



**PREPARASI KATODA SEL SURYA MELALUI
ELEKTRODEPOSISI *GRAPHENE*/PEDOT:PSS PADA
SUBSTRAT *INDIUM TIN OXIDE* (ITO)**

Skripsi

disusun sebagai salah satu syarat
untuk memperoleh gelar Sarjana Sains
Program Studi Kimia

oleh

Dinar Alghifari Ramadhan
4311414010

**JURUSAN KIMIA
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
UNIVERSITAS NEGERI SEMARANG
2018**

PERNYATAAN

Saya menyatakan bahwa skripsi ini bebas plagiat, dan apabila di kemudian hari terbukti terdapat plagiat dalam skripsi ini, maka saya bersedia menerima sanksi sesuai ketentuan peraturan perundang-undangan.

Semarang, 10 Januari 2019



Dinar Alghifari Ramadhan

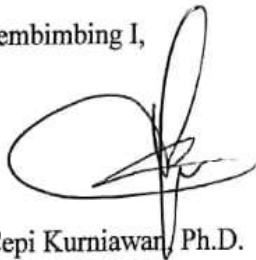
4311414010

PERSETUJUAN PEMBIMBING

Skripsi ini telah disetujui oleh pembimbing untuk diajukan ke Panitia Sidang Ujian Skripsi Jurusan kimia Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Negeri Semarang.

Semarang, 31 Desember 2018

Pembimbing I,



Cepi Kurniawan, Ph.D.
NIP. 198104112005011001

Pembimbing II,



Dr. F. Widhi Mahatmanti, M.Si.
NIP. 196912171997022001

PENGESAHAN

Skripsi yang berjudul

Preparasi Katoda Sel Surya melalui Elektrodeposisi Graphene/PEDOT:PSS
pada Substrat Indium Tin Oxide (ITO)


disusun oleh

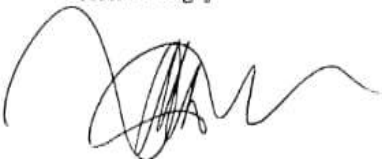
Dinar Alghifari Ramadhan
4311414010

telah dipertahankan di hadapan sidang Panitia Ujian Skripsi FMIPA UNNES pada
tanggal 10 Januari 2019.

Panitia:

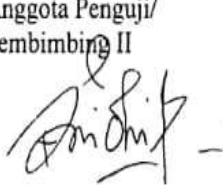
Prof. Dr. Sumarmin, M.Si.
NIP. 196601231992031003

Sekretaris

Dr. Nanik Wijayati, M.Si.
NIP. 196910231996032002

Ketua Penguji

Drs. Kasmui, M.Si.
NIP. 196602271991021001

Anggota Penguji/
Pembimbing I

Cepi Kurniawan, Ph.D.
NIP. 198104112005011001

Anggota Penguji/
Pembimbing II

Dr. F. Widhi Mahatmanti, M.Si.
NIP. 196912171997022001

MOTTO DAN PERSEMBAHAN

Motto

“Barang siapa keluar untuk mencari ilmu maka dia berada di jalan Allah”

(HR.Turmudzi)

“Dan tidak ada taufik bagiku melainkan dengan (pertolongan) Allah”

(Q.S Huud: 88)

Persembahan

Dengan penuh rasa syukur kepada Allah Yang Maha Mulia yang mengajar manusia dengan pena dan mengajarkan manusia apa yang tidak diketahuinya, untuk Ibu Siti Nurhayati, Bapak Akang Muhtar, Teh Huda, Adek Chandra, Adek Rangga, untuk keluargaku, guru-guruku, sahabat-sahabatku, dan seseorang yang telah Allah takdirkan untuk menjadi makmumku.

PRAKATA

Alhamdulillah segala puji dan syukur penulis panjatkan atas kehadiran Allah SWT yang telah melimpahkan rahmat dan karunia-Nya, sehingga penulis dapat menyelesaikan Skripsi dengan judul "Preparasi Katoda Sel Surya melalui Elektrodeposisi *Graphene*/PEDOT:PSS pada Substrat *Indium Tin Oxide* (ITO)". Skripsi ini disusun sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Sains Program Studi Kimia, Jurusan Kimia, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Negeri Semarang.


Penyusunan skripsi ini tidak lepas dari bantuan dan bimbingan dari berbagai pihak. Oleh karena itu, peneliti mengucapkan terima kasih kepada:

1. Dekan FMIPA Universitas Negeri Semarang.
2. Ketua Jurusan Kimia FMIPA Universitas Negeri Semarang.
3. Bapak Cepi Kurniawan, Ph.D. dan Ibu Dr. F. Widhi Mahatmanti, M.Si. selaku Dosen Pembimbing yang telah memberikan bimbingan, arahan, dan motivasi sehingga peneliti dapat menyelesaikan skripsi ini.
4. Bapak Drs. Kasmui, M.Si. selaku Dosen Penguji yang telah memberikan dukungan dan masukan kepada peneliti.
5. Bapak/Ibu Dosen Jurusan Kimia yang telah memberikan bekal ilmu yang bermanfaat sehingga peneliti dapat menyelesaikan skripsi ini.
6. Semua pihak yang telah memberikan doa, bantuan, harapan, motivasi, dan saran-saran dalam penelitian dan penyusunan skripsi.

Semoga skripsi ini dapat memberi manfaat bagi pembaca dan khususnya untuk peneliti sendiri, dalam hal ini dapat menambah wawasan yang bermanfaat dan serta dapat memberikan sumbangan pemikiran untuk penelitian selanjutnya.

Atas semua perhatian dari berbagai pihak yang telah membantu penulis dalam menyusun skripsi ini, penulis mengucapkan terima kasih.

Semarang, Januari 2019



Penulis

ABSTRAK

Alghifari Ramadhan, Dinar. 2018. *Preparasi Katoda Sel Surya Melalui Elektrodeposisi Graphene/PEDOT:PSS Pada Substrat Indium Tin Oxide (ITO)*. Skripsi, Jurusan Kimia Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Negeri Semarang. Pembimbing Cepi Kurniawan, Ph.D.; Dr. F. Widhi Mahatmanti, M.Si.

Kata Kunci: CE, potensial reduksi, komposit Graphene/PEDOT:PSS/ITO .

Pemanfaatan logam Pt sebagai *counter* elektroda (CE) memiliki efisiensi yang tinggi, akan tetapi karena kelimpahan di alam yang terbatas serta memiliki biaya yang mahal, maka perlu adanya bahan yang dapat mengganti logam Pt sebagai CE. *Graphene* merupakan alotrop karbon yang paling diminati untuk diteliti sebagai pengganti logam Pt. Penambahan PEDOT:PSS pada *graphene* dapat meningkatkan nilai potensial reduksi yang dapat meningkatkan efisiensi sebagai CE. Tujuan penelitian ini adalah mengetahui pengaruh penambahan massa *graphene* dan pengaruh lama waktu deposisi pada substrat *indium tin oxide* (ITO) untuk mendapatkan nilai potensial reduksi yang optimal. Pasangan redoks yang digunakan dalam pengukuran potensial reduksi adalah $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}$ dikarenakan pasangan redoks ini hampir menunjukkan reaksi elektroda yang reversibel tanpa komplikasi reaksi kimia. Dalam sintesis *graphene* digunakan metode *electrochemical exfoliation* dengan grafit sebagai katoda dan anoda, serta pada sintesis komposit *Graphene/PEDOT:PSS/ITO*, *Graphene/PEDOT:PSS* dideposisi pada substrat ITO menggunakan metode elektrodeposisi. Hasil SEM exfoliasi grafit menunjukkan pembentukan lembaran-lembaran *graphene*. Eksistensi *graphene* ditunjukkan pada daerah 1564 cm^{-1} pada spektrum IR. Komposit *Graphene/PEDOT:PSS* menunjukkan adanya lapisan homogen pada permukaan ITO yang mengindikasikan keberadaan *Graphene* dan PEDOT:PSS. Lapisan *Graphene/PEDOT:PSS* terbentuk optimum pada komposisi massa *graphene* 0,075 gram dengan potensial reduksi 0,2417 V dan waktu deposisi 160 detik dengan potensial reduksi 0,1664 V.

ABSTRACT

Alghifari Ramadhan, Dinar. 2018. Preparation of Solar Cell Cathodes Through Electrodeposition Graphene / PEDOT: PSS on Indium Tin Oxide Substrate (ITO). Final project, Jurusan Kimia Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Negeri Semarang. Supervisor Cepi Kurniawan, Ph.D., Dr. F. Widhi Mahatmanti, M.Si.

Keywords: *CE, reduction potential, Composite Graphene/PEDOT: PSS/ITO.*

The use of Pt as an electrode counter (CE) has a high efficiency, but because of its abundance in nature which is limited and has expensive costs, it is necessary to have materials that can replace Pt metal as CE. Graphene is the most preferred carbon allotrope for research as a substitute for Pt. Addition of PEDOT: PSS on graphene can increase the value of reduction potential which can increase efficiency as CE. The purpose of this study was to determine the effect of adding graphene mass and the effect of deposition time on indium tin oxide (ITO) substrate to obtain the optimal reduction potential value. The redox pair used in measuring the reduction potential is Fe^{3+} / Fe^{2+} because this redox pair almost shows a reversible electrode reaction without complications of chemical reactions. In graphene synthesis electrochemical exfoliation method is used with graphite as a cathode and anode, and in composite synthesis Graphene / PEDOT: PSS / ITO, Graphene / PEDOT: PSS is deposited on ITO substrates using the electrodeposition method. SEM results of graphite exfoliation show the formation of graphene sheets. The existence of graphene is shown in the area of 1564 cm^{-1} in the IR spectrum. Graphene Composite / PEDOT: PSS shows a homogeneous layer on the ITO surface which indicates the presence of Graphene and PEDOT: PSS. Graphene Layer / PEDOT: The optimum PSS is formed in the composition of the mass of 0.075 gram graphene with a reduction potential of 0.2417 V and a deposition time of 160 seconds with a reduction potential of 0.1664 V.

DAFTAR ISI

	Halaman
HALAMAN JUDUL	i
PERNYATAAN	ii
PERSETUJUAN PEMBIMBING	iii
PENGESAHAN	iv
MOTTO DAN PERSEMBAHAN	v
PRAKATA.....	vi
ABSTRAK.....	vii
<i>ABSTRACT</i>	viii
DAFTAR ISI.....	ix
DAFTAR GAMBAR	xi
DAFTAR TABEL.....	xii
DAFTAR ISTILAH	xii
DAFTAR LAMPIRAN.....	xiv
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	3
1.3 Tujuan Penelitian.....	4
1.4 Manfaat Penelitian.....	4
1.5 Batasan Masalah.....	4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	6
2.1 Sel Surya.....	6
2.2 <i>Dye Sensitized Solar Cells</i>	7
2.3 Komponen <i>Dye Sensitized Solar Cells</i>	9
2.3.1 Fotosensitizer	10
2.3.2 Elektrolit.....	10
2.3.3 Katoda	11
2.4 <i>Graphene</i>	13
2.4.1 Sifat <i>Graphene</i>	14
2.4.2 Sintesis <i>Graphene</i>	17
2.5 <i>Graphene</i> Sebagai Elektroda.....	20

2.6	PEDOT:PSS	21
2.7	Komposit <i>Graphene</i> /PEDOT:PSS Sebagai Elektroda	22
2.8	<i>Indium Tin Oxide</i>	24
2.9	Elektrodeposisi	25
2.10	<i>Voltammetry Cyclic</i>	28
BAB III METODOLOGI PENELITIAN		31
3.1	Lokasi Penelitian	31
3.2	Variabel Penelitian	31
3.2.1	Variabel Bebas	31
3.2.2	Variabel Terikat	31
3.2.3	Variabel Terkendali.....	31
3.3	Rancangan Penelitian	32
3.3.1	Alat dan Bahan.....	32
3.3.2	Prosedur Penelitian.....	32
3.3.3	Prosedur Analisis Penelitian	34
BAB IV HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN.....		35
4.1	Sintesis <i>Graphene</i>	35
4.2	Analisis FTIR	37
4.3	Elektrodeposisi <i>Graphene</i> /PEDOT:PSS/ITO.....	39
4.4	Analisis UV-VIS	40
4.6	Analisis SEM.....	42
4.5	Analisis <i>Voltammetry Cyclic</i>	43
BAB V PENUTUP		50
5.1	Simpulan.....	50
5.2	Saran	50
DAFTAR PUSTAKA		51
LAMPIRAN.....		60

DAFTAR GAMBAR

	Halaman
Gambar 2 .1 Perkembangan teknologi fotovoltaik	7
Gambar 2. 2 Operasi sel pada <i>Dye Sensitized Solar Cell</i>	9
Gambar 2 .3 Publikasi artikel terkait bahan <i>counter</i> elektroda.....	13
Gambar 2 .4 Struktur <i>graphene</i>	14
Gambar 2 .5Skema zona Brillouin dan spektrum dispersi <i>graphene</i>	15
Gambar 2 .6 Spektrum Raman <i>graphene</i>	17
Gambar 2.7 Berbagai metode sintesis <i>graphene</i>	17
Gambar 2.8 Skema sel eksperimental	20
Gambar 2.9 Struktur PEDOT	21
Gambar 2.10 Struktur PEDOT:PSS	22
Gambar 2.11 Karakterisasi SEM <i>Graphene</i> /PEDOT:PSS dan <i>Graphene</i> /PANI .	23
Gambar 2.12 Struktur kristal ITO	285
Gambar 2.13 Voltammogram siklik khas	28
Gambar 4 .1 Proses sintesis <i>electrochemical exfoliation</i>	35
Gambar 4 .2 Spektra FTIR <i>graphene oxide</i> dan grafit.....	37
Gambar 4 .3 Spektra UV-VIS komposit <i>Graphene</i> /PEDOT:PSS/ITO.....	41
Gambar 4 .4 Hasil SEM komposit <i>Graphene</i> /PEDOT:PSS/ITO.....	42
Gambar 4 .5 Voltamogram variasi massa <i>graphene</i>	44
Gambar 4 .6 Model reduksi pada komposit <i>Graphene</i> /PEDOT:PSS/ITO.....	45
Gambar 4 .7 Voltamogram variasi waktu deposisi	47
Gambar 4 .8 Voltamogram variasi scan rate pada	48

DAFTAR TABEL

	Halaman
Tabel 1. Graphene/Polimer sebagai <i>counter</i> elektroda	24
Tabel 2. Daftar serapan <i>graphene oxide</i> dan grafit	38
Tabel 3. Hasil Elektrodeposisi	39

DAFTAR ISTILAH

$C_{lattice}$: Lembaran pada carbon
$C_{lattice\ expanded}$: Lembaran pada carbon yang akan terkelupas
$C_{lattice\ exfoliated}$: Lembaran pada carbon yang telah terkelupas
FF	: (<i>Fill Factor</i>) Rasio daya maksimum yang dapat diperoleh terhadap produk dari tegangan hubung-terbuka dan arus hubung singkat
<i>Heptagon</i>	: Struktur yang mempunyai tujuh sisi
<i>Hexagon</i>	: Struktur yang mempunyai enam sisi
<i>Hole Electron</i>	: Unit dasar rekombinasi dan generasi yang berhubungan dengan transisi elektron antara pita valensi dan pita konduksi
<i>Intercalating</i>	: Proses penyisipan ion pada sebuah layer
I_{pa}	: Puncak arus anodik (A)
I_{pc}	: Puncak arus katodik (A)
J_{sc}	: Rapat arus maksimum (A/cm^2)
<i>Pentagon</i>	: Struktur yang mempunyai lima sisi
R_{ct}	: (<i>Charge Transfer Resistance</i>) Resistensi reaksi pada batas frekuensi tak terbatas dan gangguan AC amplitudo nol ($\Omega\ cm^2$)
S	: <i>Sensitizer</i> pada keadaan dasar
S^*	: <i>Sensitizer</i> pada keadaan tereksitasi
S^+	: <i>Sensitizer</i> pada keadaan teroksidasi
TCO	: (<i>Transparent Conductive Oxide</i>) Film tipis yang bersifat konduktif yang terbuat dari bahan transparan dan elektrik konduktif

DAFTAR LAMPIRAN

	Halaman
Lampiran 1 Diagram Alir Penelitian.....	60
Lampiran 2 Tabel Formula Komposisi Komposit <i>Graphene</i> /PEDOT:PSS/ITO..	62
Lampiran 3 Hasil Analisis Karakterisasi	63
Lampiran 4 Dokumentasi Penelitian.....	66

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Fotovoltaik (PV) adalah teknologi alternatif dan ramah lingkungan untuk produksi energi listrik. Sel fotovoltaik (juga dikenal sebagai sel surya atau sel PV) digunakan untuk mengubah energi matahari menjadi energi listrik, dan fenomena ini disebut efek fotovoltaik (Szlachta & Chrobak, 2012). Menurut laporan *Renewable Energy Policy Network for the 21st Century 2016* (REN 21), pemanfaatan teknologi PV mendapat perhatian besar dan dikenal sebagai sumber energi terbarukan yang paling cepat perkembangannya. Total kapasitas global solar sel PV telah meningkat secara eksponensial dimana pada akhir tahun 2015, sekitar 227 gigawatts listrik yang telah dihasilkan dengan menggunakan teknologi PV (Sawin, 2016). Dalam pengaplikasiannya, sel PV dapat dibedakan menjadi dua, Sel PV yang berbasis bahan organik maupun sel PV yang berbasis bahan anorganik. *Dye Sensitized Solar Cell* (DSSC) merupakan pengaplikasian dari teknologi sel PV yang berbasis bahan organik (Wrobel, *et al.*, 2010). Keuntungan dari penggunaan DSSC adalah memiliki kinerja yang ramah lingkungan, harga produksi yang rendah dikarenakan penggunaan sejumlah kecil material, dan kesederhanaan teknologi produksi (Golewski, *et al.*, 2008).

Pada sebuah DSSC terdapat beberapa komponen penyusun utama, diantaranya adalah *counter* elektroda (CE). CE berfungsi untuk mengumpulkan elektron yang mengalir dari arus luar dan mengkatalis pengurangan ion triiodida atau meregenerasi ion iodida. CE biasanya menggunakan kaca *transparent conductive oxide* (TCO) yang dilapisi logam platina ataupun karbon. Platinum adalah bahan yang paling umum digunakan sebagai CE dikarenakan memiliki kemampuan yang tinggi untuk mereduksi I_3^- menjadi I^- . Efisiensi platinum mencapai 7,31% dalam pemanfaatannya sebagai CE pada DSSC. Terlepas dari kenyataan bahwa platinum menunjukkan konduktivitas serta aktivitas elektrokatalik yang tinggi, akan tetapi karena kelimpahannya yang sedikit dan biaya unsur yang mahal, hal ini yang membuat menghambat penerapannya dalam

skala besar di masa depan (Xu, *et al.*, 2011). Oleh karena itu, untuk mengatasi masalah ini, beberapa bahan alternatif Pt telah diusulkan, seperti karbon (Lee, *et al.*, 2010), plastik konduktif (Nei, *et al.*, 2008), dan CoS (Wang, *et al.*, 2009) yang dimana telah digunakan sebagai CE alternatif.

Graphene merupakan bentuk dua dimensi dari karbon yang memiliki sifat elektronik yang unggul (Ciesielski & Paolo, 2013). *Graphene* merupakan material tertipis di dunia yang membentuk satu lapis atom karbon yang memiliki struktur *hexagonal* (Geng, 2012). Selain memiliki konduktivitas elektrik dan termal yang tinggi, *graphene* juga merupakan material terkuat di dunia. *Graphene* memiliki kekuatan tarik sebesar 1 TPa (Koch, 2010). *Graphene* memiliki luas permukaan spesifik yang besar dengan mobilitas elektron yang tinggi (Choi, *et al.*, 2011). Sifat-sifat yang tidak biasa ini telah merangsang eksplorasi *graphene* yang ekstensif untuk digunakan sebagai CE dalam DSSC (Yiqing, *et al.*, 2011). Dalam mensintesis *graphene*, berbagai metode telah dikembangkan untuk menghasilkan *graphene* dengan kualitas tinggi dan biaya rendah. *Mechromechanical cleavage* (Novoselov, *et al.* 2004), *chemical vapor deposition* (CVD) (Bae, *et al.* 2010), dan *epitaxial growth* (Emtsev, *et al.*, 2009), merupakan sintesis *graphene* dengan tingkat kualitas yang tinggi namun tidak praktis untuk aplikasi komersial, karena tingkat produksi rendah serta biaya yang relatif tinggi. Pengelupasan kimiawi *graphene* berdasarkan metode Brodie, Staundenmaier, dan Hummers memiliki keuntungan dalam hal biaya yang rendah dan proses sintesis yang dapat dikontrol. Akan tetapi, metode ini menggunakan beberapa bahan kimia berbahaya (KMnO_4 dan N_2H_4) yang dapat merusak lingkungan dan proses produksi yang lama (Li, *et al.* 2009). Metode *electrochemical exfoliation* sedang banyak digemari dalam mensintesis *graphene*, dikarenakan mudahnya proses pembuatan, cepat, ramah lingkungan, dan biaya yang rendah dalam proses produksinya (Sumanta & Archana, 2015), yang dimana hal ini membuat metode *electrochemical exfoliation* sangat cocok untuk pembuatan *graphene* dalam skala yang besar. *Graphene* yang dihasilkan dari metode ini memiliki kualitas yang relatif tinggi dengan tingkat kecacatan yang rendah (Ferrari, *et al.*, 2015).

Dalam pemanfaatan *graphene* sebagai CE, Wang dan Hu (2012) berhasil mensintesis *graphene* sebagai bahan CE dengan efisiensi sebesar 6,81%. Akan tetapi, pemanfaatan *graphene* sebagai bahan CE masih memiliki masalah mendasar seperti buruknya aktivitas elektrokatalitik untuk mereduksi I_3^- menjadi I^- dikarenakan terciptanya *graphene* yang memiliki beberapa layer, oleh sebab itu perlu penggabungan bahan yang dapat meningkatkan aktivitas elektrokatalik pada *graphene* untuk mengatasi masalah ini (Krashennnikov, *et al.*, 2008). Lee (2012) melaporkan bahwa penambahan PEDOT:PSS terhadap *graphene* dapat memperbaiki efisiensi *graphene* sebagai CE dengan efisiensi 7,26%.

Untuk proses karakterisasi, *Fourier Transform Infrared Spectroscopy* (FTIR) digunakan sebagai analisa gugus fungsi (adanya 'peak' dari gugus fungsi spesifik) beserta polanya dan melihat kekuatan absorpsi senyawa pada panjang gelombang tertentu. *Ultra Violet-Visible (UV-Vis)* digunakan untuk mengukur transmitan atau absorban suatu sampel sebagai fungsi panjang gelombang. *Scanning Electron Microscopy* (SEM) digunakan untuk mengamati morfologi permukaan dalam skala mikro dan nano.

Dengan latar belakang yang dijelaskan sebelumnya, maka pada penelitian ini akan dipelajari preparasi material *Graphene/PEDOT:PSS/ITO* dan sifat elektroniknya serta aplikasinya sebagai *counter* elektroda di dalam sel elektrokimia.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan dari latar belakang di atas, diperoleh rumusan masalah sebagai berikut:

1. Bagaimana pengaruh massa *graphene* terhadap potensial reduksi $K_3[Fe(CN)_6]$ pada elektroda *Graphene/PEDOT:PSS* ?
2. Bagaimana pengaruh waktu deposisi *Graphene/PEDOT:PSS* terhadap potensial reduksi $K_3[Fe(CN)_6]$ pada elektroda *Graphene/PEDOT:PSS* ?

1.3 Tujuan Penelitian

Berdasarkan uraian di atas dapat dirumuskan tentang tujuan penelitian yaitu sebagai berikut:

1. Mengetahui pengaruh massa *graphene* terhadap potensial reduksi $K_3[Fe(CN)_6]$ pada elektroda *Graphene/PEDOT:PSS*.
2. Mengetahui pengaruh waktu deposisi *Graphene/PEDOT:PSS* terhadap potensial reduksi $K_3[Fe(CN)_6]$ pada elektroda *Graphene/PEDOT:PSS*.

1.4 Manfaat Penelitian

Kontribusi penelitian yang ingin dicapai pada penelitian ini adalah

1. Manfaat Teoritis
Dapat memberikan kontribusi dalam pemberian informasi kepada para peneliti yang akan datang.
2. Manfaat Praktis
Dapat memberikan kontribusi dalam pengembangan material alternatif pengganti katoda Pt sebagai material yang potensial untuk bahan *counter* elektroda pada *Dye Sensitized Solar Cell* yang dapat menekan biaya tinggi dengan kemampuan serupa.

1.5 Batasan Masalah

Batasan masalah dalam penelitian ini adalah

1. Komposit yang akan dikaji dalam penelitian ini adalah PEDOT:PSS, karena PEDOT:PSS memiliki konduktivitas listrik yang besar, aktivitas elektrokatalitik yang tinggi, serta stabilitas yang baik yang dimana dapat meningkatkan aktivitas elektrokatalitik *graphene* menjadi lebih baik.
2. Substrat yang akan digunakan dalam penelitian ini adalah *Indium Tin Oxide* (ITO), karena ITO adalah bahan semikonduktor celah pita lebar dengan sifat optik, elektrik, dan magnetik yang sangat baik yang dimana dapat meningkatkan efisiensi *graphene*.
3. Metode deposisi yang akan digunakan dalam penelitian ini adalah elektrodeposisi, karena memiliki beberapa kelebihan seperti proses

pengendapan dalam suhu yang lebih rendah, elektroda yang dibuat dengan teknik elektrodeposisi memiliki gaya perekat yang kuat dan tidak memiliki tegangan termal antara lapisan pengendapan dan lapisan substrat, pelapisan yang seragam bisa dibuat di permukaan dengan berbagai bentuk rumit, dan ketebalan lapisan dan komposisi kimia film dapat dikontrol dengan mudah.

4. Efisiensi arus *counter* elektroda dikaji dengan pengukuran arus dengan metode *cyclic voltammetry*, karena metode ini dapat memberikan informasi penting mengenai tingkat energi komponen, reversibilitas reaksi elektrokimia, dan kinetika proses elektrokimia dengan cara mengukur arus voltammetry selama penyapuan potensial dari potensial awal ke potensial akhir dan kembali lagi ke potensial awal atau biasa disebut juga penyapuan (*scanning*) dan dapat dibalik kembali setelah reduksi berlangsung. Dengan demikian arus katodik maupun anodik dapat terukur.
5. Pasangan redox yang diukur dengan *cyclic voltammetry* adalah $[\text{Fe}(\text{CN})_6]^{3-}/[\text{Fe}(\text{CN})_6]^{2-}$, karena Pasangan redoks ini hampir menunjukkan reaksi elektroda yang reversibel tanpa komplikasi reaksi kimia. Dengan demikian, pasangan $[\text{Fe}(\text{CN})_6]^{3-}/[\text{Fe}(\text{CN})_6]^{2-}$ telah menjadi pilihan yang populer selama bertahun-tahun untuk digunakan sebagai standar dalam menganalisis CV.

BAB II

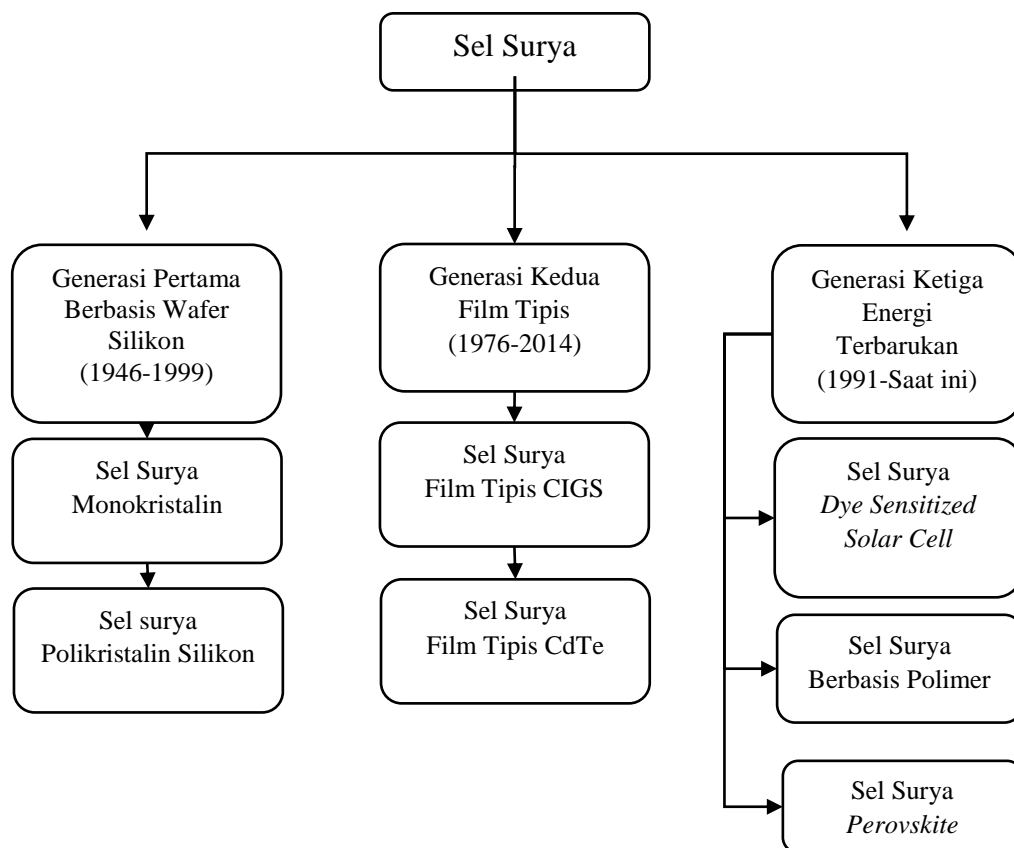
TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Sel Surya

Efek fotovoltaiik (PV) pertama kali diamati oleh Alexandre Edmound Becquerel pada tahun 1839. Pada usia 19, dia menciptakan sel PV pertama di dunia di laboratorium ayahnya. Dalam percobaannya, Alexandre Edmound Becquerel menempatkan perak klorida dalam larutan asam dan disinari saat dihubungkan ke elektroda platina. Dari percobaan ini, Alexandre Edmound Becquerel berhasil menghasilkan suatu *voltase* dan kuat arus. Akibatnya, efek PV sering disebut " efek Becquerel ". (Yadav & Kumar, 2015).

Dalam pengembangan teknologi PV, para peneliti harus berfokus pada efisiensi yang tinggi, biaya yang rendah, dan stabilitas yang baik, yang dimana biasa disebut dengan “*Golden Triangle Issues*”. Akan tetapi dengan meningkatnya kesadaran masyarakat akan pembangunan berkelanjutan, isu lingkungan harmonis juga harus ditekankan (Chu & Majumdar, 2012). Untuk memenuhi tantangan ini, tiga generasi sel surya telah berkembang hingga saat ini. Sel generasi pertama, yang juga disebut sel berbasis konvensional, tradisional atau wafer, terbuat dari silikon polikristalin atau silikon monokristalin. Sel surya Si mendominasi pasar PV dan menghasilkan efisiensi antara 12% dan 16%, sesuai dengan prosedur pembuatan dan kualitas wafer. Namun, langkah-langkah produksi yang kompleks dan biaya lingkungan yang tinggi menyebabkan pencarian alternatif ramah lingkungan dengan biaya yang rendah. Sel surya generasi kedua sering disebut teknologi film tipis, termasuk *cadmium telluride* (CdTe) dan *copper indium gallium selenium* (CIGS). Sel surya tipis memberikan potensi pengurangan biaya dalam proses pembuatan karena penghematan bahan, proses suhu rendah, dan otomatisasi tinggi dalam produksi, terutama pada sel fleksibel. Namun, teknologi modul yang sulit dan stabilitas yang terbatas telah menyebabkan pangsa pasar kecil (<12%) dari sel-sel film tipis. Sekitar 30 tahun terakhir, sel surya generasi ketiga telah diciptakan. Sel surya generasi ketiga

sering digambarkan sebagai sel PV yang dimana sebagian besar masih dalam tahap penelitian atau pengembangan. Teknologi PV generasi baru ini mencakup DSSC, sel surya *perovskite*, sel surya organik/polimer. Meskipun efisiensinya lebih rendah daripada sel surya berbasis Si dan sel surya film tipis, sel generasi ketiga mengklaim biaya pemrosesan rendah dan dampak lingkungan kecil yang mengakibatkan banyaknya penelitian dan pengembangan intensif pada sel surya generasi ketiga ini (Polman, *et al.*, 2016). Perkembangan teknologi PV secara skematis dapat dilihat pada Gambar 2.1.



Gambar 2 .1 Perkembangan teknologi fotovoltaiik (Szlachta & Chrobak, 2012)

2.2 *Dye Sensitized Solar Cells*

DSSC pertama kali dibuat dikarenakan terinspirasi oleh mekanisme transfer energi dan elektron dalam sistem fotosintesis alami (West, 1974).

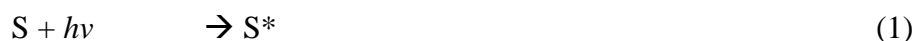
Penggunaan zat pewarna dalam PV selalu tidak berhasil sampai terjadi terobosan pada tahun 1991. Di laboratorium Photonic and Interfaces in Ecole Polytechnique Federalu de Lausanne, Swiss, Gratzel dan rekan kerjanya mengembangkan sel surya dengan kombinasi elektroda berstruktur nano yang berhasil meningkatkan efisiensi DSSC dari 1% hingga 7%. Sejak saat itu, telah dilakukan sejumlah besar investigasi eksperimental mengenai sel PV DSSC (O'Regan & Grätzel, 1991).

Mekanisme dari DSSC yaitu dengan memisahkan proses penyerapan optik dan pemisahan muatan dengan cara menghubungkan *sensitizer* dengan semikonduktor bercelah pita lebar serta bermorfologi nanokristalin. Keuntungan dari struktur semikonduktor berukuran nano adalah dapat meningkatkan daya angkut molekul yang diakibatkan dari kuantisasi ruang, penyempurnaan potensi redoks, serta timbulnya elektron yang diakibatkan dari peningkatan celah pita yang efektif. (Archer & Nozik, 2008).

Berdasarkan laporan Pusat Penelitian Energi Belanda, Grup École Polytechnique Fédérale de Lausanne, Sharp Corporation dan Arakawa, konversi efisiensi dari DSSC dapat mencapai 8,12%; 10,10%; 10,40%; dan 9,90% (Narayan, 2004).

Siklus operasi dari DSSC dalam reaksi kimia, sebagai berikut :

Anoda :



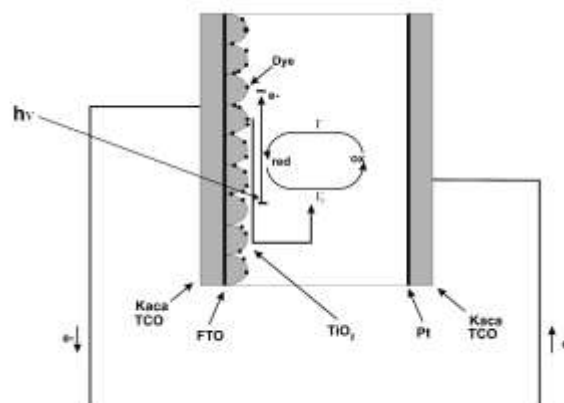
Katoda :



Ketika foton dari sinar matahari menimpa elektroda kerja pada DSSC, energi foton tersebut diserap oleh *sensitizer*. Sehingga elektron dari *sensitizer* mendapatkan energi untuk dapat tereksitasi (S^*) seperti yang ditunjukkan pada persamaan (1). Elektron yang tereksitasi dari *sensitizer* tersebut akan diinjeksikan ke pita konduksi TiO_2 , dimana TiO_2 bertindak sebagai akseptor / kolektor

elektron. *Sensitizer* yang ditinggalkan kemudian dalam keadaan teroksidasi (S^+) seperti yang ditunjukkan pada persamaan (2). Elektron yang terinjeksi selanjutnya akan mengalir melalui *transparent conductive electrode* dan kemudian melalui *external load* dimana proses menghasilkan energi listrik seperti yang ditunjukkan persamaan (3). *Sensitizer* molekul yang teroksidasi akan teregenerasi dengan menangkap elektron dari elektrolit redoks I^- yang akan teroksidasi menjadi I_3^- seperti yang ditunjukkan pada persamaan (4). Kemudian I_3^- mensubsitusi elektron sehingga akan mengalami reduksi dan kembali menjadi ion I^- seperti yang ditunjukkan pada persamaan (5). Proses yang terjadi di dalam DSSC ini terjadi bermilyar kali dalam satu detik sehingga menciptakan arus listrik dari sinar matahari.

Operasi sel bersifat regeneratif dikarenakan tidak ada zat kimia yang tidak dipakai atau dihasilkan dalam proses, seperti yang diperlihatkan dalam reaksi sel pada Gambar 2.2 (Chiba, *et al.* 2006).



Gambar 2. 2 Operasi sel pada *Dye Sensitized Solar Cell*

(Desilvestro, *et al.*, 2014)

2.3 Komponen *Dye Sensitized Solar Cells*

Penyusun utama dalam DSSC terdiri dari fotosensitizer, elektrolit redoks dan *counter* elektroda, bahan tambahan lainnya adalah TCO dan *sealing agents* yang dimana dapat dilihat seperti pada Gambar 2.2. Komponen DSSC telah mengalami berbagai perkembangan selama bertahun-tahun untuk meningkatkan efisiensi sel agar lebih baik.

2.3.1 Fotosensitizer

Dalam perkembangannya, fotosensitizer yang efisien harus memenuhi persyaratan tertentu seperti : (Smestad, 1998)

1. Penyerapan yang intens di wilayah yang terlihat pada daerah panjang gelombang *visible*.
2. Adsorpsi kuat ke permukaan semikonduktor.
3. Injeksi elektron yang efisien ke dalam pita konduksi semikonduktor.
4. Harus memiliki beberapa gugus O atau OH yang mampu melakukan chelating ke lokasi Ti (IV) di permukaan TiO₂.

Demikian juga, ia harus cepat diregenerasi oleh lapisan mediator untuk menghindari proses rekombinasi elektron, dan harus cukup stabil dalam keadaan tereksitasi. Sensitisasi ideal untuk sel PV yang mengubah standar massa udara 1,5 (AM) sinar matahari menjadi listrik, yang dimana harus menyerap semua cahaya di bawah ambang batas panjang gelombang sekitar 900 nm, yang setara dengan semikonduktor dengan bandgap 1,4 eV (Narayan, 2004).

Keseluruhan kinerja sel dikenai sejumlah faktor, namun pertimbangan mendasar yang berkaitan dengan pewarna adalah seberapa efisien:

1. Molekul menyerap foton.
2. Foton diubah menjadi pasangan *hole electron*.
3. Pemisahan dan pengumpulan terjadi.

Kinerja PV terbaik dalam hal konversi dan memiliki stabilitas jangka panjang adalah penggunaan Rutenium (Ru) yang dikembangkan oleh kelompok Gratzel. Keuntungan dari zat warna ini adalah transisi yang jauh lebih cepat dari pada reaksi balik, dimana elektron menguat kembali dengan molekul pewarna teroksidasi, dari pada harus mengalir melalui sirkuit (Ryan, 2009).

2.3.2 Elektrolit

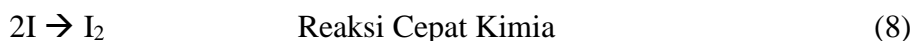
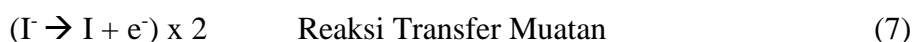
Pada sebuah DSSC, nilai rapat arus maksimum (J_{sc}) dan tegangan rangkaian terbuka (V_{oc}) sangat bergantung pada elektrolit. Elektrolit yang digunakan dalam DSSC sebagian besar mengandung ion redoks I^-/I_3^- , yang dimana memediasi elektron antara fotoanoda TiO₂ dan CE. DSSC pertama kali menggunakan elektrolit cair organik yang mengandung litium iodida / iodin.

Pelarut organik adalah komponen dasar untuk perombakan dan difusi I^-/I_3^- . Parameter fisik seperti nomor donor, konstanta dielektrik dan viskositas mempengaruhi efisiensi sel (Wu, *et al.*, 2008).

Reaksi redoks pada elektrolit : (Ferber, *et al.*, 1998).



yang terdiri dari serangkaian reaksi berturut-turut :



Persamaan (6) menunjukkan proses regenerasi elektrolit pada sebuah DSSC. Persamaan (7) menunjukkan reaksi transfer muatan yang tidak stabil pada I. Persamaan (8) menunjukkan $2I$ yang akan berubah menjadi I_2 yang dimana merupakan bentuk yang telah stabil dari I. Kemudian pada persamaan (9) menunjukkan proses regenerasi secara sempurna pada sebuah elektrolit pada sistem DSSC. Elektrolit redoks iodin memberikan kinerja terbaik (Luque & Hegedus, 2003).

2.3.3 Katoda

Elektroda adalah konduktor listrik padat yang melaluinya arus listrik masuk atau meninggalkan sel elektrolit atau media lainnya. Elektroda dalam sel elektrokimia disebut sebagai anoda atau katoda (Weiberg, 2003). Anoda sekarang didefinisikan sebagai elektroda di mana elektron meninggalkan sel dan oksidasi terjadi (ditunjukkan oleh simbol minus, "- "), dan katoda didefinisikan sebagai elektroda di mana elektron memasuki sel dan reduksi terjadi (ditunjukkan dengan simbol plus, "+ "). Dalam DSSC, anoda adalah elektroda dimana semikonduktor oksida logam diendapkan, dan disebut juga fotoanoda. Katoda adalah elektroda dimana platinum dan bahan pembantu lainnya diendapkan, dan lebih sering disebut *counter* elektroda (O'Regan & Grätzel, 1991).

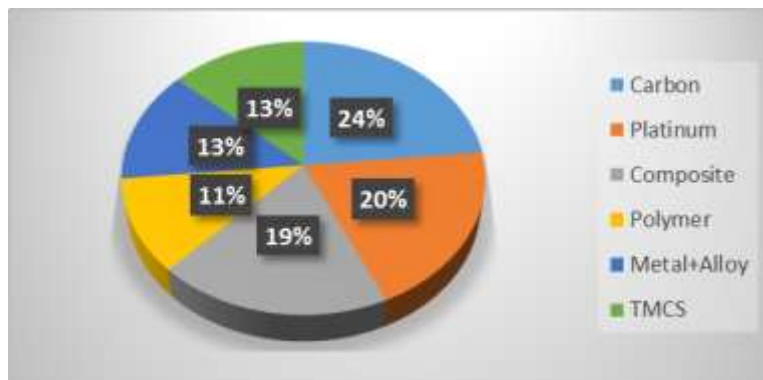
Dalam DSSC, CE memiliki tiga fungsi: (1) sebagai katalisator, (2) Sebagai elektroda positif sel primer, biasanya elektroda ini mengumpulkan elektron dari sirkuit eksternal dan mentransmisikannya ke dalam sel. Dengan demikian fungsi

utama CE adalah mengembalikan elektron dari sirkuit eksternal kembali ke sirkulasi dalam sel. (3) Sebagai cermin, cermin ini berfungsi untuk memantulkan cahaya yang tidak terserap dari sel kembali ke sel untuk meningkatkan pemanfaatan sinar matahari (Khan, *et al.*, 2017). Menurut fungsi dasar ini, CE yang optimal harus memiliki kualitas berikut: aktivitas elektrokatalitik yang tinggi, konduktivitas tinggi, reflektifitas tinggi, biaya rendah, luas permukaan tinggi, sifat berpori, ketebalan optimum, stabilitas mekanis, ketahanan korosi kimia, tingkat energi yang sesuai dengan potensi elektrolit pasangan redoks, dan perekat yang baik dengan TCO. Parameter Benchmark untuk CE yang ideal mencakup transparansi optik 80% pada panjang gelombang 550 nm, *sheet resistance* (R_s) < 20 $\Omega \text{ sq}^{-1}$, dan *charge transfer resistance* (R_{CT}) 2-3 $\Omega \text{ cm}^2$ (Trancik, *et al.*, 2008). *Overvoltage* harus serendah mungkin pada kepadatan *photocurrent* sampai 20 mA cm^{-2} . Namun, tidak mudah suatu bahan untuk mencapai semua parameter ini secara bersamaan. Sebagai contoh, R_{CT} dan R_s yang dibutuhkan dapat dicapai pada CE berkarbon, namun memiliki transparansi optik yang tidak ideal (Wang, *et al.*, 2015)

CE memiliki efek penting pada parameter PV DSSC. PV maksimum teoritis DSSC ditentukan oleh perbedaan energi antara potensi redoks mediator dan tingkat Fermi dari semikonduktor oksida logam pada fotoanoda dan hanya dapat diperoleh pada arus nol. Bagaimanapun, tegangan output biasanya kurang dari tegangan rangkaian terbuka (Li, *et al.*, 2007).

Hingga saat ini, logam Pt telah menjadi bahan yang selalu digunakan sebagai CE dalam DSSC, hal ini dikarenakan CE Pt merupakan katalisator yang sangat baik untuk mereduksi I_3^- menjadi I dengan efisien (Luque & Hegedus, 2003). Akan tetapi karena biayanya yang mahal serta ketersediaan yang rendah, CE alternatif pengganti Pt telah banyak dikembangkan. Dan yang paling menarik adalah karbon, karbon dapat menggabungkan konduktivitas dan ketahanan panas yang cukup baik serta ketahanan terhadap korosi dan aktivitas elektrokatalitik yang baik dalam mereduksi I_3^- (Kay & Gratzel, 1996). Menurut penelusuran literatur berdasarkan *ISI Web of Science and WIOP* Gambar 2.3, bahan karbon

adalah bahan CE alternatif paling umum yang digunakan di DSSC, dan jumlah artikel yang telah diterbitkan dari CE berbahan karbon adalah 24%.

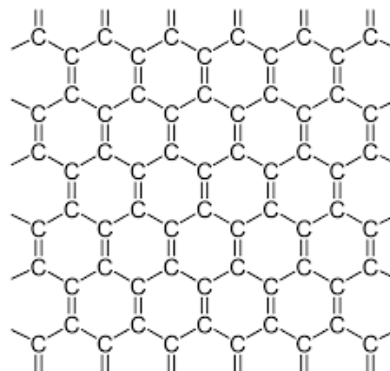


Gambar 2 .3 Publikasi artikel terkait bahan *counter* elektroda (Wu, *et al.*, 2017)

2.4 Graphene

Pada abad ke 21, *graphene* telah menjadi primadona yang berkembang pesat dalam bidang ilmu material. Hal ini dikarenakan *graphene* mempunyai luas permukaan yang tinggi ($2.630 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$), mobilitas intrinsik yang tinggi ($200.000 \text{ cm}^2 \text{ v}^{-1} \text{ s}^{-1}$), modulus young yang besar ($\sim 1,0 \text{ TPa}$), konduktivitas termal sebesar ($\sim 5.000 \text{ Wm}^{-1} \text{ K}^{-1}$), serta konduktivitas listrik yang baik ($0,00021 \text{ S/cm}$) (Geim & Novoselov, 2007). *Graphene* adalah lembaran dua dimensi (2D) atom karbon dalam konfigurasi heksagonal dengan atom yang terikat oleh ikatan sp^2 Gambar 2.4. Karena sifat khasnya, *graphene* mendapat perhatian lebih untuk berbagai aplikasi potensial yang baru. Sifat sifat yang ada pada *graphene* dipelajari dan diverifikasi secara ekperimental dalam beberapa dekade terakhir (Watcharotone, *et al.*, 2007).

Dalam proses pembuatannya, berbagai pendekatan sintesis *top up* maupun sintesis *bottom up* telah dikembangkan untuk mendapatkan *graphene* yang berkualitas tinggi.



Gambar 2 .4 Struktur *graphene* (Somani & Pawar, 2016)

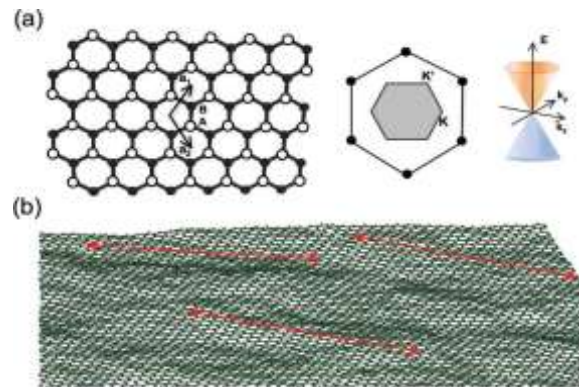
Saat ini *graphene* dapat diproduksi dengan *micro-mechanical cleavage* (Dikin, *et al.*, 2007), *epitaxial growth*, dan *chemical vapor deposition* (CVD) (Segal, 2009). Ketiga metode ini dapat menghasilkan *graphene* dengan struktur yang relatif sempurna dan sifat yang sangat baik. Namun sebagai perbandingan, *graphene* yang dihasilkan oleh reduksi *graphene oxide* (GO) memiliki biaya yang rendah untuk produksi *graphene* dalam skala yang besar. *Graphene* yang dihasilkan sangat hidrofilik dan membentuk koloid berair yang stabil untuk memfasilitasi perakitan struktur makroskopis dengan proses yang sederhana dan murah. Akibatnya, mereduksi GO dari (rGO) masih menjadi topik hangat di kalangan para peneliti dalam pengembangan *graphene*, terutama dalam hal aplikasi massal (Xu, *et al.*, 2009).

2.4.1 Sifat *Graphene*

2.4.1.1 Morfologi dan Struktur

Kisi sarang lebah *graphene* terdiri dari dua kisi-kisi ekuivalen atom karbon yang digabungkan dengan ikatan σ , seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.5a. Setiap atom karbon dalam kisi memiliki orbital π yang berkontribusi terhadap jaringan elektron terdelokalisasi. Entah *graphene* yang tersuspensi secara bebas memiliki riak 'intrinsik' atau tidak, hal ini telah diteliti oleh Monte menggunakan studi *transmission electron microscopy* (TEM) (Meyer, *et al.*, 2007). Pelebaran mikroskopik seperti yang digambarkan pada Gambar 2.5b, diperkirakan memiliki dimensi lateral sekitar 8 sampai 10 nm dan perpindahan tinggi sekitar 0,7 sampai 1 nm. Fluktuasi sub nanometer untuk *graphene* yang diendapkan pada substrat

SiO₂ pada Si dipelajari dengan cara *scanning tunneling microscopy* (STM) (Stolyarova, *et al.*, 2007). *Graphene* dalam bentuk 3D dapat memiliki 'cacat', termasuk cacat topologis (misal., *pentagons*, *heptagons*, atau kombinasi keduanya), tepi retak, kotoran yang terserap, dan sebagainya. Akan tetapi, percobaan telah menunjukkan bahwa cacat pada lapisan *graphene* yang ditemukan pada material *carbon nanotube* (CNT), seperti cacat topologi, dapat diinduksi dengan cara iradiasi elektron dan diamati pada TEM yang beroperasi pada 120 kV (Hashimoto, *et al.*, 2004).



Gambar 2 .5 (a) Skema struktur kristal, zona Brillouin dan spektrum dispersi *graphene*; (b) '*graphene rippled*' dari simulasi Monte Carlo (Fasolino, *et al.*, 2007)

2.4.1.2 Konduktivitas Listrik

Sejak penemuannya *graphene* telah menjadi fokus penelitian para fisikawan karena *graphene* memiliki berbagai macam keunikan, sehingga sangat menarik untuk diteliti baik secara eksperimental maupun secara teoritik. Sifat elektronik dari *graphene* menunjukkan perilaku yang unik, yaitu tidak adanya celah energi antara pita konduksi dan pita valensi pada kurva dispersi energi. Walaupun tidak memiliki celah energi antara pita valensi dan pita konduksi, kedua pita tersebut tidak saling tumpang tindih (*overlap*). Pada daerah sekitar energi fermi (titik Dirac), hubungan dispersi energi sebagai fungsi vektor gelombang (\vec{k}) adalah linear, tidak seperti material lain. Pada umumnya hubungan dispersi energi

sebagai fungsi vektor gelombang (\vec{k}) adalah kuadratik. Hal ini menyebabkan sifat elektronik dari *graphene* unik dibandingkan dengan semikonduktor lain (Bolotin, *et al.*, 2008).

Pada daerah tertentu di ruang k hubungan dispersi energi sebagai fungsi vektor gelombang (\vec{k}) mirip dengan hubungan dispersi energi yang diperoleh persamaan Dirac tanpa massa. Hal ini dapat diartikan bahwa elektron dan *hole* pada *graphene* berperilaku sebagai partikel Dirac tanpa massa, sehingga elektron dan *hole* memiliki mobilitas yang tinggi. Mobilitas yang tinggi menyebabkan *graphene* memiliki konduktivitas listrik yang tinggi (Geim & Novoselov, 2007).

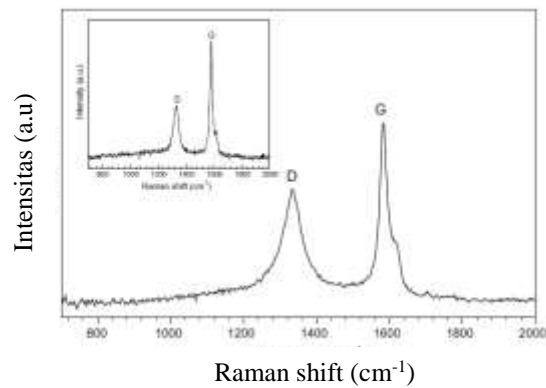
Observasi eksperimental terhadap ketergantungan massa elektron pada kerapatan elektronik akar kuadrat pada *graphene* ditafsirkan sebagai bukti adanya kuasipartis Dirac tanpa massa pada *graphene*. Sebagai semikonduktor dengan *band gap* nol, *graphene* menampilkan efek medan listrik ambipolar dan pembawa muatan, yang dapat diprogram terus menerus antara elektron dan *holes* pada konsentrasi setinggi 10^{13} cm^{-2} , dengan mobilitas suhu ruangan hingga $15.000 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$ (Novoselov, *et al.*, 2004).

Selain itu, mobilitas yang diamati pada suhu yang lemah, menunjukkan bahwa mobilitas *ultrahigh* dapat direalisasikan pada *graphene* pada suhu kamar (Morozov, *et al.*, 2008). Dengan meminimalkan hamburan pengotor, mobilitas yang melebihi $200.000 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$ dicapai dengan *graphene* yang tersuspensi, hal ini merupakan nilai yang sangat tinggi (Bolotin, *et al.*, 2008).

2.4.1.3 Sifat Vibrational

Sifat Vibrational bertanggung jawab atas beberapa sifat menarik pada *graphene* seperti konduktivitas termal tinggi dan sifat optik. Karena *graphene* terdiri dari atom karbon ringan, di mana ikatan *in-plane* sangat kuat, dan membuat *graphene* menunjukkan kecepatan suara yang sangat tinggi. Kecepatan suara besar ini bertanggung jawab atas konduktivitas termal yang sangat tinggi dari *graphene* yang berguna untuk banyak aplikasi. Selain itu, sifat getaran sangat berperan dalam memahami sifat *graphene* lainnya, termasuk sifat optik melalui hamburan *phononfoton* (Dalam hamburan Raman) dan sifat elektronik melalui

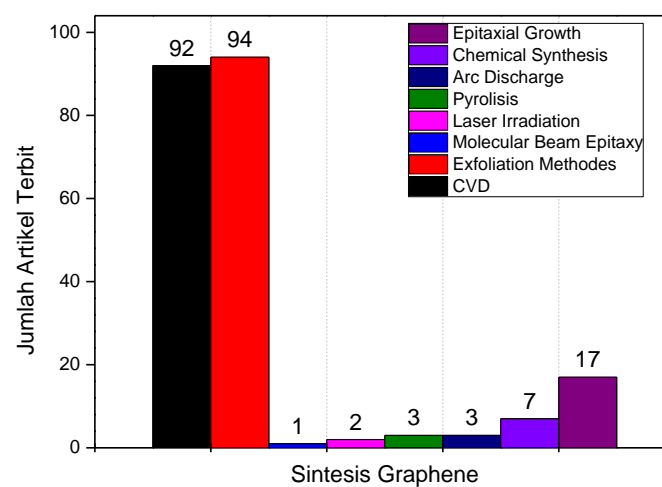
hamburan elektron fonon. Sifat vibrasi graphene dapat dipahami dengan bantuan hubungan dispersi fonon. Hamburan raman graphene dapat dilihat pada Gambar 2.6 (Dresselhaus, *et al.*, 2010).



Gambar 2.6 Spektrum Raman *Graphene* (Dresselhaus, *et al.*, 2010).

2.4.2 Sintesis *Graphene*

Selama empat puluh tahun terakhir, berbagai upaya telah dilakukan untuk mencapai produksi skala besar dalam pembuatan lembaran *graphene* murni dan bebas cacat (Soldano, *et al.*, 2010). Berbagai metode telah dirancang dan dikategorikan menjadi proses "*top down*" dan "*bottom up*" dalam mensintesis *graphene* seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.7.



Gambar 2.7 Berbagai metode sintesis *graphene* (Somani & Pawar, 2016)

2.4.2.1 Top Down

Penjelasan sederhana dari pendekatan *top down* adalah pembuatan struktur yang kecil dari material yang berukuran besar. Dalam mensintesis *graphene*, bahan awal yang dipakai merupakan material bulk yang dimana akan diolah untuk menciptakan produk akhir. Pendekatan ini memiliki biaya yang rendah jika dibandingkan dengan metode *bottom up*, tergantung bahan yang digunakan. Secara umum, pendekatan ini terbatas pada skala laboratorium dan memiliki kontrol kualitas yang terbatas (Frazier, *et al.*, 2009). Dalam pendekatan ini, *graphene* atau *graphene sheets* yang dihasilkan dibuat dengan cara pemisahan, pengelupasan, pembelahan, atau pengelupasan grafit pada turunannya (GO dan *graphite fluoride* (GF)) (Worsley, *et al.*, 2007). Para peneliti telah berhasil dalam mensintesis beberapa lapisan lembaran *graphene* pada kedua skala mikro dan nano (Frazier, *et al.*, 2009). Namun, karena pendekatan ini melibatkan investasi besar dan menghasilkan kualitas yang relatif rendah, metode ini bagus untuk memenuhi kebutuhan industri secara ekonomi. Akan tetapi, berbagai proses mekanis telah dilakukan untuk menghasilkan *graphene* berkualitas tinggi tanpa cacat seperti pengelupasan kulit grafit, sonikasi, fungsionalisasi, *electrochemical exfoliation*, pelarutan grafit, alkilasi turunan *graphene*, pengurangan kimiawi dari oksida *graphene* berair/organik, dan pengelupasan termal (Worsley, *et al.*, 2007)

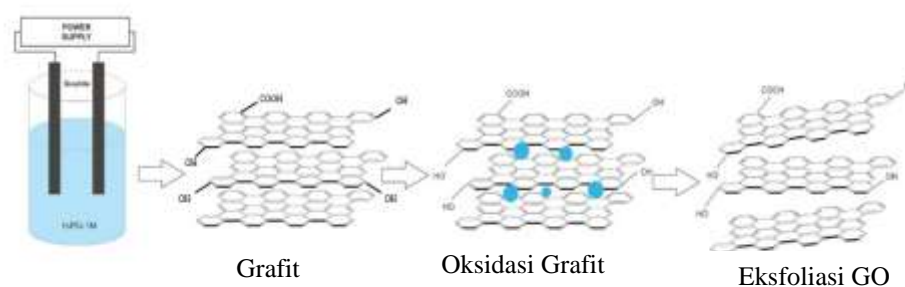
2.4.2.2 Bottom Up

Penjelasan sederhana dari pendekatan *Bottom up* adalah penggabungan atom-atom atau molekul-molekul menjadi partikel yang berukuran lebih besar. Pendekatan *bottom up* terdiri dari teknik standar seperti *epitaxial growth* menggunakan substrat logam dengan cara CVD atau sintesis organik, yang bergantung pada pilihan bahan kimia prekursor dan degradasi termal dan dekomposisi SiC (Mattausch & Pankratov, 2008). Beberapa proses lainnya seperti konversi kimia (Singh, *et al.*, 2012) dan pengurangan CO (Dikin, *et al.*, 2007) juga telah dicoba untuk sintesis *graphene* dan turunannya. Dari semua proses ini, CVD dan *epitaxial growth* dapat memproduksi *graphene* dengan struktur mendekati tanpa cacat (Yiqing, *et al.*, 2011).

2.4.2.3 *Electrochemical Exfoliation*

Electrochemical exfoliation dalam sintesis *graphene* melibatkan penggunaan larutan elektrolit, dan arus listrik untuk mendorong deformasi struktural elektroda grafit, baik melalui reduksi katodik atau oksidasi anodik dari sumber elektroda grafit. *Electrochemical exfoliation* menunjukkan keuntungan yang cukup besar bila dibandingkan dengan metode pengolahan non-elektrokimia, karena proses yang mudah, serta biaya produksi yang rendah. Sintesis *graphene* dalam metode ini memiliki waktu yang singkat, berbeda dengan metode non-elektrokimia yang bisa memakan waktu sampai beberapa hari (Khan, *et al.*, 2010). Selain itu, metode *electrochemical exfoliation* telah menghasilkan dalam jumlah skala gram (Guoxiu, *et al.*, 2009). Meskipun *electrochemical exfoliation* relatif baru, namun metode ini telah menarik minat kalangan peneliti, industri maupun akademis.

Dalam mekanisme di balik prinsip elektrokimia pada jenis potensi yang diterapkan: anodik atau katodik. Pengelupasan anodik melibatkan interkalasi anion dan setiap spesies *co-intercalating* dalam campuran reaksi menjadi grafit. Sebuah elektron penarikan positif dari anoda kerja grafit menciptakan muatan positif. Muatan ini mendorong interkalasi besar negatif, seperti anion fosfat, yang meningkatkan jarak interlayer antara grafik dan membantu dalam pengelupasan lapisan berikutnya. Pada pengelupasan katodik, bias negatif pada elektroda kerja grafit menarik ion bermuatan positif dalam larutan, bersama dengan molekul *co-intercalating* lainnya. Sekali lagi, spesies *intercalating* ini membuka lembaran *graphene*, menyebabkan ekspansi dan pengelupasan kulit seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.8. Dalam mekanisme yang tepat *electrochemical exfoliation graphene*, tidak hanya tergantung pada polaritas potensial, tetapi juga pada kondisi eksperimental lainnya misalnya elektrolit dan *co-intercalating* agen (Coros, 2016). Mekanisme pengelupasan grafit dengan metode pengelupasan elektrokimia dapat dilihat pada Gambar 2.8.



Gambar 2.8 Skema sel eksperimental, interkalasi elektrokimia dan proses pengelupasan kulit (Sumanta & Archana, 2015)

Dalam reaksi katodik: Dari reaksi hidrolisis, ion hidrogen secara fisik teradsorpsi pada permukaan kisi grafit (Persamaan (10)) dan pelepasan gas molekuler molekul yang kuat (Persamaan (11)) mengarah ke ekspansi serta penghilangan kotoran pada permukaan kisi grafit.



Dalam reaksi anodik: Dalam proses *electrochemical exfoliation*, pada potensial tinggi anion elektrolit (OH^- , HPO_4^{2-} , PO_4^{3-} dan anion terlarut kompleks lainnya) terinterkalasikan kisi grafit yang sebelumnya diperbesar dari permukaan, tempat-tempat cacat yang menghasilkan oksidasi, hidroksilasi dan karboksilasi senyawa grafit interkalasi yang terkelupas bersama dengan pelepasan dari CO_2 dan O_2 spesies gas (Persamaan. (12)).



2.5 Graphene Sebagai Elektroda

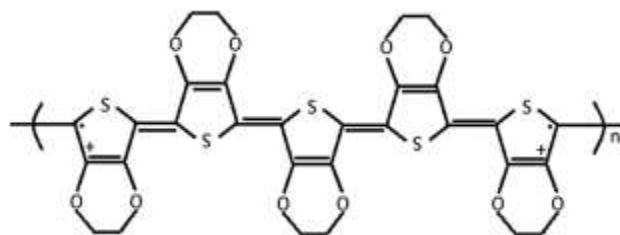
Pada tahun 2008, Xu (2008) pertama kali mempelajari bahan *graphene* sebagai CE pada DSSC. Meskipun film *chemically reduced graphene oxide* (CRGO) bekerja lebih baik sebagai CE pada DSSC (PCE = 2,2%) dari pada FTO murni (PCE = 0,05%), akan tetapi banyak perbaikan yang harus dilakukan untuk mencapai efisiensi elektroda Pt konvensional (PCE = 4,0%). Roy (2010) telah melakukan percobaan dengan menyiapkan jaringan berpori *thermally reduced*

graphene oxide (TRGO) dengan lapisan spin komposit polimer-TRGO. Lembaran *graphene* yang ditambahkan dengan bahan-bahan yang mengandung oksigen, mendapatkan hasil yang sebanding dengan Pt (TRGO, $R_{CT} = 9,4 \Omega \text{ cm}^2$, PCE = 5,0%; Pt, $R_{CT} = 1,3 \Omega \text{ cm}^2$, PCE = 5,5%). Hasil penelitian menunjukkan bahwa kelompok fungsional dan cacat dapat diubah dengan meningkatkan jumlah kelompok yang mengandung oksigen, yang menyebabkan peningkatan aktivitas elektrokatalitik elektroda (Yu, *et al.*, 2016).

Graphene diharapkan menjadi bahan yang menjanjikan untuk CE DSSC karena konduktivitas yang sangat baik yang dapat menurunkan R_{ct} . Kaniyoor & Ramaprabhu (2011) menunjukkan bahwa R_{ct} dari *thermally exfoliated graphene* (TEG) adalah $11,7 \Omega \text{ cm}^2$, yang dimana sangat dekat dengan elektroda Pt ($6,5 \Omega \text{ cm}^2$). DSSC yang dibuat dengan TEG sebagai CE menunjukkan efisiensi konversi daya sekitar 2,8%, sebanding dengan (sekitar 3,4%) dari DSSC berbasis Pt. Selanjutnya, Zhang (2011) melakukan pengamatan serupa, yaitu, nilai Rodium dari film *graphene nanosheets* (GN) mendekati Pt, menghasilkan efisiensi yang sebanding antara DSSC menggunakan GN dan Pt sebagai CE.

2.6 PEDOT:PSS

Pada tahun 1980an, para ilmuwan di laboratorium penelitian Bayer AG di Jerman mengembangkan turunan *polythiophene* baru yaitu poli (3,4-*ethylenedioxythiophene*), poli (3,4-*ethylenedioxythiophene*) memiliki struktur *backbone* yang ditunjukkan seperti Gambar 2.9.

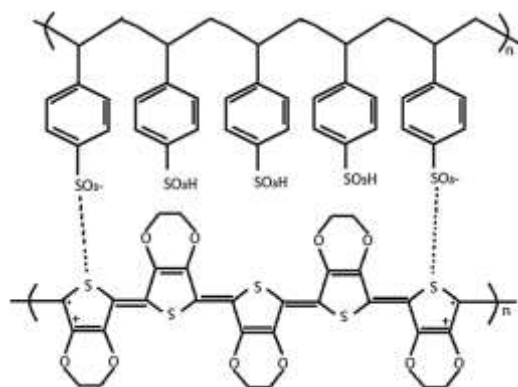


Gambar 2.9 Struktur PEDOT (Saito, *et al.*, 2002)

Polimer ini, yang sering disingkat sebagai PEDT atau PEDOT, pada awalnya dikembangkan untuk menghasilkan polimer konduktif terlarut yang tidak mempunyai kopling α,β - dan β, β - yang dimana tidak diinginkan di dalam *backbone* polimer. PEDOT disintesis menggunakan metode polimerisasi oksidatif

kimia atau elektrokimia standar, PEDOT awalnya ditemukan sebagai polimer yang sukar larut, namun menunjukkan beberapa sifat yang sangat menarik. Selain konduktivitas yang sangat tinggi (sekitar 300 S / cm), PEDOT ditemukan hampir transparan pada film tipis, serta menunjukkan stabilitas yang sangat tinggi pada keadaan teroksidasi. Masalah kelarutan kemudian dipecahkan dengan menggunakan polielektrolit yang larut dalam air, poli (stirena sulfonat asam) (PSS), sebagai dopan penyeimbang selama polimerisasi untuk menghasilkan PEDOT/PSS. Kombinasi ini menghasilkan sistem polielektrolit yang larut dalam air dengan sifat pembentukan film yang baik, konduktivitas tinggi (sekitar 10 S / cm), transmisivitas cahaya tampak tinggi, dan stabilitas yang sangat baik. Film PEDOT / PSS dapat dipanaskan di udara pada suhu 100° C selama lebih dari 1000 jam dengan hanya sedikit perubahan konduktivitas (Groenendaal, *et al.*, 2000).

Penambahan PSS memiliki dua fungsi, yang pertama adalah bertindak sebagai sumber untuk penyeimbang ion muatan. Kemudian fungsi kedua dari PSS adalah menjaga segmen PEDOT terdispersi dalam media berair. Meskipun kompleks PEDOT:PSS yang dihasilkan tidak benar-benar larut dalam air, ia membentuk ikrodispersi biru yang stabil, dan mudah diproses dengan struktur seperti pada Gambar 2.10 (Kirchmeyer & Reuter, 2004).

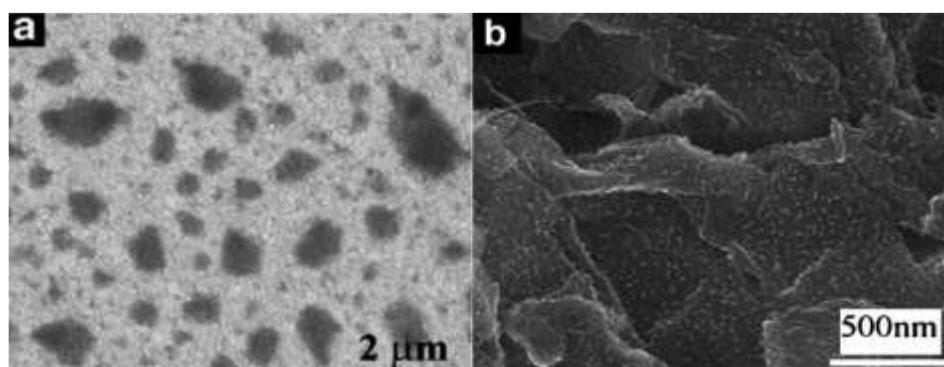


Gambar 2.20 Struktur PEDOT:PSS (Saito, *et al.*, 2002)

2.7 Komposit *Graphene*/PEDOT:PSS Sebagai Elektroda

Bahan komposit *graphene* dengan polimer konduktif pertama kali dilaporkan oleh Stankovich pada tahun 2006, dan membuat bahan komposit berbasis *graphene* telah menarik banyak perhatian. Baru-baru ini, film komposit

polimer *graphene*/konduktif telah digunakan sebagai CE di DSSC. Dalam film komposit, polimer dapat bertindak sebagai pendukung konduktif, dengan *graphene* bertanggung jawab atas katalisis DSSC. Seperti ditunjukkan pada Gambar 2.11a, Lembaran *graphene* terdispersi secara merata dalam matriks PEDOT:PSS karena interaksi statik yang kuat antara lembaran *graphene* 2-*pyrenebutyrate* (PB⁻) dan rantai PEDOT. Dalam sistem komposit ini, polimer PEDOT:PSS dapat memberikan aktivitas elektrokatalitik yang tinggi terhadap reduksi I₃⁻, sedangkan *graphene* dapat membentuk matriks konduktif yang sangat tinggi. DSSC dengan CE *graphene*/PEDOT:PSS menunjukkan efisiensi 7,26 % , yang lebih tinggi dari dari DSSC dengan CE PEDOT:PSS dengan tidak adanya *graphene* (2,3%) Tabel 2 (Hong, *et al.*, 2008).



Gambar 2.11 Karakterisasi SEM (a) Komposit *Graphene*/PEDOT:PSS and (b)Komposit *Graphene*/PANI

Di sisi lain, lembaran *graphene* juga dapat digunakan sebagai pendukung polimer konduktif. Untuk menyebarkan polimer konduktif pada lembaran *graphene*, Wang mensintesis polianilin (PANI) pada lembaran *graphene* sebagai bahan komposit nano dengan teknik polimerisasi *in situ*. Akibatnya, lembaran *graphene* dilapisi *homogen* dengan nanopartikel polianilin Gambar 2.11b. DSSC yang dibuat dengan CE *Graphene*/PANI, menghasilkan efisiensi konversi yang tinggi sebesar 6,09% (Wang, *et al.*, 2012). Lee (2012) mensintesis PEDOT:PSS pada lapisan *graphene* sebagai CE, DSSC dengan elektroda komposit *Graphene*/PEDOT:PSS menunjukkan efisiensi yang tinggi sebesar 7,26%. Hal ini terjadi karena penggabungan *graphene* ke dalam PEDOT:PSS mengakibatkan,

tidak hanya aktivitas elektrokatalitik yang superior, tetapi juga transportasi yang jauh lebih cepat.

Tabel 1. *Graphene*/Polimer sebagai counter elektroda

<i>Counter</i> Elektroda	Jsc (mA cm ⁻²)	Voc (V)	FF	η (%)
<i>Graphene</i> /PEDOT:PSS	12,96	0,72	0,48	7,26
PEDOT:PSS	10,99	0,72	0,68	2,30
<i>Graphene</i> /PANI	13,28	0,685	0,67	6,09
PANI	12,86	0,683	0,54	4,78
PEDOT	12,60	0,77	0,58	5,62

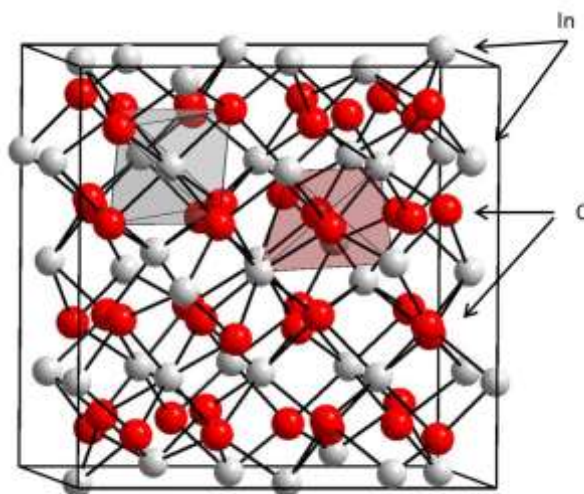
(Wang & Hu, 2012)

2.8 *Indium Tin Oxide*

Indium Tin Oxide (ITO) merupakan TCO yang paling populer karena sifat transparansi dan konduktifitas yang superior di antara material oksida lain. Transparansinya bisa mencapai 80-85% kaca atau gelas serta memiliki ketebalan yang sangat tipis. Aplikasi ITO paling sering digunakan sebagai layar LCD, LED atau layar sentuh di *smartphone*. ITO pada dasarnya tersusun dari In₂O₃ (*indium oxide*) yang di-doping atau ditambah dengan 10% SnO₂ (*tin oxide*). In₂O₃ sebenarnya sudah memiliki karakteristik dasar transparans-konduktif. Namun penelitian yang panjang telah membuktikan bahwa penambahan 10-15% SnO₂ mampu meningkatkan konduktifitas secara signifikan. Sebagaimana TCO pada umumnya, ITO memiliki band gap kurang lebih 3,0 eV (*electron-Volt*) yang membuatnya tembus pandang. Sedangkan penambahan SnO₂ meningkatkan jumlah elektron di dalam ITO sehingga berujung pada sifat konduktifitas total ITO.

ITO memiliki struktur dasar kristal kubik In₂O₃ yang mengikuti struktur kristal mineral *bixbyite*. Distribusi atom Indium (In, putih) dan Oksigen (O, merah) terdistribusi di dalam struktur kristal. Penambahan 10-15% SnO₂ tidak merubah struktur kristal In₂O₃, karena jumlah SnO₂ yang ditambahkan relatif sedikit. Sn dan oksigen (O) dari SnO₂ hanya akan menempati ruang-ruang kosong di dalam struktur *byxbyite* atau menempati posisi dan sekaligus mensubstitusi

atom In dan O di dalam struktur *bixbyite* tersebut. Ilmu mengenai kristal (kristalografi) menyebut struktur yang disederhanakan ini sebagai *unit cell*. Struktur *bixbyite* sejatinya hanya pengulangan dari *unit cell* seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.12.



Gambar 2.12 Struktur kristal ITO (Batzill & Diebold 2005).

Terlihat bahwa Indium oksida memiliki struktur kristal dengan satu kation In dikelilingi oleh atom-atom anion O. Namun, terlihat juga bahwa ada dua posisi kosong yang semestinya ditempati oleh O yang disebut dengan kekosongan atom (*vakansi*). Di tempat kosong inilah baik Sn maupun O dari SnO_2 dapat “hinggap”, atau penyisipan. Selain itu, masih ada kemungkinan lain bahwa atom Sn akan mengganti In, yakni atom Sn menempati posisi atom In di dalam struktur kristal (*substitusi*) (Batzill & Diebold 2005).

2.9 Elektrodeposisi

Proses elektrodeposisi merupakan proses pelapisan logam dengan bantuan arus listrik yang berlangsung secara reaksi reduktif oksidasi sari logam pelapis (sebagai anoda teroksidasi) ke benda kerja (sebagai katoda yang dilapisi). Pada katoda terjadi proses penangkapan elektron sedangkan pada anoda terjadi reaksi pelapisan elektron, sehingga proses pengendapan berlangsung di katoda yang berdampak terhadap penambahan ketebalan dan berat benda.

Menurut Anton (1992), elektrodeposisi pelapis atau coating logam melekat ke elektroda untuk menjaga substrat dengan memberikan permukaan dengan sifat dan dimensi berbeda dari logam basisnya tersebut.

Elektrodeposisi dilakukan dengan maksud memberi perlindungan benda kerja terhadap bahaya korosi, membentuk sifat permukaan dan sifat teknis tertentu atau mekanis tertentu, serta memberi nilai dekoratif terhadap logam dasar. Pada proses elektrodeposisi logam yang dilapisi berfungsi sebagai katoda (elektroda negatif), sedangkan logam pelapis sebagai anoda (elektroda positif). Dalam proses *plating*, arus mengalir dari kutub positif ke kutub negatif, sedangkan aliran elektron mengalir dari kutub negatif ke kutub positif. Pada elektrodeposisi arus yang dipakai adalah arus searah (DC). (Agus, 2008).

Mekanisme terjadinya pelapisan logam adalah dimulai dari dikelilinginya ion-ion logam oleh molekul-molekul pelarut yang mengalami polarisasi. Di dekat permukaan katoda, terbentuk daerah *Electrical Double Layer (EDL)* yang bertindak seperti lapisan dielektrik. Adanya lapisan EDL memberi beban tambahan bagi ion-ion untuk menembusnya. Dengan gaya dorong beda potensial listrik dibantu oleh reaksi-reaksi kimia, ion-ion logam akan menuju permukaan katoda dan menangkap elektron dari katoda, sambil mendeposisikan diri di permukaan katoda. Dalam kondisi equilibrium, setelah ion-ion mengalami *discharge* menjadi atom-atom kemudian akan menempatkan diri pada permukaan katoda dengan mula-mula menyesuaikan susunan atom dari material katoda (Doddi, 2008). Pada proses ini, komponen bersama dengan batangan atau lempengan logam yang akan disalutkan, direndam dalam suatu elektrolit yang mengandung garam-garam logam penyalut (*plating metal*). Apabila suatu potensial diberikan ke dalam sel itu sehingga komponen menjadi katoda dan batangan atau lempengan logam penyalut menjadi anoda, ion-ion logam penyalut dari larutan akan mengendap ke permukaan komponen sementara dari anoda ion-ion juga terus terlarut. Dengan larutan-larutan dan anoda-anoda yang diformulasikan dengan tepat, kita dapat menyepuh logam murni saja, tetapi juga logam-logam paduan. Ditangan mereka yang ahli, ketebalan lapisan dapat dikendalikan dengan baik, demikian pula kehalusan ukuran butiran sehingga

lapisan kemungkinan besar bisa bebas dari prioritas. Dalam metode ini kita mengenal istilah *throwing power* yang diartikan dengan kemampuan larutan penyalut untuk menghasilkan lapisan dengan ketebalan merata tertentu dengan terus berubahnya jarak antara anoda dan permukaan komponen selama proses pelapisan (Kanneth, 1991).

Faktor-faktor yang berpengaruh terhadap proses elektrodeposisi, yaitu :

1 Konsentrasi larutan

Konsentrasi ini akan berkaitan dengan nilai pH dari larutan. Jika nilai pH melebihi dari nilai yang diizinkan maka akan terjadi sumuran pada permukaan produk dan lapisan kasar pada permukaan yang dilapisi.

2 Rapat arus

Rapat arus adalah harga yang menyatakan jumlah arus listrik yang mengalir persatuan luas permukaan elektroda. Terbagi dalam dua macam rapat arus anoda dan rapat arus katoda. Pada proses lapis listrik rapat arus yang diperhitungkan adalah rapat arus katoda, yaitu banyaknya arus listrik yang diperlukan untuk mendapatkan atom-atom logam pada tiap satuan luas permukaan benda kerja yang akan dilapisi. Untuk proses lapis listrik ini faktor rapat arus memegang peranan sangat penting, karena akan mempengaruhi efisiensi pelapisan dan reduksi oksidasi.

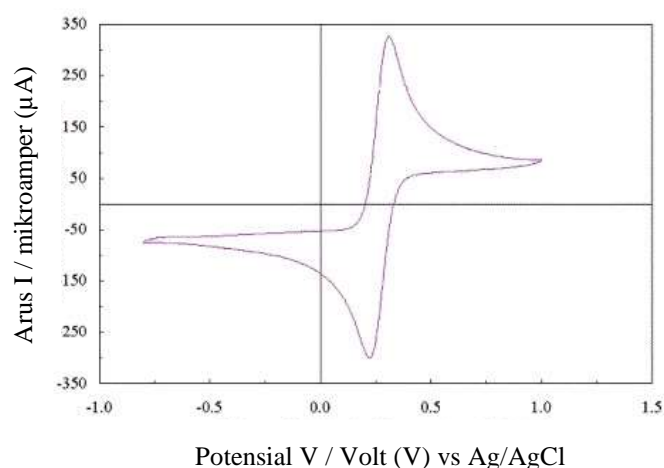
3 Temperatur dan waktu pelapisan

Temperatur terlalu rendah dan rapat arus yang cukup optimum akan mengakibatkan hasil pelapisan menjadi kasar dan kusam, tetapi jika temperatur tinggi dengan rapat arus yang optimum maka hasil pelapisan menjadi tidak merata. Waktu pelapisan akan mempengaruhi terhadap kuantitas dari hasil pelapisan yang terjadi dipermukaan produk yang dilapisi. Kenaikan temperatur akan menyebabkan nilai konduktivitas dan difusitas larutan elektrolit, berarti tahanan elektrolit akan mengecil sehingga potensial dibutuhkan untuk mereduksi ion-ion logam (Kanneth, 1991).

2.10 Voltammetry Cyclic

Metode elektrokimia digunakan untuk mengkarakterisasi semua komponen DSSC. Metode ini memberikan informasi penting mengenai tingkat energi komponen, reversibilitas reaksi elektrokimia, dan kinetika proses elektrokimia. *Voltammetry Cyclic* (CV) adalah alat penting untuk menyelidiki *counter* elektroda (Heinze, 1984).

Sistem tiga elektroda banyak digunakan untuk melakukan CV yang terdiri dari elektroda kerja, elektroda referensi, dan elektroda *counter*. Potensinya diukur pada laju konstan dan dibalik pada titik tertentu, sementara untuk arus dipantau terus menerus. Potensi diukur antara elektroda kerja dan elektroda referensi, sedangkan arus diukur antara elektroda kerja dan elektroda *counter*. Data ini diplot sebagai arus (I), potensial terapan (E, sering disebut sebagai " potensial ").



Gambar 2.13 Voltammogram siklik khas dimana i_{pc} dan i_{pa} menunjukkan arus katodik dan anodik puncak masing-masing untuk reaksi reversibel. (Wu, *et al.* 2017)

Pada Gambar 2.13, CV diilustrasikan dengan melihat pengurangan satu elektron dari *ferricyanide* ke *ferrocyanide*. Pasangan redoks ini menunjukkan hampir tanpa adanya komplikasi reaksi elektroda dan menunjukkan reaksi yang reversibel. Dengan demikian, pasangan *ferricyanide* / *ferrocyanide* telah menjadi pilihan yang populer selama bertahun-tahun untuk digunakan sebagai standar untuk menunjukkan CV. Bentuk gelombang pasangan redoks yang reversibel

sangat kompleks karena efek gabungan dari polarisasi, difusi dan laju transfer elektron. Perbedaan potensial antara dua puncak ($\Delta E_p = | E_{pc} - E_{pa} |$) adalah parameter penting. Nilai ΔE_p berkorelasi negatif dengan tingkat reaksi redoks, dan kecepatan transfer elektron dapat dihitung dari ΔE_p oleh teori yang disarankan oleh Nicholson pada tahun 1965. Teori ini menunjukkan bahwa hasil ΔE_p yang lebih kecil menghasilkan reaksi redoks yang lebih cepat, yang mengindikasikan aktivitas elektrokatalitik yang lebih tinggi. Dalam pasangan reversibel ideal untuk proses elektron n , $\Delta E_p = E_{pc} - E_{pa} = 56,5 \text{ mV} / n$. Nilai yang diamati secara eksperimen seringkali lebih besar. Misalnya, untuk satu proses elektron, ΔE_p mendekati 70 atau 80 mV. Perbedaan antara teori dan pengukuran praktis dianggap sebagai penghalang aktivasi atau *overpotential* untuk transfer elektron. *Overpotential* yang lebih besar tidak menguntungkan untuk reaksi redoks (Nicholson, 1965).

Sedangkan untuk saat ini, pasangan reversibel dicirikan oleh $i_{pa}/i_{pc} = 1$. Dengan kata lain, pasangan redoks yang lebih reversibel, semakin mirip puncak oksidasi akan terbentuk pada puncak reduksi. Bila puncak reversibel diamati, termodinamika potensial (potensial setengah sel) $E_{1/2}^0$ dapat ditentukan. Banyak proses redoks yang diamati oleh CV adalah kuasi reversibel atau tidak reversibel. Dalam kasus seperti itu, potensial termodinamika $E_{1/2}^0$ sering disimpulkan sebagai simulasi. Ireversibel ditunjukkan oleh $i_{pa}/i_{pc} \neq 1$. Penyimpangan ireversibel disebabkan oleh reaksi kimia berikutnya yang dipicu oleh transfer elektron. Proses elektrokimia semacam itu bisa rumit, melibatkan isomerisasi, disosiasi, pengendapan, dan sebagainya. Selain itu, tingkat pemindaian menentukan arus puncak. Jika transfer elektron pada permukaan elektroda cepat dan arus dibatasi oleh difusi spesies yang diukur ke permukaan elektroda, maka arus puncak akan sebanding dengan akar kuadrat dari tingkat pemindaian. Korelasi antara kepadatan arus puncak (J_{red}), koefisien difusi (D_n), dan laju pemindaian (v) dapat dinyatakan dengan persamaan Randles-Sevcik: (Saranya, *et al.*, 2015)

$$J_{red} = KAC_n^{1.5}D_n^{0.5}v^{0.5} \quad (13)$$

dimana K adalah konstanta ($=2,69 \times 10^5$), n adalah jumlah elektroda yang berkontribusi terhadap transfer muatan, A adalah daerah elektroda, dan C mewakili konsentrasi bulk spesies redoks.

Dalam reaksi redoks reversibel pada suhu 25°C dengan n jumlah elektron, E_p harus mempunyai nilai sebesar $0,0592\text{ V}$ atau sekitar 60 mV untuk satu elektron. Pada kenyataannya nilai ini sulit dicapai karena beberapa faktor seperti resistensi sel. Potensial reduksi (E°) untuk sistem reversibel dapat dihitung dalam Persamaan : (Saranya, *et al.*, 2015)

$$E^\circ = \frac{E_{pc} + E_{pa}}{2} \quad (14)$$

Keterangan:

E° : potensial reduksi standar (volt)

E_{pc} : potensial puncak katodik (volt)

E_{pa} : potensial puncak anodik (volt)

BAB V

PENUTUP

5.1 Simpulan

Berdasarkan penelitian dan pembahasan yang telah dilakukan, didapatkan simpulan sebagai berikut:

1. Penambahan massa *graphene* berpengaruh terhadap potensial reduksi $K_3[Fe(CN)_6]$ pada elektroda *Graphene/PEDOT:PSS*. Bertambahnya massa *graphene* meningkatkan nilai potensial reduksi yang dihasilkan pada elektroda *Graphene/PEDOT:PSS* dengan massa optimum *graphene* sebesar 0,075 gram.
2. Variasi waktu deposisi berpengaruh terhadap potensial reduksi $K_3[Fe(CN)_6]$ pada elektroda *Graphene/PEDOT:PSS*. Semakin lama waktu deposisi, menurunkan nilai potensial reduksi dan menaikkan nilai kuat arus yang dihasilkan pada elektroda *Graphene/PEDOT:PSS* dengan waktu optimum selama 160 detik.

5.2 Saran

Berdasarkan penelitian ini disarankan untuk melakukan penelitian lebih lanjut sebagai berikut:

1. Dilakukan penelitian lebih lanjut untuk mendapatkan efisiensi waktu sintesis *graphene* pada media tabung U dalam proses electrochemical exfoliatin.
2. Dilakukan penelitian lebih lanjut untuk mendapatkan efisiensi sintesis komposit *Graphene/PEDOT:PSS/ITO*.

DAFTAR PUSTAKA

- Abdelkader, A. M., Cooper, A. J., W, D. R., & Kinlocha, I. A. (2015). How to Get Between The Sheets: a Review of Recent Works on The Electrochemical Exfoliation of Graphene Materials from Bulk Graphite. *Nanoscale*, VII(16), 6944–6956.
- Archer, M. D., & Nozik, A. J. (2008). *Nanostructured and Photoelectrochemical Systems for Solar Photon Conversion*. London: World Scientific.
- Bae, S., Kim, H., Lee, Y., Xu, X. F., Park, J. S., Zheng, Y., . . . Iijima, S. (2010). Roll to Roll Production of 30 Inch Graphene Films for Transparent Electrodes. *Nature Nanotechnology*, V(8), 574-578.
- Bai, H., Li, C., & Shi, G. (2011). Functional Composite Materials Based on Chemically Converted Graphene. *Advanced Materials*, XXIII(9), 89-115.
- Batzill, M., & Diebold, U. (2005). The Surface and Materials Science of Tin Oxide. *Nature*, LXXIX(2), 47-154.
- Bolotin, K. I., Sikes, K. J., Jiang, Z., Klima, M., Fudenberg, G., Hone, J., . . . Stormer. (2008). Ultrahigh Electron Mobility in Suspended Graphene. *Solid State Communications*, CXLVI(9), 351-355.
- Chadijah, S., Dahlan, D., & Harmadi. (2016). Pembuatan Counter Elektroda Karbon Untuk Aplikasi Elektroda Dye Sensitized Solar Cell. *Jurnal Ilmu Fisika*, VIII(2), 78-86.
- Chiba, Y., Islam, A., Watanabe, Y., Komiya, R., Koide, N., & Han, L. (2006). Dye Sensitized Solar Cells with Conversion Efficiency of 11.1%. *Japanese Journal of Applied Physics*, XLV(25), 38-40.
- Choi, S. M., Wonbong, Lee, & Won. (2011). Synthesis and Characerization of Grafena Supported Metal Nanoparticles by Impregnation Method With Heat Treatment in H₂ Atmosphere. *Synthetic Metals*, CLXI(11), 2405-2411.
- Chu, S., & Majumdar, A. (2012). Opportunities and Challange for a Sustainable Energy Future. *Nature*, CDLXXXVIII (7411), 294-303.
- Ciesielski, A., & Paolo, S. (2013). Graphene Via Sonication Assisted Liquid Phase Exfoliation. *Chem Society Reviews*, XLIII(1), 381-398.
- Coros, M., Pogacean, F., & Rosu, M. C. (2016). Simple and Cost Effective Synthesis of Graphene by Electrochemical Exfoliation of Graphite Rods. *RSC Advances*, IV(6), 2651-2661.

- Desilvestro, H., Hebting, Y., Khan, M., & Milliken, D. (2014). Understanding and Successfully Applying Materials for Dye Sensitized Solar Cells. *Materials Matters, III*(12), 14-18.
- Dikin, D. A., Stankovich, S., Zimney, E. J., Piner, R. D., Dommett, G. H., Evmenenko, G., . . . Ruoff, R. S. (2007). Preparation and Characterization of Graphene Oxide Paper. *Nature, CDXLVIII*(7152), 57-60.
- Dresselhaus, M. S., & Eklund, P. C. (2010). Phonons in Carbon Nanotubes. *Advances in Physics, V*(2), 705-814.
- Dresselhaus, M. S., Jorio, A., & Saito, R. (2010). Characterizing Graphene, Graphite, and Carbon Nanotubes by Raman Spectroscopy. *Annual Reviews, I*(1), 89-108.
- Emtsev, K. V., Bostwick, A., Horn, K., Jobst, J., & Kellog, G. L. (2009). Towards Wafer Size Graphene Layers by Atmospheric Pressure Graphitization of Silicon Carbide. *Nature Materials, 203-207*.
- Farmer, J. D., & Lafond, F. (2016). How Predictable is Technological Progress ? *Research Policy, XLV*(3), 647-655.
- Fasolino, A., Los, J. H., & Katsnelson, M. I. (2007). Intrinsic Ripples in Graphene. *Nature Materials, VI*(11), 858-861.
- Ferber, J., Stangl, R., & Luther, J. (1998). An Electrical Model of The Dye Sensitized Solar Cell. *Solar Energy Materials and Solar Cells, LIII*(1), 29-54.
- Ferrari, A. C., Bonaccorso, F., Falko, V., & Novoselov, K. S. (2015). Science and Technology Roadmap for Graphene, Related Two-Dimensional Crystal, and Hybrid System. *Nanoscale, VII*(11), 4598-4810.
- Frazier, R. M., Daly, D. T., Swatloski, R. P., Hathcock, K. C., & South, R. (2009). Recent Progress in Graphene-Related Nanotechnologies. *Recent Patents on Nanotechnology, III*(3), 164-176.
- Geim, A. K., & Novoselov, K. S. (2007). The Rise Graphene. *Nature Materials, VI*(3), 183-191.
- Geng, Z. G. (2012). A Green and Mild Approach of Synthesis of Highly Conductive Graphene Film by Zn Reduction of Exfoliated Graphite Oxide. *China Journal Chemical Physical, XXV*(4), 494-500.
- Golewski, J., Kosk, J., & Makowska, M. (2008). Dye Sensitized Solar Cells. *Green Energy, I*(7), 28-29.

- Groenendaal, L. B., Jonas, F., Freitag, D., Pielartzik, H., & Reynolds, J. R. (2000). Poly(3,4-ethylenedioxythiophene) and Its Derivatives: Past, Present, and Future. *Advanced Materials*, *XII*(7), 481-493.
- Guoxiu, W., Bei, W., Jinsoo, P., Ying, W., Bing, S., & Jane, Y. (2009). Highly Efficient and Large-Scale Synthesis of Graphene by Electrolytic Exfoliation. *Carbon*, *XLVII*(14), 3242-3246.
- Hamakawa, Y. (2004). *Thin-Film Solar Cells : Next Generation Photovoltaics and Its Applications*. Berlin: Springer Verlag.
- Hashimoto, A., Suenaga, K., Gloter, A., Urita, K., & Iima, S. (2004). Direct Evidence for Atomic Defects in Graphene Layers. *Nature*, 1-3.
- Hauch, A., & George, A. (2001). Diffusion in The Electrolyte and Charge-Transfer Reaction at The Platinum Electrode in Dye Sensitized Solar Cells. *Electrochimica Acta*, *XLVI*(22), 3457-3466.
- Heinze, J. (1984). Cyclic Voltammetry-"Electrochemical Spectroscopy". New Analytical Methods. *Angewandte Chemie*, *XXIII*(11), 831-847.
- Hong, W., Xu, Y., Lu, G., Li, C., & Shi, G. (2008). Transparent Graphene/PEDOT-PSS Composite Films as Counter Electrode of Dye Sensitized Solar Cells. *Electrochemistry Communications*, *X*(10), 1555-1558.
- Hsieh, T. L., Chen, H. W., Kung, C. W., & Wang, C. C. (2021). A Highly Efficient Dye Sensitized Solar Cell With a Platinum Nanoflowers Counter Electrode. *Journal of Materials chemistry*, *XXII*(12), 5550-5559.
- Kaniyoor, A., & Ramaprabhu, S. (2011). Thermally Exfoliated Graphene Based Counter Electrode for Low Cost Dye Sensitized Solar Cells. *Journal of Applied Physics*, *CIX*(12), 124308-124314.
- Kay, A., & Gratzel, M. (1996). Low Cost Photovoltaic Modules Based on Dye Sensitized Nanocrystalline Titanium Dioxide and Carbon Powder. *Solar Energy Materials and Solar Cell*, *XLIV*(1), 99-117.
- Khan, A., Lee, S., Jang, T., Xiong, Z., Zhang, C., Tang, J., . . . Li, W. D. (2017). Scalable Solution Processed Fabrication Strategy for High Performance, Flexible, Transparent Electrodes with Embedded Metal Mesh. *Journal of Visualized Experiments*, *III*(124), 1-11.
- Khan, U., O'Neill, A., Lotya, M., De, S., & Coleman, J. N. (2010). High-Concentration Solvent Exfoliation of Graphene. *National Center for Biotechnology Information*, *VI*(7), 64-71.

- Kim, D. H., Atanasov, S. E., Lemaire, P., Lee, K., & Parsons, G. N. (2015). Platinum-free Cathode for Dye-sensitized Solar Cells Using Poly(3,4-ethylenedioxythiophene) (PEDOT) formed via Oxidative Molecular Layer Deposition. *Applied Materials and Interfaces*, VII(7), 1-15.
- Kirchmayer, S., & Reuter, K. (2004). Scientific Importance, Properties and Growing Applications of Poly(3,4-ethylenedioxythiophene). *Journal of Materials Chemistry*, XV(121), 2077-2088.
- Koch, K. R. (2010). Oxidation by Mn₂O₇: An Impressive Demonstration of The Powerful Oxidizing Property of Dimanganeseheptoxide. *Journal of Chemical Education*, LVIX(11), 973-983.
- Krasheninnikov, A., Lehtinen, P., Foster, A., Pyykkö, P., & Nieminen, R. (2008). Electronic and Magnetic Properties of 3d Transition Metal Atom Adsorbed Graphene and Graphene Nanoribbons. *Physical Review*, LXXVII(11), 195434-195441.
- Lee, K. S., Lee, Y., Lee, J. Y., Ahn, J. H., & Park, J. H. (2012). Flexible and Platinum-Free Dye-Sensitized Solar Cells with Conducting Polymer Coated Graphene Counter Electrodes. *ChemSusChem*, V(2), 379-382.
- Lee, S. U., Choi, W. S., & Hong, B. (2010). A Comparative Study Of Dye Sensitized Solar Cells Added Carbon Nanotubes to Electrolyte and Counter Electrodes. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, XCIV(4), 680-685. doi:10.1016/j.solmat.2009.11.030
- Lee, Z., Jeon, K. J., Dato, A., Erni, R., Richardson, T. J., Frenklach, M., & Radmilovic, V. (2009). Direct Imaging of Soft Hard Interfaces Enabled by Graphene. *Nature Letter*, IX(9), 365-374.
- Li, K., Yu, Z., Luo, Y., Li, D., & Meng, Q. (2007). Recent Progress of Counter Electrode in Nanocrystalline Dye Sensitized Solar Cell. *Journal Materials of Science Technology*, III(12), 577-582.
- Li, X. L., Wang, H. L., Robinson, J. T., Sanchez, H., Diankov, G., & Dai, H. J. (2009). Simultaneous Nitrogen Doping and Reduction of Graphene Oxide. *Journal of The American Society*, CXXXI(43), 15939-15944.
- Liu, J., Yang, H., Zhen, S. G., Poh, C. K., Chaurasia, A., Luo, J., & Wu, X. (2013). A Green to The Synthesis of High Quality Graphene Oxide Flakes via Electrochemical of Pencil Core. *RSC Advances*, III(29), 1-18.
- Luque, A., & Hegedus, S. (2003). *Handbook of Photovoltaic Science and Engineering* (2nd ed.). Delaware: Wiley.
- Mattausch, A., & Pankratov, O. (2008). Density functional study of graphene overlayers on SiC. *Physical Review Letters*, CCXLV(7), 1425-1435.

- Meyer, J. C., Geim, A. K., Katsnelson, M. I., Novoselov, K. S., Booth, T. J., & Roth, S. (2007). The Structure of Suspended Graphene Sheets. *Nature*, *CDXLVI*(7131), 1-3.
- Moharana, M., & Mallik, A. (2013). Nickel Electrocrystallization in Different Electrolytes: An in Process and Post Synthesis Analysis. *Electrochimica Acta*, *XCVIII*(3), 1-10.
- Morozov, S. V., Novoselov, K. S., Katsnelson, M. I., Schedin, F., Elias, D. C., Jaszczak, J. S., & Geim, A. K. (2008). Giant Intrinsic Carrier Mobilities in Graphene and Its Bilayer. *Physical Review Letter*, 16602-16606.
- Narayan, M. R. (2004). Review: Dye Sensitized Solar Cells Based on Natural Photosensitizers. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *XVI*(1), 208-215.
- Nei, J., Longo, C., Flavia, A., & De Paoli, M. A. (2008). Solar Module Using Dyesensitized Solar Cells With a Polymer Electrolyte. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, *XCII*(9), 1110–1114. doi:10.1016/j.solmat.2008.03.022
- Nicholson, R. S. (1965). Theory and Application of Cyclic Voltammetry For Measurement of Electrode Reaction Kinetics. *Analytical Chemistry*, *XXXVII*(11), 1351-1355.
- Novoselov, K. S., Geim, A. K., Morozov, S. V., Jiang, D., Zhang, Y., Dubonos, S. V., . . . Firsov, A. A. (2004). Electric Field Effect in Atomically Thin Carbon Films. *Science*, *CCCVI*(5696), 6-9.
- O'Regan, B., & Grätzel, M. (1991). A low Cost, High Efficiency Solar Cell Based on Dye Sensitize Collodial TiO₂ Films. *Nature*, *CCCLIII*(6346), 37-40.
- Polman, A., Knight, M., Garnett, E. C., Ehler, B., & Sinke, W. C. (2016). Photovoltaic Materials: Present Efficiencies and Future Challenges. *Science*, *CCCLII*(6283), 4424-4434.
- Pysch, D., Mette, A., & W, G. S. (2007). A Review and Comparison of Different Methods to Determine The Series Resistance of Solar Cells. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, *XCI*(18), 1689-1706.
- Roy, M. J., Punckt, C., & Aksay, I. A. (2010). Functionalized Graphene as a Catalytic Counter Electrode in Dye Sensitized Solar Cells. *ACS Nano*, *IV*(10), 6203-6211.
- Ryan, M. (2009). Progress in Ruthenium Complexes for Dye Sensitised Solar Cells. *Platinum Metals Review*, *LIII*(4), 6-8.

- Saito, Y., Kitamura, T., Wada, Y., & Yanagida, S. (2002). Application of Poly (3,4- ethylenedioxythiophene) as Counter Electrode in Dye Sensitized Solar Cells. *Chemistry Letters*, *IV*(4), 1060-1061.
- Santiago, F. F., Bisquert, J., Palomares, E., Otero, L., Kuang, D., Zakeeruddin, S. M., & Gratzel, M. (2007). Correlation Between Photovoltaic Performance and Impedance Spectroscopy of Dye Sensitized Solar Cells Based on Ionic Liquids. *Journals American Chemical Society*, *CXI* (17), 6550-6560.
- Saranya, K., Rameez, M. D., & Subramania. (2015). Development in Conducting Polymer Based Counter Electrodes for Dye Sensitized Solar Cell- An Overview. *Review Article*, *LXVI*(5), 207-227.
- Sawin, F. S. (2016). *Renewables Global Status Report 2016*. New York: REN21.
- Segal, M. (2009). Selling Graphene by The Ton. *Nature Nanotechnology*, *IV*(10), 2-4.
- Singh, K., Anil, O., & Dhawan, S. K. (2012). Polymer-Graphene Nanocomposites: Preparation, Characterization, Properties, and Applications. *Nanocomposites-New Trends and Developments*, *III*(12), 37-72.
- Smestad, G. P. (1998). Education and Solar Conversion: Demonstrating Electron Transfer. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, *LV*(1), 57-78.
- Soldano, C., Mahmood, A., & Dujardin, E. (2010). Production, Properties, and Potential of Graphene. *Carbon*, *XLVIII*(8), 2127-2150.
- Somani, S. D., & Pawar, S. B. (2016). Graphene: A Review. *International Research Journal of Engineering and Technology*, *VI*(8), 375-378.
- Soumen, D., & Jayaraman, V. (2014). SnO₂: A Comprehensive Review on Structures and Gas Sensors. *Progress in Materials Science*, *LXVI*(1), 112-255.
- Stolyarova, E., Rim, K. T., Ryu, S., Maultzsch, J., Kim, P., Brus, L. E., . . . Flynn, G. W. (2007). High-resolution Scanning Tunneling Microscopy Imaging of Mesoscopic Graphene Sheets on an Insulating Surface. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *CIV* (22), 9-12.
- Sumanta, K. S., & Archana, M. (2015). Simple, Fast and Cost-Effective Electrochemical Synthesis of Few Layer Graphene Nanosheets. *NANO: Brief Reports and Reviews*, *X*(2), 1550019-1550029.
- Sun, H., Qin, D., huang, S., Guo, X., Li, D., Luo, Y., & Meng, Q. (2011). Dye Sensitized Solar Cells With NiS Counter Electrodes Electrodeposited by a

- Potential Reversal Technique. *Energy and Environmental Science*, IV(8), 2630-2637.
- Szlachta, J., & Chrobak, S. (2012). DSSC Cells-Colorful Future of Photovoltaics. *Green Energy*, III(10), 56-58.
- Trancik, E. J., Barton, S. C., & Hone, J. (2008). Transparent and Catalytic Carbon Nanotube Films. *Nano Letters*, 982-987.
- Wang, G., Zhuo, S., & Xing, W. (2012). Graphene/Polyaniline Nanocomposite as Counter Electrode of Dye Sensitized Solar Cells. *Materials Letters*, LXIX(3), 27-29.
- Wang, H., & Hu, Y. h. (2012). Graphene as a Counter Electrode Materials for Dye Sensitized Solar Cells. *Energy and Environmental Science*, V(8), 8182-8188.
- Wang, L., Al-Mamun, M., Liu, P., Wang, Y., Yang, H. G., Wang, H. F., & Huijun. (2015). The Search for Efficient Electrocatalysts as Counter Electrode Materials for Dye Sensitized Solar Cell: Mechanistic Study, Material Screening and Experimental Validation. *NPG Asia Materials*, VII(11), 1-15.
- Wang, M., Anghel, A. M., Cevey, N. L., Pootrakulchote, N., Zakeeruddin, S. M., & Gratzel, M. (2009). CoS Supersedes Pt As Efficient Electrocatalyst for Triiodide Reduction in Dye Sensitized Solar Cells. *Journal of The America Chemical Society*, CXXXII (44), 15976-15977. doi:10.1021/ja905970y
- Watcharotone, S., Dikin, D. A., Stankovich, S., Piner, R., Jung, I., Dommett, G. H., . . . Ruoff, R. S. (2007). Graphene-Silica Composite Thin Films as Transparent Conductors. *Nano Letters*, VII(7), 1888-1892.
- Weiberg, S. (2003). *The Discovery of Subatomic Particles Revised Edition*. London: Cambridge Press.
- West, W. (1974). Proceedings of Vogel Centennial Symposium. *Photographic Science and Engineering*, XLII(11), 35-45.
- Wongcharee, K., Meeyoo, V., & Chavadej, S. (2007). Dye Sensitized Solar Cell Using Natural Dyes Extracted From Rosella and Blue Pea Flowers. *Solar Energy Materials and Solar Cell*, XCI(7), 66-71.
- Worsley, K. A., Ramesh, P., Mandal, S. K., Niyogi, S., Itkis, M. E., & Haddon, R. C. (2007). Soluble Graphene Derived From Graphite Fluoride. *Chemical Physics Letters*, CDXLV(1), 51-56.

- Wrobel, A., Wasik, J., & Godlewski, J. (2010). Trends in Development of Organic. *Green Energy, II*(8), 7-8.
- Wu, J., Lan, Z., Lin, J., Huang, M., Huang, Y., Fan, L., . . . Wei, Y. (2017). Counter Electrodes in Dye Sensitized Solar Cells. *Chemical Society Review, XLVI*(19), 5975-6023.
- Wu, L. J., Hao, S., Li, P., Lin, J., Huang, & M. (2008). Progress on the Electrolytes For Dye Sensitized Solar Cells. *Pure and Applied Chemistry, LXXX*(11), 41-58.
- Wu, M., Lin, X., Wang, Y., Wang, L., Guo, W., Qi, D., . . . Ma, T. (2012). Economical Pt-Free Catalyst for Counter Electrodes of Dye Sensitized Solar Cells. *Journal of The American Chemical Society*, 3419-3428.
- Xu, K., Cao, P., & Heath, J. R. (2009). Scanning Tunneling Microscopy Characterization of the Electrical Properties of Wrinkles in Exfoliated Graphene Monolayers. *Nano Letturance, IX*(12), 46-51.
- Xu, S., Luo, Y., & Zhong, W. (2011). Investigation of Catalytic Activity of Glassy Carbon With Controlled Crystallinity for Counter Electrode in Dye Sensitized Solar Cells. *Solar Energy, LXXXV*(11), 2826–2832. doi:10.1016/j.solener.2011.08.014
- Xu, Y., Bai, H., Lu, G., Li, C., & Shi, G. (2008). Flexible Graphene Films Via The Filtration of Water Noncovalent Functionalized Graphene Sheets. *Journals of The American Chemical Society, CXXX*(18), 5856-5857.
- Yadav, A., & Kumar, P. (2015). Enhancement in Efficiency of PV Cell through P&O Algorithm. *International Journal for Technological Research in Engineering, XI*(12), 2642-2644.
- Yin, X., Xue, Z., & Liu, B. (2011). Electrophoretic Deposition of Pt Nanoparticles on Plastic Substrate as Counter Electrode for Flexible Dye Sensitized Solar Cell. *Journal of Power Source, CXCVI*(4), 2422-2426.
- Yiqing, S., Qiong, W., & Gaoquan, S. (2011). Graphene Based New Energy Materials. *Energy and Environmental Science, IV*(4), 1113–1132.
- Yoon, C. H., Vittal, R., Lee, J., Chae, W. S., & Kim, K. J. (2008). Enhanced Performance of a Dye Sensitized Solar Cell With an Electrodeposited Platinum Counter Electrode. *Electrochimica Acta, LIII*(6), 2890-2896.
- Yu, C., Liu, Z., Meng, X., Lu, B., Chui, D., & Qiu, J. (2016). Nitrogen and Phosphorus Dual Doped Graphene as a Metal Free High Efficiency Electrocatalyst for Triiodide Reduction. *National Center for Biotechnology Information, VIII*(40), 17458-17464.

- Yue, G., Wu, J., Xiao, Y., Lin, J., Huang, M., Lan, Z., & Fan, L. (2013). Functionalized Graphene/Poly (3,4-ethylenedioxythiophene) : Polystyrene sulfonate as Counter Electrode Catalyst for Dye-Sensitized Solar Cells. *Energy*, *LIV*(1), 315-321.
- Zangari, G. (2015). Electrodeposition of Alloys and Compounds in the Era of Microelectronics and Energy Conversion Technology. *Coating*, *V*(2), 195-218.
- Zhang, H., Liu, X., Li, D., Luo, Y., Li, H., & Song, W. (2011). Application of Carbon Materials as Counter Electrode of Dye Sensitized Solar Cells. *Electrochemistry Communications*, *IX*(4), 596-598.
- Zhong, C., Hu, W. B., & Cheng, Y. F. (2011). On The Essential Role of Current Density in Electrocatalytic Activity of The Electrodeposited Platinum for Oxidation of Ammonia. *Journal of Power Source*, *CXCVI*(19), 8064-8072.