



UNIVERSITAS INDONESIA

PENGEMBANGAN GRAFIN OKSIDA TEREDUKSI (rGO) UNTUK
APLIKASI SEL SURYA TERSENSITASI ZAT PEWARNA

TESIS

SYUKUR DAULAY

1706990451

FAKULTAS TEKNIK

PROGRAM STUDI MAGISTER TEKNIK MATERIAL

DEPOK

JULI 2019



UNIVERSITAS INDONESIA

PENGEMBANGAN GRAFIN OKSIDA TEREDUKSI (rGO) UNTUK
APLIKASI SEL SURYA TERSENSITASI ZAT PEWARNA

TESIS

Diajukan sebagai salah satu syarat memperoleh gelar Magister Teknik

SYUKUR DAULAY

1706990451

FAKULTAS TEKNIK

PROGRAM STUDI MAGISTER TEKNIK MATERIAL

DEPOK

JULI 2019

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

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

Nama : Syukur Daulay

NPM : 1706990451

Tanda Tangan : 

Tanggal : 5 Juli 2019

Lembar Pengesahan

Nama : Syukur Daulay
NPM : 1706990451
Program Studi : Magister Teknik Material
Judul Tesis : Pengembangan Grafin Oksida Tereduksi (rGO) untuk Aplikasi Sel Surya Tersensitasi Zat Pewarna

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

DEWAN PENGUJI

Pembimbing : Prof. Dr. Ir. Akhmad Herman Yuwono, M.Phil,Eng ()
Penguji : Dr.Ir. Sri Harjanto ()
Penguji : Prof. Dr. Ir. Sutopo, M.Sc ()
Penguji : Prof. Dr. Ir. Anne Zulfia Syahrial, M.Sc ()

Ditetapkan di : Depok

Tanggal : Juli 2019

Kata Pengantar

Segala puji bagi Allah SWT dan shalawat serta salam semoga tercurah kepada Nabi Muhammad SAW. Dengan rahmat Allah SWT yang maha kuasa proses penelitian dan penyusunan tesis ini bisa berjalan dan selesai dengan baik.

Pada kesempatan ini penulis ingin mengucapkan terimakasih kepada orang-orang yang berperan besar dalam penyusunan tesis ini.

1. Pembimbing tesis saya, Bapak Prof. Dr. Ir. Akhmad Herman Yuwono, M.Phil,Eng yang sudah memberikan bimbingan dan meluangkan waktu yang sangat berharga untuk membuat penelitian dan tesis ini berkualitas.
2. Dosen pembimbing lapangan, Bapak Dr.-Ing. Alfian Ferdiansyah yang sudah menyempatkan waktu untuk membimbing dengan sabar dalam pengerjaan penelitian dan tesis ini.
3. Pembimbing akademis, Bapak Dr. Ir. Bambang Priyono, M.T, yang membantu dalam proses akademik saya selama studi.
4. Bapak dan Ibu dewan Penguji yang sudah memberi masukan yang sangat berarti untuk perbaikan tesis ini yaitu Dr.Eng.Ir. Sri Harjanto, Prof. Dr. Ir. Sutopo, M.Sc, dan Prof. Dr. Ir. Anne Zulfia Syahrial, M.Sc.
5. Kedua orang tua penulis yang sudah mengajari dan mendidik dengan sepenuh kemampuan dan doa yang terus mengalir.
6. Istri saya, Winda Iriani S.T, yang sudah sabar memberikan dukungan penuh dalam proses penyelesaian pendidikan magister ini.
7. Saudara kandung penulis, Syakir Daulay dan Borkat Daulay yang memberikan dukungan moril maupun materil dalam penyelesaian proses studi.
8. Mas Wahab dan Gerry sebagai teman satu tim penelitian sebagai teman diskusi dan berbagi hasil penelitian.
9. Teman-teman satu angkatan di program pasca sarjana DTMM UI terkhusus bapak ketua kelas, Pak Dede.
10. Teman-teman tim di Laboratorium Nanomaterial Departemen Teknik Metalurgi dan Material Universitas Indonesia (DTMM UI)
11. Pengurus Yayasan, Kepala Sekolah dan Staf Guru dan Tenaga Kependidikan di SMA Islam Sinar Cendekia yang memberikan kesempatan dan dukungan dalam

proses pendidikan ini. Ucapan terimakasih kepada teman-teman guru, Pak Fakhruddin, Pak Marzuki dan Pak Hendra yang sudah sering menemani dalam penyelesaian tugas.

12. Staf laboratorium dan pengujian di Universitas Indonesia.

13. Sahabat dan teman-teman yang belum bisa saya sebutkan namanya satu per satu.

Tak ada logam yang tak memiliki *crack*, dan tak ada karya yang tak memiliki kekurangan. Sebaik apapun saya membuat karya ini dapat dipastikan tidak lepas kekurangan, maka saran dan masukan dari pembaca dan penguji sangat dibutuhkan untuk penyempurnaan karya ini.

Depok, Juli 2019

Penulis



(Syukur Daulay)



HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI

TUGAS AKHIR UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS

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

Nama : Syukur Daulay
NPM : 1706990451
Program Studi : Teknik Metalurgi dan Material
Fakultas : Teknik
Jenis karya : Tesis

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

Pengembangan Grafin Oksida Tereduksi (rGO) untuk Aplikasi Sel Surya Tersensitasi Zat Pewarna

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

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Depok

Pada tanggal : 5 Juli 2019

Yang menyatakan,


(Syukur Daulay)

ABSTRAK

Nama : Syukur Daulay

NPM : 1706990451

Judul : Pengembangan Grafir Oksida Tereuksi (rGO) untuk Aplikasi Sel Surya Tersensitasi Zat Pewarna

Pembimbing : Prof. Dr. Ir. Akhmad Herman Yuwono, M.Phil, Eng

Sel surya tersensitasi zat pewarna, (*dye-sensitized solar cell*, DSSC) merupakan salah satu sel surya yang mudah dan murah dalam proses pembuatannya dan memiliki prospek untuk menjadi pengganti sel surya generasi pertama. Namun demikian, DSSC memiliki efisiensi yang rendah, karena terjadi rekombinasi elektron yang disebabkan konduktivitas rendah dan penyerapan TiO_2 . Pada penelitian ini, pengaruh Grafir oksida tereuksi (*reduced graphene oxide*, rGO) pada performa DSSC telah diinvestigasi. Material rGO diproduksi dengan menggunakan metode Hummer melalui oksidasi dengan Kalium Permanganat (KMnO_4) dan kemudian reduksi dengan *Hidrazine Hydrate*. Hasil fabrikasi berupa Grafir Oksida (GO) dan rGO dikarakterisasi dengan XRD, SEM, UV-Vis dan FTIR sedangkan performa sel surya diukur dengan *solar cell simulator*. Hasil XRD menunjukkan bahwa telah terjadi pergeseran puncak difraksi dari sudut 2θ sebesar 26.50° menjadi 10.4° yang menunjukkan adanya eksfoliasi grafir. Dan terjadi pergeseran kembali ke posisi semula ketika GO menjadi rGO yang mengindikasikan adanya kontraksi kembali. Hasil SEM menunjukkan bahwa telah terjadi perubahan bentuk fisis dari grafir, GO dan rGO. Data FTIR menunjukkan bahwa puncak-puncak gugus OH mengalami peningkatan saat oksidasi dan penurunan saat reduksi yang menunjukkan adanya reaksi oksidasi dan reduksi yang efektif. Dari data DRS ditemukan energi celah pita grafir, GO dan rGO berturut-turut 3.4, 3.7 dan 3.95 eV sementara energi celah pita untuk komposit nano sekitar 3.38-3.48 eV. Efisiensi yang diperoleh untuk komposit dengan persentase 0, 1, 2, 3, 4 dan 5 wt% masing-masing 1.45, 0.67, 0.91, 0.09, 0.82 dan 0.46 %. Sementara itu untuk lapisan didapatkan hasil untuk 0, 1, 2, 3, 4 dan 5 lapis rGO adalah 1.39, 1.13, 0.801, 0.05, 1.05 dan 0.853%. Penurunan efisiensi ini diakibatkan selisih energi LUMO pewarna dan pita konduksi semikonduktor kecil sehingga masih banyak rekombinasi elektron.

Kata Kunci : DSSC, grafir oksidasi tereuksi, performa, rekombinasi elektron

ABSTRACT

Name : Syukur Daulay

NPM : 1706990451

Title : Developing of Reduced Graphene Oxide (rGO) for Dye-Sensitized Solar Cell (DSSC) Applications

Supervisor : Prof. Dr. Ir. Akhmad Herman Yuwono, M.Phil,Eng

Dye-sensitized solar cell (DSSC) is a ease and low cost fabrication and has high possibility to become substitution for the first generation of solar cell. However, DSSC has low efficiency that caused by electron recombination due to low conductivity and high absorbance of TiO₂. This research has investigated the effect of reduced graphene oxide (rGO) to the performance of DSSC. The rGO synthesized using Hummer's method that routed by oxidation by potassium permanganate (KMnO₄) and reduction by Hydrazine Hydrate. Graphene Oxide (GO) and rGO as result of fabrication are characterized using XRD, SEM, UV-Vis and FTIR and solar cell's performance is measured by solar cell simulator. XRD result shows the displacement of diffraction peak from angle 2θ of 26.50° become 10.4° that indicated the graphite exfoliation. Then it returned to the initial position that indicate contraction. SEM's result showed the form of graphite, GO and rGO. FTIR's data showed the peaks of OH increase when it was oxidized and decreased when it was reduced indicate the oxidation and reduction processes were effective. Bandgap of graphite, GO, rGO is found from DRS's data that gained results of 3.4 , 3.7 and 3.95 eV consecutively whereas bandgap for nanocomposite about 3.38-3.48 eV. The efficiencies for DSSC with nanocomposite photoanode that have percentage of 0, 1, 2, 3, 4 are 5 wt% 1.45, 0.67, 0.91, 0.09, 0.82 and 0.46 % consecutively. The results for layers form one for 0, 1, 2, 3, 4 and 5-layers number of rGO are 1.39, 1.13, 0.801, 0.05, 1.05 and 0.853% consecutively. The decreasing of efficiencies are caused by the small difference of LUMO energy of dye and conduction band of semiconductor resulted much electron recombination.

Keywords : DSSC, reduced graphene oxide, performance, electron recombination

Daftar Isi

Halaman Pernyataan Orisinalitas	iii
Lembar Pengesahan	iv
KATA PENGANTAR.....	v
Halaman Persetujuan Publikasi Tugas Akhir Untuk Kepentingan Akademis	vii
ABSTRAK	viii
ABSTRACT	ix
DAFTAR ISI	x
DAFTAR GAMBAR	xii
DAFTAR TABEL	xiii
DAFTAR SINGKATAN	xiv
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	3
1.3 Tujuan Penelitian	3
1.4 Sasaran	4
1.5 Ruang Lingkup	4
1.6 Hipotesis	4
BAB II STUDI PUSTAKA	5
2.1 Sel Surya dan Perkembangannya	5
2.2 Sel surya Tersensitasi Zat Pewarna (<i>Dye-Sensitized Solar Cell</i> , DSSC)	6
2.3 Faktor-Faktor yang Mempengaruhi Performa DSSC	8
2.4 Grafen (G), Grafen Oksida (GO) dan Grafen Oksida Tereduksi (rGO)	13
2.5 Sintesis Grafen Oksida Tereduksi (rGO)	16
2.6 Grafen dan Turunannya pada DSSC	17
2.7 Teknik Karakterisasi rGO	19
2.8 Performa Sel Surya	22
BAB III METODOLOGI	24
3.1 Bagan Alir Penelitian.....	24
3.2 Sintesis <i>Reduced Graphene Oxide</i> (rGO)	25

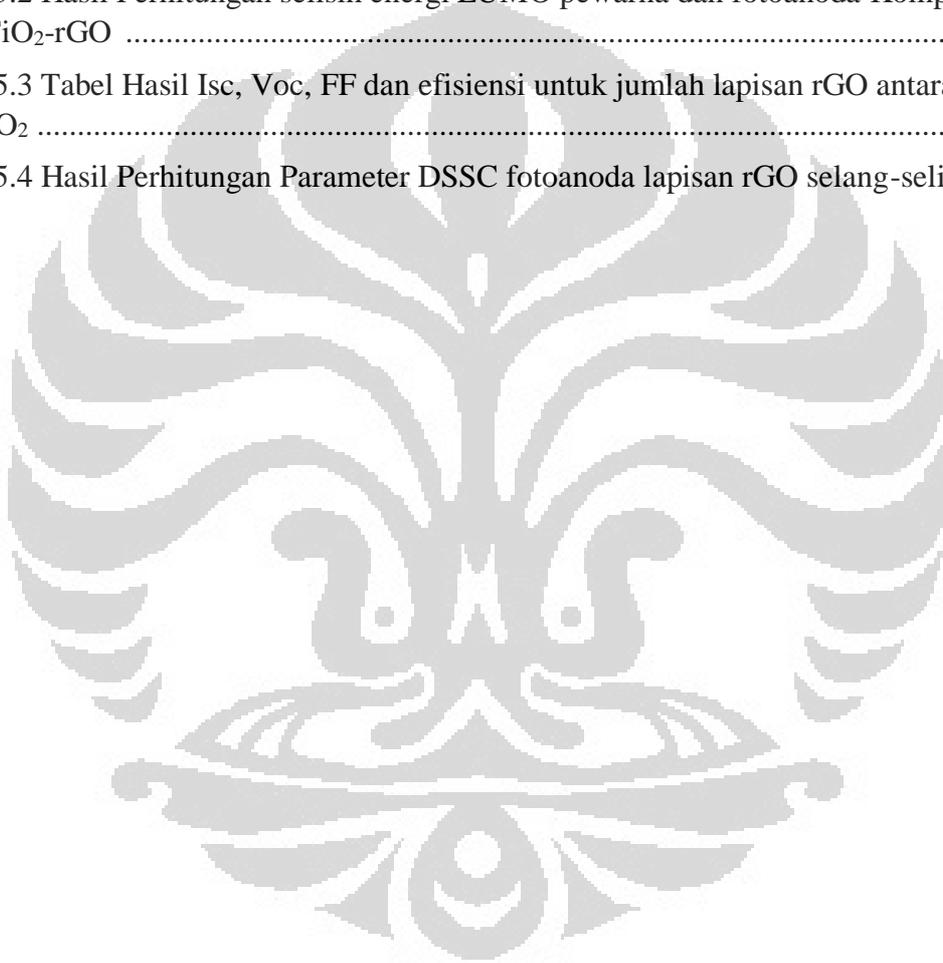
3.3 Fabrikasi DSSC	26
3.3.1 Fabrikasi DSSC dengan rGO-TiO ₂ <i>Nanocomposite</i> sebagai <i>Photoanode</i>	26
3.3.2 Fabrikasi DSSC dengan rGO Lapisan di antara ITO dan TiO ₂	26
3.4 Karakterisasi rGO dan Nanokomposit rGO-TiO ₂	27
3.5 Pengukuran Performa DSSC	28
BAB IV SINTESIS rGO dan KOMPOSIT NANO rGO-TiO₂	29
4.1 Pembentukan rGO	29
4.1.1 Hasil XRD Grafit, GO dan rGO	29
4.1.2 Hasil SEM Grafit, GO dan rGO	31
4.1.3 Hasil FTIR Grafit, GO dan rGO	32
4.1.4 Hasil DRS Grafit, GO dan rGO	34
4.2 Pembentukan Komposit Nano	37
4.2.1 Hasil SEM Komposit Nano	37
4.2.2 Hasil DRS Komposit Nano	37
BAB V PERFORMA DSSC	40
5.1 Performa DSSC fotoanoda komposit nano	40
5.2 Performa DSSC fotoanoda dengan lapisan antara ITO dan TiO ₂	45
5.3 Performa DSSC untuk fotoanoda rGO selang seling	48
5.4 Pengaruh pelarut fotoanoda	50
BAB VI KESIMPULAN	52
DAFTAR PUSTAKA	54
Lampiran	57

Daftar Gambar

Gambar 2.1 Struktur Dasar DSSC	6
Gambar 2.2 Skema Aliran Arus DSSC	8
Gambar 2.3 Diagram Energi untuk setiap bagian komponen DSSC	9
Gambar 2.4 Skema umum fabrikasi grafin oksida tereduksi dengan metode Hummer ..	15
Gambar 2.5 Model bentuk fisis grafit, GO, rGO dan Grafin.....	15
Gambar 2.6 Tipikal kurva J-V Performa Sel Surya.....	22
Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian.....	24
Gambar 4.1 Grafik XRD Grafit, GO dan rGO	29
Gambar 4.2 Hasil SEM Grafit, GO dan rGO	31
Gambar 4.3 Hasil FTIR Grafit, GO dan rGO dalam bentuk larutan	32
Gambar 4.4 Hasil FTIR Grafit, GO dan rGO dalam bentuk bubuk	33
Gambar 4.5 Hasil DRS Grafit, GO dan rGO dalam bentuk film tipis	35
Gambar 4.6 Kurva Hasil Plot Tauc untuk mendapatkan energi celah pita Grafit, GO dan rGO dalam bentuk film tipis.....	35
Gambar 4.7 Hasil DRS Grafit, GO dan rGO dalam bentuk bubuk	35
Gambar 4.8 Kurva Hasil Plot Tauc untuk mendapatkan energi celah pita Grafit, GO dan rGO dalam bentuk bubuk	36
Gambar 4.9 Hasil SEM Komposit Nano	37
Gambar 4.10 Hasil DRS Komposit Nano	38
Gambar 5.1 Kurva I-V DSSC untuk fotoanoda komposit nano.....	41
Gambar 5.2 Grafik efisiensi sel surya DSSC untuk berbagai persentase rGO	42
Gambar 5.3 Diagram energi untuk DSSC standar.....	43
Gambar 5.4 Diagram energi untuk DSSC dengan fotoanoda komposit nano	44
Gambar 5.5 Kurva I-V DSSC untuk fotoanoda lapisan rGO	47
Gambar 5.6 Grafik efisiensi sel surya DSSC untuk jumlah lapisan berbeda	47
Gambar 5.7 Diagram energi untuk DSSC untuk fotoanoda lapisan	48
Gambar 5.8 Kurva I-V DSSC fotoanoda dengan lapisan selang seling rGO	49
Gambar 5.9 Grafik efisiensi DSSC untuk berbagai jumlah lapisan rGO	50
Gambar 5.10 Hasil Kurva I-V untuk DSSC dengan pelarut berbeda	51

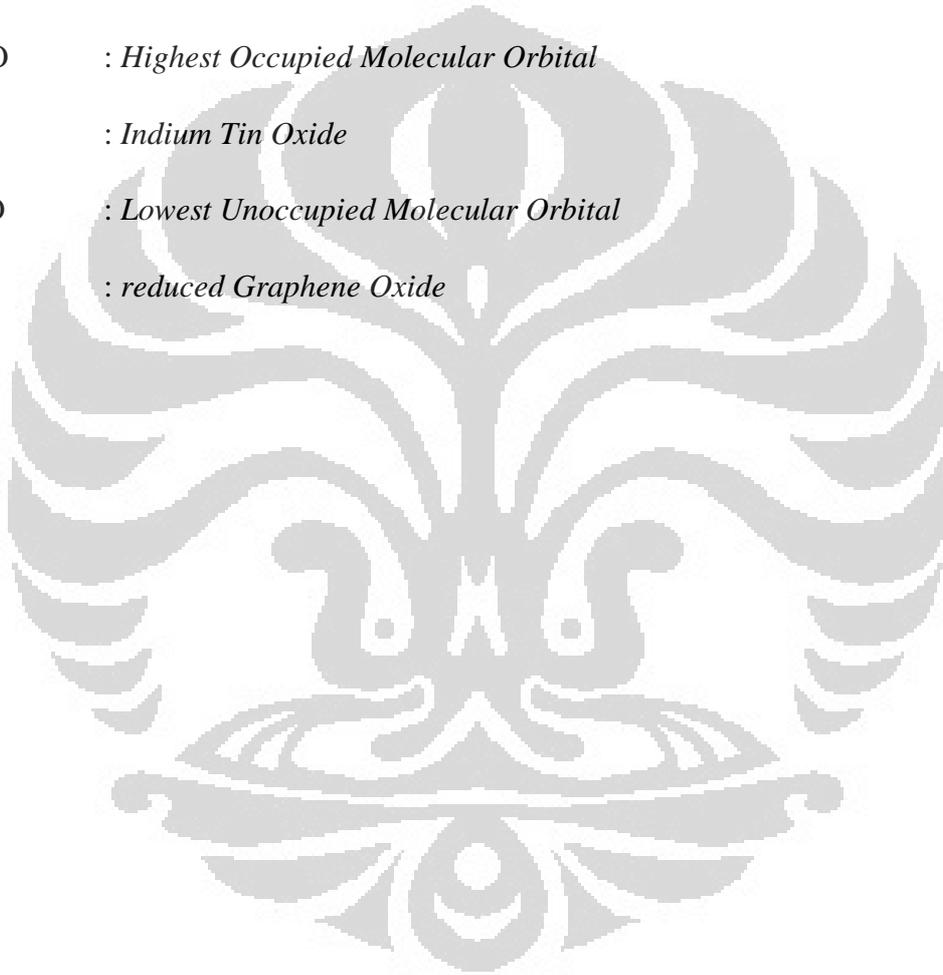
DAFTAR TABEL

Tabel 4.1 Hasil Perhitungan energi celah pita Komposit nano TiO ₂ -rGO	39
Tabel 5.1 Hasil Perhitungan Parameter DSSC fotoanoda komposit nano	42
Tabel 5.2 Hasil Perhitungan selisih energi LUMO pewarna dan fotoanoda Komposit nano TiO ₂ -rGO	44
Tabel 5.3 Tabel Hasil Isc, Voc, FF dan efisiensi untuk jumlah lapisan rGO antarai ITO dan TiO ₂	48
Tabel 5.4 Hasil Perhitungan Parameter DSSC fotoanoda lapisan rGO selang-seling	50



DAFTAR SINGKATAN

DSSC	: <i>Dye-Sensitized Solar Cell</i>
DRS	: <i>Diffuse Reflectance Spectroscopy</i>
FF	: <i>Fill Factor</i>
FTIR	: <i>Fourier-Transform InfraRed</i>
GO	: <i>Grafin Oksida (Graphene Oxide)</i>
HOMO	: <i>Highest Occupied Molecular Orbital</i>
ITO	: <i>Indium Tin Oxide</i>
LUMO	: <i>Lowest Unoccupied Molecular Orbital</i>
rGO	: <i>reduced Graphene Oxide</i>



BAB 1

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Energi adalah sektor vital kebutuhan umat manusia, karena menyentuh hajat hidup orang banyak. Sebagian besar sumber energi peralatan rumah tangga dan industri berasal dari listrik, karena energi listrik lebih bersih meskipun sumber energi untuk menghasilkan listrik terbatas. Produksi energi listrik masih bergantung pada sumber energi fosil yang ketersediannya terus menurun dari tahun ke tahun karena proses pembentukan energi ini membutuhkan waktu berjuta-juta tahun. Hal inilah yang menyebabkan sumber energi fosil ini dimasukkan sebagai sumber energi tak terbarukan [1].

Secara garis besar, penyebab dari kelangkaan energi adalah (i) kelangkaan sumber energi, (ii) inefisiensi distribusi, (iii) inefektivitas penyimpanan dan (v) inefisiensi produksi. Keempat hal ini menyebabkan terjadinya kelangkaan energi yang sedianya selalu dibutuhkan umat manusia. Setiap masalah dasar tersebut diselesaikan dengan keilmuan yang berbeda-beda sehingga diperlukan sinergi antar keilmuan untuk mengatasi masalah kelangkaan energi secara komprehensif.

Penelitian untuk mendapatkan sumber energi baru telah berlangsung sejak beberapa dekade dan sumber-sumber energi baru sudah banyak dikembangkan. Energi-energi baru yang dikembangkan adalah energi angin dibuat dalam sebuah proyek yang disebut Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB), energi air dibuat dalam sebuah sistem yang disebut Pembangkit Listrik Tenaga Air (PLTA), energi surya menggunakan sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS). PLTB menggunakan turbin untuk digerakkan menggunakan angin sehingga turbin berputar yang dihubungkan ke sistem dinamo untuk menghasilkan listrik. Prinsip yang hampir sama untuk PLTA di mana air terjun digunakan untuk menggerakkan turbin. PLTS sedikit berbeda karena PLTS menggunakan sistem kumpulan dari sel-sel surya yang digabung menjadi bentuk lembaran-lembaran.

Sel surya ini terdiri dari berbagai bentuk dan jenis dimana sel surya berbasis silikon adalah jenis sel surya yang paling banyak menguasai pasar. Sel surya silikon ini bekerja berdasarkan prinsip diode yang terdiri dari semikonduktor tipe p dan tipe n yang digabungkan sehingga membentuk diode. Diode secara alami memiliki tegangan minimal sehingga arus bisa melewatinya dan gelombang elektromagnetik yang dikenai pada diode sel surya ini mampu melewati tegangan minimal ini sehingga arus dapat mengalir. Diode silikon ini akan berperan sebagai komponen elektronika biasa jika tidak ada sinar matahari yang mengenainya dan menjadi sumber arus dan tegangan saat sinar matahari yang mengenainya.

Jika dibandingkan sumber energi lain maka sumber energi surya merupakan potensi tertinggi di Indonesia karena intensitas energi matahari di wilayah Indonesia sangat tinggi, sekitar 4.80 KWh/m². Berdasarkan data Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral (ESDM) potensi energi surya di Indonesia dapat mencapai daya sebesar 200 GW [1] yang dapat memenuhi kebutuhan energi secara nasional. Kesimpulannya Indonesia memiliki potensi energi “raksasa tidur” yang jika dibangun maka Indonesia dapat mencapai kedaulatan energi di masa mendatang. Selain kelimpahan energi yang sangat tinggi, pemasangan sel surya lebih mudah dibanding perangkat sumber energi lain karena operasional sel surya sangat sederhana. Sel surya cukup diberikan intensitas sinar matahari yang tinggi, maka akan menghasilkan energi. Energi yang dihasilkan dapat disimpan dalam baterai sehingga tetap tersedia meskipun keadaan mendung. Hasil sel surya yang berupa arus searah biasanya dikonversi menjadi arus bolak balik dengan menggunakan konverter karena perangkat-perangkat listrik saat ini menggunakan arus bolak-balik. Selain itu, komponen-komponen sel surya aman karena tidak memiliki bagian-bagian tajam yang bergerak seperti pada turbin dan ramah lingkungan karena operasional sel surya tidak menghasilkan limbah sehingga sel surya bisa dipasang di setiap rumah dan tidak berbahaya.

Sel surya berbasis zat pewarna tersensitasi atau *dye-sensitized solar cell* (DSSC) merupakan salah satu jenis sel surya dengan fabrikasi yang sederhana [2, 3] sehingga dapat diproduksi oleh perlengkapan laboratorium pada umumnya. Hal ini berbeda dengan sel surya tipe silikon yang harus difabrikasi pada laboratorium

dengan teknologi yang sangat tinggi sehingga diperlukan laboratorium yang sangat khusus. Namun demikian kelemahan sel surya DSSC ini adalah efisiensi yang relatif rendah dibandingkan dengan efisiensi sel surya generasi silikon [4].

Pada penelitian ini akan dikembangkan efisiensi sel surya menggunakan grafen oksida tereduksi atau *reduced graphene oxide* (rGO) sebagai bagian dari anoda pada DSSC. rGO ini dipilih karena sifatnya yang transparan dan konduktivitasnya yang tinggi. Sifat transparan akan meningkatkan intensitas cahaya yang masuk ke pewarna sedangkan konduktivitas tinggi akan menghasilkan transfer elektron yang lebih lancar dalam perangkat sel surya [5]. Kedua hal ini diharapkan dapat meningkatkan efisiensi sel surya.

Selain transparansi dan konduktivitas, selisih energi tinggi pewarna (LUMO) dan energi pita konduksi anoda sangat mempengaruhi proses injeksi elektron ke anoda. Grafen atau turunannya berupa rGO memiliki pita konduksi yang lebih rendah dibandingkan dengan TiO_2 sehingga diharapkan dapat meningkatkan proses injeksi elektron.

1.2. Rumusan Masalah

Efisiensi DSSC masih rendah disebabkan terjadinya rekombinasi elektron dan penyerapan cahaya pada komponen katoda dan anoda yang menyebabkan intensitas cahaya yang diserap sedikit. Sehingga diperlukan komponen tambahan yang lebih transparan dengan konduktivitas tinggi. Komponen yang memiliki sifat tersebut adalah grafen dan turunannya berupa grafen oksida tereduksi (rGO).

1.3. Tujuan Penelitian

Tujuan penelitian ini adalah untuk menginvestigasi pengaruh rGO pada performa DSSC. rGO ini dibuat dalam dua bentuk: (i) anoda pada DSSC berupa komposit nano rGO- TiO_2 , dan (ii) anoda dalam bentuk lapisan di antara ITO dan TiO_2 . Dengan penelitian ini diharapkan pengaruh rGO pada DSSC dalam bentuk komposit nano dan lapisan akan diinvestigasi.

1.4. Sasaran

Proses awal adalah dengan membuat rGO dengan metode Hummer kemudian membuat komposit nano rGO-TiO₂ dan membuat lapisan rGO di antara ITO dan TiO₂. Komposit nano rGO-TiO₂ dibuat dengan rGO sebesar 0, 1, 2, 3, 4 dan 5 wt%. Sementara lapisan rGO adalah sebanyak 1, 2, 3, 4 dan 5 lapis. Fotoanoda dalam bentuk komposit nano dan lapisan disusun untuk menjadi DSSC.

1.5. Ruang Lingkup Penelitian

Ruang lingkup penelitian ini adalah untuk mempelajari pengaruh grafen dan rGO pada performa DSSC. Proses pembuatan rGO merupakan tahapan yang harus dilakukan untuk mendapatkan komponen variabel dibutuhkan dalam penelitian ini.

1.6. Hipotesis

rGO akan meningkatkan efisiensi dari DSSC karena konduktivitas yang tinggi akan mengurangi terjadinya rekombinasi elektron dan absorpsi yang rendah menyebabkan jumlah cahaya yang diserap pewarna lebih besar. Rekombinasi elektron membuat elektron yang sudah tereksitasi ke pita konduksi zat warna gagal menghasilkan arus karena kembali ke pita valensi. Dengan menggunakan rGO diharapkan rekombinasi elektron akan berkurang karena transfer elektron lebih cepat.

Absorpsi grafen oksida tereduksi rendah sehingga meningkatkan intensitas sinar matahari yang dapat diserap oleh zat pewarna. Tingginya intensitas yang diserap ini akan menghasilkan jumlah elektron yang tereksitasi lebih banyak sehingga dapat dihasilkan efisiensi yang lebih tinggi. Satu lapis grafen hanya menyerap 3% cahaya dan meneruskan 97% sisanya sehingga penambahan rGO ini akan meningkatkan konduktivitas tetapi tidak mengurangi transparansi dari perangkat sel surya

BAB 2 STUDI PUSTAKA

2.1. Sel Surya dan Perkembangannya

Sel surya memiliki daya tarik sejak awal kelahirannya untuk menjadi sumber energi masa depan sehingga telah banyak penelitian yang dilakukan tentang sel surya ini [6, 7]. Sel surya memiliki jenis dan bentuk yang sangat banyak sehingga dapat diklasifikasikan menjadi beberapa generasi. Setiap generasi memiliki sifat-sifat khas serta kelebihan dan kekurangan masing-masing yang menjadi ciri khas setiap generasi sel surya itu sendiri. Setiap generasi sel surya juga memiliki perkembangan yang berarti dibanding generasi sebelumnya walaupun belum bisa mengimbangi efisiensi sel surya generasi pertama (silikon) [8].

Generasi pertama adalah sel surya dengan silikon kristal tunggal (*single crystal*) yang memiliki kelebihan berupa efisiensi yang tinggi tetapi membutuhkan teknologi yang sangat tinggi dalam proses fabrikasinya. Sel surya jenis ini membutuhkan fasilitas khusus sehingga hanya bisa diproduksi massal dengan modal besar. Selain itu, sel surya generasi ini membutuhkan silikon kristal tunggal dimana dalam proses produksinya menghasilkan bahan berbahaya.

Generasi kedua adalah sel surya film tipis dari material silikon amorf, silikon polikristal, cadmium telurida dan tembaga indium galium selenida. Kelebihan dari sel surya jenis ini adalah biaya produksi yang murah dan harga jual konsumen yang murah sehingga secara ekonomi sangat menjanjikan. Sifat film tipis sangat lentur sehingga sel surya ini bisa dibuat sebagai material fleksibel untuk sel surya. Kekurangan sel surya jenis ini adalah efisiensi yang rendah dibandingkan dengan generasi silikon dan kurang stabil.

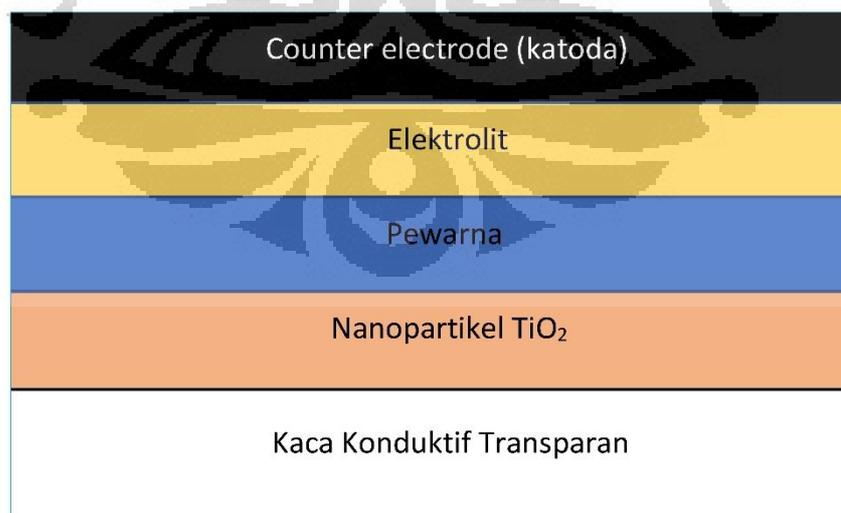
Modifikasi besar pada bentuk dan prinsip kerja sel surya muncul pada generasi ketiga karena sel surya ini tidak menggunakan bahan silikon. Sel surya jenis ini berasal dari bahan kristal nano, polimer serta sel surya tersensitasi zat pewarna. Sel surya generasi ini dapat dibuat dalam laboratorium biasa karena tidak diperlukan perlengkapan yang terlalu spesifik dalam proses fabrikasinya sehingga sel surya ini

dapat diproses dengan mudah dan berbiaya murah. Di samping kelebihan-kelebihan yang dimiliki sel surya jenis ini, sel surya ini memiliki efisiensi yang rendah dan *lifetime* yang terbatas.

Generasi keempat adalah kristal nano dalam bentuk hybrid yang dapat produksi dengan harga sangat murah dan efisiensi yang lebih tinggi dibanding generasi ketiga meskipun masih lebih rendah jika dibandingkan dengan generasi yang pertama. Kelemahan sel surya jenis ini adalah terjadinya degradasi namun masih dapat dikembangkan menjadi lebih baik untuk menjadi sumber energi yang prospektif di masa depan.

2.2. Sel Surya Tersensitasi Zat Pewarna (*Dye-Sensitized Solar Cell, DSSC*)

Penelitian ini akan mengembangkan salah satu sel surya generasi ketiga yaitu *dye sensitized solar cell* (DSSC). Sel surya ini menggunakan pewarna untuk mengubah energi matahari menjadi gerakan elektron (arus) dengan cara eksitasi elektron pada zat pewarna. Prinsip kerja ini terinspirasi dari daun yang menghasilkan reaksi kimia dari cahaya pada proses fotosintesis. DSSC menjadi sangat menarik karena warna-warna yang digunakan bisa didapatkan dari berbagai sumber dengan variasi yang beragam dan warna-warna tersebut bisa dikombinasikan sehingga didapatkan banyak variasi warna.



Gambar 2. 1 Struktur dasar DSSC

Gambar 2.1 menunjukkan struktur dasar DSSC yang umumnya terdiri dari lima lapisan yang secara makro tidak terlihat namun dapat diamati dengan jelas jika dilihat dengan pembesaran tertentu. Kaca transparan merupakan anoda yang melewatkan sinar menuju TiO_2 dan pewarna yang mengeksitasi elektron dari level energi rendah (HOMO) ke level energi tinggi (LUMO). Kaca transparan ini biasanya terdiri dari kaca ITO yang dilapisi konduktor sehingga menjadi konduktif pada satu sisi dan isolatif pada sisi lain.

Pita energi tinggi (LUMO) pada pewarna harus lebih tinggi dari pita konduksi semikonduktor sehingga elektron yang tereksitasi pada pewarna dapat diinjeksi ke nanopartikel TiO_2 . Nano partikel TiO_2 meneruskan elektron ke anoda, dari anoda arus dialirkan ke kaca katoda. Di katoda terjadi reaksi redoks yang menghasilkan elektron dan menangkap elektron. Pada saat reduksi elektron diterima dan saat oksidasi elektron dihasilkan sehingga total elektron pada perangkat tetap sama. Elektron yang dihasilkan diinjeksi kembali ke energi rendah (HOMO) pewarna sehingga pewarna kembali menjadi atom atau molekul netral. Proses ini berlangsung terus menerus yang menghasilkan aliran elektron.

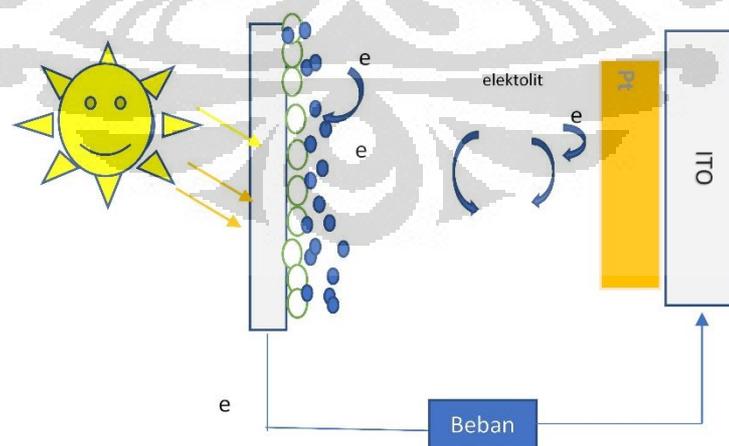
Berbagai usaha untuk meningkatkan efisiensi DSSC terus dilakukan dengan cara membuat kombinasi baru dari pewarna, elektroda lawan, anoda dan elektrolit [7]. Kombinasi pewarna dilakukan dengan mencampur pewarna dengan pewarna organik dan sintetis sehingga dapat ditemukan pewarna yang berkualitas dan murah. Indonesia memiliki potensi besar dalam hal ini karena kekayaan sumber daya alam hayati wilayah Indonesia yang memiliki komponen warna yang beragam. Elektroda lawan dikembangkan menuju material non logam sehingga lebih ramah lingkungan dan berbagai jenis anoda terus dikembangkan. Sementara itu, elektrolit yang banyak digunakan adalah iodine.

DSSC dapat bekerja meskipun pada intensitas rendah sehingga dapat tetap beroperasi optimal pada keadaan cuaca sedang mendung atau gelap. Sementara itu sel surya jenis silikon membutuhkan intensitas cahaya cukup tinggi agar bisa menghasilkan listrik.

Salah satu yang menghalangi peningkatan efisiensi DSSC adalah adanya rekombinasi elektron, yaitu elektron kembali ke level energi rendah sebelum sampai ke elektroda yang disebabkan oleh hambatan pada semikonduktor yang tidak bisa dilewati elektron. Salah satu cara untuk mengatasi hal ini adalah dengan mencampur semikonduktor dengan bahan-bahan yang lebih konduktif. Salah satu bahan yang sering digunakan adalah grafin karena konduktivitasnya sangat tinggi. Pada penelitian ini akan dicoba menggunakan rGO untuk mengurangi rekombinasi elektron pada DSSC.

2.3. Faktor-Faktor yang Mempengaruhi Performa DSSC

Komponen-komponen umum DSSC adalah semikonduktor *photoanode* (fotoanoda), *counter electrode* (elektroda lawan), *redox mediator* (mediator redoks) dan *photosensitizer* (pewarna). Secara ringkas cara kerja DSSC adalah cahaya masuk melalui *photoanode*, kemudian pewarna mengalami eksitasi elektron dari energi rendah (HOMO) ke keadaan elektron yang lebih tinggi (LUMO), elektron diinjeksi ke pita konduksi semikonduktor kemudian diteruskan ke elektroda dan dialirkan ke elektroda lawan. Elektroda lawan mengalirkan elektron kembali ke larutan elektrolit dan terjadi oksidasi reduksi sehingga elektron kembali ke pewarna. Siklus ini terus berulang yang mengalirkan arus listrik terus-menerus seperti ditunjukkan pada Gambar 2.2.

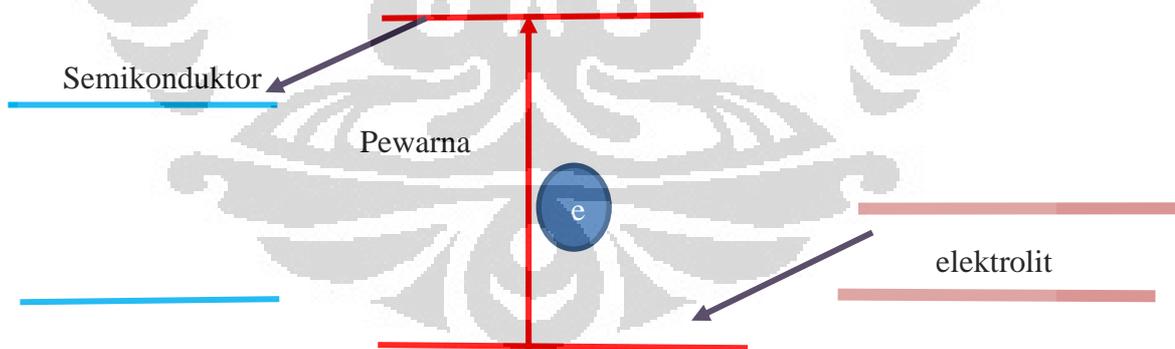


Gambar 2. 2 Skema aliran arus pada DSSC

Semikonduktor fotoanoda yang digunakan pada umumnya adalah TiO_2 dengan ketebalan 7-20 μm . Luas permukaan internal semikonduktor ini biasanya 1000 cm^2 per 1 cm^2 dengan porositas 50%. Mobilitas elektron pada TiO_2 ditentukan oleh kekristalan, morfologi dan luas permukaannya [9].

Semikonduktor yang digunakan memiliki beberapa syarat untuk menjadi semikonduktor yang berkualitas dalam DSSC. Semikonduktor harus transparan untuk menghindari penyerapan cahaya sehingga *transmittance* nya tinggi [10]. Selain itu, permukaannya harus luas sehingga cukup untuk tempat untuk sebanyak mungkin pewarna menempel pada semikonduktor [9]. Sehingga rGO ini merupakan salah satu kandidat yang tepat karena memiliki luas permukaan 2630 m^2/g [11, 12].

Secara fisis semikonduktor ini harus sesuai dengan pewarna yang diberikan. Pita konduksi dari semikonduktor ini harus sesuai dibawah level energi tinggi dari pewarna. Selisih energi antara LUMO pewarna dan pita konduksi semikonduktor mempengaruhi efektifitas injeksi elektron antara keduanya. Hal ini diperlukan agar elektron yang tereksitasi pada pewarna bisa diinjeksi ke semikonduktor. Gambar 2.3 menunjukkan diagram energi pada komponen DSSC



Gambar 2. 3 Diagram energi untuk setiap bagian DSSC

Semikonduktor harus memiliki mobilitas elektron yang besar untuk menghindari terjadinya rekombinasi elektron yang dapat mengurangi efisiensi. Semikonduktor ini harus stabil, mudah disintesis, murah, dan ramah lingkungan [3]. Bahan-bahan yang biasa digunakan sebagai semikonduktor ini adalah metal oksida berupa TiO_2 , ZnO dan SnO_2 . Di antara ketiga metal oksida tersebut yang paling stabil dan paling

sering digunakan adalah TiO_2 karena semikonduktor TiO_2 menghasilkan efisiensi lebih tinggi dibandingkan metal oksida lainnya [8, 9].

Elektroda lawan berguna sebagai tempat terjadinya reaksi redoks pada elektrolit. Peran dari elektroda lawan ini adalah untuk menerima elektron dari anoda dan meneruskan untuk terjadinya proses reduksi. Sehingga elektroda lawan ini harus memiliki konduktivitas tinggi. Selama ini yang digunakan sebagai bagian dari elektroda lawan adalah Pt karena Pt dapat berperan sebagai katalis yang sangat bagus untuk reaksi redoks iodida. Namun, elektroda jenis Pt ini memiliki kelemahan karena ada kecenderungan terbentuknya PtI_4 . Bahan-bahan pengganti untuk Pt ini sedang terus diteliti berupa *carbon nanotube*, grafit, dan bahan polymer [9].

Mediator reaksi redoks (elektrolit) menjalankan proses regenerasi elektron ke pewarna setelah terjadi eksitasi karena pewarna harus tetap bermuatan netral selama proses konversi energi. Pada saat yang sama, elektrolit berfungsi sebagai transporter proton ke elektroda lawan. Elektrolit yang bagus adalah elektrolit yang memiliki konduktivitas tinggi. Elektrolit berperan sebagai penghantar muatan positif ke counter elektroda dan penghantar muatan negatif ke pewarna. Selain itu elektrolit harus memiliki antarmuka yang sesuai untuk nano kristal dan elektroda lawan sehingga kohesivitas pada antar komponen harus kuat [13].

Selain kedua sifat di atas, elektrolit harus bersifat tidak mendegradasi pewarna karena degradasi dapat menimbulkan terjadinya penurunan kualitas DSSC. Elektrolit juga harus sebisa mungkin transparan sehingga cahaya bisa diterima dari dua sisi DSSC yang berguna untuk meningkatkan efektifitas DSSC [14]. Elektrolit juga harus bersifat tidak korosif terhadap elektroda lawan. Sampai saat ini DSSC umumnya masih memakai Pt sebagai elektroda lawan.

Secara umum elektrolit bisa dibagi menjadi tiga jenis berdasarkan keadaan zatnya yaitu elektrolit cair, elektrolit padat dan elektrolit kuasi padat. Elektrolit cair sendiri dibagi menjadi dua jenis yaitu elektrolit organik dan elektrolit ion cair [7]. Elektrolit cair terdiri dari pelarut dan zat terlarut sehingga konsentrasi elektrolit

mempengaruhi kualitas larutan. Larutan elektrolit organik yang biasa digunakan adalah iodida, bromida, sulfur sianida, dan selenium sianida.

Elektrolit yang umumnya yang dipakai dan dikenal adalah iodida memiliki kelarutan yang tinggi dan mengalami regenerasi elektron yang sangat cepat. Selain itu, elektrolit iodida juga memiliki sifat *transmittance* yang tinggi pada frekuensi cahaya tampak. Sehingga sangat sedikit cahaya yang diserap. Selain itu elektrolit iodida ini memiliki peluang kecil untuk terjadinya rekombinasi elektron [14]. Rekombinasi elektron ini mengurangi konversi energi cahaya ke energi listrik.

Elektrolit padat dikembangkan karena elektrolit cair cenderung tidak stabil karena elektrolit cair bisa mengalami penguapan dan ada kemungkinan terjadi kebocoran. Elektrolit padat memiliki kelemahan berupa terjadinya banyak rekombinasi elektron sehingga efisiensinya sangat rendah. Senyawa-senyawa yang biasa dipakai untuk elektrolit padat adalah tembaga iodida, tembaga bromida dan tembaga sulfur sianida [9].

Elektrolit quasi padat, sebagaimana namanya, adalah elektrolit yang mirip padatan yang bertujuan untuk mengambil sifat kelebihan pada elektrolit cair dan sifat kelebihan pada elektrolit padat. Elektrolit cair memiliki keunggulan dalam hantaran elektron sedangkan elektrolit padat memiliki kelebihan dalam stabilitasnya. Elektrolit jenis ini adalah elektrolit komposit dari polymer dan cairan. Kelebihan dari elektrolit ini adalah stabil, konduktivitas tinggi dan antarmuka yang pas dengan elektroda lawan. Namun, jenis ini juga memiliki kekurangan berupa perubahan fase pada suhu tertentu [7].

Sensitizer atau pewarna memiliki peran untuk menyerap gelombang dan mengkonversi gelombang menjadi listrik. Pewarna yang baik untuk DSSC memiliki kriteria daya serap yang kuat dan mampu terikat dengan semikonduktor TiO_2 . Syarat yang terpenting adalah kesesuaian level energi pewarna menyesuaikan dengan semikonduktor. Level energi tinggi dari pewarna harus di atas level pita konduksi dari semikonduktor dan level energi rendah harus lebih rendah dari level energi rendah dari elektrolit [14, 15]. Kesesuaian level energi ini bertujuan untuk memastikan bahwa terjadi injeksi elektron dari pewarna ke semikonduktor dan

transfer elektron dari elektrolit ke pewarna [12]. Sifat elektronik dari pewarna ditentukan oleh struktur molekulnya.

Secara umum, pewarna untuk DSSC dibagi menjadi tiga yaitu logam kompleks, organik tanpa logam dan pewarna alami. Jenis-jenis yang dipakai biasanya adalah N3, N719 dan pewarna hitam N749. Kelebihan dari pewarna logam kompleks ini adalah efisiensi relatif tinggi dan stabil. Namun tetap memiliki kekurangan berupa harga yang mahal dan fabrikasi yang lama [9].

Pewarna organik tanpa logam digunakan karena memiliki kelebihan berupa kemudahan dalam modifikasi strukturnya. Jenis ini memerlukan setidaknya dua jenis pewarna karena sebagai donor dan *acceptor*. Di samping kelebihan, pewarna organik ini memiliki masalah dalam hal stabilitas dan tidak ramah lingkungan [7, 9].

Alternatif lain sebagai pewarna pada DSSC adalah pewarna alami, pewarna yang didapat dari ekstrak warna alami. Kelebihannya adalah preparasi yang sederhana, ketersediaan di alam dalam jumlah banyak, kemurnian dan ramah lingkungan. Namun tetap memiliki kelemahan dalam hal rendahnya efisiensi dibanding logam kompleks dan organik [7, 9].

DSSC sebagai sel surya yang akan memproduksi energi memiliki tujuan untuk mendapatkan efisiensi tinggi dengan harga yang murah. Efisiensi tinggi disebabkan oleh faktor penyerapan energi tinggi. Jika penyerapan gelombang cahaya bagus maka efisiensi juga bagus.

Untuk meningkatkan penyerapan energi ini beberapa usaha dilakukan. Usaha tersebut berupa peningkatan pada warna dan penyerapan pada elektroda. Salah satu trik untuk mengoptimalkan penyerapan cahaya adalah dengan membuat dua atau lebih pewarna dengan panjang gelombang penyerapan yang berbeda-beda yang disebut dengan metode *co-sensitizer* [10, 12] yang menyebabkan daerah serapan warna lebih luas sehingga energi yang diterima oleh perangkat semakin besar.

Penyerapan cahaya pada elektroda harus dikurangi agar jumlah cahaya yang diterima oleh pewarna semakin besar. Cara untuk meningkatkan jumlah cahaya

yang diteruskan adalah dengan membuat kaca yang lebih bening. Kaca yang dicoating dengan Pt hanya meneruskan cahaya 70%. Sementara jika dicoating dengan grafin, sebagai salah satu kandidat baru, bisa meneruskan sampai 80% [10].

Salah satu faktor yang mengurangi efisiensi sel surya DSSC adalah terjadinya rekombinasi elektron. Bahasa sederhananya adalah elektron kembali ke posisi awal karena terhalang di transportasi dari pewarna ke elektroda. Hal ini terjadi karena hambatan yang tedapat pada TiO_2 . Salah satu cara untuk mengurangi ini dengan mencampur dengan grafin yang memiliki konduktivitas tinggi sehingga campuran grafin bisa mengurangi faktor rekombinasi elektron ini [9, 10].

2.4. Grafin, Grafin Oksida, dan Grafin Oksida Tereduksi

Grafin dikenal dengan grafit dua dimensi yang memiliki sifat-sifat unggul yang sangat menarik. Grafin memiliki kekuatan yang sangat tinggi dan massa jenis yang rendah sehingga perbandingan kekuatan per satuan massa sangat tinggi. Grafin juga bisa sebagai konduktor yang baik karena konduktivitasnya yang tinggi karena sifat elektronik yang unik pada grafin [16]. Sifat-sifat unggul diharapkan dapat memberikan efek positif pada DSSC.

Cara termudah untuk mendefinisikan grafin adalah dengan membandingkan dengan bahan dasar pembuatannya, yaitu grafit. Grafit adalah material umum yang banyak kita gunakan sebagai pensil dan konduktor. Grafit itu terdiri dari banyak lembaran grafin yang terikat oleh 'gaya london'. Gaya london ini sangat lemah sehingga grafit lebih lemah karena ikatan antar lembaran ini tidak kuat.

Penemuan grafin yang stabil ditemukan oleh Andre Geim dan Konstantin Novoselov di University of Manchester pada tahun 2004. Setelah itu, perhatian para akademisi dan kalangan industri terus berdatangan. Sebelumnya, ada prediksi di kalangan para ilmuwan bahwa material dua dimensi tidak akan pernah tercapai karena akan terjadi dekomposisi dan berubah menjadi material stabil yang lain pada suhu ruang. [17]

Grafin adalah grafit dua dimensi memiliki sifat-sifat unggul sehingga menarik perhatian banyak peneliti. Sifat-sifat tersebut meliputi sifat mekanik, sifat

elektronik, sifat termik, sifat optik dan sifat kimiawi [16]. Semua karakteristik grafir ini memunculkan daya tarik untuk terus meneliti tentang grafir.

Sifat elektronik dari grafir tergantung pada jumlah lapisan grafir. Jika jumlah lapisan grafir semakin banyak, maka ketergantungan konduktivitas dengan pembentukan electron dan hole semakin sedikit. Ketergantungan terkuat didapatkan pada lapisan grafir tunggal. Mobilitas elektron yang tinggi menyebabkan adanya efek Hall ketika dikenai medan magnet. Mobilitas elektron tergantung pada suhu dan substrat yang digunakan. Mobilitas elektron tertinggi didapatkan adalah $200,000 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$ [17].

Perilaku grafir tidaklah biasa seperti material pada umumnya dimana grafir sangatlah lemah sementara penyusun grafir, grafir, sangatlah kuat. Grafir bisa mencapai kekuatan 200 kali kekuatan baja. Hasil pengukuran yang diperoleh beberapa peneliti memang berbeda-beda, namun mereka mendapatkan hasil yang sama dalam satu hal, kekuatan grafir yang sangat tinggi. Kekuatan grafir juga sangat ditentukan oleh keberadaan pengotornya dan jumlah lapisannya. [17]

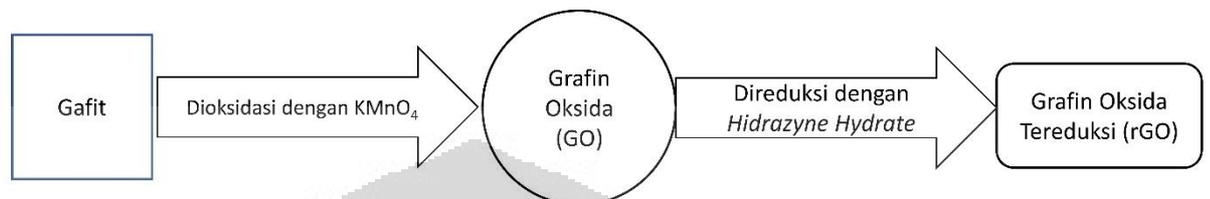
Sifat ketiga dari grafir adalah sifat penyerapan optiknya. Grafir dapat menyerap 2.3% dan meneruskan sisanya. Dua lapisan grafir akan menyerap 4.6%. Penyerapan setiap lapisan grafir dapat dimodelkan dengan

$$A = 1 - T = \pi\alpha \quad (2.1)$$

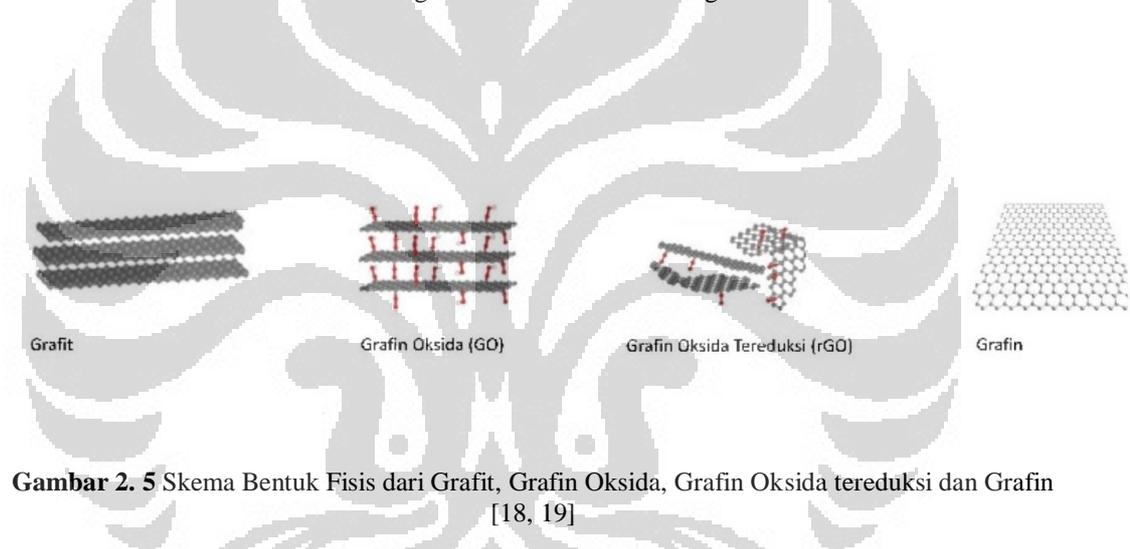
Dengan A adalah koefisien penyerapan, T adalah transmittansi dan α konstanta struktur dengan nilai $1/37$ [17].

Sifat selanjutnya adalah sifat termik dari grafir yang didominasi oleh *phonon* sebagai pembawa panas utama dibandingkan dengan aliran elektron. Konduktivitas panas yang tinggi dapat digunakan untuk stabilitas suhu pada berbagai peralatan karena panas yang terperangkap dalam sebuah peralatan bisa menjadi masalah karena bisa saja energi panas memicu reaksi kimia. Sifat terakhir dari grafir adalah sifat kimianya. Grafir pada dasarnya adalah inert. Untuk bereaksi dengan unsur lain diperlukan gugus fungsi. Sifat kimia grafir ditentukan oleh permukaannya dan ketebalannya [17].

Dengan sifat-sifat unggul di atas maka dapat diharapkan bahwa grafina akan membuat sifat yang unggul pada DSSC. Grafina sudah banyak digunakan dalam berbagai aplikasi DSSC. Grafina bisa menjadi lapisan aktif, lapisan konduktif atau campuran pada pewarna DSSC.



Gambar 2. 4 Skema umum fabrikasi grafina oksida tereduksi dengan metode oksidasi dan reduksi



Gambar 2. 5 Skema Bentuk Fisis dari Grafina, Grafina Oksida, Grafina Oksida tereduksi dan Grafina [18, 19]

Mendapatkan grafina yang murni sangatlah sulit karena proses tersebut memerlukan kondisi sangat bersih dan memerlukan waktu yang lama. Oleh karena itu ditawarkan dua bentuk turunan grafina yang merupakan transisi antara grafina dan grafina, yaitu GO dan rGO. Secara skematik, proses pembuatan grafina dari grafina pada Gambar 2.4 menunjukkan bahwa GO berasal dari grafina yang dioksidasi karena untuk melepas grafina dari grafina dibutuhkan proses oksidasi. Sementara itu untuk mendapatkan grafina, grafina oksida tadi direduksi sehingga oksigennya atau gugus hidroksida menjadi berkurang. Jika reduksinya berjalan mulus maka didapatkan grafina murni. Pada kenyataannya sangat sulit untuk mendapatkan grafina murni sehingga perlu untuk mempelajari transisi dari GO ke grafina murni. Bentuk

fisis dari masing-masing material dalam proses sintesis ditunjukkan pada Gambar 2.5.

2.5. Sintesis rGO

Metode yang umum untuk mendapatkan GO adalah dengan metode Hummer dari bubuk grafit. Grafit dalam bentuk bubuk dicampur dengan asam sulfat dan asam fosfat. Kemudian ditambahkan kalium permanganate secara perlahan dan diaduk pada suhu tertentu dalam waktu yang lama. Setelah itu ditambahkan asam peroksida kemudian diaduk dan dibersihkan, disaring dan dikeringkan untuk menguapkan kandungan air [4]. Bentuk persamaan reaksi oksidasi oleh kalium permanganate adalah seperti persamaan reaksi 2.1 dan 2.2 berdasarkan referensi[20]



Metode Hummer ini memiliki kelemahan karena adanya cacat dalam hasil akhirnya. Defek ini dapat diperbaiki dengan reduksi untuk menghasilkan rGO. Reduksi ini dapat dilakukan secara kimiawi, termik dan menggunakan gelombang mikro. Secara kimiawi, grafin oksida dapat direduksi dengan hydrazine hidrat, asam hidrida, asam amino, dopamine dan asam askorbat [17].

rGO dibagi menjadi dua jenis tergantung jenis larutan basa yang digunakan dalam penetralan pH larutan. Jika pelarut yang digunakan adalah KOH maka disebut K-rGO dan jika yang digunakan adalah larutan amonia hidrat maka disebut N-rGO. Kedua jenis ini memberikan efek berbeda dalam DSSC [4].

Secara termik, GO diberikan panas yang tinggi sehingga terjadi reduksi. Hasil dari ini biasanya disebut *thermally reduced graphene* (TRG). Hal ini karena oksigen akan membentuk karbon dioksida dan air. Metode ini memiliki hasil yang lebih optimal dalam prosesnya [17].

Di antara beberapa metode di atas, maka metode yang saat ini sudah stabil adalah metode reduksi secara kimia dan metode ini dianggap paling efektif sampai saat ini dengan menggunakan reduktor *hydrazine hidrat*. Namun kelemahannya adalah

bahwa bahan *hydrazine* ini adalah bahan beracun. Dan sampai saat ini belum ada metode reduksi yang bisa mengurangi oksigen 100% dari GO.

Hasil dari berbagai metode yang sudah digunakan menghasilkan nilai konduktivitas yang berbeda-beda. Hal ini berawal dari hasil perbandingan karbon dan oksigen dalam rGO tersebut [21]. Umumnya jika karbonnya semakin banyak dibanding oksigennya maka konduktivitas semakin tinggi. Konduktivitas ini sangat penting untuk aplikasi pada DSSC.

2.6. Grafin dan Turunannya pada DSSC

Grafin sebagai bahan yang memiliki konduktivitas tinggi yang sering digunakan dalam DSSC. Selain itu juga sifat transmisi yang tinggi bisa membuat grafin digunakan sebagai elektroda pada DSSC. Hal ini diharapkan dapat meningkatkan performansi DSSC. Grafin umumnya digunakan untuk mengurangi rekombinasi elektron akibat terhalang oleh hambatan pada pewarna dan pada semikonduktor. Rekombinasi ini menurunkan produksi elektron yang mengalir karena elektron kembali ke keadaan semula.

Secara umum grafin digunakan dalam anoda sebagai elektroda, semikonduktor, sensitizer pewarna dan elektrolit. Kaca ITO yang biasa digunakan memiliki konduktivitas tinggi pada spektrum cahaya tampak. Namun ITO biasanya getas dan tidak stabil sehingga diganti dengan FTO. Alternatif lain adalah grafin karena grafin memiliki transmisi dan konduktivitas tinggi serta tahan pada suhu tinggi. Kelemahan dari grafin adalah belum bisa diproduksi massal, sementara ITO dan FTO sudah dapat dibeli dengan mudah di pasaran. Hasil yang ditunjukkan berupa efisiensi tidak terlalu jauh berbeda dengan FTO [5].

Hal lain yang menarik ketika membahas tentang kaca konduktif pada DSSC adalah sifat mobilitas elektronnya. Jika ITO dengan Grafena didapatkan mobilitas elektron $56.35 \text{ cm}^2/\text{Vs}$. Sementara itu jika ITO dan ITO didapatkan $32.71 \text{ cm}^2/\text{Vs}$. Namun jika yang digunakan hanya grafin didapatkan mobilitas $1.403 \times 10^4 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ [22]. Hal ini merupakan nilai yang sangat besar. Jika teknologi kaca konduktif diganti ke grafin maka hampir dipastikan tidak terjadi rekombinasi elektron.

Grafir juga bisa digunakan sebagai semikonduktor pengganti TiO_2 . Namun tahapan saat ini masih menggabungkan antara TiO_2 dan grafir. Grafir digunakan sebagai bahan batas antara TiO_2 dan ITO atau FTO. Sifat grafir yang bening menyebabkan transmittansi tetap tinggi dan rekombinasi elektron dihalangi. Kedua hal ini menyebabkan kehadiran grafir di antara keduanya menyebabkan efisiensi lebih tinggi [5].

Grafir juga digunakan sebagai campuran pewarna yang pada dasarnya berfungsi sebagai penyerap energi matahari dan mentransfer elektron ke pita konduksi semikonduktor. Grafir memiliki absorbansi yang sangat rendah, hanya 2.3% per lapisannya [23]. Namun penyerapan tersebut terjadi di semua rentang frekuensi cahaya tampak. Sementara itu, pewarna seperti N719 hanya menyerap pada daerah yang sangat sempit di sekitar 800 nm [5]. Untuk mengatasi absorbansi yang rendah, maka grafir bisa dalam beberapa lapis untuk membantu penyerapan.

Selain tiga di atas, grafir juga bisa dibuat sebagai bahan aditif untuk elektrolit [10]. Grafir bisa berperan sebagai katalis untuk reaksi redoks iodide. Keberadaan ini bisa juga menjadi hambatan adanya hubungan singkat dalam iodide sendiri [5]. Hal ini menjadi kerugian pada DSSC. Sehingga penggunaan grafir pada elektrolit belum bisa dipastikan efektif untuk menaikkan performa DSSC.

Dalam sebuah laporan penelitian jurnal didapatkan bahwa penambahan rGO pada sebuah elektrolit DSSC menunjukkan bahwa efisiensi naik jika konsentrasi rGO naik. Namun nilai efisiensi ini masih lebih rendah dibanding dengan tanpa rGO [24]. Kejadian ini menjadi menarik karena ketika semakin tinggi efisiensi lebih tinggi, namun ketika tiada efisiensi lebih tinggi lagi.

Lain halnya jika digunakan sebagai grafir nanosheet. Konduktivitas elektrolit naik ketika jumlah grafir nanosheets meningkat. Hal yang sama terjadi pada efisiensinya. Jika tanpa grafir nanosheet didapatkan efisiensi 7.71%, maka jika ditambah 10 mg grafir nanosheets ke elektrolit didapatkan efisiensi 7.89 dan naik drastis ketika diberikan 20 mg menjadi 9.26% [25]. Dalam bentuk grafir nanosheet memberikan efek berbeda jika dibandingkan dengan grafir sebagai bubuk atau padatan.

Selain anoda, grafin bisa juga dijadikan sebagai bagian dari katoda. Grafin bisa menjadi katoda tanpa atau dengan logam lain. Sifat grafin sebagai bagian yang inert seperti Pt dan konduktivitas tinggi maka grafin bisa menjadi substitusi untuk Pt. Sampai saat ini penggunaan grafin sebagai katoda tanpa logam lain berkisar antara 0.74-9.4% tergantung teknik yang digunakan. Hasil efisiensi antara Pt dan grafin tidak terlalu jauh meskipun tidak sebesar dengan katoda Pt. Grafin dengan logam lain selain Pt juga sudah diocoba. Salah satu yang menjadi pasangan adalah *carbon nanotube*. *Carbon nanotube* adalah kelas karbon sama seperti grafena. Didapatkan efisiensi yang lebih tinggi jika menggunakan campuran antara grafin dan *carbon nanotube* (CNT) [5].

Di atas adalah pengaruh grafin yang hampir murni. Jika kemurnian itu tidak sampai 100%, maka sifat-sifat yang mengunggulkan tersebut bisa tetap berlaku pada rGO. Sebuah penelitian menunjukkan bahwa penggunaan K-rGO dan N-rGO pada DSSC memberikan efisiensi sekitar 3.38% dan 4,72%. Hasil ini dibandingkan dengan Pt yang mencapai 6.01 % [4].

2.7. Teknik Karakterisasi rGO

Karakterisasi material adalah untuk menentukan struktur dan komposisi material. Gelombang elektromagnetik digunakan untuk mengetahui 'bagian dalam' material. Karakterisasi ini bisa berupa mekanik, optik, elektrik, fisik dan kimiawi. Pada riset ini digunakan tiga jenis karakterisasi, yaitu karakterisasi komposisi dengan *X-Ray Diffraction* (XRD), *Fourier transform infrared spectroscopy* (FT-IR), karakterisasi fisis dengan *Scanning Electron Microscope* (SEM) dan Karakterisasi Optik dengan menggunakan *Ultra Violet-Visible* (UV-Vis) *spectrometer*.

XRD adalah salah satu karakterisasi untuk menentukan fasa dari zat. Alat ini bekerja dengan prinsip interferensi dan difraksi sinar X pada bidang-bidang atom yang sifatnya periodik. Dengan adanya interferensi ini maka akan didapatkan intensitas tinggi berupa puncak-puncak pada sudut tertentu. Sudut-sudut ini menunjukkan jarak antar atom pada bentuk kristal tertentu yang bisa diproyeksikan menjadi bentuk fasa zat.

FT-IR adalah salah satu alat yang banyak digunakan untuk menentukan gugus fungsi atau ikatan yang terdapat dalam sebuah molekul. Sebagaimana namanya, gelombang yang digunakan adalah gelombang inframerah yang ditembakkan pada material kemudian gelombang tersebut ditangkap kembali dan dianalisa hasilnya. Hasil akhir dari yang ditampilkan melalui sebuah transformasi matematis yang disebut transformasi fourier.

Hasil data yang ditampilkan untuk FT-IR adalah grafik antara transmittansi dengan panjang gelombang *infrared*. Jika transmittansi rendah, maka akan terbentuk palung ke bawah. Ini menandakan bahwa terjadi penyerapan gelombang pada panjang gelombang tersebut. Dengan membandingkan data dengan pangkalan data dapat ditentukan gugus atau ikatan apa saja yang ada pada zat tersebut. Dengan data gugus dan ikatan dapat diperkirakan zat apa saja yang ada pada zat tersebut.

Ketika menggunakan TiO_2 maka akan ada ikatan antara Ti-O-Ti. Ikatan ini mengalami *stretching* dengan energi sekitar 535 cm^{-1} . Sementara itu grafir yang memiliki ikatan C=C yang diketahui dari pangkalan data bahwa ikatan ini mengalami vibrasi dan *stretching* dengan energi sekitar 1627 cm^{-1} [26]. Sehingga akan didapatkan transmittansi yang rendah pada energi gelombang tersebut.

Melalui karakterisasi dengan SEM dapat diketahui ukuran kristal dan jenis material. Ukuran kristal dapat terlihat dengan jelas karena memiliki pembesaran yang tinggi. Hal ini karena SEM menggunakan elektron untuk memindai permukaan material. Ketika elektron ini ditembakkan maka akan ada perbedaan ketinggian antara tip dengan permukaan. Perbedaan ketinggian ini memberikan efek gaya yang berbeda. Gaya yang berbeda ini akan dideteksi oleh SEM sehingga dapat dipetakan bentuk morfologi material. Ketika SEM menembakkan elektron pada material maka akan ada beberapa jenis elektron yang keluar yaitu elektron balik, elektron auger, elektron eksitasi pertama dan elektron eksitasi kedua. Semua elektron ini menggambarkan bentuk material dan memperkuat penggambaran pada SEM. Selain itu juga didapatkan sinar X yang membantu untuk mendapatkan gambar yang lebih akurat.

Data yang didapatkan dari SEM adalah gambar serta pembesaran. Gambar menunjukkan morfologi material. Zat yang berbeda akan memiliki morfologi berbeda. Dari gambar juga dapat diketahui ketebalan lapisan yang diberikan pada bidang bata sambungan. Ketebalan dapat dihitung dengan membandingkan skala pembesaran dengan ukuran menggunakan penggaris.

Dalam penelitian ini akan akan diteliti bidang batas antara ITO dan TiO₂. Kaca akan terlihat permukaan halus, sementara TiO₂ bentuk pasta juga terlihat halus. Namun diantara keduanya akan ada batas yang tipis jika dikosongkan[27]. Namun jika diantaranya diberikan lapisan rGO akan terlihat adanya rGO dengan bentuk yang berbeda.

UV-Vis digunakan untuk menentukan daerah gelombang yang diserap oleh bahan. Tujuan dari menggunakan UV-Vis adalah untuk menentukan energi *band gap* dari material. Jika diketahui *band gap* dari material, maka dapat ditentukan panjang gelombang yang bisa diserap oleh material.

Sebuah ekstrapolasi linier didapatkan dari persamaan

$$(\alpha hv)^{\frac{1}{2}} = \beta(hv - E_g) \quad (2.4)$$

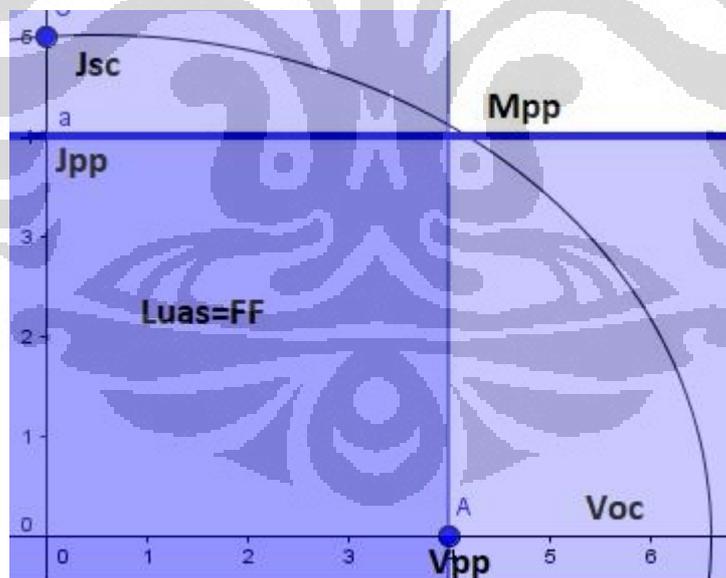
dengan E_g adalah energi celah pita, v adalah frekuensi, h adalah konstanta plank yaitu 6.63×10^{-34} Js, $\alpha = 2.303 A/d$ (dengan A adalah densitas optik, d adalah tebal sampel) dan β adalah konstanta. Jika grafik diplot maka akan didapatkan nilai konstanta dan energi celah pita [26].

Data yang didapatkan dalam pengukuran UV-Vis adalah grafik antara absorbansi dengan panjang gelombang. Dari sumber [26] didapatkan bahwa daerah penyerapan untuk TiO₂ adalah 302-356 nm untuk gelombang cahaya tampak. Maka hasil yang akan muncul di sekitar tersebut. Jika dihitung dengan teknik ekstrapolasi di atas bisa didapatkan hasil sekitar 2.2-3.06 eV Maka jika kita menguji UV-Vis untuk TiO₂ maka hasilnya tidak jauh dari angka tersebut.

2.8. Performa Sel Surya

Performa sebuah sel surya diukur dengan berbagai parameter. Parameter tersebut adalah rapat arus hubungan singkat (J_{sc}), tegangan rangkaian terbuka (V_{oc}), *fill factor* (FF) dan efisiensi konversi energi (PCE). Keempat parameter tersebut menunjukkan kualitas yang pada akhirnya adalah untuk menentukan efisiensi. Parameter lainnya adalah V_{pp} , J_{pp} dan M_{pp} yang merupakan simbol dari *Voltage Power Point*, *Rapat arus power point* dan *Maximum Power Point* yang merupakan tegangan, rapat arus dan daya maksimum.

J_{sc} adalah rapat arus pada saat tegangan nol. Ini sama dengan defenisi arus singkat. Sebaliknya tegangan V_{oc} adalah tegangan saat arus sama dengan nol. Sementara itu FF adalah hasil optimasi dari energi yang bisa digunakan. Dan PCE adalah perbandingan daya yang diterima dengan daya keluaran yang dihasilkan. Defenisi sama dengan defenisi efisiensi secara umum.

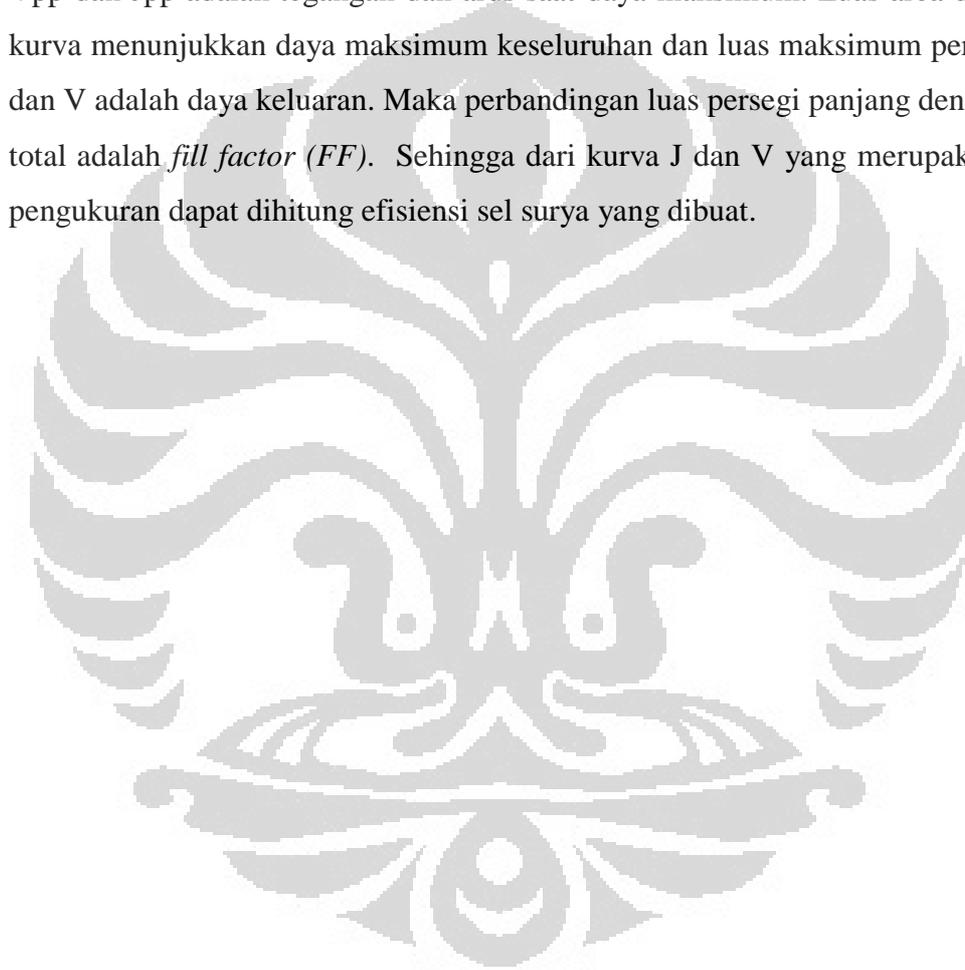


Gambar 2. 6 Tipikal kurva J dan V pada pengukuran performa sel surya

Hasil yang didapat dari alat uji performa sel surya adalah kurva J dan V. Jika kita ibaratkan bahwa kurva J dan V berbentuk elips, maka efisiensi sel surya dapat dihitung dengan maksimum luas area yang dapat dihitung dari daerah kurva V dan J.

$$PCE = \frac{V_{pp} \times J_{pp}}{P_{in}} = \frac{V_{oc} \times J_{sc} \times FF}{P_{in}} \quad (2.5)$$

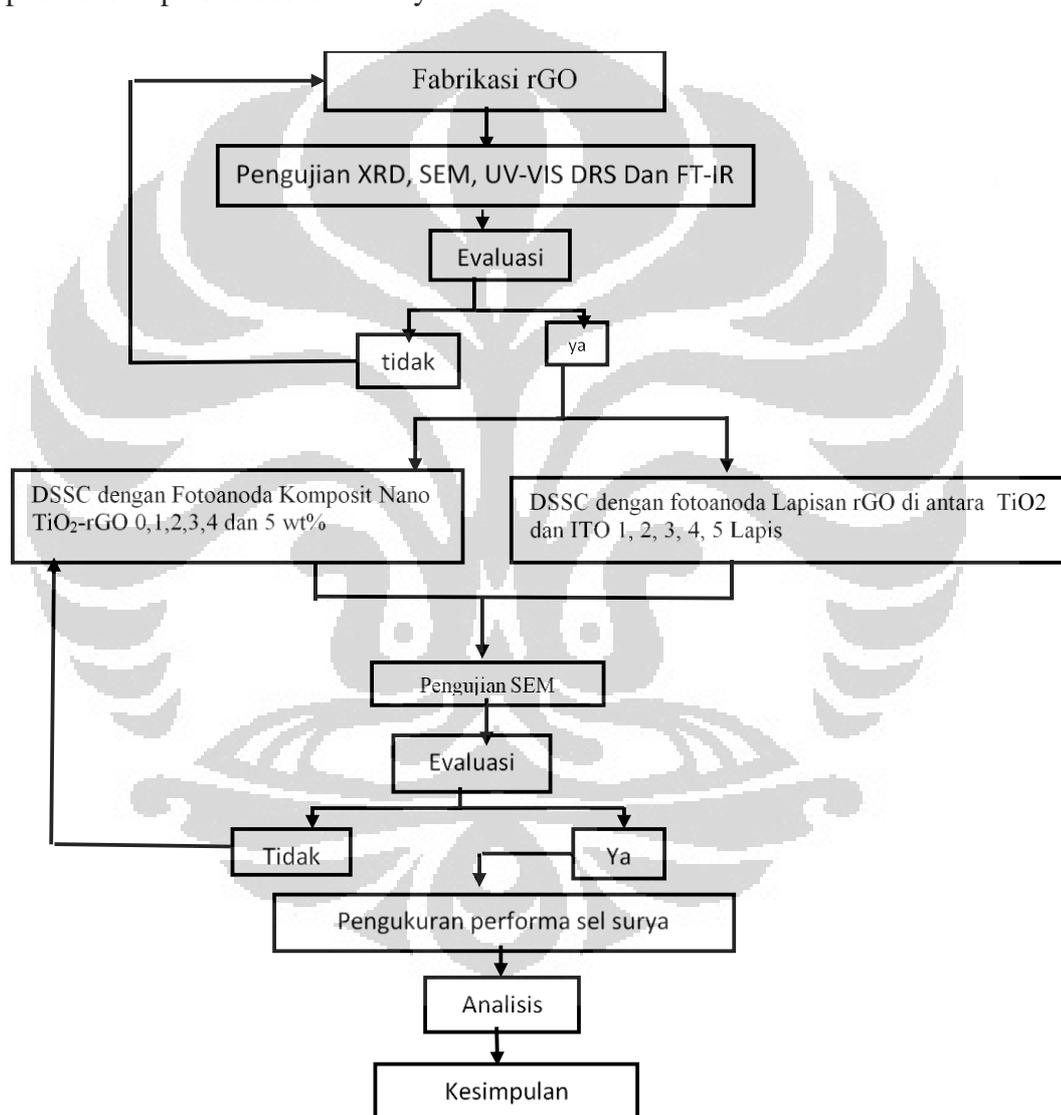
V_{pp} dan J_{pp} adalah tegangan dan arus saat daya maksimum. Luas area di bawah kurva menunjukkan daya maksimum keseluruhan dan luas maksimum perkalian J dan V adalah daya keluaran. Maka perbandingan luas persegi panjang dengan luas total adalah *fill factor (FF)*. Sehingga dari kurva J dan V yang merupakan hasil pengukuran dapat dihitung efisiensi sel surya yang dibuat.



BAB 3 METODOLOGI

3.1. Diagram Alir Penelitian

Berikut ini Gambar 3.1 adalah diagram alir penelitian tesis ini yang merupakan langkah-langkah signifikan. Penjelasan detail setiap langkah-langkahnya diberikan pada beberapa sub bab berikutnya.



Gambar 3. 1 Diagram Alir Penelitian

3.2. Sintesis *Reduced Graphene Oxide (rGO)*

Pembuatan grafina menggunakan metode kimia basah atau yang lebih dikenal dengan metode Hummer. Cara ini mengikuti kombinasi dari berbagai jurnal [17, 24, 28]. Cara ini merupakan cara *top-down*, membuat grafina dari bubuk grafit.

- Bubuk grafit sebanyak 1-gram dicampur dengan 46 ml H_2SO_4 dan 0.5-gram NaNO_3 . Ketiganya dicampur dengan diaduk dengan pengaduk magnetik selama 2 menit pada suhu 35°C . Campuran tersebut selanjutnya diaduk selama 15 menit dengan es batu sehingga mencapai suhu mendekati 0°C .
- Sebanyak 3-gram Kalium Permanganat (KMnO_4) ditambahkan secara perlahan. Selama penambahan tersebut, suhu tidak boleh mencapai lebih dari 20°C . Kemudian diaduk selama 6 jam pada suhu 35°C . Setelah itu, KMnO_4 ditambahkan lagi secara perlahan dan diaduk selama 18 jam pada suhu 35°C . Penambahan tersebut harus secara perlahan sehingga suhu tidak boleh tinggi.
- Langkah terakhir untuk menghasilkan GO adalah dengan penambahan 150 ml H_2O yang mengandung 6 ml larutan 30% H_2O_2 . Penambahan dilakukan secara sangat pelan. Suhu harus dijaga dibawah 80°C . Maka residu KMnO_4 dan MnO_2 direduksi menjadi Mn^{+2} . Warna larutan berubah dari coklat hitam menjadi kuning cerah.
- Larutan yang sudah menjadi kuning cerah dibuang cairannya dan diambil endapannya. Endapan tersebut dicampur dengan aquades masing-masing 10 ml untuk di sentrifugal. Tujuannya adalah agar asam-asam yang masih ada dalam grafina oksida bisa habis. Proses sentrifugasi dilakukan bisa sampai 10 x 20 menit sampai pH cairan sama dengan pH akuades.
- Jika sudah didapatkan pH yang sama dengan pH akuades maka larutan disaring dengan menggunakan saringan vakum. Sebelum disaring terlebih dahulu dicampur aquades sampai 300 ml. kemudian disaring sampai kering membutuhkan waktu sekitar 1.5 jam. Hasil saringan ini dipanaskan sampai pada suhu 90° sampai semua cairan menguap selama semalam (+-12 jam).
- GO yang sudah kering diberikan aquades dengan perbandingan 1 mg/ml. Kemudian larutan *hydrazine* dicampur kemudian dipanaskan pada suhu

100⁰ C selama 12 jam. Hasil pemanasan dicampur dengan ethanol dan dipanaskan kembali pada suhu 80⁰ selama 24 jam. Hasil akhirnya adalah grafin oksida yang tereduksi (rGO).

3.3. Fabrikasi DSSC

3.3.1. DSSC dengan *rGO -TiO₂ Nanocomposite* sebagai fotoanoda

Langkah pertama untuk membuat DSSC jenis ini adalah penyiapan dari *rGO-TiO₂ nanocomposite*. Metode ini merujuk pada sebuah jurnal [12]. Jumlah tertentu dari rGO yang terdispersi dicampur dengan TiO₂ sehingga didapatkan pasta. Komposisi rGO yang akan dibuat adalah dengan persentase 1, 2, 3, 4, dan 5 wt % dan TiO₂ tanpa rGO juga dibuat sebagai kontrol.

Masing-masing komposit nano dilapiskan ke kaca ITO dengan metode *doctor blade method*. Substrat yang sudah dilapisi dipanaskan pada suhu 450⁰C selama 1 jam. Kemudian didinginkan pada suhu ruang sampai dingin. Pewarna RK1 dengan larutan 10% ditetaskan pada permukaan komposit nano. Dibutuhkan waktu 12 jam untuk memastikan bahwa pewarna terdifusi ke komposit nano.

Katoda dilapisi dengan plastisol sebagai katalis untuk reaksi redoks elektrolit. Kemudian dipanaskan pada suhu 450⁰C selama 1 jam. Kemudian didinginkan pada suhu ruang sampai dingin pada temperatur ruang.

Kedua elektroda kaca digabungkan sesuai luasan daerah yang dibuat. Sisanya yang tidak berlapis menjadi kontak untuk pengujian. Elektrolit iodida ditambahkan di antara dua kaca tersebut. Maka elektrolit akan berdifusi. Setelah itu, perangkat solar cell siap untuk dikarakterisasi dengan *Solar Cell Simulator*.

3.3.2. Fabrikasi DSSC dengan rGO Lapisan di antara ITO dan TiO₂

Langkah pertama untuk membuat DSSC dengan rGO di antara ITO dan TiO₂ adalah penyiapan lapisan rGO pada ITO nya. Metode untuk membuat lapisan pada ITO telah dijelaskan dalam sebuah jurnal [5]. Untuk membuat sebuah lapisan, maka satu tetes rGO terdispersi ditetaskan di atas ITO yang kemudian diputar dengan metode *spin coating*. Sampel kemudian dipanaskan selama 20 menit pada suhu 70⁰C

sehingga satu lapisan rGO akan terbentuk. Untuk membuat 2 lapisan, langkah diatas dilakukan dua kali. Begitu juga untuk jumlah lapisan seterusnya.

Langkah selanjutnya adalah membuat DSSC dengan lapisan TiO₂ pada ITO yang sudah dicoating rGO sebagai anoda. Caranya sama seperti yang 3.2.1. Jumlah lapisan rGO yang akan dibuat adalah 1, 2, 3, 4 dan 5 lapisan. Pengaruh dari jumlah lapisan ini kepada performansi DSSC akan diteliti.

3.4. Karakterisasi rGO dan Komposit nano rGO-TiO₂

1. XRD

XRD digunakan untuk sampel grafit, GO dan rGO dalam bentuk bubuk dan setelah grafik XRD didapatkan maka jarak antar bidang atom dihitung dengan rumus difraksi Bragg. Rumus Bragg menyatakan hubungan sudut dan interferensi dari bidang-bidang atom.

2. FTIR

Sampel yang akan di karakterisasi menggunakan FTIR adalah Grafit, rGO dan GO dalam bentuk bubuk dan larutan.

3. UV-Vis

UV-Vis yang digunakan adalah Uv-Vis Diffuse Reflectance Spectroscopy (DRS) untuk menentukan band gap dan serapan gelombang pada Grafit, GO dan rGO dalam bentuk bubuk dan bentuk film tipis. Selain itu juga bentuk komposit juga di karakterisasi DRS menggunakan bentuk film tipis.

4. SEM

SEM digunakan untuk melihat struktur dari GO dan komposit nano. SEM dilakukan dengan kondisi sampel berbentuk film tipis.

3.5. Pengukuran Performa DSSC

Performansi DSSC diukur dengan cara standard 0.05 mW/cm². Grafik antara tegangan dan rapat arus akan didapatkan sehingga parameter-parameter yang diharapkan untuk menghitung efisiensi sel surya dapat diketahui. Pengukuran ini dilakukan dengan solar cell simulator.

BAB 4

SINTESIS rGO DAN KOMPOSIT NANO rGO-TiO₂

Langkah pertama dalam penelitian ini adalah membuat grafin oksida tereduksi untuk dibuat menjadi bahan fotoanoda dalam sel surya tersensitasi zat pewarna. Material ini akan digunakan dalam dua bentuk yaitu sebagai lapisan antara kaca ITO dan TiO₂ dan sebagai komposit nano dicampur dengan TiO₂. Untuk mengkonfirmasi pembentukan GO dan rGO digunakan karakterisasi XRD, SEM, FTIR dan DRS. Sedangkan untuk mengkonfirmasi apakah sudah terbentuk komposit nano digunakan SEM dan DRS.

4.1. Pembentukan rGO

4.1.1. Hasil XRD Grafit, GO dan rGO

Hasil XRD pada penelitian ini digunakan untuk menentukan apakah GO dan rGO sudah terbentuk. Hal ini dapat dikonfirmasi dari posisi puncak-puncak difraksi sinar X yang dihamburkan pada material. Hasil grafik dari XRD dapat dilihat dari Gambar 4.1.

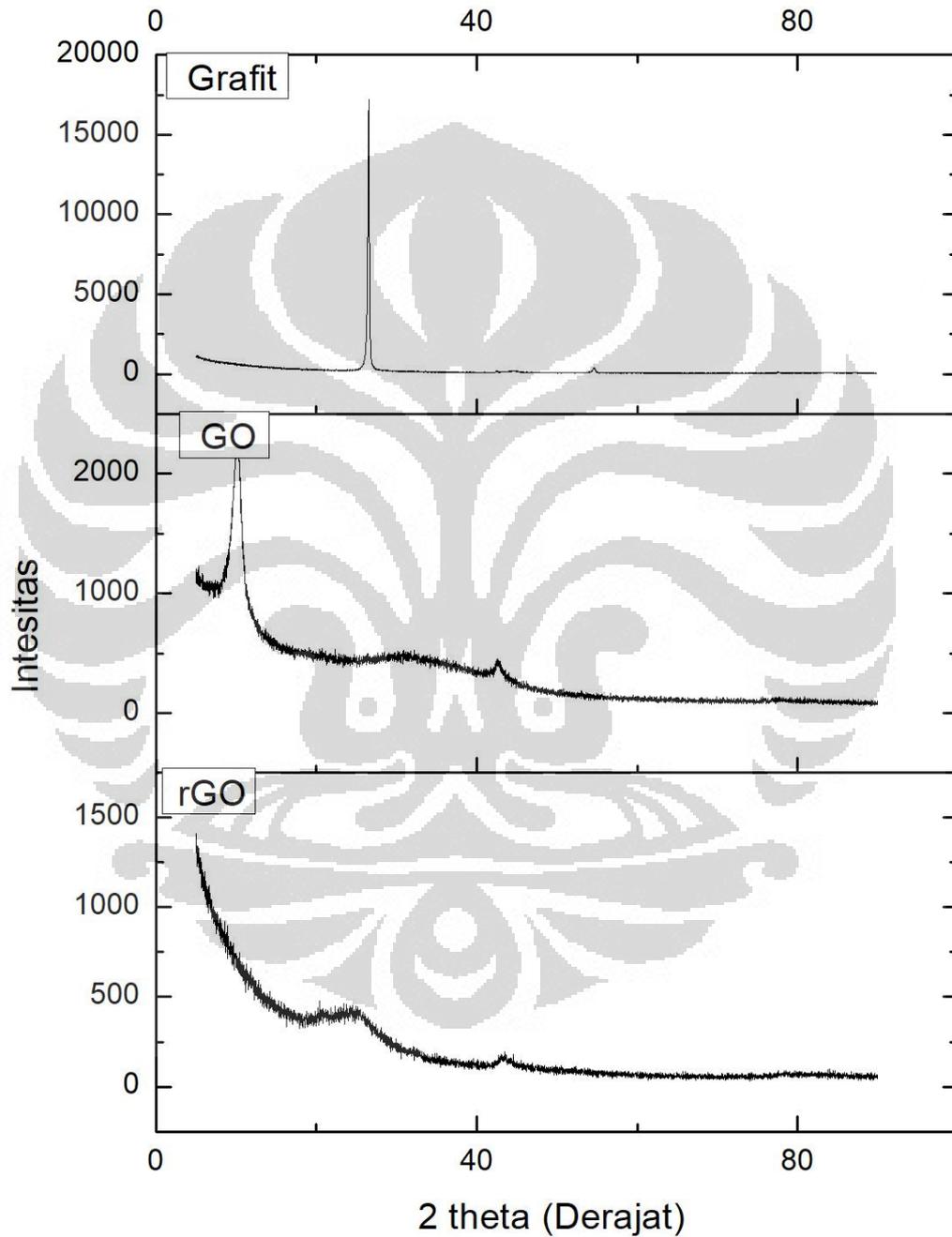
Untuk menganalisa struktur dan panjang kisi biasanya digunakan hukum difraksi Bragg yang dinyatakan dengan berikut ini.

$$2d \sin \theta = m\lambda \quad (4.1)$$

Dengan d adalah jarak antar kisi, θ adalah sudut difraksi dan m adalah orde dan λ adalah Panjang gelombang dengan satuan masing-masing menyesuaikan. Sehingga letak setiap puncak-puncak difraksi berhubungan dengan jarak antar bidang pada kristal. Dari perbandingan panjang antar kristal didapatkan dapat dihitung untuk menebak bentuk dan jenis kristal.

Dari Gambar 4.1 dapat dilihat bahwa puncak untuk grafit berada di 2θ sebesar 26.50° yang bersesuaian dengan nilai jarak antar bidang hkl sebesar 3.9 \AA dan ini adalah jarak antara lapisan grafin pada grafit. Pada grafik GO terlihat bahwa terjadi pergeseran dan penurunan puncak disertai dengan pelebaran grafik. Pergeseran ini

menjadikan nilai 2θ semakin kecil sehingga secara matematis berdasarkan rumus difraksi bragg maka nilai jarak antar bidang juga melebar. Hasil 2θ GO adalah 10.4° bersesuaian dengan 8.6 \AA



Gambar 4. 1 Grafik XRD dari grafit, GO dan rGO hasil sintesis

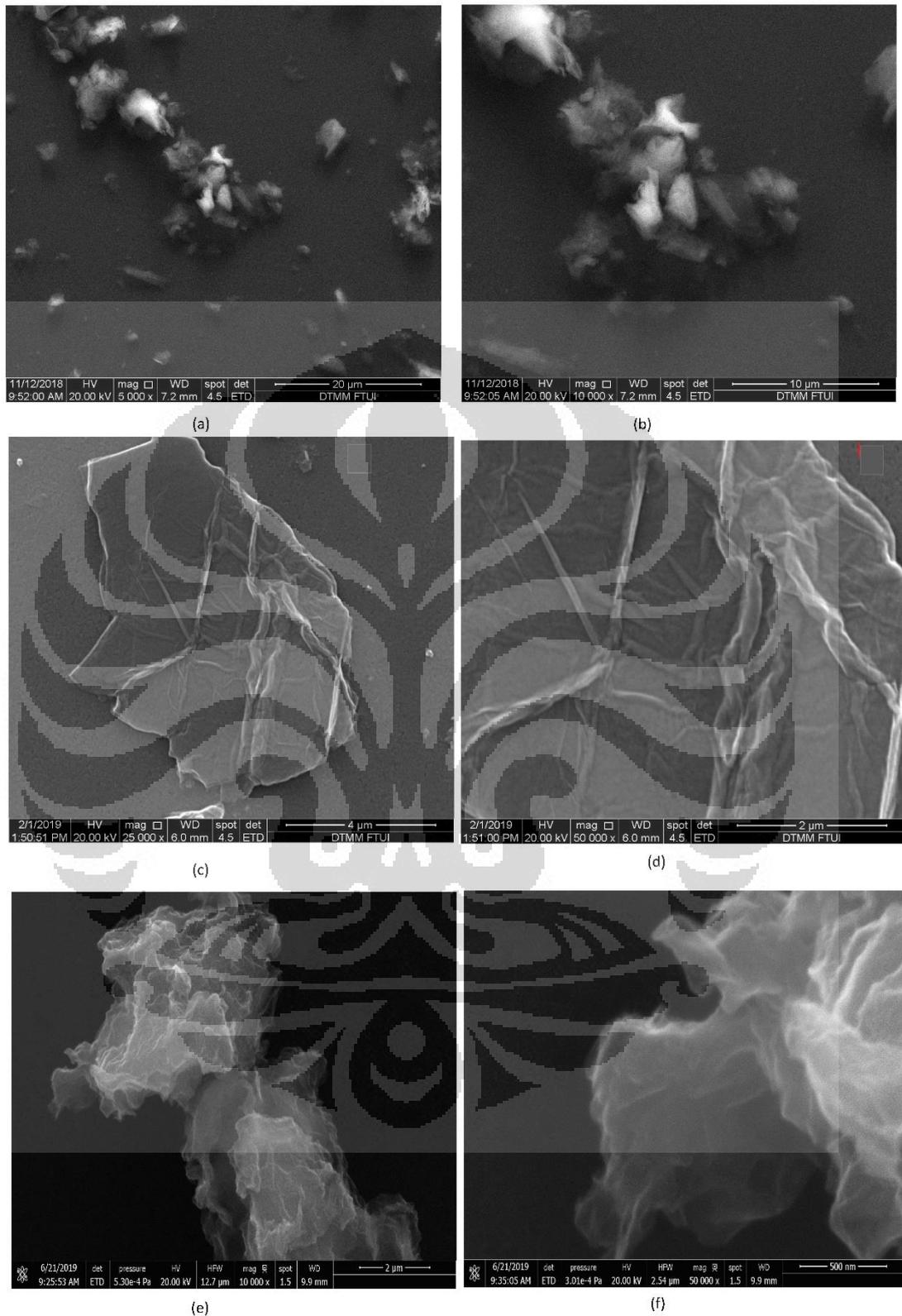
sehingga dapat disimpulkan bahwa telah terjadi exfoliasi antar lapisan grafin pada grafit dengan terjadinya relaksasi jarak antar lapisan [4, 24, 29, 30]. Maka pada saat ini GO sudah terbentuk sehingga jarak antar lapisan sudah saling menjauh sebagaimana tujuan awal dari oksidasi grafit. Jika ditinjau dari segi tinggi puncak grafit dan grafin oksida dapat dilihat bahwa oksidasi yang terjadi ditunjukkan tinggi puncak-puncak tersebut. Puncak dari grafit adalah ± 17000 sementara puncak grafin oksida adalah ± 2200 .

Pada puncak rGO dihasilkan puncak yang cukup pendek dimana posisi puncak hampir sama dengan puncak grafit. Hal ini menunjukkan bahwa reduksi sudah berhasil karena sifat grafit dan grafin adalah mirip, namun berbeda dalam dimensinya. Semakin besar pergeseran maka semakin tinggi derajat oksidasi karena jarak antar lapisan semakin besar. Lebarnya puncak rGO dan GO pada posisi yang sama menunjukkan bahwa ukuran butiran pada hasil oksidasi lebih kecil. Selain itu dapat dilihat bahwa bentuk material semakin amorf dari grafit, GO dan rGO.

Puncak kedua adalah menunjukkan jarak antar ikatan karbon yang berikatan kovalen. Terlihat pada puncak grafit bersesuaian dengan panjang kisi 1.67 \AA , sementara untuk grafin oksida 2.11 \AA dan 2.12 \AA untuk grafin oksida tereduksi. Hal ini dapat dilihat bahwa telah terjadi perubahan panjang jarak antar kisi pada ikatan kovalen akibat oksidasi.

4.1.2. Hasil SEM Grafit, GO dan rGO

Hasil SEM untuk grafit, grafin oksida dan rGO ditunjukkan pada gambar 4.2. Gambar 4.2 (a) dan 4.2 (b) dapat dilihat bentuk grafit berupa serbuk dimana pada pembesaran 5000 X dan 10000 X dimana hasil ini mirip dengan hasil yang dilakukan peneliti S.s Shojaeenezhad et al. [29]. Sementara itu, hasil SEM untuk grafin oksida menunjukkan bahwa telah terjadi eksfoliasi sehingga grafit bubuk sudah menjadi lembaran-lembaran grafin sebagaimana Gambar 4.2 (c) dan Gambar 4.2 (d). Bentuknya adalah seperti kertas basah sebagai lembaran GO yang menunjukkan oksidasi yang dilakukan telah berhasil. Adapun grafin oksida tereduksi secara mikrostruktur hampir sama dengan grafin oksida. Hasil ini mirip dengan hasil-hasil peneliti yang lain [21, 25, 29].

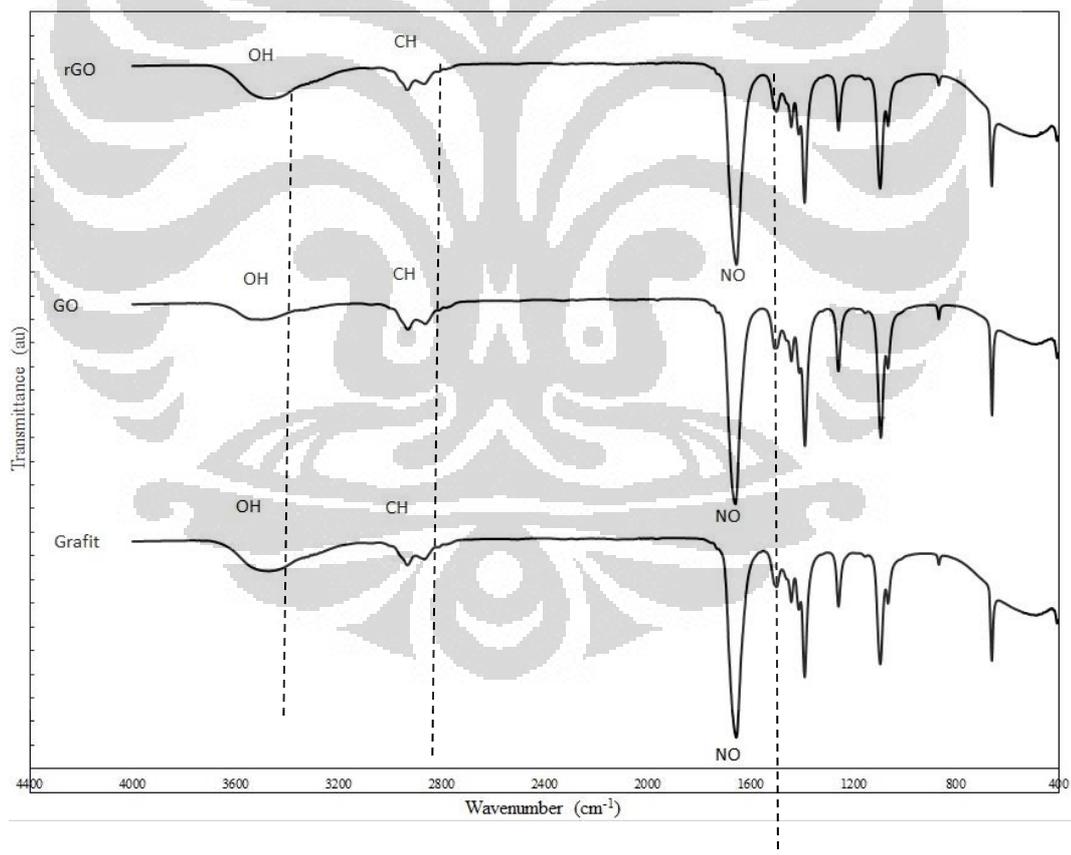


Gambar 4. 2 Hasil SEM Grafit, GO dan rGO, **a-b** adalah SEM Grafit untuk pembesaran 5000 X dan 10000 X, **c-d** adalah SEM GO untuk perbesaran 25000X dan 50000X, **e-f** adalah SEM rGO untuk pembesaran 20000 X dan 50000 X

Pada Gambar 4.2 (c) dengan pembesaran 25000 X dapat dilihat 1 buah lembar grafin oksida yang sudah dihasilkan dari proses eksfoliasi grafit. Ketika dibuat dengan pembesaran yang lebih besar dapat dilihat lebih detail bahwa memang proses oksidasi sudah terjadi dengan hasil yang baik sehingga terbentuk lembaran seperti pada Gambar 4.2 (c).

Gambar 4.2 (e) dan 4.2 (f) menunjukkan bentuk lembaran-lembaran rGO dengan pembesaran 20000 X dan 50000 X dimana dapat dilihat bahwa sebagian lembaran bertindih dengan lembaran lain sedangkan sebagian lainnya masih membentuk lembaran grafin. Secara mikrostruktur bahwa grafin oksida sudah terbentuk saat dioksidasi dan berubah menjadi rGO saat dioksidasi.

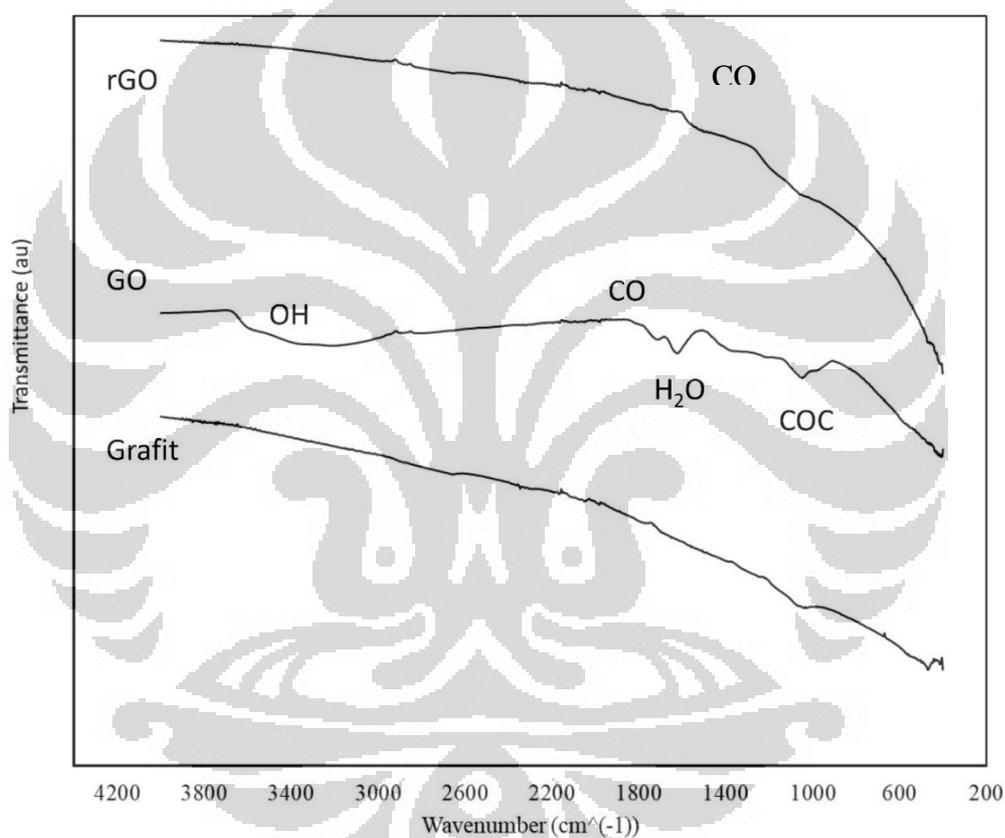
4.1.3. Hasil FTIR Grafit, GO dan rGO



Gambar 4. 3 Hasil FTIR dalam bentuk larutan dengan pelarut DMF

Sampel FTIR yang hasilnya pada Gambar 4.3 dibuat dalam bentuk larutan dengan pelarut DMF sehingga sebagian unsur pelarut banyak masuk dalam larutan dari

puncak-puncak serapan berikut ini. Dari bentuk pola yang ditemukan dapat dilihat bahwa bentuk yang paling diperhatikan adalah lembah hidroksida OH yang berada antara $3000\text{-}3500\text{ cm}^{-1}$ dapat dilihat bahwa intensitas lembah OH dari grafin oksida berbeda panjang dengan puncak pada grafit. Hal ini terjadi karena pada saat oksidasi terjadi karena peningkatan jumlah OH pada pada grafit (berubah menjadi GO). Perubahan puncak OH ini menunjukkan telah terjadinya oksidasi. Setelah dilakukan reduksi, lembah kembali menjadi mirip dengan grafit sehingga lembah-lembah pada grafit mirip dengan rGO.



Gambar 4. 4 Hasil FTIR dalam bentuk bubuk untuk Grafit, GO dan RGO

Hasil dengan tren yang mirip dapat dilihat ketika FTIR dilakukan dengan kondisi berupa padatan (dalam bentuk bubuk) sehingga tidak ada pengaruh pelarut. Dari gambar 4.4 dapat dilihat bahwa puncak-puncak FTIR pada grafit dan rGO hampir tidak ada puncak yang tegas dan pola yang mirip antara keduanya. Berbeda hal

dengan GO yang menghasilkan puncak-puncak yang tajam terutama puncak hidroksida.

Hasil FTIR berupa bubuk dapat dilihat bahwa di sekitar 3500 cm^{-1} adalah hasil FTIR untuk OH. Disekitar 1500 cm^{-1} adalah CO ikatan rangkap dan Air sedangkan di sekitar 1000 cm^{-1} adalah COC ikatan tunggal. Dari grafik dapat dilihat bahwa pada saat grafik dioksidasi menjadi GO, maka puncak OH muncul dan hilang kembali saat direduksi. Hal ini menunjukkan bahwa proses pembuatan rGO sudah efektif. Hasil ini sesuai dengan hasil peneliti lain sesuai dengan tren tersebut [3, 4, 31].

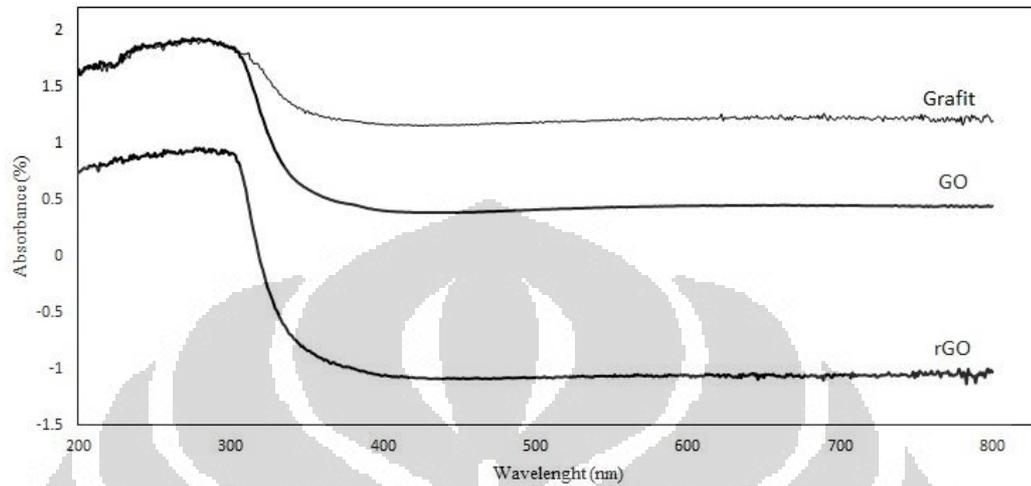
4.1.4. Hasil DRS Grafit, GO dan rGO

Hasil dari karakterisasi DRS pada grafit, GO dan RGO dalam bentuk film tipis ditunjukkan pada Gambar 4.5 dimana hasil absorbansi dari grafit, GO dan rGO semakin menuju ke gelombang yang lebih kecil. Dengan kata lain bahwa pada spektrum gelombang cahaya tampak tidak terjadi penyerapan sehingga diharapkan bahwa rGO akan meneruskan gelombang sinar tampak dari fotoanoda ke pewarna untuk mengoptimalkan penyerapan cahaya matahari. Bentuk kurva seperti ini sesuai dengan hasil yang didapatkan oleh peneliti lain yang membandingkan tiga metode fabrikasi GO berupa metode Hummer, metode hummer yang ditingkatkan dan metode hummer yang dimodifikasi bahwa penyerapan GO di bawah sinar cahaya tampak [31, 32]

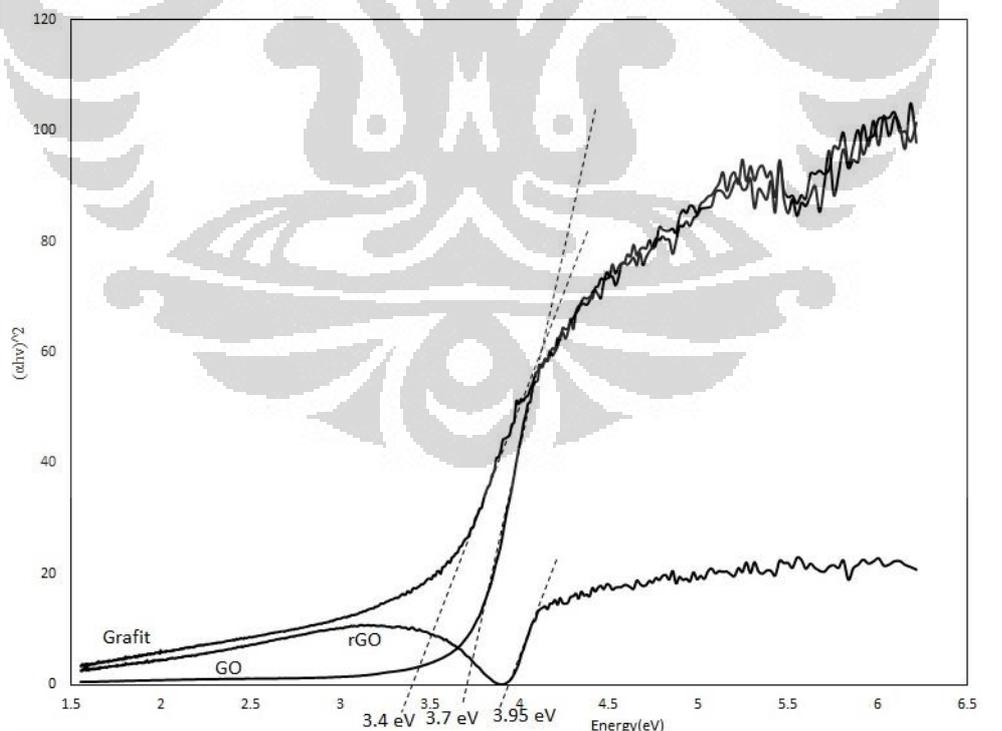
Hasil perhitungan energi celah pita dari hasil DRS pada Gambar 4.6 untuk grafit, GO dan rGO berturut-turut adalah 3.4, 3.7 dan 3.95 eV. Hasil-hasil ini diperoleh dengan metode Tauc plot sehingga didapatkan besar energi yang menyentuh sumbu X ketika garis lurus ditarik. Hal ini sesuai dengan model Tauc bahwa absorbansi kuadrat sebanding dengan selisih gelombang dan energi celah pita.

Gambar 4.7 menunjukkan kurva dan penyerapan grafit, GO dan rGO berurutan dalam bentuk bubuk. Dapat dilihat bahwa baik dalam bentuk bubuk atau film tipis penyerapan pada gelombang cahaya tampak tidak didapatkan adanya puncak penyerapan. Dari Gambar 4.8 dibuat grafik antara penyerapan dengan energi sehingga didapatkan plot untuk mendapatkan energi celah pita optis dari grafit, GO dan rGO. Hasil perhitungan berturut-turut untuk grafit, GO dan rGO adalah 4.47,

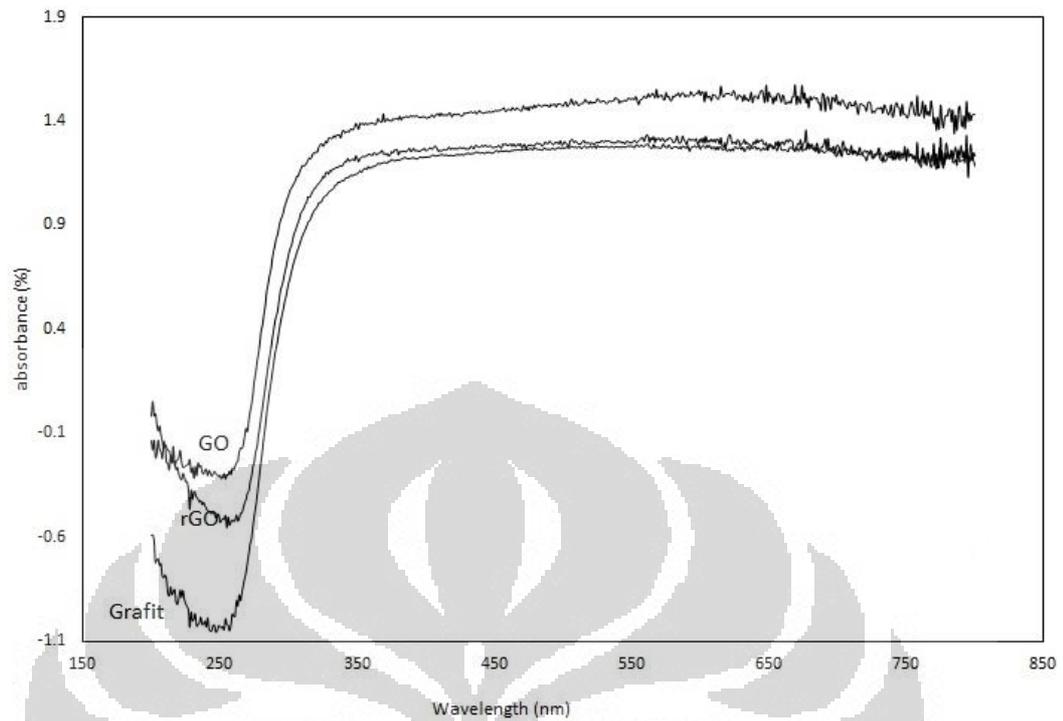
4.62 eV dan 4.49 eV. Dalam bentuk film tipis bahwa energi celah pita naik ketika dioksidasi dan reduksi. Sementara itu dalam bentuk bubuk, energi celah pita naik ketika dioksidasi dan kembali turun ketika direduksi.



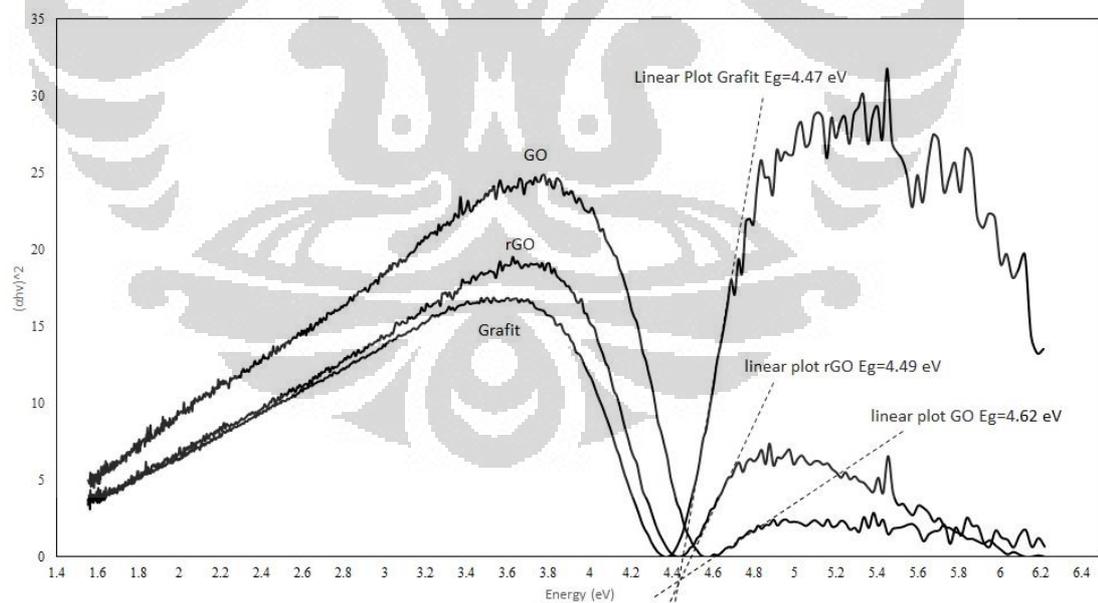
Gambar 4. 5 hasil DRS dari grafit, Grafin Oksida dan Grafin oksida tereduksi dalam bentuk thin film pada kaca ITO



Gambar 4. 6 Kurva hasil Plot Tauc untuk mendapatkan energi celah pita dari Grafit, GO dan rGO bentuk film tipis



Gambar 4. 7 Hasil DRS dari grafit, GO dan rGO dalam bentuk bubuk.

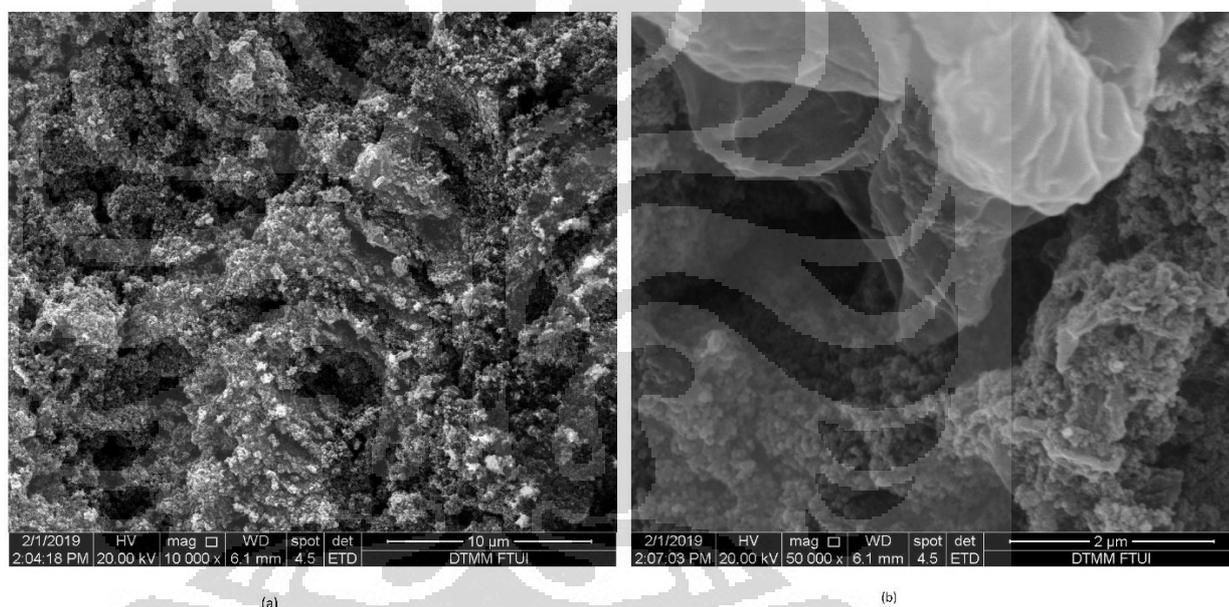


Gambar 4. 8 Linear Plot Tauc Model untuk menentukan energi celah pita untuk Grafit, GO, rGO bentuk bubuk

4.2. Pembentukan Komposit Nano

4.2.1. Hasil SEM Komposit Nano

Komposit nano terbentuk sesuai dengan yang diharapkan dimana rGO bercampur dengan TiO_2 merata dapat dilihat pada Gambar 4.9 (a) dengan pembesaran 10000X dimana yang berwarna terang adalah grafina oksida tereduksi dan partikel yang agak gelap adalah titanium oksida. Gambar 4.9 (b) adalah SEM komposit nano untuk pembesaran 50000 X dan dapat dilihat bahwa bagian terang terlihat lebih jelas dan merata. Hasil dari bentuk komposit nano ini sesuai dengan gambar yang didapatkan oleh peneliti lain yang dilakukan pada tahun 2016 oleh S.A. Kazmi et al.[26].



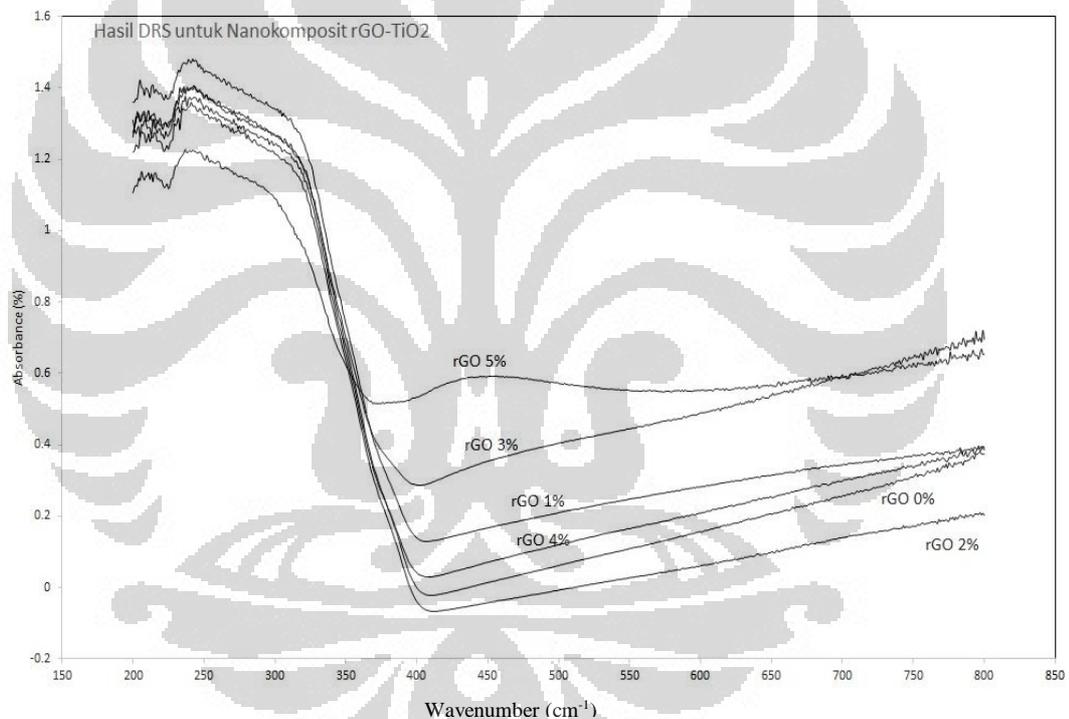
Gambar 4. 9 Hasil SEM untuk komposit nano berbagai pembesaran (a) 25000X, dan (b) 50000X

4.2.2. Hasil DRS komposit nano

Hasil DRS untuk komposit nano ditunjukkan pada Gambar 4.10 dimana dari gambar tersebut dapat dihitung bandgap untuk setiap jenis konsentrasi rGO. Dari hasil tersebut dapat dilihat bahwa absorbance tinggi gelombang diantara 200-400nm dimana gelombang ini adalah gelombang yang energinya lebih tinggi dari cahaya tampak sehingga diharapkan bahwa cahaya tampak akan diteruskan. Hasil

ini bersesuaian dengan hasil penelitian dari peneliti yang menginvestigasi pengaruh grafen dan pada komposit nano TiO₂-Grafen [26].

Dari nilai energi celah pita dapat dilihat untuk masing-masing komposisi komposit nano pada Tabel 4.1 yang didapatkan dari ekstrapolasi linear kurva dengan model tauc dimana hasil energi celah pita sekitar 3.4 eV. Adapun gambar kurva lebih detail ditampilkan pada lampiran 1. Umumnya hasil penelitian menunjukkan bahwa hasil energi celah pita untuk TiO₂ adalah sekitar 3.4 eV tergantung pada bentuk dari TiO₂ yang didapatkan dari nilai pita velensi -7.6 eV dan pita konduksi -4.2 eV. Sehingga dapat disimpulkan bahwa hasil yang didapatkan pada penelitian ini menguatkan penelitian-penelitian sebelumnya tentang energi celah pita dari TiO₂.



Gambar 4. 10 Hasil DRS dari berbagai komposisi RGO dan Titanium Oksida

Tabel 4. 1 Hasil Perhitungan Energi Celah Pita (Bandgap) dari Komposit nano TiO₂-rGO dengan persentase rGO yang berbeda-beda

No	Persen rGO (%)	Energi Celah Pita (eV)
1	0	3.38
2	1	3.48
3	2	3.48
4	3	3.48
5	4	3.46
6	5	3.38

Bentuk komposit nano yang adalah film tipis yang merupakan gabungan dari TiO₂ dan rGO. Dalam penelitian ini didapatkan bahwa TiO₂ tanpa rGO memiliki energi celah pita 3.38 eV sementara untuk rGO tanpa TiO₂ memiliki energi celah pita 3.95 eV. Sebagai komposit nano maka energi celah pita nya akan dipengaruhi oleh energi celah pita kedua bahan dasarnya. Dan dapat dilihat bahwa energi celah pita di sekitar 3.4 eV dimana angka ini lebih dekat ke energi celah pita yang TiO₂. Hal ini dipengaruhi oleh konsentrasi dari rGO yang lebih sedikit dari TiO₂ sehingga nilai energi celah pita lebih dekat ke energi celah pita TiO₂.

BAB 5

PERFORMA DSSC

DSSC dalam penelitian ini dibuat dalam empat bentuk fotoanoda yaitu sel surya DSSC standar dengan hanya menggunakan ITO dan TiO₂. Bentuk kedua adalah bentuk komposit nano rGO-TiO₂ dimana keduanya dicampur dalam bentuk bubuk kemudian dilarutkan menjadi koloid. Bentuk ketiga adalah dalam bentuk lapisan antara ITO dan TiO₂ dimana larutan rGO dibuat dalam bentuk lapisan diantara ITO dan TiO₂. Di bawah ini akan dijelaskan masing-masing hasil yang didapatkan dari kedua bentuk fotoanoda diatas.

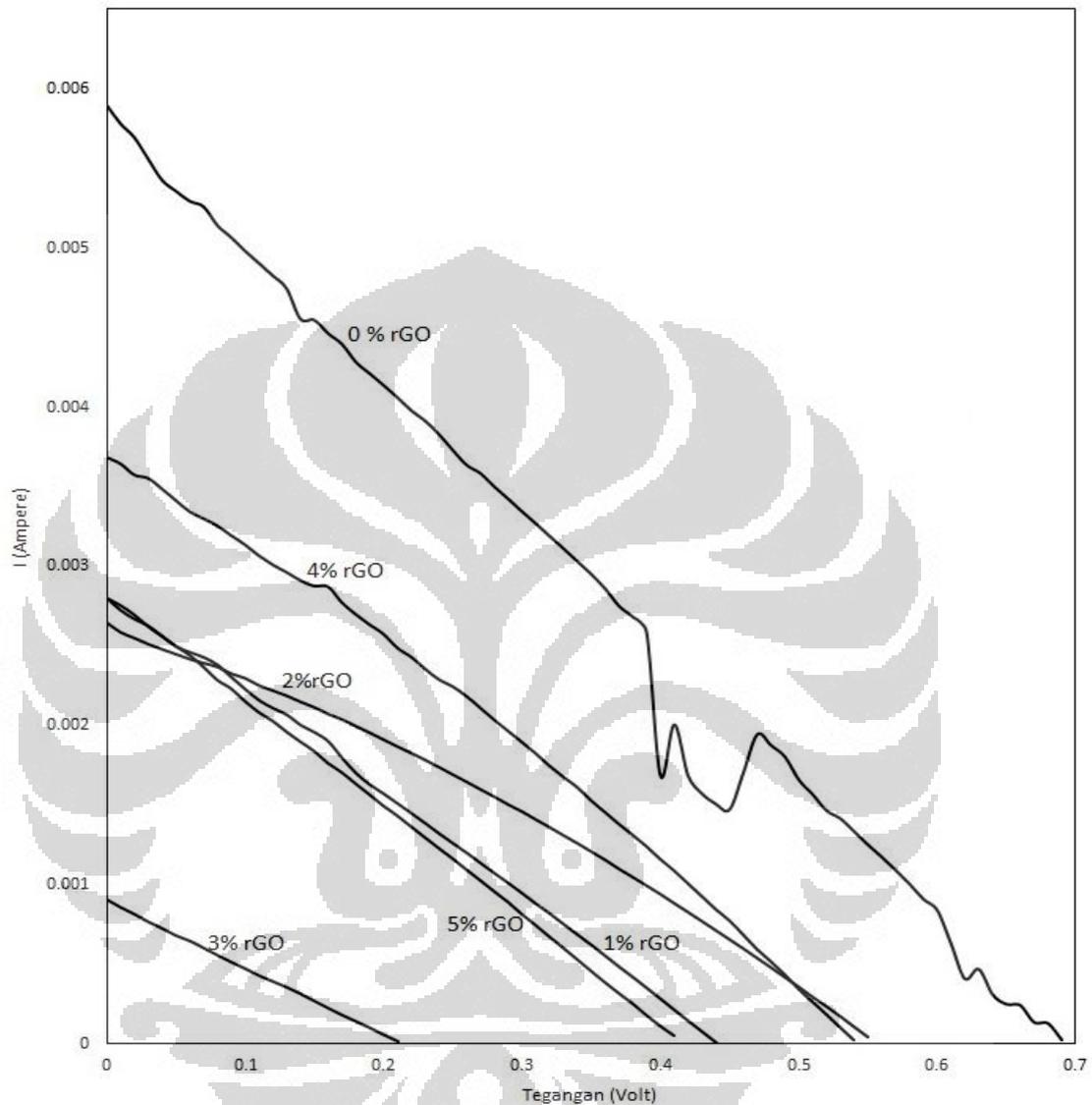
5.1. Performansi DSSC untuk fotoanoda komposit nano

Dari Gambar 5.1 dapat dilihat bahwa sel surya DSSC sudah terbentuk dengan adanya pola kurva arus-tegangan. Dari kurva dapat dilihat bahwa luasan daerah di bawah kurva merupakan salah satu parameter performa sel surya yaitu *fill factor* (*FF*). Jika luas di bawah kurva besar maka dapat ditarik sebuah kesimpulan bahwa kualitas sel surya baik. Maka perbedaan luas dapat menggambarkan perbedaan parameter lain yang ada pada performa sel surya seperti I_{sc} , V_{oc} dan *FF*.

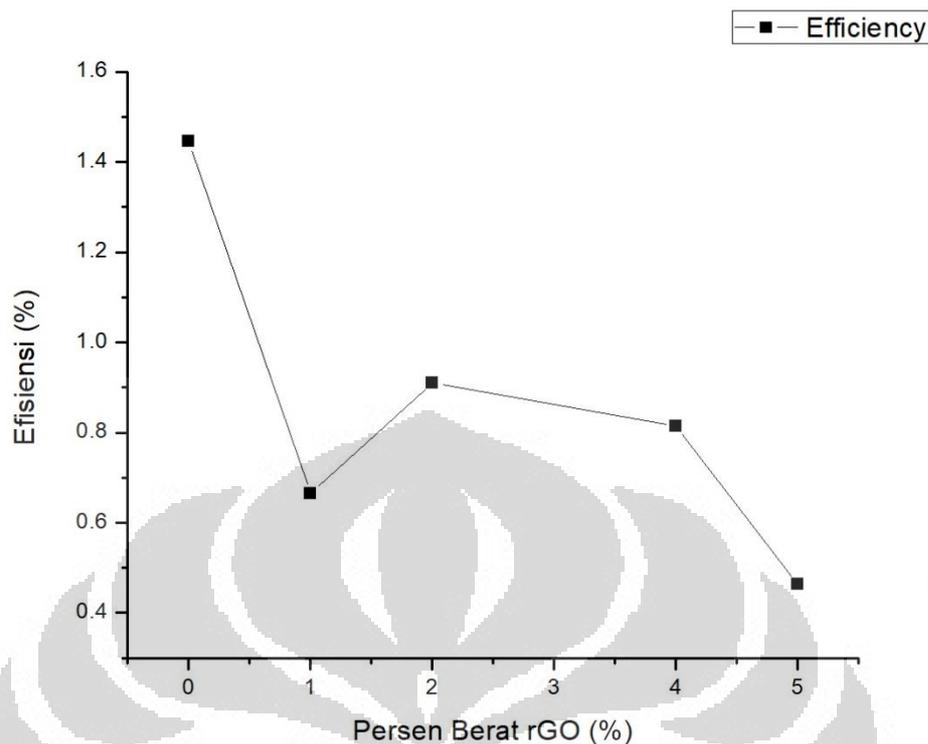
Dari Gambar 5.1 tersebut dapat dilihat bahwa luas yang terbesar adalah pada sel surya yang dijadikan sebagai standar dengan kandungan rGO sebesar 0%. Hal ini sesuai dengan hasil efisiensi dimana efisiensi tertinggi adalah pada sel surya standar dengan efisiensi 1.45%. Semakin banyak jumlah rGO efisiensi semakin rendah. Hasil yang sangat turun drastis terdapat pada saat rGO 3%. Kemungkinan terjadi adalah kesalahan di fabrikasi sehingga efisiensi ini sangat jauh dibandingkan yang lainnya.

Efisiensi dari sel surya ditunjukkan pada Gambar 5.2 dimana terlihat penurunan efisiensi dengan bertambahnya konsentrasi rGO. Hasil ini sangat rendah jika dibandingkan dengan DSSC yang umumnya dibuat dimana sudah bisa mencapai diatas 10%. Nilai V_{oc} , I_{sc} dan *FF* ditunjukkan pada Tabel 5. 1 dimana dapat dilihat pada tabel serta grafik bahwa tren efisiensi mengikuti tren untuk ketiga parameter

lainnya. Hal ini sesuai dengan hubungan efisiensi dan ketiga variable lainnya berbanding lurus.



Gambar 5. 1 Hasil Kurva I-V pengujian DSSC untuk fotoanode komposit nano untuk kandungan rGO 0, 1, 2, 3, 4 dan 5 wt%.



Gambar 5. 2 Efisiensi Sel Surya DSSC untuk persen berat rGO

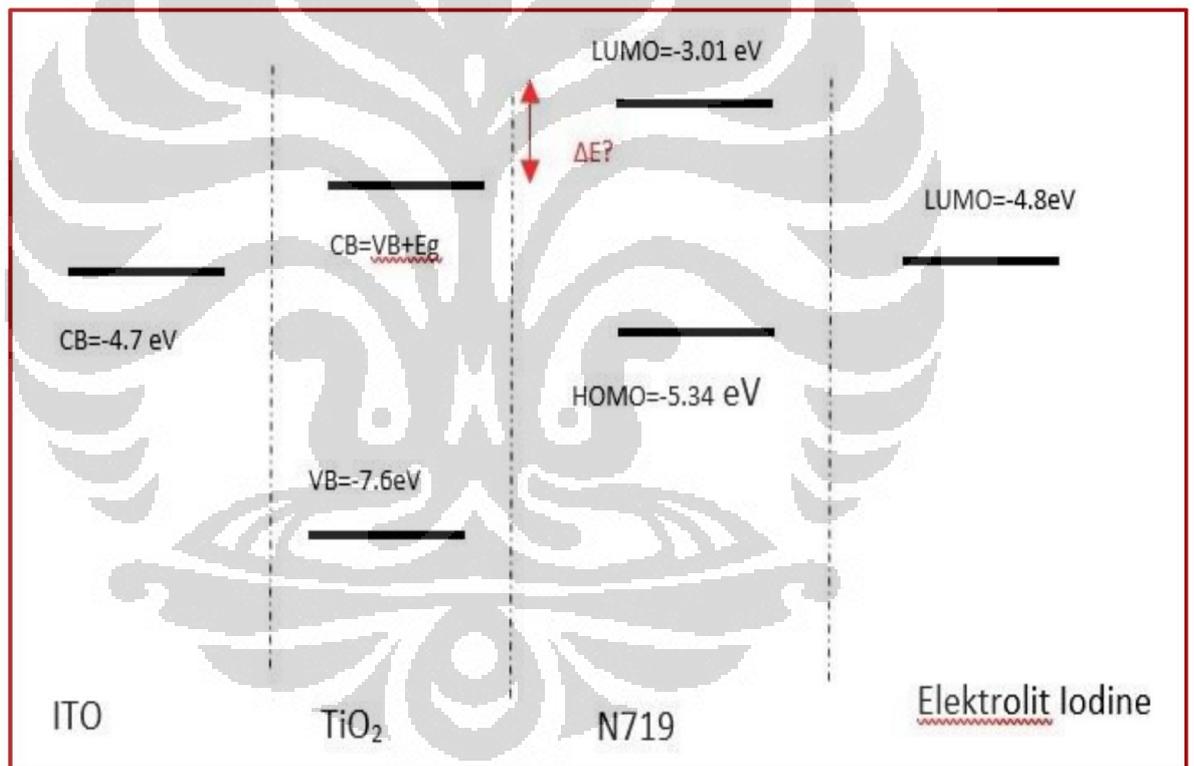
Tabel 5. 1 Hasil I_{sc} , V_{oc} , FF dan efisiensi dari DSSC dengan Komposit nano sebagai fotoanoda

Persentase rGO (%)	I_{sc} (A)	V_{oc} (V)	FF	Eff (%)
0	0.0059	0.69	0.18	1.45
1	0.0028	0.44	0.12	0.67
2	0.0027	0.55	0.18	0.91
3	0.0009	0.21	0.06	0.09
4	0.003	0.54	0.17	0.82
5	0.002	0.41	0.12	0.46

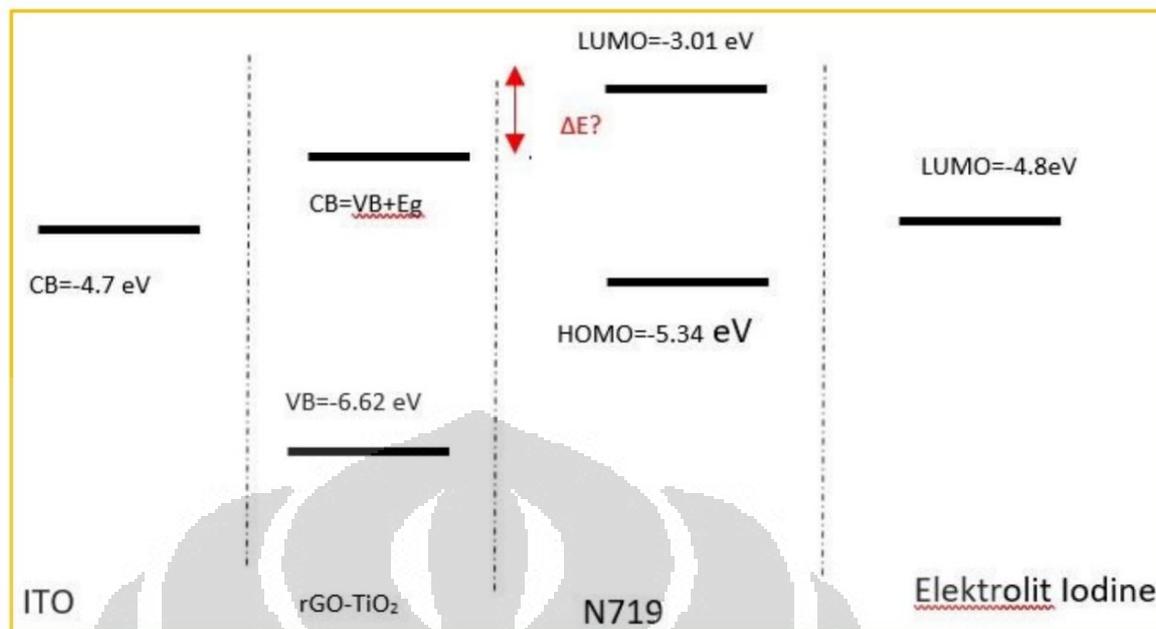
Rekombinasi elektron disebabkan oleh beberapa faktor seperti selisih antara LUMO pewarna dan energi pita konduksi dari semikonduktor dan konduktivitas (mobilitas elektron) dari semikonduktor. Mobilitas elektron dari grafen murni adalah sekitar $200.000 \text{ cm}^2\text{v}^{-1}\text{s}^{-1}$ yang menunjukkan nilai yang sangat bagus untuk menghalangi terjadinya rekombinasi elektron. Namun grafen dan rGO jelas berbeda bahwa konduktivitas atau elektron mobilitas dari rGO bervariasi tergantung pada proses

pembuatan dan hasilnya. Sehingga dapat dicurigai bahwa kecilnya efisiensi akibat dari masih banyaknya rekombinasi elektron berasal dari masalah mobilitas elektron ini.

Hasil pada Tabel 5.1 bahwa didapatkan nilai V_{oc} dan I_{sc} sekitar 0.5 V dan sekitar 3 mA yang cukup besar jika dibandingkan dengan hasil jika menggunakan pewarna organik. Nilai FF juga lumayan besar jika dibandingkan dengan hasil dengan pewarna organik [9]. Efisiensi yang dihasilkan pun lebih besar dari yang menggunakan organik. Namun hasil ini sangat rendah jika dibandingkan dengan hasil yang diperoleh dari pewarna yang sama. Untuk jenis komposit nano grafen- TiO_2 didapatkan efisiensi tertinggi 8.2% [12].



Gambar 5. 3 Diagram Energi untuk DSSC Standard



Gambar 5. 4 Diagram Energi untuk DSSC dengan Komposit Nano TiO_2 -rGO sebagai fotoanoda

Tabel 5. 2 Hasil Perhitungan Energi Celah Pita (bandgap) untuk komposit nano dengan berbagai persentase rGO

Persen rGO	LUMO N719 (eV)	Eg rGO-TiO2 (eV)	VB rGO-TiO2 (eV)	CB rGO-TiO2 (eV)	Delta E
0	-3.01	3.38	-7.6	-4.22	1.21
1	-3.01	3.48	-6.62	-3.14	0.13
2	-3.01	3.48	-6.62	-3.14	0.13
3	-3.01	3.48	-6.62	-3.14	0.13
4	-3.01	3.46	-6.62	-3.16	0.15
5	-3.01	3.38	-6.62	-3.24	0.23

Gambar 5.3 menunjukkan diagram energi untuk masing-masing pita konduksi dan pita valensi atau HOMO dan LUMO untuk masing-masing bagian dari DSSC standar. Dengan mengetahui masing-masing nilai energi tersebut dapat dianalisa efektifitas transfer elektron dari setiap bagian DSSC. Pita valensi TiO_2 berdasarkan perhitungan teoritik didapatkan -7.6 eV sehingga dapat ditentukan energi pada pita

konduksi dengan menambahkan dengan energi celah pita yang didapatkan dari DRS [3]. Hasil nya didapatkan bahwa pita konduksi TiO_2 adalah -4.22 eV. Sehingga selisih antara LUMO dari N719 (pewarna) dan pita konduksi semikonduktor TiO_2 adalah 1.21 eV seperti ditunjukkan pada Tabel 5.2. Angka selisih ini lumayan besar untuk memastikan terjadinya transfer elektron dari pewarna ke semikonduktor.

Gambar 5.4 menunjukkan diagram energi untuk DSSC dengan fotoanoda komposit nano TiO_2 . Berbeda dengan TiO_2 , energi pita valensi untuk komposit nano TiO_2 dan rGO adalah -6.62 eV. Secara teoretik sebenarnya penambahan rGO akan menaikkan energi pita valensi dan menurunkan energi celah pita [12]. Namun pada riset ini energi celah pita justru hampir sama dengan energi celah pita TiO_2 . Sehingga jika ditambahkan dengan energi celah pita, didapatkan energi pada pita konduksi pada angka -3.14 , -3.16 dan -3.24 eV pada persentase rGO yang berbeda-beda seperti pada Tabel 5.2. Hasil perhitungan selisih energi antara LUMO pewarna N719 dan pita konduksi 0.13 , 0.15 dan 0.25 eV dimana hasil ini sangat rendah untuk menjamin efektifitas tranfer elektron dari pewarna ke semikonduktor. Berdasarkan referensi bahwa setidaknya selisih LUMO pewarna dan pita konduksi semikonduktor adalah 0.3 eV untuk menjamin efektifitas transfer elektron. Sehingga inilah kemungkinan besar penyebab rendahnya efisiensi dari DSSC ini yang diakibatkan terjadinya rekombinasi elektron.

5.2. Performa DSSC untuk rGO sebagai Lapisan antara ITO dan TiO_2

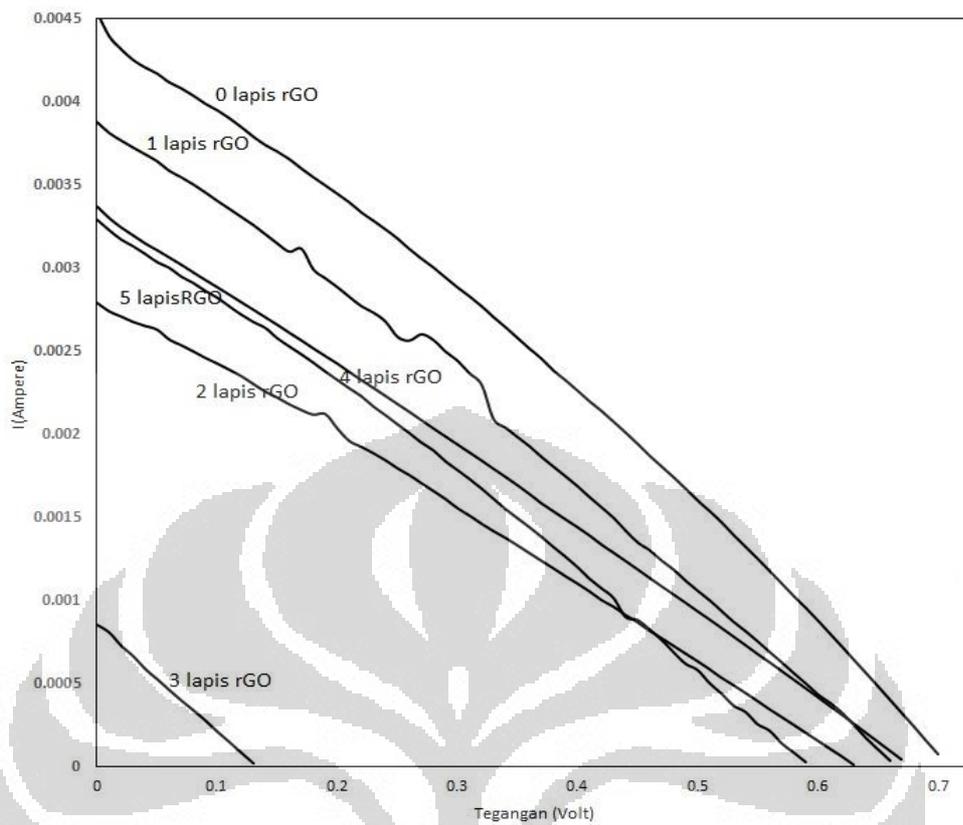
Sebagaimana dijelaskan sebelumnya bahwa luas di bawah grafik menggambarkan performa sel surya. Pada gambar tersebut dapat dilihat bahwa luas terbesar adalah saat tidak ada lapisan rGO antara ITO dan TiO_2 . Ketika dibuat satu lapisan maka grafik bergeser lebih kedalam yang menunjukkan penurunan performa sel surya.

Data efisiensi dapat dilihat pada Gambar 5.3 dimana efisiensi tertinggi didapatkan pada fotoanoda yang tidak ada lapisan antara ITO dan TiO_2 . Dan terjadi variasi efisiensi di bawah efisiensi sel surya sel surya standar dimulai dari 1.13% pada satu lapisan rGO. Variasi efisiensi nya ditunjukkan pada gambar 5.4 yang membentuk

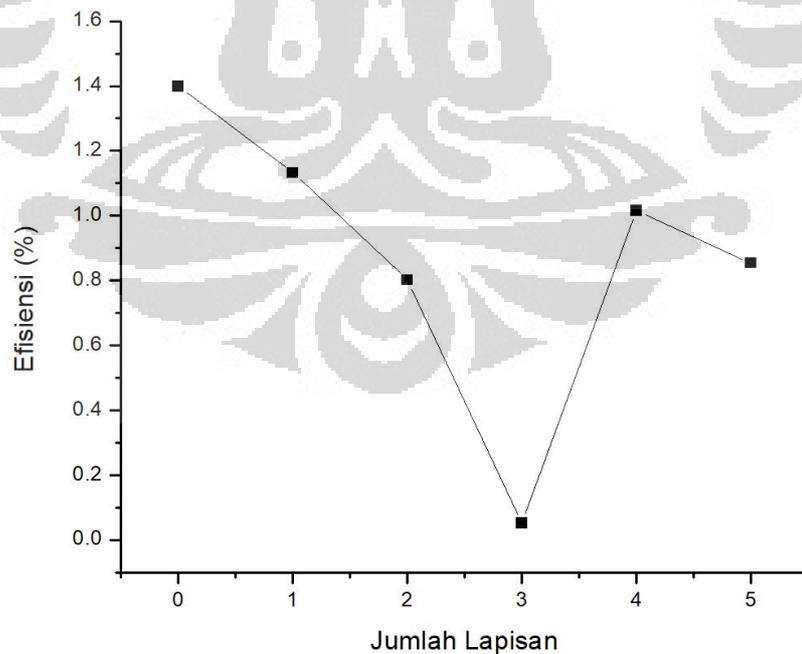
tren yang mirip dengan parameter performa sel surya lainnya yaitu I_{sc} , V_{oc} dan FF yang ditunjukkan pada Tabel 5.2.

Dalam bentuk lapisan antara maka rGO memiliki peran transfer antara ITO dengan TiO_2 . Jika dilihat dari segi energi celah pita, maka nilai energi pita valensi dari grafen adalah sekitar -6.8 eV [14]. Berdasarkan data bahwa energi celah pita dari rGO adalah 3.9 eV maka pita konduksinya adalah -2.9 eV. Energi ini sangat tinggi jika dibandingkan dengan energi pita konduksi dari TiO_2 dimana nilainya sekitar 4 eV [14]. Sehingga pengaruh energi pita celah ini bisa saja menjadi domain utama yang membuat rendahnya hasil efisiensi pada penelitian ini. Namun hal yang menjadi perhatian adalah bahwa bentuk dari zat mempengaruhi energi pita konduksi dan valensi sehingga data referensi yang digunakan bisa saja memiliki perbedaan. Sehingga pengaruh dari pada rekombinasi elektron bisa saja masih memiliki peran besar yang membuat sel surya ini kurang dalam hal efisiensi.

Gambar 5.7 menunjukkan diagram energi untuk DSSC dengan adanya lapisan rGO antara ITO dan TiO_2 sehingga dapat dilihat bahwa transfer elektron dari TiO_2 melewati rGO. Berdasarkan referensi bahwa energi pita valensi rGO adalah -6.8 eV sedangkan energi celah pita adalah 3.95 eV sehingga energi pita konduksi rGO menjadi -2.85 eV. Sementara itu energi pita konduksi TiO_2 adalah -4.22 eV dimana energi ini lebih rendah dari energi pita konduksi rGO sehingga dapat dipastikan transfer elektron antara TiO_2 dan rGO pada masing-masing pita konduksi tidak terjadi. Transfer elektron dari TiO_2 langsung ke ITO sehingga rGO berperan sebagai konduktor. Transfer elektron dengan rGO antara ITO dan TiO_2 dua kali lebih cepat dibandingkan tanpa rGO, namun lebih lambat jika langsung ke pita konduksi. Hal inilah yang menyebabkan hasil pada penelitian ini kurang optimal karena rekombinasi elektron dan generasi elektron adalah dua hal yang berkenaan dengan rebutan waktu [9]. Jika generasi elektron tidak terjadi pada jangka waktu tertentu akan terjadi rekombinasi.



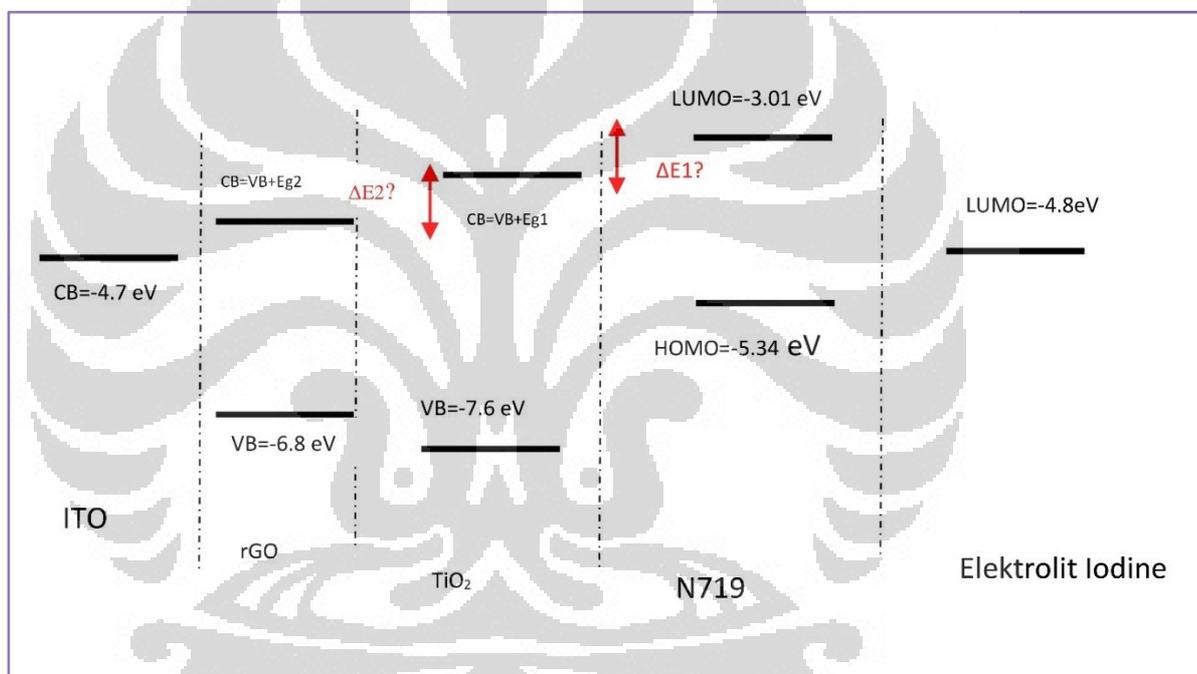
Gambar 5. 5 Kurva I-V sel surya DSSC ketika lapisan rGO dibuat diantara ITO dan TiO₂



Gambar 5. 6 Grafik Efisiensi untuk berbagai jumlah lapisan rGO antara ITO dan TiO₂

Tabel 5. 3 Tabel Hasil Isc, Voc, FF dan efisiensi untuk jumlah lapisan rGO antara ITO dan TiO₂

Lapis	Isc (A)	Voc (V)	FF	eff(%)
0	0.0045	0.7	0.215	1.39
1	0.0039	0.66	0.204	1.13
2	0.0028	0.63	0.18	0.801
3	0.0008	0.13	0.035	0.05
4	0.0034	0.67	0.189	1.015
5	0.0033	0.59	0.175	0.853

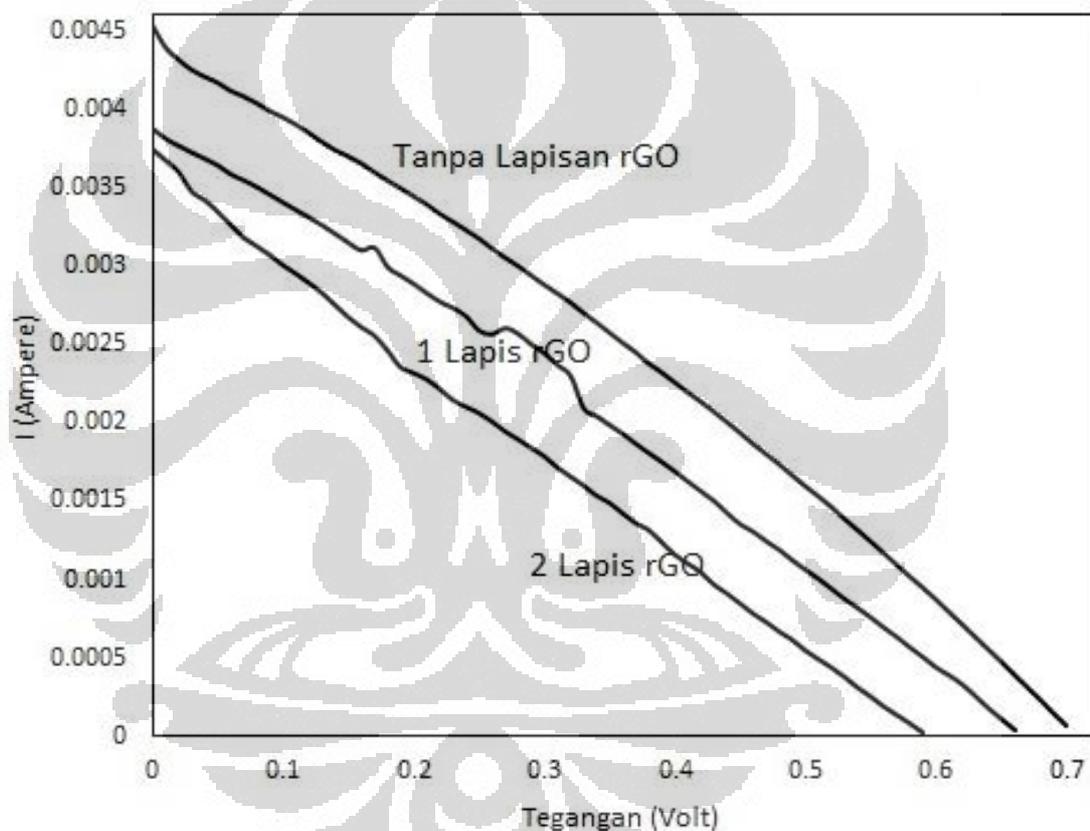
**Gambar 5. 7** Diagram energi dengan lapisan rGO antara ITO dan TiO₂ pada fotoanoda

5.3. Lapisan Selang Seling antara ITO dan TiO₂

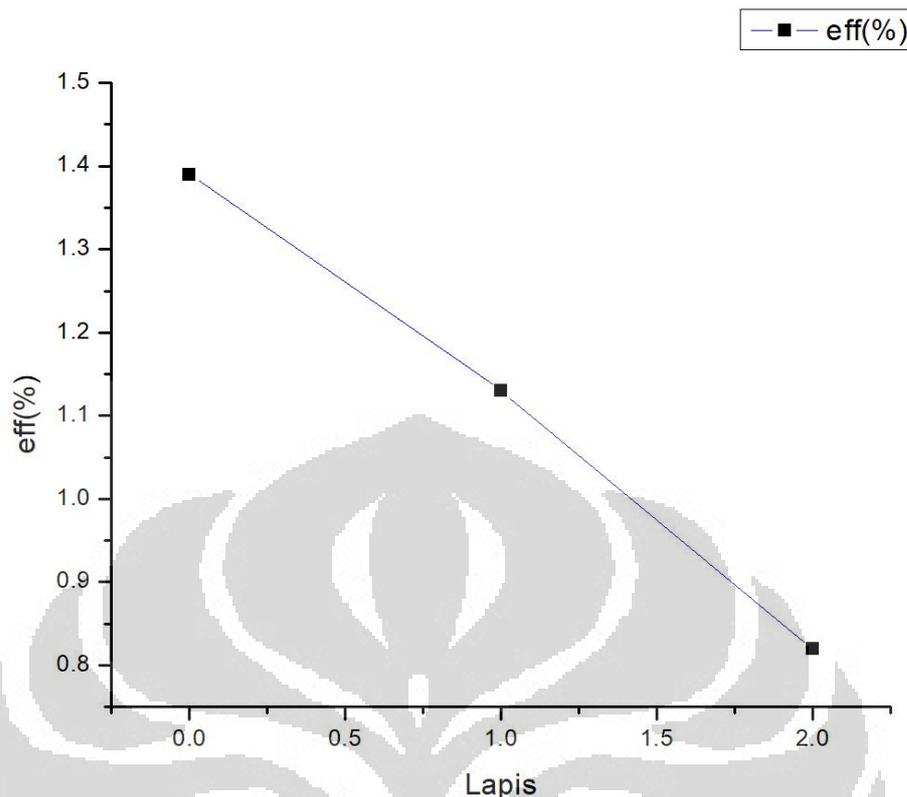
Sel surya berikut ini dibuat dengan adanya lapisan antara ITO dan TiO₂ secara selang seling. Hal ini bertujuan untuk membandingkan apakah hal ini lebih efektif jika lapisan TiO₂ dibuat selang seling. Gambar 5.5 menunjukkan hasil kurva I-V dari sel surya dengan lapisan rGO dan TiO₂ selang seling. Gambar 5.6 menunjukkan hasil efisiensi dimana terjadi penurunan efisiensi dengan penambahan jumlah lapisan selang-seling rGO. Jika dibandingkan dengan hasil yang dalam bentuk lapisan

maka didapatkan bahwa hasilnya untuk dua lapisan mirip dengan yang dibuat tidak selang-seling. Efisiensi lapisan berdasarkan data Tabel 5.3 untuk dua lapisan rGO adalah 0.801% dan sama hamper sama dengan data pada Tabel 5.3 sebesar 0.82%. Hal ini menunjukkan bahwa baik sebagai lapisan antara atau lapisan selang-seling hasil ini tidak jauh berbeda.

Sebagaimana pembahasan di sub bab sebelumnya bahwa hasil perhitungan efisiensi menurun sesuai dengan banyaknya jumlah lapisan. Dan begitu juga untuk tiga parameter lainnya berupa I_{sc} , V_{oc} dan FF seperti ditunjukkan Tabel 5.3.



Gambar 5. 8 Hasil Grafik I-V untuk lapisan rGO selang seling antara TiO_2



Gambar 5. 9 Hasil efisiensi untuk Lapisan selang-seling antara TiO₂ dengan jumlah lapisan rGO yang berbeda-beda

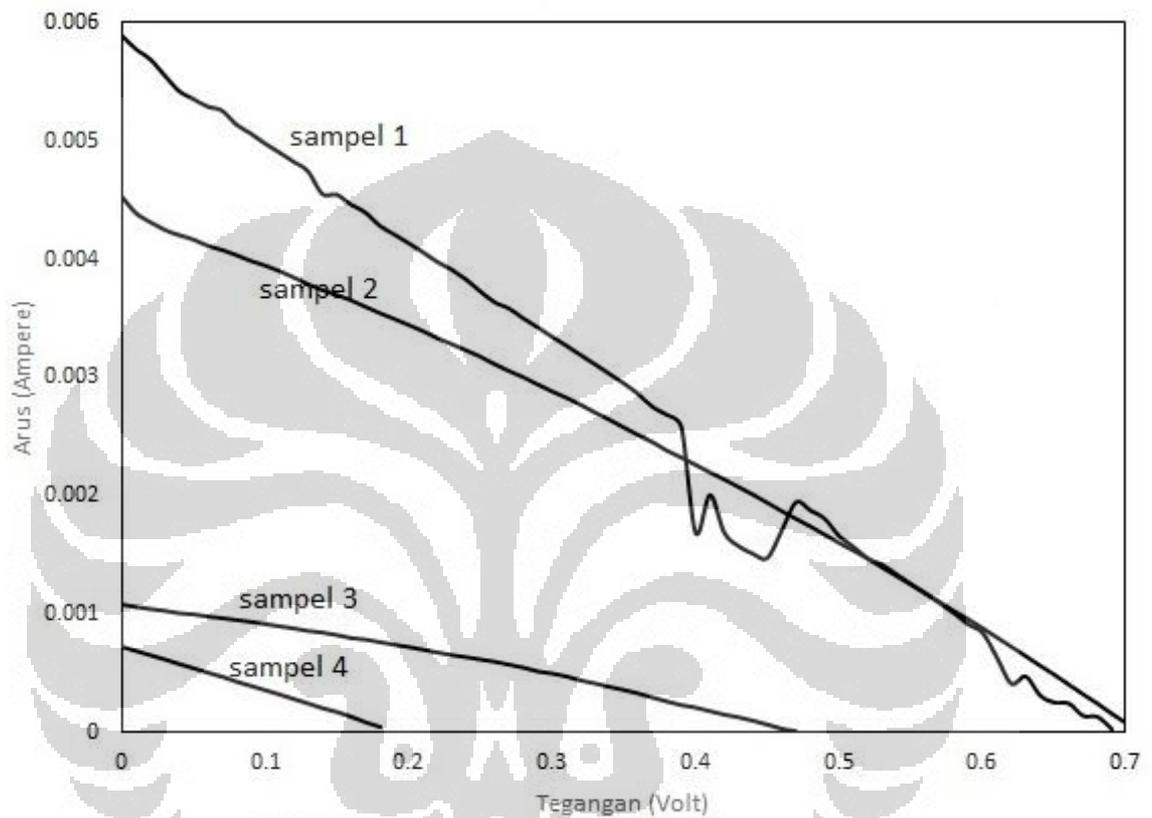
Tabel 5. 4 Tabel hasil Isc, Voc, FF dan efisiensi dari DSSC dengan lapisan rGO selang-seling

Lapis	Isc (A)	Voc (V)	FF	eff(%)
0	0.0045	0.7	0.215	1.39
1	0.0039	0.66	0.204	1.13
2	0.0037	0.59	0.154	0.82

5.4. Pengaruh Pelarut pada Fotoanode

Salah satu bentuk pengembangan yang dilakukan adalah dengan membuat pelarut berbeda untuk membuat koloid fotonoda. Pelarut tersebut adalah air dan DMF. Data-data sebelumnya semua menggunakan air. Karena hasil yang kurang memuaskan, maka ada kecurigaan bahwa rGO tidak terlarut dengan sempurna sehingga dibuatlah dengan pelarut lain berupa DMF. Dari hasil karakterisasi pada Gambar 5.7 dapat dilihat bahwa mengubah pelarut menjadi DMF menurunkan efisiensi. Kedua jenis sel surya ini dibuat dengan kondisi standar tanpa rGO.

Sehingga dapat disimpulkan bahwa DMF sebagai pelarut yang lebih baik untuk rGO tidak cocok untuk menjadi pelarut pada TiO_2 sehingga hasilnya tidak meningkatkan efisiensi sel surya.



Gambar 5. 10 Hasil kurva I-V untuk DSSC standar dengan pelarut berbeda yaitu air (sampel 1 dan 2) dan DMF (sampel 3 dan 4)

BAB 6

KESIMPULAN DAN SARAN

6.1. Kesimpulan

Pengembangan rGO sebagai fotoanoda dalam DSSC telah berhasil difabrikasi pada penelitian ini. Langkah pertama berupa fabrikasi rGO berhasil dilakukan dimana dengan adanya data karakterisasi XRD, SEM, FTIR dan DRS. Dari data XRD didapatkan terjadinya pergeseran puncak-puncak dari bidang disebabkan terjadinya eksfoliasi. Data SEM memperlihatkan adanya perubahan bentuk fisis dari grafit ke grafin oksida dan grafin oksida tereduksi. Dari data FTIR dapat diketahui bahwa puncak hidroksida meningkat saat dioksidasi dan menurun saat direduksi. Dari data DRS dapat dihitung energi celah pita grafit, GO dan rGO 3.4, 3.7 dan 3.95 eV untuk bentuk film tipis dan 4.47, 4.62 dan 4.49 eV untuk bentuk bubuk.

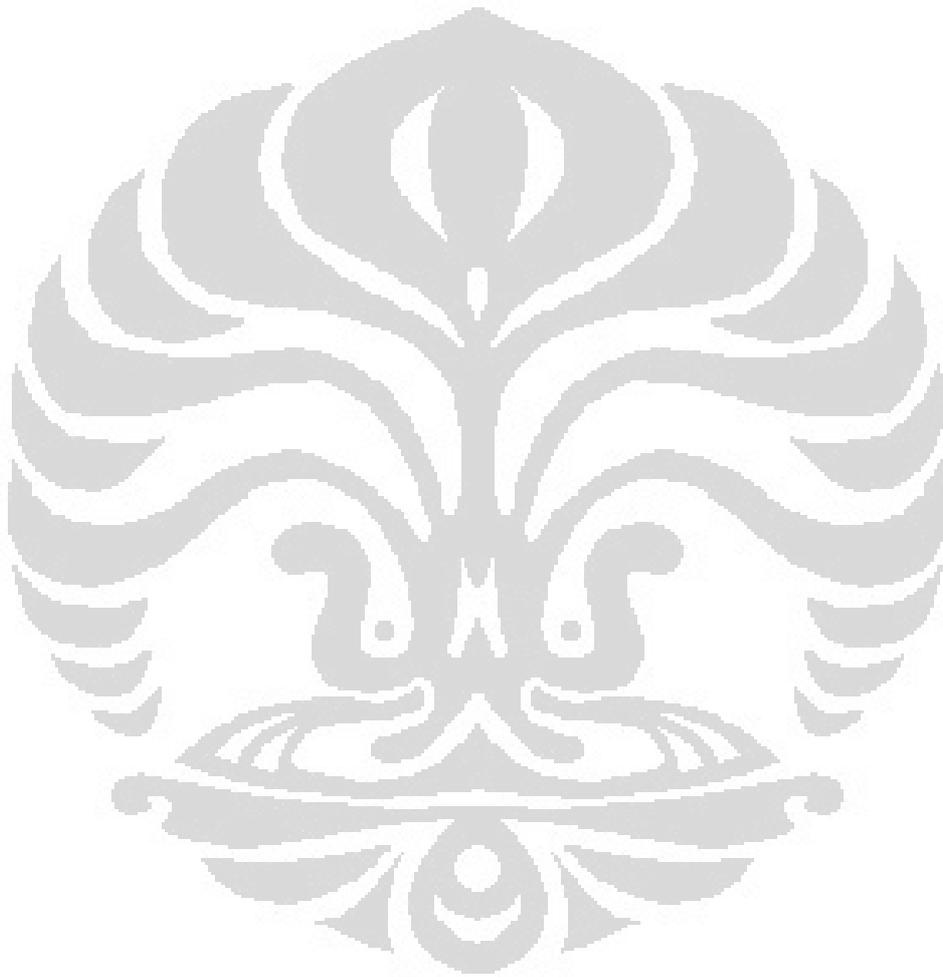
Fabrikasi komposit nano juga berhasil dilakukan pada penelitian ini dikonfirmasi dengan hasil DRS dan SEM. Dari data DRS didapatkan energi celah pita untuk konsentrasi rGO tertentu dan dari SEM dapat dilihat bahwa partikel TiO_2 secara umum menyebar merata dengan rGO. Pengaruh rGO pada efisiensi sel surya dengan fotoanoda komposit nano dapat dilihat dengan penurunan efisiensi pada saat jumlah rGO meningkat. Efisiensi yang diperoleh untuk komposit dengan persentase 0, 1, 2, 3, 4 dan 5 wt% masing-masing 1.45, 0.67, 0.91, 0.09, 0.82 dan 0.46 %. Penurunan efisiensi ini diakibatkan selisih energi LUMO pewarna dan pita konduksi semikonduktor kecil sehingga masih banyak rekombinasi elektron.

Hal yang sama terjadi pada saat rGO dalam bentuk lapisan antara ITO dan TiO_2 . Hasil untuk 0, 1, 2, 3, 4 dan 5 lapis rGO adalah 1.39, 1.13, 0.801, 0.05, 1.05 dan 0.853%. Hal ini disebabkan oleh ketidaksesuaian energi pita konduksi rGO dan LUMO pewarna sehingga tidak terjadi injeksi antara pewarna dan rGO.

6.2. Saran

Dalam penelitian ini bahwa hasil yang diperoleh untuk performa sel surya masih rendah sehingga masih diperlukan peningkatan dalam hal proses sintesis rGO dan

fabrikasi DSSC. Proses sintesis rGO bisa menggunakan metode lain seperti metode Hummer yang dimodifikasi (*Modified Hummer Method*) atau metode-metode lainnya. Untuk fabrikasi DSSC diperlukan ketelatenan yang tinggi sehingga bisa mengurangi faktor ketidakhati-hatian yang mengurangi performa DSSC. Bahan-bahan yang digunakan sebagiannya adalah bahan organik yang mungkin saja sensitif terhadap lingkungan laboratorium sehingga disarankan untuk menggunakan ruang vakum dalam prosesnya.

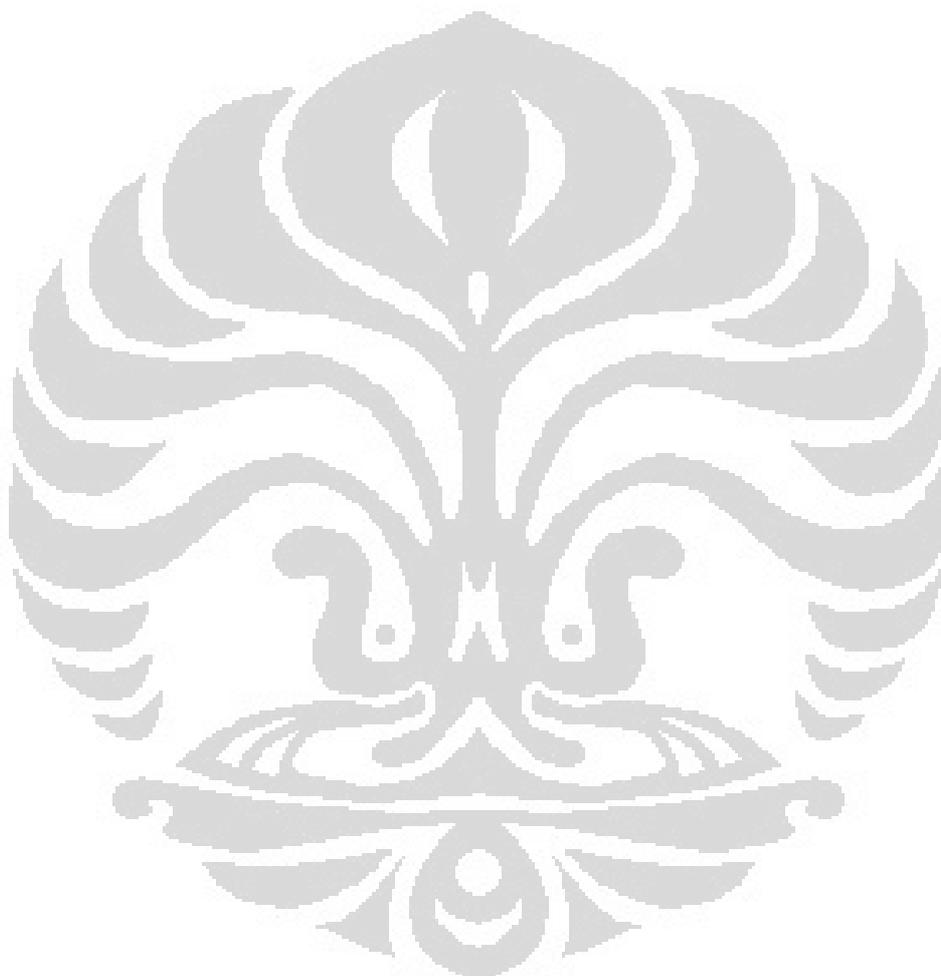


DAFTAR PUSTAKA

1. ESDM, K., *Outlook Energi Nasional*, S.J.D.E. Nasional, Editor. 2016, Dewan Energi Nasional: Jakarta.
2. Lee, C.-P., C.-T. Li, and K.-C. Ho, *Use of organic materials in dye-sensitized solar cells*. *Materials Today*, 2017. **20**(5): p. 267-283.
3. Sasikumar, R., T.-W. Chen, S.-M. Chen, S.-P. Rwei, and S.K. Ramaraj, *Developing the photovoltaic performance of dye-sensitized solar cells (DSSCs) using a SnO₂-doped graphene oxide hybrid nanocomposite as a photo-anode*. *Optical Materials*, 2018. **79**: p. 345-352.
4. Xu, K., Y. Shen, Z. Zhang, M. Cao, F. Gu, and L. Wang, *The influence of different modified graphene on property of DSSCs*. *Applied Surface Science*, 2016. **362**: p. 477-482.
5. Zhang, Y., H. Li, L. Kuo, P. Dong, and F. Yan, *Recent Applications of Graphene in Dye-sensitized Solar Cells*. *Current Opinion in Colloid & Interface Science*, 2015. **20**(5): p. 406-415.
6. Tonui, P., S.O. Oseni, G. Sharma, Q. Yan, and G. Tessema Mola, *Perovskites photovoltaic solar cells: An overview of current status*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2018. **91**: p. 1025-1044.
7. Ye, M., X. Wen, M. Wang, J. Iocozzia, N. Zhang, C. Lin, and Z. Lin, *Recent advances in dye-sensitized solar cells: from photoanodes, sensitizers and electrolytes to counter electrodes*. *Materials Today*, 2015. **18**(3): p. 155-162.
8. Shakeel Ahmad, M., A.K. Pandey, and N. Abd Rahim, *Advancements in the development of TiO₂ photoanodes and its fabrication methods for dye sensitized solar cell (DSSC) applications. A review*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2017. **77**: p. 89-108.
9. Kumara, N.T.R.N., A. Lim, C.M. Lim, M.I. Petra, and P. Ekanayake, *Recent progress and utilization of natural pigments in dye sensitized solar cells: A review*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2017. **78**: p. 301-317.
10. Gong, J., K. Sumathy, Q. Qiao, and Z. Zhou, *Review on dye-sensitized solar cells (DSSCs): Advanced techniques and research trends*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2017. **68**: p. 234-246.
11. Song, N., X. Gao, Z. Ma, X. Wang, Y. Wei, and C. Gao, *A review of graphene-based separation membrane: Materials, characteristics, preparation and applications*. *Desalination*, 2018. **437**: p. 59-72.
12. Mehmood, U., S.H.A. Ahmad, A.U.H. Khan, and A.A. Qaiser, *Co-sensitization of graphene/TiO₂ nanocomposite thin films with ruthenizer and metal free organic photosensitizers for improving the power conversion efficiency of dye-sensitized solar cells (DSSCs)*. *Solar Energy*, 2018. **170**: p. 47-55.
13. Ondersma, J.W. and T.W. Hamann, *Recombination and redox couples in dye-sensitized solar cells*. *Coordination Chemistry Reviews*, 2013. **257**(9): p. 1533-1543.
14. Mahmoudi, T., Y. Wang, and Y.-B. Hahn, *Graphene and its derivatives for solar cells application*. *Nano Energy*, 2018. **47**: p. 51-65.
15. Khan, M.Z.H., M.R. Al-Mamun, P.K. Halder, and M.A. Aziz, *Performance improvement of modified dye-sensitized solar cells*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2017. **71**: p. 602-617.

16. Liu, X., L. Shi, W. Jiang, J. Zhang, and L. Huang, *Taking full advantage of KMnO₄ in simplified Hummers method: A green and one pot process for the fabrication of alpha MnO₂ nanorods on graphene oxide*. *Chemical Engineering Science*, 2018. **192**: p. 414-421.
17. Phiri, J., P. Gane, and T.C. Maloney, *General overview of graphene: Production, properties and application in polymer composites*. *Materials Science and Engineering: B*, 2017. **215**: p. 9-28.
18. Norman Syakir, R.N., Syafiul Anam, Annisa Aprilia, Sahrul Hidayat, Fitrilawati, *Kajian Pembuatan Oksida Grafit untuk Produksi Oksida Grafena dalam Jumlah Besar*. *Jurnal Fisika Indonesia*, 2015. **55**: p. 26-29.
19. Shao, G., Y. Lu, F. Wu, C. Yang, F. Zeng, and Q. Wu, *Graphene oxide: the mechanisms of oxidation and exfoliation*. *Journal of Materials Science*, 2012. **47**(10): p. 4400-4409.
20. R. Dreyer, D., S. Park, C. W. Bielawski, and R. Ruoff, *The chemistry of graphene oxide*. Vol. 39. 2009.
21. Betancur, A.F., N. Ornelas-Soto, A.M. Garay-Tapia, F.R. Pérez, Á. Salazar, and A.G. García, *A general strategy for direct synthesis of reduced graphene oxide by chemical exfoliation of graphite*. *Materials Chemistry and Physics*, 2018. **218**: p. 51-61.
22. Iqbal, M.Z. and A.-U. Rehman, *Recent progress in graphene incorporated solar cell devices*. *Solar Energy*, 2018. **169**: p. 634-647.
23. Tarelho, J.P.G., M.P. Soares dos Santos, J.A.F. Ferreira, A. Ramos, S. Kopyl, S.O. Kim, S. Hong, and A. Kholkin, *Graphene-based materials and structures for energy harvesting with fluids – A review*. *Materials Today*, 2018. **21**(10): p. 1019-1041.
24. Prabakaran, K., P.J. Jandas, S. Mohanty, and S.K. Nayak, *Synthesis, characterization of reduced graphene oxide nanosheets and its reinforcement effect on polymer electrolyte for dye sensitized solar cell applications*. *Solar Energy*, 2018. **170**: p. 442-453.
25. Tsai, C.-H., P.-Y. Chuang, and H.-L. Hsu, *Adding graphene nanosheets in liquid electrolytes to improve the efficiency of dye-sensitized solar cells*. *Materials Chemistry and Physics*, 2018. **207**: p. 154-160.
26. Kazmi, S.A., S. Hameed, A.S. Ahmed, M. Arshad, and A. Azam, *Electrical and optical properties of graphene-TiO₂ nanocomposite and its applications in dye sensitized solar cells (DSSC)*. *Journal of Alloys and Compounds*, 2017. **691**: p. 659-665.
27. Liu, X., C. Zhang, S. Liu, and Y. Xiong, *Efficiency enhancement of DSSC by alternating TiO₂ active layer*. *Optik*, 2018. **160**: p. 277-282.
28. Lim, J.Y., N.M. Mubarak, E.C. Abdullah, S. Nizamuddin, M. Khalid, and Inamuddin, *Recent trends in the synthesis of graphene and graphene oxide based nanomaterials for removal of heavy metals – A review*. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 2018. **66**: p. 29-44.
29. Shojaeenezhad, S.S., M. Farbod, and I. Kazeminezhad, *Effects of initial graphite particle size and shape on oxidation time in graphene oxide prepared by Hummers' method*. *Journal of Science: Advanced Materials and Devices*, 2017. **2**(4): p. 470-475.
30. Demir, E., A. Savk, B. Sen, and F. Sen, *A novel monodisperse metal nanoparticles anchored graphene oxide as Counter Electrode for Dye-Sensitized Solar Cells*. *Nano-Structures & Nano-Objects*, 2017. **12**: p. 41-45.

31. Öztürk, A. and M. Alanyalıoğlu, *Electrochemical fabrication and amperometric sensor application of graphene sheets*. *Superlattices and Microstructures*, 2016. **95**: p. 56-64.
32. Marcano, D.C., D.V. Kosynkin, J.M. Berlin, A. Sinitskii, Z. Sun, A. Slesarev, L.B. Alemany, W. Lu, and J.M. Tour, *Improved Synthesis of Graphene Oxide*. *ACS Nano*, 2010. **4**(8): p. 4806-4814.



LAMPIRAN

Kurva Tuc Plot untuk Komposit Nano Pada Persentase Berbeda

