

Analisis Pengaruh Susunan Komposit Laminat *Graphene-TiO₂* sebagai Lapisan Semikonduktor terhadap Unjuk Kerja *Dye Sensitized Solar Cell* (DSSC)

Wahyu Tirta Nugraha, dan Diah Susanti,

Jurusan Teknik Material dan Metalurgi, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)

Jl. Arief Rahman Hakim, Surabaya 60111 Indonesia

e-mail: santiche@mat-eng.its.ac.id

Abstrak—Penelitian mengenai sel surya mengalami peningkatan yang signifikan beberapa tahun terakhir. Khususnya penelitian tentang sel surya lanjutan, *Dye Sensitized Solar Cell* (DSSC). Karena fabrikasinya yang mudah dan murah dibandingkan dengan sel surya konvensional. Penelitian ini akan dilakukan untuk menghasilkan prototype DSSC. DSSC tersebut difabrikasi menggunakan susunan komposit laminat *Graphene – TiO₂* yang berbeda dengan metode *Spincoating* sebagai lapisan semikonduktor dan *dye organik* dari ekstrak Bunga Geranium. Lapisan semikonduktor dikarakterisasi menggunakan X –Ray Diffraction (XRD) dan Scanning Electron Microscope (SEM) untuk mengetahui terbentuknya lapisan *Graphene-TiO₂*. Absorbansi larutan *dye* diuji menggunakan UV-Vis Spektrofotometer. Dan pengujian unjuk kerja kelistrikan diukur menggunakan I-V Keithley Instrumen. Hasil terbaik didapatkan pada susunan komposit laminat *TiO₂/Graphene/TiO₂* (TGT) dengan nilai daya maksimum sebesar $0,259 \text{ Wm}^{-2}$, nilai efisiensi sebesar $0,0241 \%$ dan Fill Factor sebesar $0,42$.

Kata kunci— *Dye Sensitized Solar Cell* (DSSC), *Graphene-TiO₂*, Komposit laminat, semikonduktor, unjuk kerja

I. PENDAHULUAN

Dalam beberapa tahun terakhir, krisis energi sudah menjadi isu global yang melanda hampir seluruh belahan dunia. Sehingga perkembangan energi sekarang mengarah pada penelitian tentang energi alternatif yang terbarukan dan ramah lingkungan, untuk meminimalisir dan mengantisipasi penggunaan energi fosil yang berlebihan. Dimana kita tahu, kebutuhan energi dunia semakin lama semakin meningkat, sedangkan ketersediaan energi fosil semakin lama semakin menipis. Selain itu, penggunaan bahan bakar fosil secara luas juga meningkatkan konsentrasi CO_2 di atmosfer sehingga menyebabkan terjadinya pemanasan global [1].

Dari beberapa sumber energi yang alternatif yang terbarukan, energi matahari menjadi salah satu sumber energi yang sangat potensial untuk dikembangkan. Perkembangan teknologi sel surya sendiri sudah mengalami perkembangan yang sangat signifikan, ditandai dengan munculnya generasi baru sel surya mulai dari sel surya konvensional berbasis silikon, kemudian sel surya *thin film* sampai sel surya *Dye Sensitized Solar Cell* (DSSC) yang merupakan sel surya

generasi ketiga. Berbeda dengan sel surya generasi sebelumnya, pada DSSC energi matahari dirubah menjadi energi listrik melalui sel fotoelektrokimia [2].

Salah satu semikonduktor yang mempunyai *band gap* lebar yang sering digunakan adalah *Titanium Oxide* (TiO_2). TiO_2 mempunyai *band gap* sebesar $3,2 \text{ eV}$, dengan rentang $-1,2 \text{ eV}$ sampai $2,0 \text{ eV}$. Selain itu TiO_2 juga merupakan bahan yang inert, tidak berbahaya dan memiliki karakteristik optik yang baik. Selain itu, untuk meningkatkan kemampuan fotokatalitiknya TiO_2 dapat dikompositkan dengan berbagai macam bentuk karbon seperti karbon aktivasi, karbon *nanotube* [3].

Material *graphene* merupakan salah satu jenis karbon dengan struktur dua dimensi nanokristalin, yang memiliki konduktivitas sangat baik. Sehingga komposit TiO_2 dan *graphene* menjadi fokus dalam penelitian ini untuk meningkatkan unjuk kerja DSSC.

Untuk memaksimalkan absorpsi cahaya digunakan molekul *dye* berupa *anthocyanin*. *Anthocyanin* ($\text{C}_{15}\text{H}_{11}\text{O}^+$) sendiri termasuk ke dalam kelompok senyawa flavonoid, dimana senyawa ini merupakan pigmen tanaman yang dapat larut dalam air dan sering ditemukan pada buah, daun dan bunga yang berwarna merah sampai biru [4]. Selain itu, pemilihan bahan organik sebagai molekul *dye* dikarenakan harganya murah, mudah didapatkan dan dapat terdekomposisi sendiri sehingga tidak menimbulkan terjadinya polusi. Sedangkan *dye* sintesis yang biasanya menggunakan bahan anorganik berbasis *ruthenium* kompleks harganya sangat mahal, dan memiliki kandungan logam berat yang berpotensi mencemari lingkungan.

Pada penelitian ini, *prototype* sel surya difabrikasi menggunakan nanokristalin TiO_2 yang dikompositkan dengan *graphene* secara laminat pada kaca FTO sebagai material semikonduktor. Bahan *dye* yang digunakan sebagai *sensitizer* (penangkap energi matahari) adalah bahan *dye organik* hasil ekstraksi dari geranium (*Geranium sylvaticum*). Sedangkan larutan elektrolit yang digunakan terdiri dari *iodine* (I^-) dan *triiodide* (I_3^-) sebagai pasangan redoks dalam pelarut. Selanjutnya DSSC akan diuji karakterisasi dan unjuk kelistrikannya menggunakan XRD, SEM, UV-Vis dan Instrumen I-V

II. METODOLOGI PENELITIAN

A. Sintesis Graphene

Proses sintesis *graphene* ini menggunakan modifikasi Metode Hummer. Pada metode ini grafit dioksidasi menjadi grafit oksida. Setelah itu, grafit oksida direduksi menjadi *graphene* menggunakan reduktor Zn dan proses hidrotermal.

Proses sintesis dimulai dengan melarutkan 2 g grafit di dalam 80 ml H_2SO_4 98%. Proses pelarutan ini dalam kondisi *stirring* di dalam *ice bath* untuk menjaga temperatur di bawah $25\text{ }^\circ\text{C}$ selama 4 jam. Selama proses *stirring* ini ditambahkan 4 g NaNO_3 dan 8 g KMnO_4 secara bertahap. Prosesnya selanjutnya adalah proses homogenisasi dengan *stirring* pada temperatur $35\text{ }^\circ\text{C}$ selama 24 jam. Selama proses ini ditambahkan 200 ml aquades apabila larutan telah mengental. Lalu setelah 24 jam, *stirring* dimatikan dan ditambahkan 15 ml H_2O_2 30%. Endapan grafit oksida dipisahkan dari pengotornya dengan *centrifuge* dan HCl ditambahkan ke grafit oksida untuk menghilangkan pengotor logam yang terlarut. Lalu dilakukan pencucian berkala pada grafit oksida untuk menghilangkan ion-ion terlarut, seperti SO_4^{2-} . Selain itu, proses pencucian bertujuan untuk menetralkan pH. Setelah tidak didapatkan endapan putih sulfat dan didapatkan pH netral, grafit oksida di *drying* menggunakan *muffle furnace* dengan temperatur $110\text{ }^\circ\text{C}$ dengan waktu tahan 12 jam.

Proses selanjutnya adalah proses reduksi grafit oksida menjadi *graphene*. Proses ini diawali dengan melarutkan 40 mg grafit oksida ke dalam 40 ml aquades dan *distirring* hingga larutan menjadi homogen. Setelah larutan menjadi homogen, larutan diultrasonikasi 90 menit. Akibat gelombang ultrasonik, maka grafit oksida akan terkelupas menjadi *graphene* oksida (GO). Lalu ditambahkan 10 ml HCl 37% ke dalam larutan GO untuk membentuk kondisi asam dan 1,6 g serbuk Zn ke dalam larutan GO. Setelah Zn bereaksi dengan GO sehingga menghasilkan gelembung-gelembung gas, HCl kembali ditambahkan untuk menghilangkan ZnO yang merupakan pengotor. Dari proses sintesis ini dihasilkan *graphene*. Setelah itu, larutan *graphene* dicuci berulang kali dengan aquades untuk menetralkan pH-nya. Setelah pH menjadi netral, larutan *graphene* di-*hydrothermal* menggunakan *muffle furnace* dengan temperatur $160\text{ }^\circ\text{C}$ selama 12 jam untuk mereduksi gugus oksida GO dan membentuk serbuk *graphene* yang berukuran nano.

B. Preparasi Lapisan Semikonduktor Komposit Laminat Graphene-TiO₂

Lapisan komposit laminat Graphene/TiO₂ dibuat menggunakan metode *spincoating*. Lapisan komposit divariasikan susunannya yaitu TiO₂ murni, TiO₂/Graphene (T/G), TiO₂/Graphene/TiO₂ (T/G/T), Graphene/TiO₂ (G/T) dan Graphene/TiO₂/Graphene (G/T/G). Pada proses ini pasta TiO₂ dan pasta *graphene* di-*spincoating* pada kaca FTO (*Flourin doped Tin Oxide*) dengan kecepatan 500 rpm selama 30 detik dan 2000 rpm selama 90 detik. Selama pelapisan Setiap setelah melapiskan satu lapisan *graphene*/TiO₂, dilakukan *drying* dengan temperatur $110\text{ }^\circ\text{C}$ selama 60 menit. Setelah didapatkan semua variasi komposit laminat, dilakukan kalsinasi pada temperatur $450\text{ }^\circ\text{C}$ selama 60 menit,

untuk menguapkan pelarut dan menghilangkan gugus *volatile* yang masih tersisa.

Setelah kalsinasi, lapisan semikonduktor disensitisasi dengan cara perendaman ke dalam ekstrak dye selama 24 jam, agar larutan dye terserap secara optimal ke dalam lapisan semikonduktor.

C. Preparasi Larutan Dye

Larutan *dye* dibuat dengan mengekstraks bunga geranium (*Geranium sylvaticum*) dengan perbandingan antara bahan dye dan pelarut 13:50. Bahan *dye* sebanyak 13 gr dan pelarut sebanyak 50 ml yang meliputi 21 ml ethanol, 4 ml asam asetat (CH_3COOH), dan 25 ml aquades.

Sebelum dilakukan ekstraksi, terlebih dahulu geranium (*Geranium sylvaticum*) dihaluskan dan ditambahkan 21 ml ethanol, 4 ml asam asetat (CH_3COOH), dan 25 ml aquades lalu diaduk sampai rata. Kemudian *dye* diamkan selama 24 jam untuk mendapatkan hasil ekstraksi yang maksimal. Setelah didiamkan selama 24 jam, lalu disaring dengan menggunakan kassa steril untuk mendapatkan larutan *dye*-nya.

D. Preparasi Larutan Elektrolit

Pembuatan larutan elektrolit dilakukan dengan cara melarutkan campuran antara 0.8 gr KI 0.5 M (*Pottassium Iodide*) ke dalam 10 ml Polietilena glikol 400. Selanjutnya, ditambahkan 0.127 gr I₂ (*Iodine*) ke dalam larutan dan diaduk sampai ketiga bahan tersebut terlarut dengan sempurna.

E. Preparasi Elektroda Balik

Counter katalis elektroda yang digunakan adalah Pd/Au. Metode yang digunakan untuk *coating* Pd/Au pada kaca FTO adalah metode *sputtering* selama 90 menit.

F. Perakitan Dye Sensitized Solar Cells (DSSC)

Perakitan DSSC dapat diawali penumukan elektroda kerja berupa kaca FTO dengan lapisan semikonduktor yang telah disensitisasi dan elektroda balik berupa kaca FTO dengan katalis Pd/Au dengan permukaan yang saling berhadapan. Kemudian, kaca FTO disusun membentuk sebuah struktur *sandwich*. Dalam struktur *sandwich* yang dibuat harus dipastikan tidak ada air dan udara yang terperangkap dalam *prototipe Dye Sensitized Solar Cell*. Setelah itu, diberikan *offset* pada bagian ujung dari masing-masing elektroda sebesar 0.5 cm untuk kontak elektrik. Kedua bagian pinggir sel *Dye Sensitized Solar Cell* yang tidak diberi *offset* dijepit dengan penjepit kertas agar *prototipe* melekat sempurna.

Setelah melekat sempurna, DSSC kemudian ditetesi 2 – 3 tetes larutan elektrolit triiodide dari kedua ujung *offset prototipe*. Gaya kapilaritas akan menyerap larutan elektrolit ke dalam lapisan semikonduktor. Sehingga didapatkan *Dye Sensitized Solar Cells (DSSC)*.

G. Karakterisasi dan Uji Kelistrikan

Absorbansi larutan dye diukur menggunakan Ultraviolet-Visible Spektrofotometer (UV-Vis, Genesys 10S) dengan Lampu Xenon sebagai sumber cahaya yang dapat memancarkan gelombang cahaya mulai 190 nm sampai 1100

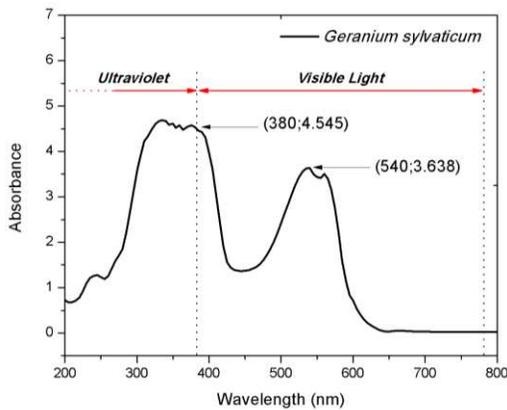
nm. Komposisi kimia dan struktur kristal diidentifikasi menggunakan X-Ray Diffraction (XRD, PANalytical) dengan radiasi Cu K α . Morfologi dan mikrostruktur diamati menggunakan Scanning Electron Microscope (SEM, Inspect S50) dan unjuk kerja kelistrikan diukur menggunakan instrumen I-V (I-V Keithley 2602A Sourcemeter) menggunakan Lampu Xenon dengan intensitas 1000 Wm⁻².

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Hasil Pengujian Absorbansi

Dari grafik spektrum absorbansi *dye* ekstrak bunga geranium (*Geranium sylvaticum*) pada gambar 1 terlihat bahwa spektrum absorbansi memiliki 2 puncak pada rentang cahaya tampak yaitu puncak pertama pada panjang gelombang 380 dengan absorbansi 4.545 pita warna ungu. Kemudian spektrum kedua terdapat pada rentang yang cukup lebar (490 - 580 nm) yaitu mulai pita warna biru sampai pita warna kuning dengan intensitas maksimal sebesar 3.638 pada pita warna hijau.

Dari hasil pengujian dapat diketahui bahwa semakin tinggi nilai absorbansi suatu larutan, maka kemampuan menyerap foton cahaya akan semakin tinggi. Selain itu juga dapat diketahui bahwa berdasarkan panjang gelombangnya, larutan *dye* dari ekstrak Bunga Geranium (*Geranium sylvaticum*) dapat menangkap cahaya dalam rentang spektrum yang lebih lebar.



Gambar. 1. Grafik spektrum absorbansi larutan dye ekstrak Geranium

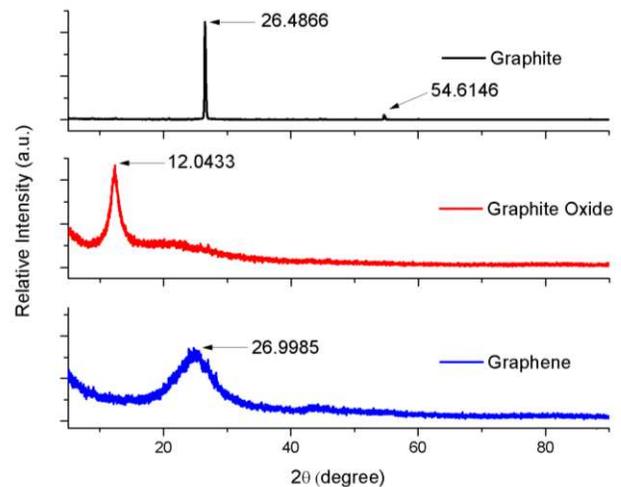
Tabel 1. Nilai absorbansi Bunga Geranium

Panjang Gelombang (nm)	Absorbansi	Spektrum Warna
380	4,545	Ungu
540	3.638	Hijau

Nilai absorbansi *dye* ekstrak Bunga Geranium (*Geranium sylvaticum*) ini menunjukkan kemampuan *dye* dalam menyerap cahaya. Semakin tinggi nilai absorbansi maka semakin mudah larutan *dye* dalam menyerap radiasi energi yang berupa foton - foton cahaya matahari. Sehingga semakin banyak pula foton yang bisa dieksitasi untuk dikonversikan oleh sel surya menjadi energi listrik.

B. Hasil Pengujian X-Ray Diffraction (XRD)

Perbandingan pola hasil XRD dari grafit, grafit oksida dan *graphene* ditunjukkan pada gambar 2. Dari gambar tersebut terlihat grafit terdapat puncak (002) yang sangat tajam pada posisi 2 θ 26.4866° dan puncak (101) yang lemah pada posisi 2 θ 54.6146° sesuai dengan (ICDD 03-065-6212). Pada grafit oksida puncak 2 θ 26.4866° tidak terlihat tetapi muncul puncak (001) pada posisi 2 θ 12.0433°. Hal tersebut menunjukkan bahwa grafit sudah teroksidasi sempurna menjadi grafit oksida. Kemudian dilakukan reduksi grafit oksida menjadi *graphene* menggunakan Zn, sehingga didapatkan puncak baru (002) pada posisi 2 θ 26.9985° yang lebar (broad) dengan intensitas yang rendah. Posisi 2 θ tersebut sesuai dengan peak *graphene* yang lebar (broad band) dengan batas antara 14° sampai 36°. Hal ini menunjukkan kristalinitas yang rendah dibandingkan dengan grafit dan grafit oksida [5]-[7].



Gambar 2. Pola XRD dari grafit, grafit oksida dan *graphene*

Untuk membandingkan jarak antar layer dari grafit, grafit oksida dan *graphene* dapat dilakukan dengan perhitungan menggunakan menggunakan Persamaan Bragg [8], sebagai berikut,

Tabel 2. Nilai jarak antar layer Grafit, Grafit Oksida dan Graphene

Sampel	2 θ	FWHM	d-spacing (Å)
Grafit	26.4866	0.1004	3.361
Grafit Oksida	12.0433	0.2007	7.340
Graphene	26.7590	0.2007	3.327

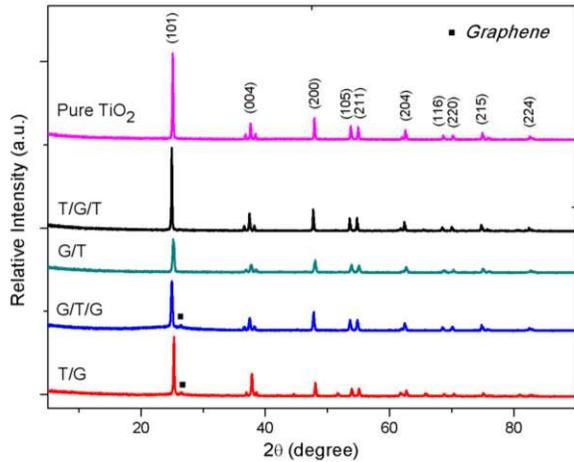
Dari tabel 2, dapat dilihat bahwa terjadi peningkatan jarak antar layer dari grafit ke grafit oksida dan penurunan jarak antar layer dari grafit oksida ke *graphene*. Penurunan ini terjadi akibat terbentuknya gugus fungsional oksigen dan peningkatan kadar air di antara lapisan grafit oksida akibat proses oksidasi. Kemudian, pada *graphene*, nilai jarak antar layer menurun lagi mendekati nilai grafit, yang mengindikasikan adanya proses reduksi yang telah menghilangkan gugus fungsional oksigen dan air, sehingga diperoleh struktur *graphene* yang hanya berisi atom karbon, sebagaimana halnya grafit [9].

Pola XRD yang dihasilkan titanium dioksida menunjukkan bidang-bidang kristal yang tercantum pada gambar 3 yang

disesuaikan dengan standar ICDD 01-070-7348. Dapat terlihat bahwa terdapat kesesuaian antara pola XRD pada gambar di atas dengan standar, yaitu tampak mempunyai puncak tertinggi pada 2θ sekitar 25° .

Setelah itu dilakukan pengujian XRD pada variasi susunan komposit laminat pada semikonduktor DSSC. Berikut hasil pengujian XRDnya,

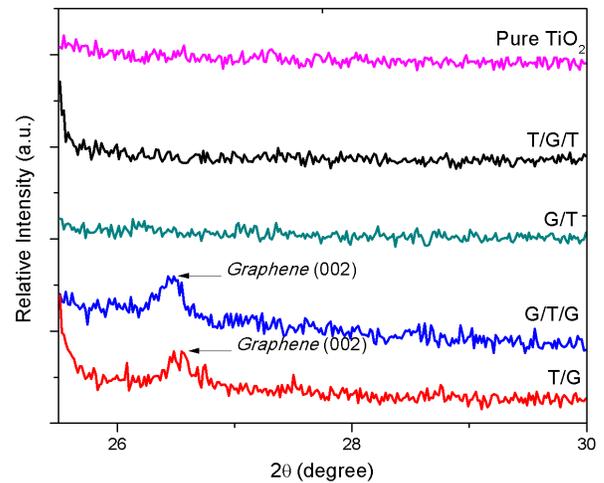
Dari gambar di atas dapat dilihat bahwa TiO_2 murni



Gambar. 3 Perbandingan pola XRD dari variasi susunan komposit laminat semikonduktor DSSC

membentuk fase anatase murni dengan kristalinitas yang tinggi pada puncak 2θ 26.48° , sedangkan pada komposit laminat fase anatase murni yang terbentuk cenderung menurun karena telah dikompositkan dengan *Graphene*. Selain itu terlihat pula pola XRD yang terbentuk untuk lapisan TiO_2 dan komposit TiO_2 -*graphene* memiliki perbedaan ketajaman intensitas ketika diberikan variasi susunan lapisan komposit laminat TiO_2 -*graphene*. Dapat diketahui bahwa nilai intensitas dari TiO_2 murni lebih tinggi daripada semua variasi komposit laminat TiO_2 -*Graphene*.

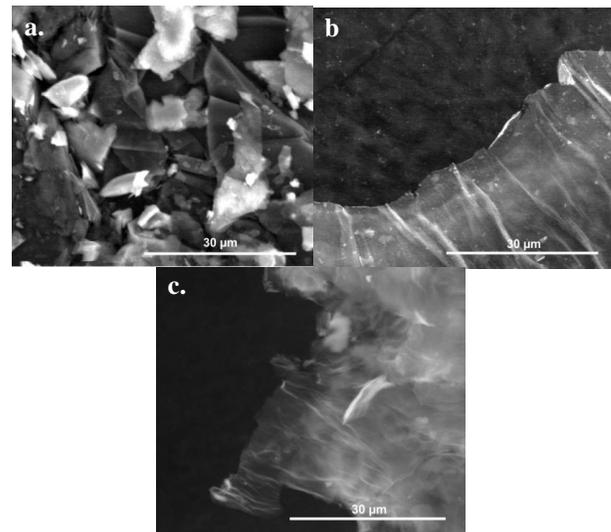
Pada gambar 4 terdapat perbedaan pada potongan pola XRD pada 2θ antara 25.5° sampai 30° dari variasi susunan komposit laminat semikonduktor DSSC adalah puncak TiO_2 yang terbentuk tanpa adanya puncak *graphene* yang muncul pada lapisan komposit semikonduktor T/G/T dan G/T yang menunjukkan bahwa TiO_2 sudah melapisi sempurna lapisan *graphene* di bawahnya, sedangkan pada lapisan komposit semikonduktor T/G dan G/T/G muncul puncak *graphene* dan TiO_2 , hal tersebut menunjukkan bahwa lapisan *graphene* telah terbentuk namun tidak melapisi sempurna dan cenderung berpori, sehingga masih terlihat puncak TiO_2 yang berada satu lapis di bawah lapisan *graphene*.



Gambar. 4. Potongan pola XRD dari variasi susunan komposit laminat semikonduktor DSSC pada 2θ antara 25.5° sampai 30°

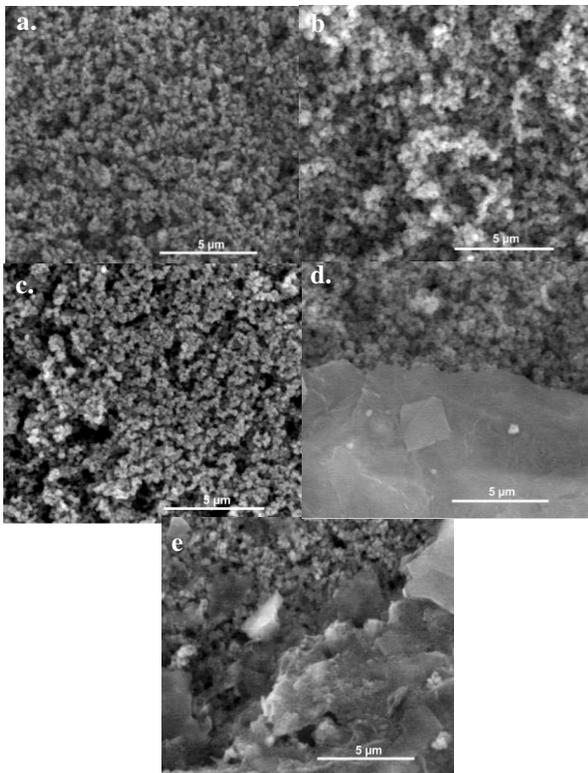
C. Hasil Pengujian Scanning Electron Microscope (SEM)

Pada gambar 5 ditunjukkan morfologi dari grafit, grafit oksida dan *graphene*. Terlihat pada gambar 5a grafit memiliki morfologi yang berbentuk serpihan (*flakes*) dan lebih padat. Untuk grafit oksida ditunjukkan pada gambar 5b, terlihat morfologinya berbentuk lembaran yang lebih tipis dan transparan. Hal tersebut menunjukkan bahwa grafit sudah mengalami oksidasi sempurna menjadi grafit oksida. Sedangkan pada gambar 5c menunjukkan morfologi dari *Graphene* yang lebih tipis dan transparan dari Grafit Oksida.



Gambar 5 Struktur morfologi dari a. Grafit, b. Grafit oksida, dan c. *Graphene* dengan perbesaran 5000x

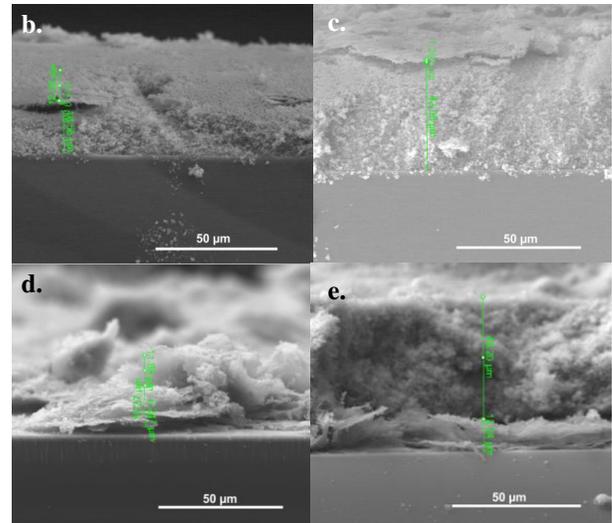
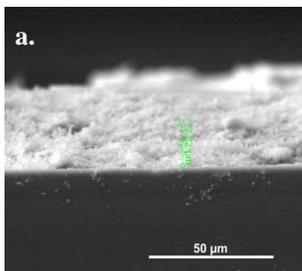
Setelah itu dilakukan pengujian SEM semikonduktor DSSC yang berupa komposit laminat TiO_2 dan *Graphene* pada bidang permukaan dan penampang melintang. Hasilnya sebagai berikut,



Gambar 6. Struktur morfologi permukaan a.TiO₂ murni b.TGT c.GT d.GTG e.TG dengan perbesaran 20000x

Pada perbesaran 20000x seperti pada gambar 6, terlihat persebaran lapisan TiO₂ pada TiO₂ murni, komposit GT dan TGT sudah merata dan menutup sempurna lapisan dibawahnya. Hal tersebut sesuai dengan hasil XRD pada Gambar 4 a, b dan c dimana tidak tampak puncak *graphene* dan hanya terlihat puncak TiO₂. Sedangkan pada komposit TG dan GTG terlihat lapisan *graphene* tidak merata dan tidak menutup sempurna lapisan TiO₂ di bawahnya, sehingga cenderung membentuk pori-pori TiO₂, hal ini dikarenakan topografi permukaan yang kurang rata ketika dilakukan *spincoating* dan jumlah *graphene* yang terdeposisi sangat terbatas.

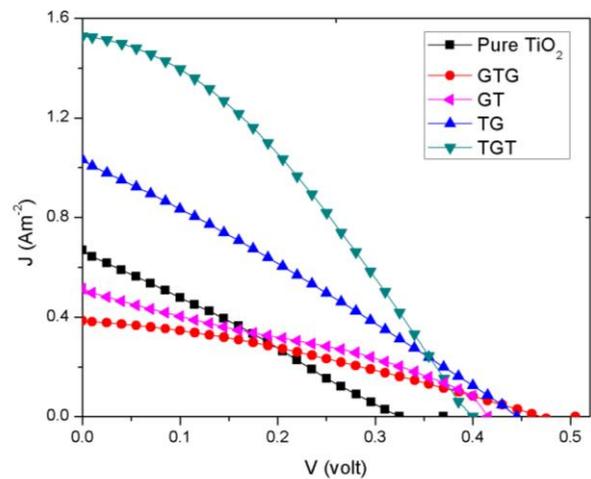
Pada gambar 7 dibawah ini ditunjukkan komposit laminat yang terbentuk dengan gambar potongan SEM secara melintang,



Gambar 7. Struktur morfologi penampang melintang a.TiO₂ murni b.TGT c.GT d.GTG e.TG dengan perbesaran 2500x

D. Pengujian Kelistrikan

Pada gambar 8 ditunjukkan kurva J-V pada masing – masing variasi lapisan komposit laminat. Terlihat bahwa Jsc pada lapisan komposit laminat GTG dan GT lebih rendah daripada TiO₂ dan Jsc pada lapisan komposit laminat TG dan TGT lebih tinggi daripada TiO₂. Sedangkan Voc pada komposit laminat berturut – turut menunjukkan peningkatan mulai dari TiO₂ murni, TGT, GT, TG dan GTG. Sehingga nilai efisiensi dari komposit laminat Graphene – TiO₂ masih lebih baik dibandingkan TiO₂ murni, hal tersebut ditunjukkan pada tabel 3.



Gambar 8. Kurva J-V dari variasi susunan lapisan komposit laminat

Pada gambar 10 terlihat kerapatan daya dari komposit laminat Graphene-TiO₂ meningkat mulai dari GTG, GT, TG dan TGT. Peningkatan nilai kerapatan daya yang dihasilkan sebanding dengan peningkatan yang terjadi pada nilai efisiensi. Nilai kerapatan daya maksimum pada TiO₂ murni,

GTG, GT, TG dan TGT berturut – turut sebesar 0.066 Wm^{-2} , 0.084 Wm^{-2} , 0.102 Wm^{-2} , 0.128 Wm^{-2} dan 0.259 Wm^{-2} .

Pada tabel di bawah ini terlihat bahwa nilai FF dan efisiensi komposit laminat *Graphene*-TiO₂ lebih baik daripada TiO₂ murni. Terjadi peningkatan nilai FF dari TG, TGT, GT dan GTG berturut – turut sebesar 3.8%, 61.5%, 76.9% dan 173%. Sedangkan kenaikan nilai efisiensi mulai dari GTG, GT, TG dan TGT berturut – turut sebesar 55.5%, 87.3%, 111.1% dan 282.5%.

Tabel 3. Perbandingan unjuk kerja kelistrikan

Variasi	Voc(Volt)	Jsc(Am ⁻²)	P _{mx} (Wm ⁻²)	FF	η(%)
TiO ₂ murni	0.370	0.699	0.066	0.26	0.0063
GTG	0.505	0.333	0.084	0.46	0.0098
GT	0.415	0.577	0.102	0.71	0.0118
TG	0.445	1.215	0.128	0.27	0.0133
TGT	0.400	1.204	0.259	0.42	0.0241

.Hal ini disebabkan ketika lapisan TiO₂ (TG dan TGT) berada di atas maka fungsinya sebagai pengonversi cahaya matahari menjadi energi listrik lebih optimal, hal ini ditunjukkan pada hasil SEM gambar 7a, 7b dan 7c dimana lapisan TiO₂ membentuk struktur pori dengan ukuran nano yang persebaran partikelnya merata. Struktur pori yang terbentuk ini meningkatkan luas permukaan. Sehingga meningkatkan kemampuan fotokatalitik DSSC, karena reaksi fotokatalitik ini termasuk reaksi kimia yang berlangsung pada permukaan fotokatalis [10]. Hal tersebut dapat menyebabkan nilai efisiensi menjadi lebih tinggi ketika lapisan TiO₂ berada pada lapisan pertama dan *graphene* berada pada lapisan kedua.

Sedangkan ketika lapisan *graphene* berada di atas lapisan TiO₂ (GTG dan GT) maka kedua fungsi tersebut menjadi kurang optimal dan lapisan *graphene* yang berada di atas lapisan TiO₂ akan melapisi sebagian besar permukaan dan pori-pori nanopartikel TiO₂. Hal tersebut menyebabkan berkurangnya dye yang ter-*absorb*. Walaupun begitu, nilai efisiensinya masih lebih baik dibandingkan dengan TiO₂ murni. Hal ini disebabkan karena material *graphene* yang memiliki transparansi tinggi, sehingga cahaya matahari dapat diteruskan dengan baik [11]. Selain itu *graphene* dan TiO₂ berfungsi sebagai kolektor dan pembawa elektron. Sehingga elektron yang tereksitasi semakin banyak dan efisiensi akan meningkat.

IV. KESIMPULAN

Dye-sensitized Solar Cell (DSSC) telah berhasil difabrikasi dengan menggunakan material semikonduktor TiO₂ yang dikompositkan dengan *graphene* secara laminat dan dye dari ekstrak bunga geranium. Susunan komposit laminat TGT merupakan susunan yang paling optimal untuk menghasilkan performa DSSC yang maksimal. Unjuk kerja kelistrikan pada TGT memiliki nilai efisiensi sebesar 0,0241%, daya maksimal (P_{\max}) 0.259 Wm^{-2} ; $J_{\text{SC}} = 1.204 \text{ Am}^{-2}$; $V_{\text{OC}} = 0.4 \text{ Volt}$; dan *fill factor* sebesar 0,42. Hal ini disebabkan ketika TiO₂ berada di lapisan atas maka fungsi sebagai kolektor muatan dan ketika

graphene berada pada lapisan kedua maka fungsinya sebagai kolektor serta pembawa muatan menjadi lebih optimal. Hal ini dapat meningkatkan nilai efisiensi DSSC.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis W.T.N mengucapkan terima kasih atas dukungan finansial dan fasilitas dari Kementerian Pendidikan dan Kebudayaan Republik Indonesia melalui Dana Hibah Penelitian Unggulan 2014 (BOPTN) dan Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS) – Surabaya, Indonesia.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Doney, S. C. and Schimel, D.S., "Carbon and Climate System Coupling on Timescales from The Precambrian to the Anthropocene", *Annual Review of Environment and Resources*, Vol. 32 (2007)31-66.
- [2] Wonboong, Choi and Jo-won Lee, *Graphene and Application*. Florida Taylor & Francis Group (2012).
- [3] Ansón-Casaos, A., Tacchini, I., Unzue, A., and Martínez, M.T., "Combined Modification of a TiO₂ Photocatalyst with Two Different Carbon Forms", *Applied Surface Science*. Vol. 270 (2013) 675–684.
- [4] Brouillard, R. "The *In Vivo* Expression of Anthocyanin Colour in Plants", *Phytochemistry*. Vol. 22 (1983) 1311–1323.
- [5] Murat, Alanyalioglu, Juan Jose Segura, Judith Oro-Sole, Nieves Casan-Pastor. "The synthesis of graphene sheets with controlled thickness and order using surfactant-assisted electrochemical process", *Carbon* Vol.50 (2012)142-152.
- [6] Panbo, LiuYing Huang dan lei Wang. "A facile synthesis of reduced graphene oxide with Zn powder under acid condition", *Material Letter*.91(2013).125-128.
- [7] Chia, Feng Chang, Quang Duc Truong dan Jiann-Ruei Chen. "Graphene as excellent support for rapid and efficient near infrared-assisted tryptic proteolysis", *Colloid and Surface B: Biointerface*. 104(2013) 221-228.
- [8] Mitchel, Brian.S. "An Introduction to materials engineering and science for chemical and materials enginee". New Jersey: John Wiley & Son, Inc. (2004).
- [9] Wang, Guoxiu, Juan Yang, Jinsoo Park, Xinglong Gou, Bei Wang, Hao Liu, dan Jane Yao. "Facile Synthesis and Characterization of Graphene Nanosheets", *Journal of Physical Chemistry C*. Vol.112 (2008): 8192-8195.
- [10] Susanti, Diah, Maula Nafi', Haryati Purwaningsih, Rindang Fajarin, George Endri Kusuma. "The Preparation of Dye Sensitized Solar Cell (DSSC) from TiO₂ and Tamarillo Extract", *Procidia Chemistry*. Vol.9 (2013):3-10.
- [11] Hongyi Q., Yang X., Jangah K., Taehyun H., dan Taesung K., "The Effect of Structure on The Photoactivity of a Graphene/TiO₂ Composit", *Materials Science and Engineering B*. Vol 184 (2014) 72–79.