

Review Penggunaan Reduced Graphene Oxide/TiO₂ sebagai Fotoelektrode pada Dye-Sensitized Solar Cell

Eka Cahya Prima^{1*}, Meilisyah Putri Utami², Andhy Setiawan³, Endi Suhendi⁴

^{1,2,3,4}Solar Energy Materials Laboratory, Faculty of Mathematics and Science Education, Universitas Pendidikan Indonesia, Bandung 40154, Indonesia

*E-mail: ekacahyaprima@upi.edu

Abstrak

Penelitian mengenai graphene yang diaplikasikan pada DSSC sudah banyak dilakukan yang bertujuan untuk meningkatkan efisiensi konversi daya pada sel surya organik. Penelitian ini dilakukan guna mencari komposisi sel surya yang terbaik sehingga dapat dimanfaatkan dan dikonversi menjadi energi listrik. Penggunaan graphene sebagai fotoanoda mampu meningkatkan efisiensi konversi seiring dengan nilai konduktivitas listrik yang baik dalam graphene. Review ini bertujuan untuk menganalisis proses peningkatan efisiensi konversi daya pada DSSC yang disebabkan oleh penambahan reduced graphene oxide pada TiO₂ yang bertindak sebagai fotoanoda dalam DSSC selama lima tahun terakhir. Hasil pengukuran efisiensi DSSC meningkat ketika dilakukan penambahan reduced graphene oxide terhadap TiO₂.

Kata kunci: Dye-sensitized Solar Cell, Graphene, Pigmen

Abstract

Many studies on graphene applied to DSSC have been carried out with the aim of increasing the efficiency of power conversion in organic solar cells. This research was conducted to find the best composition of solar cells so that they can be utilized and converted into electrical energy. The use of graphene as a photoanode can increase the conversion efficiency along with good electrical conductivity values in graphene. This review aims to analyze the process of increasing power conversion efficiency in DSSC caused by the addition of graphene to TiO₂ which acts as a photoanode in DSSC during the last five years. The results of the measurement of DSSC efficiency increased when the addition of reduced graphene oxide to TiO₂ was carried out.

Keywords: Dye-sensitized Solar Cell, Graphene, Pigment

PENDAHULUAN

Sejak ditemukannya *Dye Sensitized Solar Cell* (DSSC) oleh O'Regan dan Gratzel pada tahun 1991, para peneliti mulai mencoba untuk mensintesis berbagai jenis sensitizer (Nazeeruddin et al., 1993). Sebelum ditemukannya sel surya ini, para peneliti menggunakan sel surya silikon. Namun dengan berkembangnya ilmu pengetahuan, para peneliti menemukan bahan alternatif yang mudah diperoleh dan tidak membahayakan lingkungan yaitu pewarna organik sebagai sensitizer alami. Selain ramah lingkungan, pewarna alami juga memungkinkan biaya produksi yang rendah (Adhyaksa et al., 2014; E. Prima, Nuruddin, Yulianto, Kawamura, & Matsuda, 2018).

Penelitian terakhir mengenai DSSC masih

diupayakan untuk meningkatkan kinerja DSSC berbasis pewarna alami yaitu dengan mencari pigmen terbaik (E. C. Prima et al., 2020). Peningkatan kinerja sel surya sebagian besar bergantung pada sifat elektroda semikonduktor dan pewarna, seperti luas permukaan efektif yang tinggi dapat meningkatkan adsorpsi zat warna pada permukaan sehingga penyerapan cahaya yang diubah menjadi energi listrik akan meningkat (E. C. Prima, Hidayat, Yulianto, Suyatman, & Dipojono, 2017).

Adsorpsi cahaya dalam hal ini dilakukan oleh molekul *dye* atau zat warna dan separasi muatan oleh bahan semikonduktor. Bahan semikonduktor yang sering digunakan sebagai elektroda dalam DSSC yaitu TiO₂ (*Titanium Dioxide*). Hal tersebut dikarenakan TiO₂ memiliki fase kristal yang reaktif terhadap cahaya. Selain itu pada fotoelektroda TiO₂,

elektron dengan mudah tereksitasi ke pita konduksi ketika TiO_2 terkena cahaya dengan energi yang lebih besar dari celah energinya (Calogero, Bartolotta, Di Marco, Di Carlo, & Bonaccorso, 2015; Cole, Pepe, Al Bahri, & Cooper, 2019).

Graphene merupakan salah satu bahan yang dapat dijadikan sebagai solusi untuk meningkatkan kinerja sel surya. Pada beberapa penelitian, graphene digunakan sebagai elektroda counter untuk DSSC (Al-Ghamdi et al., 2014; Alami et al., 2019; Chong, Lai, Juan, & Leo, 2019; San Esteban & Enriquez, 2013). Selain itu, graphene dapat di campurkan bersama dengan zat pewarna dan menghasilkan efisiensi yang meningkat (Al-Ghamdi et al., 2014; Chong et al., 2019; Kazmi, Hameed, Ahmed, Arshad, & Azam, 2017; Low & Lai, 2019; San Esteban & Enriquez, 2013).

Setiap atom karbon dalam graphene menggunakan 3 dari 4 orbital terluar untuk membentuk 3 ikatan sigma yang terpisah 120° dengan 3 atom karbon yang berdekatan dibidang yang sama (Ding et al., 2015). Sehingga graphene memiliki nilai konduktivitas listrik yang baik.

Selain pencampuran graphene dalam zat warna, graphene dapat dikombinasikan dengan TiO_2 yang dibuat dengan menggunakan pencampuran mekanis antara *graphene oxide* (GO) dengan TiO_2 kemudian dilakukan reduksi GO untuk menghasilkan RGO melalui reduksi kimia atau reaksi hidrotermal. Proses reduksi tersebut, masing-masing memiliki kelebihan dan kekurangan. Pada reduksi kimia, akan melibatkan zat-zat yang tidak aman bagi lingkungan sehingga penggunaannya menjadi tidak ramah lingkungan. Kemudian pada proses reaksi hidrotermal tidak menggunakan zat yang berbahaya namun membutuhkan proses pemanasan yang cukup lama.

Hasil penelitian terbaru, terdapat alternatif lain untuk mereduksi *graphene oxide* menjadi graphene pada suhu kamar yaitu dengan menggunakan vitamin C sebagai zat pereduksi dalam larutan. Kedua bahan tersebut melalui proses pengadukan menggunakan sentrifugasi sehingga terbentuk nanokomposit RGO- TiO_2 sebagai fotoanoda pada DSSC.

RGO- TiO_2 yang digunakan sebagai fotoanoda kemudian melalui proses pelapisan pada kaca konduktif. Teknik pelapisan yang umum digunakan yaitu doctor-blade, namun terdapat kekurangan pada metode doctor-blade yaitu kurang meratanya pelapisan. Teknik lain yang umum digunakan yaitu

spin-coating, teknik ini terbilang lebih baik dikarenakan mesin meratakan dengan cukup sempurna (Chong et al., 2019; Kazmi et al., 2017; Sawant & Kale, 2020). Selain itu, teknik deposisi elektroforesis merupakan teknik yang cepat dan dapat mengontrol bahan yang akan dilapisi pada permukaan konduktif. Metode ini dapat mencegah terkelupasnya bahan di DSSC. Keuntungan dari metode ini yaitu tingkat deposisi yang tinggi, kecepatan pelapisan yang cepat, kemurnian relatif tinggi dan memiliki kemampuan untuk menghasilkan film tipis dengan kontrol yang tinggi terhadap ketebalan bahan (Ananth, Arumanayagam, Vivek, & Murugakoothan, 2014; Jambure, Gund, Dubal, Shinde, & Lokhande, 2014).

Prinsip kerja dari sel surya berbasis pewarna alami mirip dengan prinsip kerja pada fotosintesis alami pada tumbuhan. Dimana pada lapisan pertama DSSC merupakan *dye* sebagai fotosensitizer yaitu untuk menyerap cahaya. Hal ini mirip dengan fungsi klorofil pada tumbuhan. Pada *dye* terdapat pembawa positif dan negatif dalam sel. Molekul zat warna akan menyerap cahaya berbentuk foton dengan panjang gelombang yang sesuai dengan perbedaan energi antara HOMO dan LUMO pada zat warna (Cahya Prima, Yuliarto, & Kresno Dipojono, 2015; E. C. Prima, Yuliarto, Suyatman, & Dipojono, 2015, 2017). Elektron dari keadaan dasar akan ditransfer ke keadaan tereksitasi. Elektron yang tereksitasi ini akan masuk ke lapisan pita konduksi TiO_2 , kemudian elektron akan masuk ke tempat kolektor arus melalui semikonduktor dengan proses difusi. Elektron dapat mengalir ke katoda melalui sirkuit eksternal dimana dapat menghasilkan tenaga listrik. Kemudian akan terjadi proses oksidasi-reduksi dalam larutan elektrolit (Kazmi et al., 2017).

Parameter penting yang dapat digunakan untuk melihat kinerja sel surya berbasis pewarna alami yaitu *fill factor* (FF), dan efisiensi konversi energi (η) (Furukawa, Iino, Iwamoto, Kukita, & Yamauchi, 2009; Tobin, O'Reilly, Zerulla, & Sheridan, 2011). *Short circuit current density* (J_{sc}) dan *open circuit voltage* (V_{oc}) dipengaruhi oleh elektrolit. Elektrolit yang digunakan diharuskan mengandung ion redox yang berfungsi sebagai mediator antara TiO_2 dengan *counter electrode*. I_3^- bertindak sebagai pembawa muatan positif menuju *counter electrode*, sedangkan I^- akan bergerak dengan arah yang berlawanan (Bella, Gerbaldi, Barolo, & Gratzel, 2015; Mohamad, 2016; Stathatos, Lianos, Zakeeruddin,

Liska, & Grätzel, 2003; Wu et al., 2006).

Selain itu, *counter electrode* pada DSSC juga penting untuk diperhatikan. *Counter electrode* yang baik yaitu memiliki nilai resistivitas yang rendah, tahan korosi, dan katalis untuk mediator elektrolit yang mengalami reaksi redoks. Pada umumnya, Pt digunakan sebagai katalis untuk reduksi I₃⁻, namun terdapat alternatif lain sebagai pengganti Pt yaitu graphene atau karbon (Alami et al., 2019; Maiaugree et al., 2015; Sawant & Kale, 2020; Yuliza, Saehana, Rosi, Khairurrijal, & Mikrajuddin, 2013).

Penambahan reduced graphene oxide terhadap TiO₂ merupakan upaya yang dilakukan untuk menghasilkan peningkatan efisiensi pada DSSC sehingga dengan peningkatan efisiensi tersebut maka DSSC diharapkan dapat di manfaatkan sebagai energi listrik kedepannya.

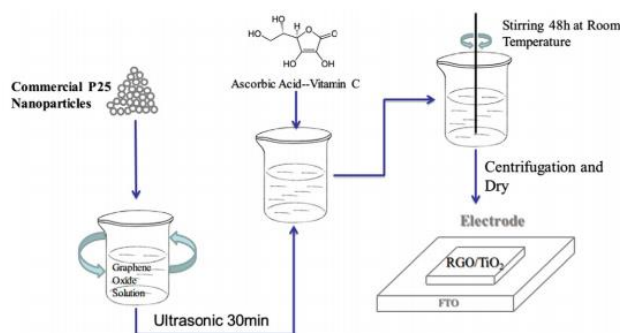
METODE/EKSPERIMEN

Pembuatan ekstrak natural dye

Pada beberapa penelitian, digunakan bahan alam seperti tumbuhan yang memungkinkan untuk menghasilkan zat warna yang pekat seperti daun yang menghasilkan pigmen klorofil, buah/sayuran berwarna merah seperti cabai yang menghasilkan pigmen antosianin, dan lain sebagainya. Ekstraksi natural dye pada umumnya menggunakan pelarut air, ethanol, atau methanol. Namun sebagian besar menggunakan pelarut ethanol dikarenakan mampu menghasilkan kualitas ekstraksi yang lebih baik. Selain itu, tingkat absorbansi dari ethanol lebih tinggi dibandingkan pelarut lain (Zhou, Wu, Gao, & Ma, 2011). Teknik sealing sering digunakan ketika dalam pembuatan ekstrak natural dye dengan menggunakan pelarut ethanol, dikarenakan ethanol bersifat mudah menguap sehingga dibutuhkan teknik sealing yang baik untuk menutup rapat plat DSSC. Proses pembuatan ekstrak natural dye agar menghasilkan efisiensi DSSC yang maksimal dapat melakukan proses pemurnian dengan 2 tahap ekstraksi, pada proses yang pertama melarutkan bahan alam pada ethanol, kemudian dilarutkan kembali ketika bahan sudah dikeringkan (A. M. Al-Alwani, Al-Mashaan, & Abdullah, 2019; A.M. Al-Alwani, Abu Hasan, Kaid Nasser Al-Shorgani, & S.A. Al-Mashaan, 2020; Hemmatzadeh & Mohammadi, 2013).

Pembuatan RGO-TiO₂ nanokomposit

Pada beberapa penelitian, pembuatan RGO-TiO₂ dimulai dengan melarutkan graphene oksida dalam air deionisasi kemudian dilakukan sonifikasi sampai larutan menjadi jernih dan tidak terdapat endapan. Kemudian TiO₂ ditambahkan kedalam larutan untuk diaduk bersama. Selanjutnya vitamin C ditambahkan kedalam larutan. Metode lain yang digunakan untuk pembuatan RGO-TiO₂ yaitu dengan electrospinning, dimana metode tersebut akan mempersiapkan nanofibers TiO₂ yang digabungkan dengan RGO (Nasr et al., 2017). Kemudian setelah pembuatan RGO-TiO₂, dapat dilakukan metode Gratzel yaitu melapisi kaca konduktor dengan pasta yang telah dibuat. Pelapisan kaca dalam percobaan Gratzel menggunakan teknik doctor-blade (Ananth et al., 2014; Qibtiya, Prima, Yuliarto, & Suyatman, 2016).



Gambar 1. Reduksi GO dan pembuatan fotoanoda RGO-TiO₂ untuk DSSC (Ding et al., 2015)

Kaca atau substrat yang biasa digunakan dapat berupa kaca *flourine doped tin oxide* (FTO) maupun *indium tin oxide* (ITO).

Pengujian kristalisasi RGO-TiO₂

Pengujian kristalisasi RGO-TiO₂ dilakukan menggunakan X-ray Diffractometer.

Pengujian morfologi RGO-TiO₂

Morfologi RGO-TiO₂ dilakukan karakterisasi menggunakan *scanning electron microscopy* (SEM) dengan menggunakan variasi pada tegangan atau *transmittance electron microscopy* (TEM).

Pengujian absorbansi natural dye

Pengujian absorbansi dari natural dye dapat dilakukan dengan berbagai alat seperti spektroskopi UV-Vis untuk pengujian konsentrasi dan absorbansi. Zat warna alami mampu mengabsorpsi gelombang

dengan intensitas tinggi dibawah panjang gelombang 900nm.

Pengujian dye dalam identifikasi gugus-gugus fungsi dalam senyawa dye

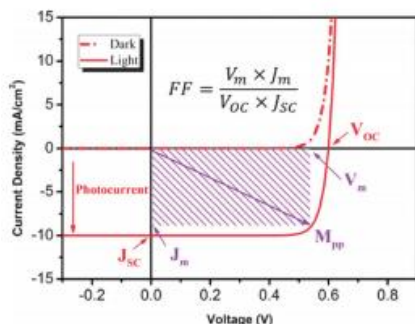
Vibrasi ikatan-ikatan yang terdapat dalam senyawa dye dapat ditunjukkan oleh spektrum FTIR. Analisis FTIR dapat dilakukan pada bilangan gelombang 4500-500 cm^{-1} maupun bilangan gelombang lainnya (Derenne, Van Hemelryck, Lamoral-Theys, Kiss, & Goormaghtigh, 2013; Griffiths & de Hasseth, 2007; Jantasee, Thumanu, Muangsan, Leeanansaksiri, & Maensiri, 2014).

Pengujian Elektrokimia

Pengujian elektrokimia dilakukan dengan parameter *cyclic voltammetry* (CV), dan *electrochemical impedance spectroscopy* (EIS) (Bisquert & Compte, 2001; Wang, Moser, & Grätzel, 2005a, 2005b).

Perhitungan Efisiensi DSSC

Efisiensi konversi daya (PCE) pada sel surya organik ditentukan oleh tiga parameter, yaitu *shortcircuit current density* (J_{sc}), *open-circuit voltage* (V_{oc}), dan *fill factor* (FF).



Gambar 2. Grafik karakteristik arus-tegangan

Pada gambar 2 menunjukkan grafik arus-tegangan untuk sel surya organik secara umum. Pada titik tertentu dalam grafik tersebut terdapat daya maksimum (P_m) dengan rapat arus (J_m) dan tegangan (V_m). Sehingga efisiensi konversi daya dari sel surya organik dapat dihitung menggunakan persamaan:

$$\eta = \frac{J_{sc} \cdot V_{oc} \cdot FF}{P_{in}} \times 100\%$$

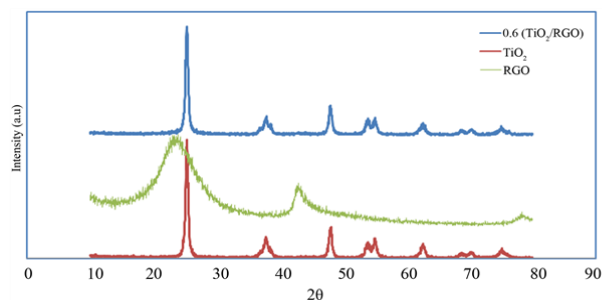
dengan P_{in} merupakan daya input penyinaran diatas permukaan DSSC. Kemudian FF dapat dihitung menggunakan persamaan:

$$FF = \frac{J_m \cdot V_m}{J_{sc} \cdot V_{oc}}$$

HASIL DAN PEMBAHASAN

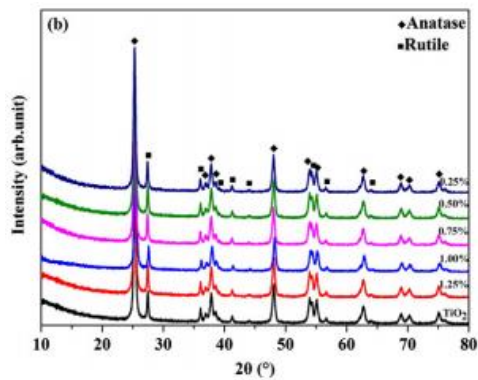
Struktur Kristal RGO-TiO₂

Pada beberapa penelitian dalam pengujian kristalisasi RGO-TiO₂ terdapat perbedaan dalam nilai radiasi Cu K α dan dalam rentang yang berbeda. Pada penelitian yang membandingkan struktur kristal RGO murni, TiO₂, dan struktur kristal RGO-TiO₂ dengan menggunakan nilai radiasi Cu K α 1.5418 Å dengan laju pemindaian 0.033°s⁻¹ pada rentang 2θ dari 10°- 90° (Low & Lai, 2019). Terlihat pada gambar 3 merupakan hasil kristalisasi untuk sampel RGO murni, hasil kristalisasi TiO₂, dan hasil dari kristalisasi RGO-TiO₂. Pada hasil karakterisasi RGO-TiO₂ terlihat bahwa setelah TiO₂ dilapisi dengan RGO, puncak-puncak anatase TiO₂ masih tetap pada posisi yang sama. Akibat dari tumpang tindihnya anatase TiO₂ pada puncak $2\theta = 24.4^\circ$ (hkl = 002), puncak RGO pada $2\theta = 25.2^\circ$ tidak dapat terlihat dengan jelas. Intensitas puncak TiO₂ yang lebih tinggi ditutupi oleh puncak RGO dikarenakan kristalinitas TiO₂ yang lebih tinggi (Low & Lai, 2019).



Gambar 3. Pola XRD dari RGO murni, TiO₂, RGO-TiO₂ dengan durasi *spinning* 30 detik

Hasil pengujian kristalisasi menggunakan radiasi Cu K α 0.0541 nm secara bertahap dengan ukuran 0.02° (0.2 detik/step) pada rentang 2θ dari 10°- 80° dapat dilihat pada gambar 4. Pada gambar menunjukkan bahwa fase TiO₂ anatase dan rutil menghasilkan puncak yang terlihat pada gambar, dengan kandungan relatif fase anatase dan rutil sekitar 4:1 yang sesuai dengan TiO₂ (Ding et al., 2015).



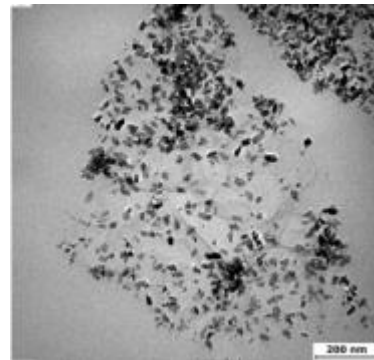
Gambar 4. Pola XRD dari RGO-TiO₂ (Ding et al., 2015)

Nanopartikel TiO₂ mempertahankan struktur kisi kristalnya setelah melalui proses reduksi sehingga pada gambar terlihat tidak adanya perubahan puncak yang jelas pada berbagai kandungan RGO-TiO₂.

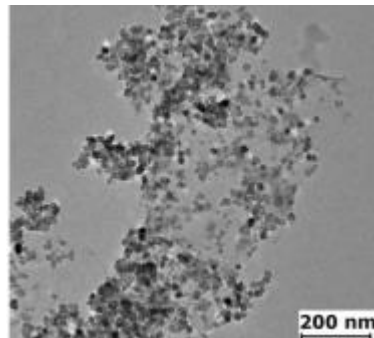
Struktur Morfologi RGO-TiO₂

Pada beberapa penelitian dilakukan karakterisasi mengenai morfologi dari RGO-TiO₂ menggunakan TEM, namun terdapat juga untuk beberapa penelitian menggunakan SEM.

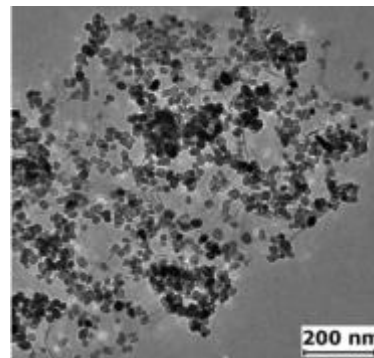
Pada penelitian menggunakan TEM, dilakukan perbandingan hasil karakterisasi TEM untuk berbagai sampel diantaranya dengan memvariasikan suhu dari tiap sampel. Terdapat perbedaan hasil dari sampel TEM seperti yang terlihat pada Gambar 5. Sampel TEM dibuat bervariasi dari suhu 120°, 150°, dan 180°. Gambar 5 (a) merupakan hasil dari sampel TEM pada suhu 120°, (b) merupakan hasil sampel TEM 150°, dan (c) hasil dari sampel TEM pada suhu 180°. Pada gambar terlihat bahwa untuk sampel (c) jika dibandingkan dengan sampel (a) terlihat memiliki bentuk yang lebih bulat. Ukuran rata-rata dari masing-masing sampel diantaranya 20.4 ± 3.9 nm, 20.5 ± 4.7 nm, dan 21.3 ± 3.5 nm. Berdasarkan hasil karakterisasi, terlihat bahwa suhu mempengaruhi morfologi RGO-TiO₂. Sampel yang diberi suhu lebih tinggi terlihat lebih banyak partikel yang mengkristal, berbentuk bulat, dan homogen. Sehingga suhu dapat mempengaruhi morfologi RGO-TiO₂ (Chang, 2013).



(a)



(b)



(c)

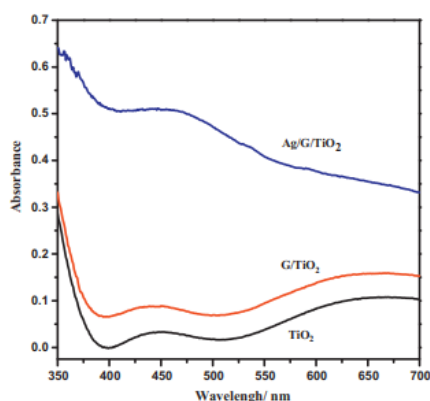
Gambar 5. Karakterisasi TEM RGO-TiO₂ (a) 120°, (b) 150°, dan (c) 180° (Sumber: B. Sze, 2013)

Spektrum Penyerapan

Spektroskopi UV-Vis merupakan alat untuk mengkarakterisasi optik yang efektif untuk memahami sifat optik. Spektrum serapan UV-Vis dari nanokomposit TiO₂ dan TiO₂+graphene dipahami untuk menentukan hubungan antara efisiensi konversi energi matahari dan celah pita energi (Kazmi et al., 2017).

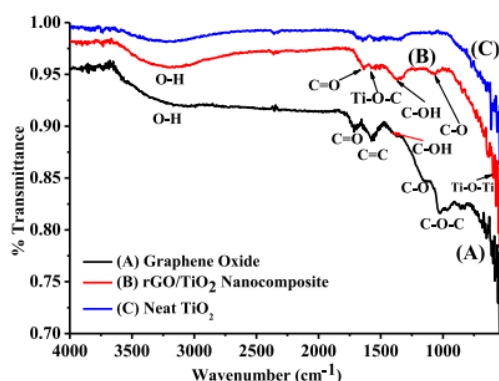
Dari hasil penelitian yang dilakukan, penyerapan wilayah UV dari film disebabkan oleh eksitasi elektron dimana elektron bereksitasi dari satu pita ke pita lain. Berdasarkan Gambar 3 dimana hasil penelitian membandingkan nilai penyerapan untuk TiO₂ murni, TiO₂+ G, dan TiO₂+G+Ag. Terlihat bahwa untuk TiO₂ murni menunjukkan penyerapan yang

lemah dan memiliki nilai onset penyerapan pada 380 nm dengan celah pita energi sebesar 3.26 eV. Kemudian nilai penyerapan untuk $\text{TiO}_2+\text{G}+\text{Ag}$ menunjukkan penyerapan yang intens dan menghasilkan photocurrent yang paling banyak. Sedangkan untuk TiO_2+G menunjukkan nilai penyerapan yang lebih tinggi jika dibandingkan dengan TiO_2 murni.



Gambar 6. Spektrum penyerapan dari UV-Vis untuk berbagai film

Gugus-gugus fungsi senyawa dye dalam FTIR

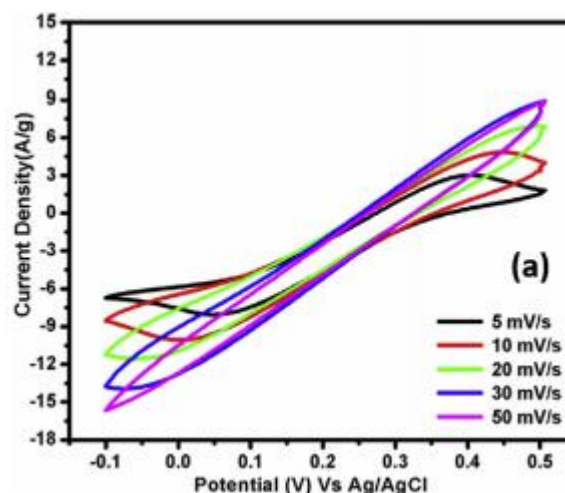


Gambar 7. Spektrum FTIR dari TiO_2 , graphene oxide (GO), dan nanokomposit RGO- TiO_2 .

FTIR merupakan salah satu instrumen yang digunakan untuk mengidentifikasi gugus-gugus fungsi dalam suatu senyawa seperti dye. Pada penelitian yang membandingkan hasil FTIR antara TiO_2 , graphene oxide (GO), dan RGO- TiO_2 seperti dalam gambar 7 menampilkan bahwa pada spektrum IR nanokomposit RGO- TiO_2 menunjukkan puncak karakteristik yang luas pada bilangan gelombang 3367 cm^{-1} yang hal ini sesuai dengan alur vibrasi O-H dari gugur C-OH (Deshmukh et al., 2020).

Analisis Elektrokimia

Analisis elektrokimia menggunakan parameter CV dalam sebuah penelitian dilakukan pengujian pada rentang *potential window* dari -0.1 sampai 0.5 V karena dalam rentang tersebut berlangsung reaksi oksidasi dan reduksi. Seperti pada gambar 8 menampilkan kurva CV elektroda RGO- TiO_2 sebagai fungsi dari laju pemindaian (5-50 mV/s). Pada gambar tersebut terlihat puncak redoks yang menggambarkan kepadatan energi yang tinggi dari sistem sampel dan dapat dipengaruhi oleh sifat pseudokapasitif TiO_2 (Sundriyal, Shrivastav, Sharma, Mishra, & Deep, 2019).



Gambar 8. Kurva CV dari RGO- TiO_2 untuk berbagai laju pemindaian (Sundriyal et al., 2019)

Efisiensi DSSC ketika Penambahan RGO/ TiO_2

Pada beberapa penelitian didapatkan bahwa nilai efisiensi DSSC meningkat seiring dengan penambahan konsentrasi RGO terhadap TiO_2 . Efisiensi tertinggi didapatkan sebesar 3.11% untuk penambahan RGO 5 wt% dengan nilai J_{sc} dan V_{oc} sebesar 6.68 mA/cm^2 dan 0.65 V.

PENUTUP

Pengembangan pewarna alami sebagai fotosensitizer untuk DSSC mengalami peningkatan dan sudah menjadi salah satu energi terbarukan yang menarik dan dapat diteliti. Pada penelitian ini disajikan sintesis dan karakterisasi dari RGO- TiO_2 dimana dalam pembuatan RGO berasal dari graphene oxide yang melalui reaksi redoks. Nanopartikel graphene disintesis kemudian dilakukan karakterisasi terhadap TiO_2 dan $\text{TiO}_2+\text{graphene}$ untuk mempelajari apakah penambahan graphene dapat meningkatkan efisiensi DSSC. Berdasarkan

dari hasil beberapa penelitian, maka RGO dapat digunakan sebagai bahan yang dapat ditambahkan pada TiO₂ sebagai fotoanoda dikarenakan hasil beberapa penelitian menunjukkan bahwa terdapat peningkatan kinerja DSSC. Hal tersebut dikaitkan dengan peningkatan penyerapan cahaya, rentang panjang gelombang serapan, dan jarak transportasi muatan yang lebih pendek.

UCAPAN TERIMAKASIH

Penelitian ini didanai oleh Hibah Penelitian Unggulan Perguruan Tinggi (No. 279/UN40.LP/PT.01.03/2021), Kementerian Pendidikan dan Kebudayaan RI 2021.

REFERENSI

- A. M. Al-Alwani, M., Al-Mashaan, A. B. S. A., & Abdullah, M. F. (2019). Performance of the dye-sensitized solar cells fabricated using natural dyes from *Ixora coccinea* flowers and *Cymbopogon schoenanthus* leaves as sensitizers. *International Journal of Energy Research*, *43*(13). <http://dx.doi.org/10.1002/er.4747>
- A.M. Al-Alwani, M., Abu Hasan, H., Kaid Nasser Al-Shorgani, N., & S.A. Al-Mashaan, A. B. (2020). Natural dye extracted from *Areca catechu* fruits as a new sensitizer for dye-sensitized solar cell fabrication: Optimisation using D-Optimal design. *Materials Chemistry and Physics*, *240*, 122204. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2019.122204>
- Adhyaksa, G. W. P., Prima, E. C., Lee, D. K., Ock, I., Yatman, S., Yulianto, B., & Kang, J. K. (2014). A light harvesting antenna using natural extract graminoids coupled with plasmonic metal nanoparticles for bio-photovoltaic cells. *Adv. Energy Mater.*, *4*(18), 1400470. <http://dx.doi.org/10.1002/aenm.201400470>
- Al-Ghamdi, A. A., Gupta, R., Kahol, P., Wageh, S., Al-Turki, Y., El Shirbeeney, W., & Yakuphanoglu, F. (2014). Improved solar efficiency by introducing graphene oxide in purple cabbage dye sensitized TiO₂ based solar cell. *Solid State Communications*, *183*, 56-59. <https://doi.org/10.1016/j.ssc.2013.12.021>
- Alami, A. H., Aokal, K., Zhang, D., Taieb, A., Faraj, M., Alhammedi, A., . . . Irimia-Vladu, M. (2019). Low-cost dye-sensitized solar cells with ball-milled tellurium-doped graphene as counter electrodes and a natural sensitizer dye. *International Journal of Energy Research*, *43*(11), 5824-5833. <http://dx.doi.org/10.1002/er.4684>
- Ananth, S., Arumanayagam, T., Vivek, P., & Murugakoothan, P. (2014). Direct synthesis of natural dye mixed titanium dioxide nano particles by sol-gel method for dye sensitized solar cell applications. *Optik - International Journal for Light and Electron Optics*, *125*(1), 495-498. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijleo.2013.07.018>
- Bella, F., Gerbaldi, C., Barolo, C., & Gratzel, M. (2015). Aqueous dye-sensitized solar cells. *Chemical Society Reviews*, *44*(11), 3431-3473. doi:10.1039/C4CS00456F
- Bisquert, J., & Compte, A. (2001). Theory of the electrochemical impedance of anomalous diffusion. *J. Electroanal. Chem.*, *499*(1), 112-120. [http://dx.doi.org/10.1016/S0022-0728\(00\)00497-6](http://dx.doi.org/10.1016/S0022-0728(00)00497-6)
- Cahaya Prima, E., Yulianto, B., & Kresno Dipojono, H. (2015). Theoretical investigation of anthocyanidin aglycones as photosensitizers for dye-sensitized tio₂ solar cells. *Adv. Mat. Res.*, *1112*, 317-320. <http://dx.doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.1112.317>
- Calogero, G., Bartolotta, A., Di Marco, G., Di Carlo, A., & Bonaccorso, F. (2015). Vegetable-based dye-sensitized solar cells. *Chem. Soc. Rev.*, *44*(10), 3244-3294. <http://dx.doi.org/10.1039/C4CS00309H>
- Chang, B. Y. S. (2013). *Synthesis and characterization of reduced graphene oxide/TiO₂ nanocomposites as high performance photocatalyst*/Betty Chang Yea Sze. University of Malaya.
- Chong, S. W., Lai, C. W., Juan, J. C., & Leo, B. F. (2019). An investigation on surface modified TiO₂ incorporated with graphene oxide for dye-sensitized solar cell. *Solar Energy*, *191*, 663-671.
- Cole, J. M., Pepe, G., Al Bahri, O. K., & Cooper, C. B. (2019). Cosensitization in Dye-Sensitized Solar Cells. *Chemical Reviews*, *119*(12), 7279-7327. <http://dx.doi.org/10.1021/acs.chemrev.8b00632>
- Derenne, A., Van Hemelryck, V., Lamoral-Theys, D., Kiss, R., & Goormaghtigh, E. (2013). FTIR

- spectroscopy: A new valuable tool to classify the effects of polyphenolic compounds on cancer cells. *Biochimica et Biophysica Acta (BBA) - Molecular Basis of Disease*, 1832(1), 46-56.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.bbadis.2012.10.010>
- Deshmukh, S. P., Kale, D. P., Kar, S., Shirsath, S. R., Bhanvase, B. A., Saharan, V. K., & Sonawane, S. H. (2020). Ultrasound assisted preparation of rGO/TiO₂ nanocomposite for effective photocatalytic degradation of methylene blue under sunlight. *Nano-Structures & Nano-Objects*, 21, 100407.
- Ding, H., Zhang, S., Chen, J.-T., Hu, X.-P., Du, Z.-F., Qiu, Y.-X., & Zhao, D.-L. (2015). Reduction of graphene oxide at room temperature with vitamin C for RGO-TiO₂ photoanodes in dye-sensitized solar cell. *Thin Solid Films*, 584, 29-36.
- Furukawa, S., Iino, H., Iwamoto, T., Kukita, K., & Yamauchi, S. (2009). Characteristics of dye-sensitized solar cells using natural dye. *Thin Solid Films*, 518(2), 526-529.
- Griffiths, P., & de Hasseth, J. A. (2007). *Fourier Transform Infrared Spectrometry (2nd ed.)*. New Jersey: Wiley.
- Hemmatzadeh, R., & Mohammadi, A. (2013). Improving optical absorptivity of natural dyes for fabrication of efficient dye-sensitized solar cells. *Journal of Theoretical and Applied Physics*, 7(1), 1-7.
<http://dx.doi.org/10.1186/2251-7235-7-57>
- Jambure, S. B., Gund, G. S., Dubal, D. P., Shinde, S. S., & Lokhande, C. D. (2014). Cost effective facile synthesis of TiO₂ nanograins for flexible DSSC application using rose bengal dye. *Electronic Materials Letters*, 10(5), 943-950. <http://dx.doi.org/10.1007/s13391-014-3200-0>
- Jantasee, A., Thumanu, K., Muangsan, N., Leeansaksiri, W., & Maensiri, D. (2014). Fourier Transform Infrared Spectroscopy for Antioxidant Capacity Determination in Colored Glutinous Rice. *Food Anal. Methods*, 7(2), 389-399.
<http://dx.doi.org/10.1007/s12161-013-9637-1>
- Kazmi, S. A., Hameed, S., Ahmed, A. S., Arshad, M., & Azam, A. (2017). Electrical and optical properties of graphene-TiO₂ nanocomposite and its applications in dye sensitized solar cells (DSSC). *Journal of Alloys and Compounds*, 691, 659-665.
- Low, F. W., & Lai, C. W. (2019). Reduced graphene oxide decorated TiO₂ for improving dye-sensitized solar cells (DSSCs). *Current Nanoscience*, 15(6), 631-636.
- Maiaugree, W., Lowpa, S., Towannang, M., Rutphonsan, P., Tangtrakarn, A., Pimanpang, S., . . . Amornkitbamrung, V. (2015). A dye sensitized solar cell using natural counter electrode and natural dye derived from mangosteen peel waste. *Scientific Reports*, 5, 15230.
 doi:10.1038/srep15230
<http://www.nature.com/articles/srep15230#supplementary-information>
- Mohamad, A. A. (2016). Absorbency and conductivity of quasi-solid-state polymer electrolytes for dye-sensitized solar cells: A characterization review. *Journal of Power Sources*, 329, 57-71.
<https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2016.08.064>
- Nasr, M., Balme, S., Eid, C., Habchi, R., Miele, P., & Bechelany, M. (2017). Enhanced visible-light photocatalytic performance of electrospun rGO/TiO₂ composite nanofibers. *The Journal of Physical Chemistry C*, 121(1), 261-269.
- Nazeeruddin, M. K., Kay, A., Rodicio, I., Humphry-Baker, R., Mueller, E., Liska, P., . . . Graetzel, M. (1993). Conversion of light to electricity by cis-X₂bis(2,2'-bipyridyl-4,4'-dicarboxylate)ruthenium(II) charge-transfer sensitizers (X = Cl-, Br-, I-, CN-, and SCN-) on nanocrystalline titanium dioxide electrodes. *Journal of the American Chemical Society*, 115(14), 6382-6390.
<http://dx.doi.org/10.1021/ja00067a063>
- Prima, E., Nuruddin, A., Yuliarto, B., Kawamura, G., & Matsuda, A. (2018). Combined spectroscopic and TDDFT study of single-double anthocyanins for application in dye-sensitized solar cells. *New Journal of Chemistry*, 42(14), 11616-11628.
- Prima, E. C., Hidayat, N. N., Yuliarto, B., Suyatman, & Dipojono, H. K. (2017). A combined spectroscopic and TDDFT study of natural dyes extracted from fruit peels of Citrus reticulata and Musa acuminata for dye-sensitized solar cells. *Spectrochim. Acta Mol. Biomol. Spectrosc.*, 171, 112-125.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.saa.2016.07.024>

- Prima, E. C., Nugroho, H. S., Nugraha, Refantero, G., Panatarani, C., & Yulianto, B. (2020). Performance of the dye-sensitized quasi-solid state solar cell with combined anthocyanin-ruthenium photosensitizer. *RSC Advances*, *10*(60), 36873-36886. <http://dx.doi.org/10.1039/D0RA06550A>
- Prima, E. C., Yulianto, B., Suyatman, & Dipojono, H. K. (2015). Ground and excited state properties of high performance anthocyanidin dyes-sensitized solar cells in the basic solutions. *AIP Conf. Proc.*, *1677*, 120002. <http://dx.doi.org/10.1063/1.4930785>
- Prima, E. C., Yulianto, B., Suyatman, & Dipojono, H. K. (2017). Donor-Modified Anthocyanin Dye-Sensitized Solar Cell with TiO₂ Nanoparticles: Density Functional Theory Investigation *Mater. Sci. Forum*, *889*, 178-183.
- Qibtiya, M. A., Prima, E. C., Yulianto, B., & Suyatman. (2016). pH Influences on optical absorption of Anthocyanin from Black Rice as Sensitizer for Dye Sensitized Solar Cell TiO₂ Nanoparticles. *Materials Science Forum*, *864*, 154-158. <http://dx.doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.864.154>
- San Esteban, A. C. M., & Enriquez, E. P. (2013). Graphene–anthocyanin mixture as photosensitizer for dye-sensitized solar cell. *Solar Energy*, *98*, 392-399.
- Sawant, J. P., & Kale, R. B. (2020). Surfactant mediated TiO₂ photoanodes and Cu₂ZnSnS₄ counter electrodes for high efficient dye sensitized solar cells. *Materials Letters*, *265*, 127407. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2020.127407>
- Stathatos, E., Lianos, P., Zakeeruddin, S. M., Liska, P., & Grätzel, M. (2003). A Quasi-Solid-State Dye-Sensitized Solar Cell Based on a Sol–Gel Nanocomposite Electrolyte Containing Ionic Liquid. *Chemistry of Materials*, *15*(9), 1825-1829. <http://dx.doi.org/10.1021/cm0213568>
- Sundriyal, S., Shrivastav, V., Sharma, M., Mishra, S., & Deep, A. (2019). Significantly enhanced performance of rGO/TiO₂ nanosheet composite electrodes based 1.8 V symmetrical supercapacitor with use of redox additive electrolyte. *Journal of Alloys and Compounds*, *790*, 377-387.
- Tobin, L. L., O'Reilly, T., Zerulla, D., & Sheridan, J. T. (2011). Characterising dye-sensitised solar cells. *Optik - International Journal for Light and Electron Optics*, *122*(14), 1225-1230. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijleo.2010.07.028>
- Wang, Q., Moser, J.-E., & Grätzel, M. (2005a). Electrochemical impedance spectroscopic analysis of dye-sensitized solar cells. *J. Phys. Chem. B*, *109*(31), 14945-14953. <http://dx.doi.org/10.1021/jp052768h>
- Wang, Q., Moser, J.-E., & Grätzel, M. (2005b). Electrochemical Impedance Spectroscopic Analysis of Dye-Sensitized Solar Cells. *J. Phys. Chem B*, *109*(31), 14945-14953. <http://dx.doi.org/10.1021/jp052768h>
- Wu, J., Lan, Z., Wang, D., Hao, S., Lin, J., Huang, Y., . . . Sato, T. (2006). Gel polymer electrolyte based on poly(acrylonitrile-co-styrene) and a novel organic iodide salt for quasi-solid state dye-sensitized solar cell. *Electrochimica Acta*, *51*(20), 4243-4249. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2005.11.047>
- Yuliza, E., Saehana, S. R., D. Y., Rosi, M., Khairurrijal, & Mikrajuddin, A. (2013). Enhancement Performance of Dye-Sensitized Solar Cells from Black Rice as Dye and Black Ink as Counter Electrode with Inserting Copper on the Space between TiO₂ Particle's by Using Electroplating Method. *Materials Science Forum*, *737*, 85-92.
- Zhou, H., Wu, L., Gao, Y., & Ma, T. (2011). Dye-sensitized solar cells using 20 natural dyes as sensitizers. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, *219*(2–3), 188-194. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jphotochem.2011.02.008>