



EFISIENSI *COUNTER ELECTRODE* DENGAN PENGURANGAN PEMAKAIAN PLATINA MENGGUNAKAN KOMPOSIT BAHAN RAMAH LINGKUNGAN GRAFIN DAN *CARBON NANOTUBES* UNTUK APLIKASI *DYE SENSITIZED SOLAR CELLS*

Fatiatun Fatiatun* dan Intan Masruroh Swasti

Prodi Pendidikan Fisika, Fakultas Ilmu Tarbiyah dan Keguruan, Universitas Sains Al-Qur'an, Mojotengah, Wonosobo, Indonesia

*coresponding author: fatia@unsiq.ac.id

Received 04-06-2022, Revised 20-10-2022, Accepted 24-10-2022

Available Online 27-10-2022, Published Regularly October 2022

ABSTRACT

Dye sensitized solar cells (DSSCs) are the most popular solar cells in the third generation. DSSCs have been widely developed as an alternative to silicon-based solar cells because of its easy manufacturing process, high efficiency, easy production costs, and environmental friendliness. Graphene and carbon nanotubes (CNTs) are promising materials to reduce the use of platinum (Pt) in counter electrode (CE) due to their excellent properties, such as thermal, electrical conductivity, and high surface area. One of the derivatives of graphene that is often used is reduced graphene oxide (rGO) which is produced from GO solution by a reduction process. GO was synthesized in an electrolyte containing surfactant by the electrochemical exfoliation method. The specially prepared sodium 1,4-bis(neopentyloxy)-3-(neopentyloxycarbonyl)-1,4-dioxobutane-2-silphonate (TC14) surfactant was used in GO synthesis. The CE thin film of TC14-rGO/CNTs/Pt hybrid shows the highest efficiency values (0.0594%) with J_{sc} , V_{oc} , and FF of 0.176 mA/cm², 0.622 V, and 0.464, respectively. This was believed due to the conjugated network in CNTs acts as a connecting cable between the TC14-rGO layers and as a vacancy filler, the high electrical conductivity value and the larger surface area also cause faster electron movement, making these properties important in DSSC performance. The FF value which is also the highest in the TC14-rGO/CNTs/Pt hybrid samples as CE is also influenced by its structure. The high surface area of CNTs and TC14-rGO in the TC14-rGO/CNTs/Pt hybrid samples exhibited important properties for generating dye after electron injection and led to a faster route of electron regulation during DSSCs processing. These findings indicate that Pt composited with environmentally friendly and inexpensive materials such as T14-rGO and CNTs can improve CE performance in DSSCs applications. Based on this, this research can be used as a basis for further research on the fabrication of carbon-based CE.

Keywords: carbon nanotubes; counter electrode; DSSCs; graphene; platinum

ABSTRAK

Sel surya tersensitisasi warna (*dye sensitized solar cell*-DSSC) merupakan solar sel yang paling terkenal di generasi ketiga. DSSC sudah secara luas dikembangkan sebagai alternatif pengganti solar sel berbasis silikon karena proses pembuatannya yang mudah, efisiensi tinggi, biaya produksi yang mudah dan ramah lingkungan. Grafen dan *carbon nanotubes* (CNTs) merupakan bahan-bahan yang menjanjikan untuk mengurangi penggunaan platina (Pt) dalam CE karena sifatnya yang sangat baik, seperti konduktivitas termal, listrik dan luas permukaan yang tinggi. Salah satu turunan dari grafen yang sering digunakan yaitu *reduced graphene oxide* (rGO) yang diproduksi dari larutan GO dengan proses reduksi. GO disintesis dalam elektrolit yang mengandung surfaktan dengan metode

electrochemical exfoliation. Surfaktan tiga kaki sodium 1, 4-bis (neopentyloxy)-3-(neopentyloxycarbonyl)-1, 4-dioxobutane-2-silphonate (TC14) yang dibuat khusus digunakan dalam sintesis GO. Dari semua CE yang telah difabrikasi, sampel film tipis CE TC14-rGO/CNTs/Pt *hybrid* memiliki nilai efisiensi yang paling besar (0.0594%) dengan J_{sc} , V_{oc} , dan FF berturut-turut yaitu 0.176 mA/cm², 0.622 V and 0.464. Nilai efisiensi yang tinggi ini karena jaringan terkonjugasi pada CNTs berperan sebagai kabel penghubung antara lapisan-lapisan TC14-rGO dan sebagai pengisi kekosongan, tingginya nilai konduktivitas listrik serta luas permukaan yang lebih besar juga menyebabkan pergerakan elektron lebih cepat sehingga menjadikan sifat-sifat ini penting dalam kinerja DSSCs. Nilai FF yang juga paling tinggi pada sampel TC14-rGO/CNTs/Pt *hybrid* sebagai CE juga dipengaruhi oleh strukturnya. Luas permukaan yang tinggi pada CNTs dan TC14-rGO pada sampel TC14-rGO/CNTs/Pt *hybrid* menunjukkan sifat yang penting untuk membangkitkan pewarna (*dye*) setelah injeksi electron dan menyebabkan rute regulasi elektron yang lebih cepat selama proses DSSCs. Penemuan ini mengindikasikan bahwa Pt yang dikompositkan dengan bahan yang ramah lingkungan dan murah seperti T14-rGO dan CNTs dapat meningkatkan kinerja CE dalam aplikasi DSSCs. Berdasarkan hal tersebut, penelitian ini dapat digunakan sebagai dasar dalam penelitian selanjutnya mengenai fabrikasi CE dengan bahan dasar grafin.

Kata kunci: Grafin; Carbon Nanotubes; Counter Electrode; DSSCs; Platina

PENDAHULUAN

Sejak tahun 1991, sel surya tersensitisasi warna (*dye sensitized solar cell*-DSSC) merupakan solar sel yang paling terkenal di generasi ketiga. DSSC sudah secara luas dikembangkan sebagai alternatif pengganti solar sel berbasis silikon karena proses pembuatannya yang mudah, efisiensi tinggi, biaya produksi yang mudah dan ramah lingkungan ^[1]. DSSC juga menunjukkan hasil yang lebih baik dibandingkan solar sel yang konvensional dan dapat mengubah energi matahari menjadi listrik. DSSC terdiri dari empat komponen yaitu fotoanoda, pewarna (*dye*), elektrolit dan *counter electrode* (CE). CE dalam aplikasi DSSC telah memperoleh perhatian yang cukup besar untuk dikembangkan karena berfungsi sebagai katalis untuk mempercepat reaksi reduksi-oksidasi pada elektrolit ^[2].

Pt merupakan material yang sudah banyak digunakan sebagai CE karena konduktivitas listrik dan aktivitas katalitik yang tinggi ^{[3], [4]}. Namun, Pt tergolong material yang mahal dan terbatas jumlahnya di alam sehingga perlu dikurangi jumlah penggunaannya. Bahan-bahan berbasis carbon seperti grafin, carbon nanotubes (CNTs) dan karbon hitam dapat dipilih sebagai bahan alternative untuk CE. Grafin adalah bahan yang menjanjikan untuk mengurangi penggunaan platina (Pt) karena sifatnya yang sangat baik, seperti konduktivitas termal, listrik dan luas permukaan yang tinggi (2630 m² g⁻¹) ^{[5], [6]}. Grafin juga menghadirkan biaya produksi yang murah, transparansi optik yang tinggi, aktivitas elektrokatalitik yang bagus, ramah lingkungan dan nilai efisiensi yang tinggi ketika diaplikasikan dalam DSSC ^[7]. Grafin dapat disintesis dengan menggunakan pendekatan fisik, seperti pengelupasan mikromekanis, pertumbuhan epitaxial pada silikon karbida dan uap kimia deposisi (CVD) ^{[8], [9]}. Selain grafin, turunannya yaitu grafin oksida (GO) telah dikembangkan sebagai bahan CE karena proses pembuatannya yang mudah, konduktivitas listrik dan luas permukaan yang tinggi ^[10]. GO dapat disintesis dengan berbagai cara seperti *Hummer's* dan *electrochemical exfoliation* ^[11].

Metode *Hummer's* menunjukkan biaya produksi yang tinggi karena menggunakan banyak bahan kimia dan waktu produksi yang lama ^[12]. Oleh karena itu, metode *electrochemical exfoliation* dipilih untuk sintesis GO karena ramah lingkungan, proses pembuatan yang mudah dan biaya produksi yang murah ^[13]. Kandungan oksigen yang tinggi pada GO dikurangi melalui proses reduksi untuk menghasilkan larutan *reduced graphene oxide* (rGO). Kandungan oksigen yang rendah pada rGO ini menjadikan sifatnya lebih konduktif, strukturnya lebih bagus dan stabil ^[14]. Berdasarkan hal tersebut, peneliti akan mengembangkan CE dengan menggunakan sedikit Pt yang dikompositkan dengan rGO dan CNTs yang berasal dari limbah minyak kelapa

sawit yang ramah lingkungan. Komposit antara Pt, rGO dengan CNTs ini bertujuan untuk saling melengkapi sifat yang dimiliki oleh masing-masing material sehingga tercipta sifat yang lebih bagus dan ramah lingkungan untuk CE dalam aplikasi DSSC.

METODE

Sintesis *Graphene Oxide*

Metode yang bisa digunakan dalam sintesis GO yaitu dengan pendekatan kimia seperti *electrochemical exfoliation* dan *Hummers* [11]. Metode *Hummers* memperoleh perhatian khusus karena efisiennya yang tinggi dan proses reaksi yang singkat. Akan tetapi, metode *Hummers* termasuk metode yang mahal karena menggunakan banyak bahan kimia dan menimbulkan tingkat cacat yang tinggi pada sampel. Oleh karena itu, *electrochemical exfoliation* dipilih untuk sintesis GO karena biaya produksi yang murah, ramah lingkungan dan efisien [10]. GO disintesis dalam elektrolit yang mengandung surfaktan. Surfaktan tiga kaki sodium 1, 4-bis (neopentyloxy)-3-(neopentyloxycarbonyl)-1, 4-dioxobutane-2-silphonate (TC14) yang dibuat sendiri secara khusus digunakan dalam sintesis GO dengan kadar elektrolit 0.1 M. Elektrolit ini dibuat dengan mencampurkan surfaktan TC14 dengan *deionized water* (DI-water). Dua batang grafit (GoodFellow GmbH, Germany) dengan diameter 1 mm dan panjang 15 mm digunakan dalam sintesis GO dengan cara direndam dalam larutan elektrolit 0.1 M dan dihubungkan ke potensial 7V selama 24 jam pada suhu kamar.

Produksi *Reduced Graphene Oxide*

Dalam proses reduksi, larutan GO yang telah berhasil disintesis direduksi kadar oksigen yang ada di dalamnya sehingga menghasilkan larutan rGO. Hydrazine hydrate (80% larut dalam air, made in France) digunakan sebagai bahan pereduksi oksigen dalam proses reduksi. Rasio antara hydrazine hydrate dan larutan GO yaitu 1:100 dan proses reduksi dilakukan pada suhu ~95°C selama 24 jam dengan selalu diaduk dengan menggunakan pengaduk magnet.

Komposit *Reduced Graphene Oxide* dan *Carbon Nanotubes*

Komposit TC14-rGO dan CNTs dibuat dengan mencampurkan serbuk CNTs sebanyak 0.254 gram dan 25 ml larutan TC14-rGO. Selanjutnya, larutan komposit TC14-rGO dan CNTs (TC14 rGO-CNTs hybrid) diaduk selama 1 jam di atas *hot plate* dengan bantuan pengaduk magnet di dalamnya dan disonikasi selama 30 menit pada suhu kamar.

Transfer Proses Komposit TC14-*Reduced Graphene Oxide*/Carbon Nanotubes

Sebelum proses transfer, substrat kaca FTO dibersihkan dengan alat *ultrasonic cleaner* menggunakan aseton, metanol dan DI-water. Substrat kaca yang telah dibersihkan kemudian dipanaskan di atas *hot plate* pada suhu 120°C selama 5 menit. Setelah itu, metode pelapisan semprot (*spray coating*) digunakan untuk mentransfer larutan TC14 rGO/CNTs *hybrid* di atas substrat FTO sehingga terbentuk film tipis. Penyemprotan dilakukan dengan jarak sekitar 10 cm dari posisi substrat. Film tipis yang telah terbentuk di *annealing* pada suhu 400°C selama 1 jam dengan dialiri argon (Ar).

Komposit *Reduced Graphene Oxide*/Carbon Nanotubes dan Platina

Setelah terbentuk film tipis rGO/CNTs hybrid, maka selanjutnya dilakukan coating Pt di atas sampel film tipis rGO/CNTs hybrid dengan menggunakan alat *sputter coater*. Ketebalan Pt yang di coating di atas sampel film tipis rGO/CNTs hybrid tersebut yaitu sekitar ~10 nm yang dapat ditentukan dari alat tersebut.

Karakterisasi CE

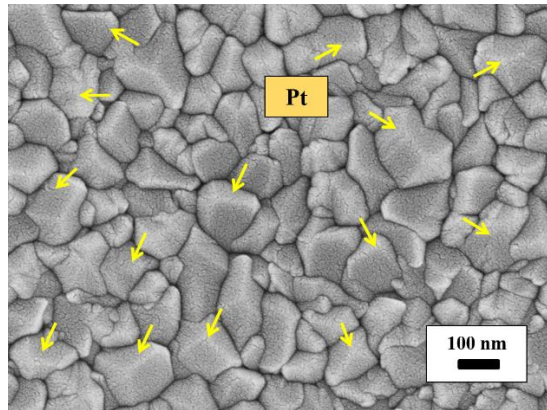
CE dikarakterisasi dalam tiga sifat utama yaitu struktur, optik dan listrik. Struktur CE dikarakterisasi dengan menggunakan *field emission scanning electron microscopy* (FESEM), *energy dispersive X-ray* (EDX), spektroskopi mikro-Raman. Sifat optik diukur dengan spektroskopi *ultraviolet-visible* (UV-Vis) dan pengukuran *four-point probe* untuk mengetahui sifat listrik film tipis CE. Pengukuran terakhir yang dilakukan yaitu dengan solar simulator untuk mengetahui efisiensi dari berbagai macam CE yang telah dibuat yaitu TC14-GO, TC14-rGO, TC14 rGO-CNTs hybrid dan TC14 rGO-CNTs/Pt hybrid untuk aplikasi DSSC.

HASIL DAN PEMBAHASAN

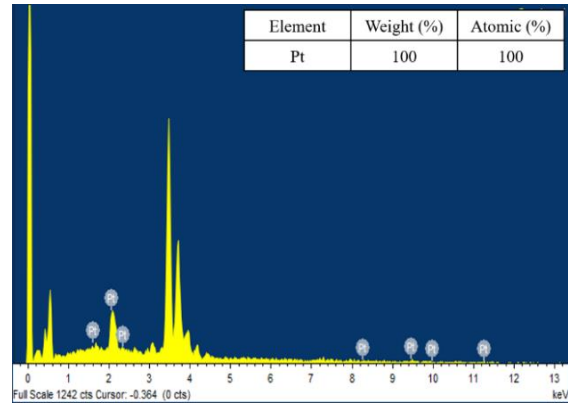
Field Emission Scanning Electron Microscopy (FESEM) dan Energy Dispersive X-ray (EDX)

Hasil analisis struktur menggunakan alat karakterisasi FESEM dan EDX ditunjukkan pada Gambar 1. Pada gambar ini menunjukkan ada 3 sampel CE yang dianalisis yaitu platina (Pt), komposit TC14 *reduced graphene oxide*/Pt (TC14-rGO/Pt *hybrid*) dan komposit TC14 rGO/*carbon nanotubes*/Pt (TC14-rGO/CNTs/Pt *hybrid*). Gambar 1(a) memperlihatkan sampel Pt sebagai CE dengan struktur nanopartikel yang homogen di atas permukaan substrat FTO. Hasil EDX analisis pada Gambar 1(b) memperlihatkan bahwa hasil persentase atomik Pt adalah 100%. Hal ini membuktikan kemurnian dari sampel Pt yang telah dibuat. Struktur nanopartikel Pt juga tersebar secara homogen pada permukaan film tipis TC14-rGO (Gambar 1(c)). Pada sampel film tipis TC14-rGO (Gambar 1(c)) memperlihatkan hasil struktur permukaan yang seperti lembaran dan lapisannya sangat tipis. Hasil yang sangat tipis ini diperkirakan karena rendahnya kandungan oksigen (O) pada sampel TC14-rGO dibandingkan dengan kandungan karbon (C) dan juga menunjukkan berhasilnya proses reduksi (proses pembuatan rGO).

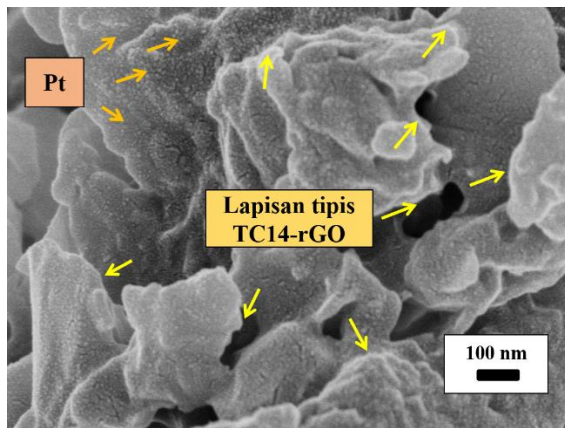
Hasil analisis EDX mengkonfirmasi adanya nanopartikel Pt pada permukaan sampel film tipis TC14-rGO/Pt dan TC14-rGO/CNTs/Pt *hybrid* (Gambar 1(d) dan 1(f)). Persentase atomik Pt pada sampel film tipis TC14-rGO/Pt dan TC14-rGO/CNTs/Pt *hybrid* secara berturut-turut yaitu 0.70% dan 1.28%. Persentase atomik Pt yang rendah ini memverifikasi bahwa lapisan Pt sangat tipis yaitu 10 nm pada permukaan sampel film tipis. Pada Gambar 1(d) juga memperlihatkan hasil persentase atomik O (36.32%) yang lebih rendah dibandingkan C (62.92%). Struktur morfologi pada sampel film tipis TC14-rGO/CNTs/Pt hybrid (Gambar 1(e)) menunjukkan penyebaran yang baik dan merata TC14-rGO/CNTs pada permukaan substrat FTO. Kekosongan antara lapisan-lapisan TC14-rGO diisi oleh CNTs yang terlihat sebagai jaringan terkonjugasi. CNTs dapat juga digunakan sebagai kabel penghubung antara lapisan-lapisan TC14-rGO^{[15],[16]}. Struktur nanopartikel Pt juga tersebar secara homogen pada permukaan film tipis TC14-rGO/CNTs. Pada Gambar 1(f) juga membuktikan keberhasilan proses komposit TC14-rGO dengan CNTs yang dapat dilihat dari persentase atomik C (76.95%) lebih tinggi daripada C pada sampel TC14-rGO/Pt (Gambar 1(d)) yaitu 62.98%.



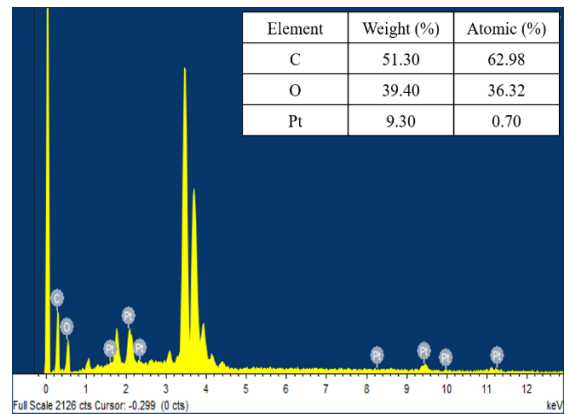
(a)



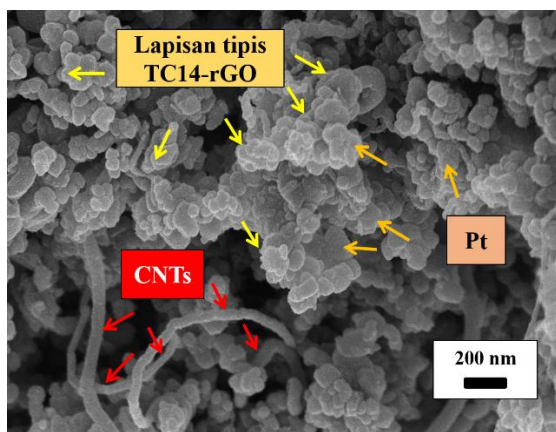
(b)



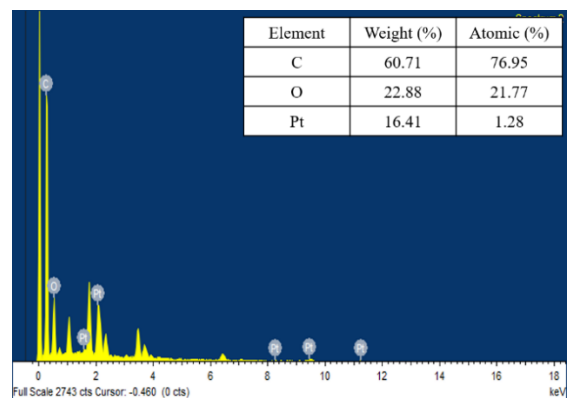
(c)



(d)



(e)



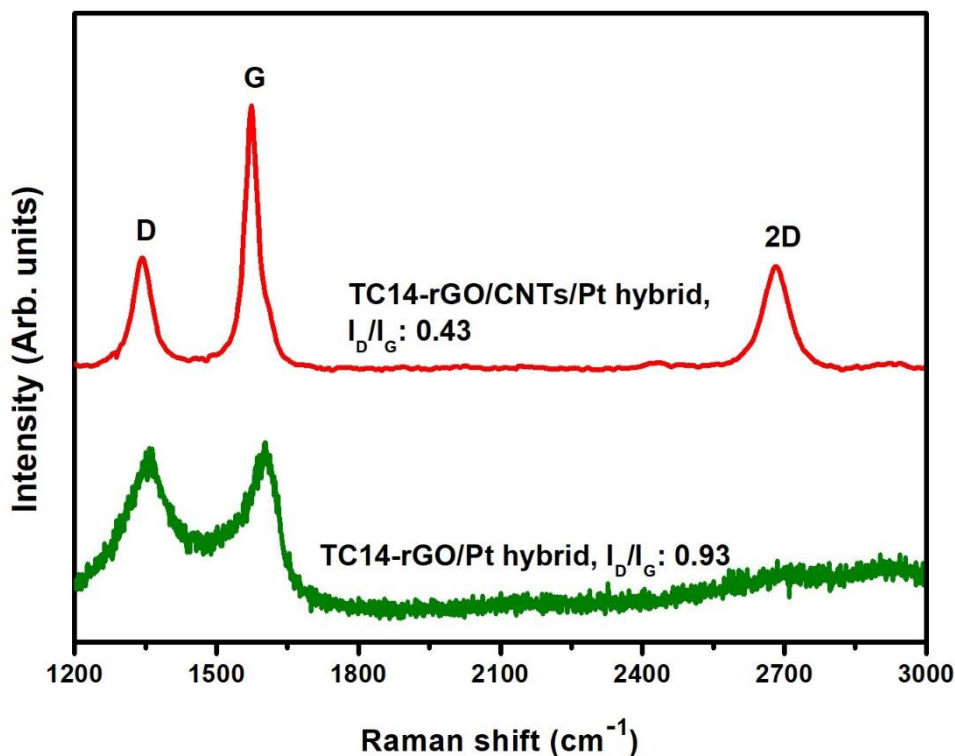
(f)

Gambar 1. Gambar hasil analisis struktur menggunakan FESEM dan EDX (a)-(b)Pt, (c)-(d) TC14 rGO/Pt hybrid, dan (e)-(f) TC14 rGO/CNTs/Pt hybrid

Micro-Raman Spectroscopy

Hasil analisis *micro-Raman spectroscopy* pada sampel-sampel film tipis CE ditunjukkan dalam Gambar 2. Kristalinitas dan cacat pada sampel-sampel film tipis dapat ditentukan dengan menggunakan analisis *micro-Raman spectroscopy* yang dilihat dari berbagai *peak* yang muncul dalam grafik raman [17]. Pada grafik *micro-Raman Spectroscopy* menunjukkan rasio I_D/I_G (0.43) yang lebih kecil pada sampel film tipis TC14 rGO/CNTs/Pt *hybrid* dibandingkan pada TC14 rGO/Pt *hybrid* (0.93). Nilai rasio I_D/I_G yang rendah ini karena nilai rasio I_D/I_G pada sampel TC14 rGO/CNTs juga memiliki nilai yang rendah yaitu 0.35 [18]. Rendahnya nilai rasio I_D/I_G ini juga dipercaya karena kontribusi dari rendahnya rasio I_D/I_G pada sampel CNTs murni yang terdiri dari struktur sp^2 yang lebih tinggi [19]. Bahan CNTs murni juga tidak memiliki kandungan O yang tinggi, sehingga menunjukkan cacat kecil (*small defect*) dan ini juga menyebabkan penurunan rasio I_D/I_G .

D- dan G-band pada sampel TC14 rGO/Pt *hybrid* berturut-turut 1362 dan 1595 cm^{-1} . D-band menunjukkan ikatan-ikatan dangling yang mengindikasikan cacat pada kisi-kisi karbon dan dikenal sebagai vibrasi sp^3 pada atom-atom karbon [20]. G-band dapat digunakan untuk mendeteksi vibrasi ikatan sp^2 pada atom-atom karbon [21]. Nilai D- dan G-band pada sampel TC14 rGO/Pt *hybrid* ini juga mengalami pergeseran ke panjang gelombang yang lebih rendah setelah dikompositkan dengan CNTs yaitu nilai D- dan G-band berturut-turut menjadi 1343 dan 1574 cm^{-1} . Hasil ini mengindikasikan interaksi yang bagus antara TC14-rGO, CNTs dan Pt pada sampel film tipis TC14 rGO/CNTs/Pt *hybrid*. Ringkasan hasil analisis menggunakan *micro-Raman spectroscopy* pada sampel film tipis TC14 rGO/Pt dan TC14 rGO/CNTs/Pt *hybrid* ditunjukkan pada Tabel 1.



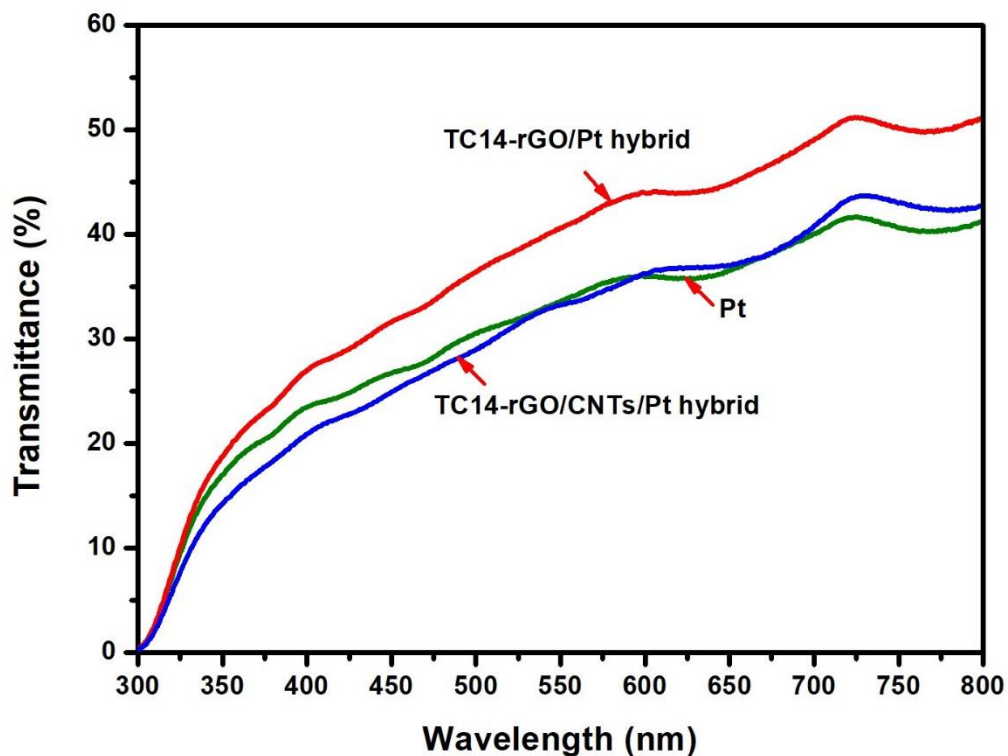
Gambar 2. Spektra micro-Raman pada sampel TC14 rGO/Pt hybrid dan TC14 rGO/CNTs/Pt hybrid

Tabel 1. Hasil analisis menggunakan *micro-Raman spectroscopy* pada sampel film tipis TC14 rGO/Pt dan TC14 rGO/CNTs/Pt *hybrid*

Sampel	D-peak (cm ⁻¹)	G-peak (cm ⁻¹)	I _D /I _G ratio	2D-peak (cm ⁻¹)
TC14-rGO/Pt hybrid	1362	1595	0.93	2835
TC14-rGO/CNTs/Pt hybrid	1343	1574	0.43	2681

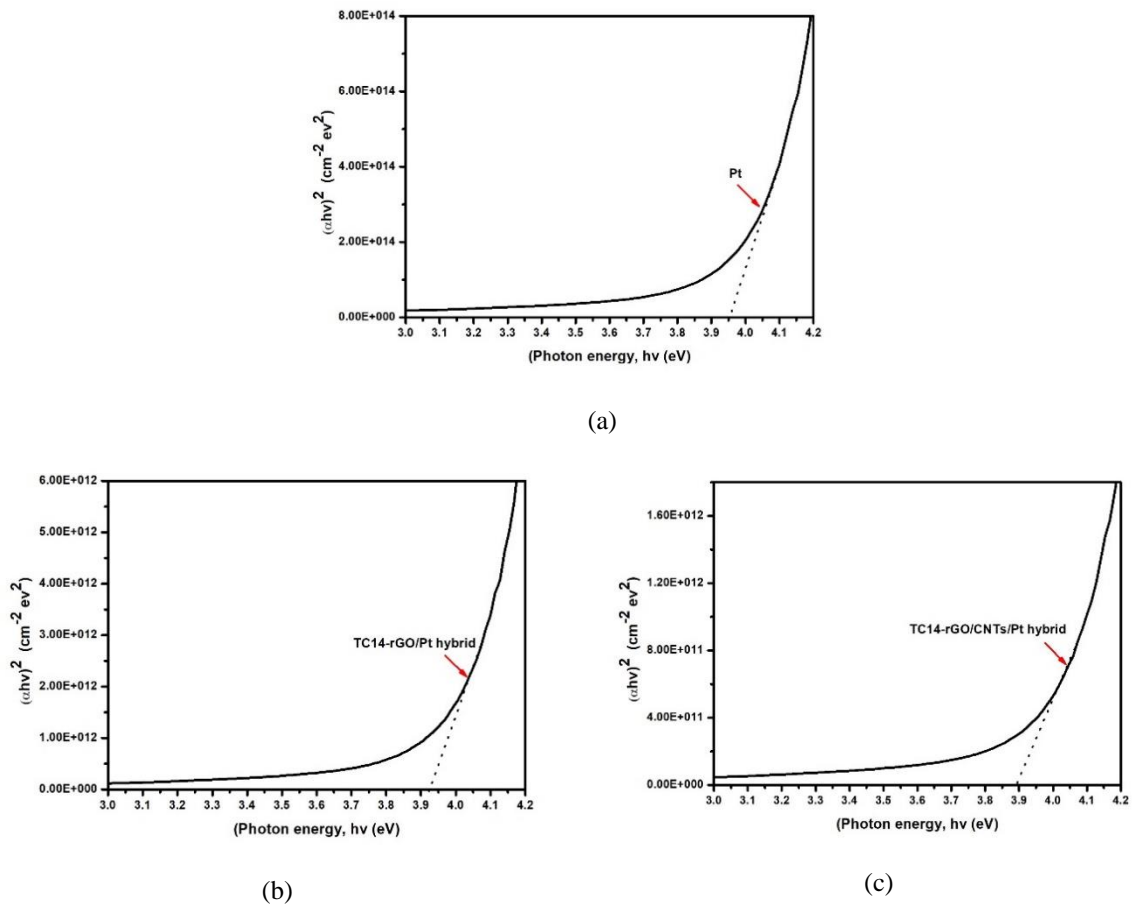
Ultraviolet-visible Spectroscopy (UV-Vis)

Sifat optik pada sampel film tipis CE yaitu Pt, TC14-rGO/Pt dan TC14-rGO/CNTs/Pt *hybrid* dianalisis dengan menggunakan UV-Vis spectroscopy dan ditunjukkan dalam Gambar 3. Berdasarkan hasil spektrum UV-Vis, sampel TC14-rGO/Pt dan TC14-rGO/CNTs/Pt *hybrid* memiliki nilai transmitansi yang cukup rendah berturut-turut yaitu 42% dan 34%. Nilai transmitansi ini diukur pada panjang gelombang 400-800 nm [22]. Nilai transmitansi yang rendah ini disebabkan karena film TC14-rGO/Pt dan TC14-rGO/CNTs/Pt *hybrid* yang lebih gelap dan lebih tebal dibandingkan dengan film pada TC14-rGO murni (92%) [10]. Nilai transmitansi pada Pt murni yaitu 35% dan nilai transmitansi ini lebih tinggi dibandingkan dengan TC14-rGO/CNTs/Pt *hybrid* (34%). Hal ini karena ketebalan dalam sampel Pt murni masih lebih rendah dibandingkan dengan ketebalan pada sampel TC14-rGO/CNTs/Pt *hybrid* yang jauh lebih tebal karena ada banyak material yang ada di sampel tersebut.

**Gambar 3.** Spektrum UV-Vis pada sampel film tipis Pt, TC14-rGO/Pt dan TC14-rGO/CNTs/Pt *hybrid*

Analisis UV-Vis spectroscopy juga dapat digunakan untuk menentukan nilai energi *band gap*. Energi *band gap* dapat ditentukan dari transmitansi yang telah diperoleh dengan menggunakan *plot Tauc* (ekstrapolasi linear) seperti yang disajikan dalam Gambar 4. Berdasarkan hasil penghitungan dalam penentuan energi *band gap*, sampel TC14-

rGO/CNTs/Pt *hybrid* memperlihatkan energi *band gap* yang paling rendah (~ 3.89 eV) dibandingkan dengan TC14-rGO/Pt *hybrid* (3.92 eV) dan Pt (3.95 eV). Nilai energi *band gap* yang rendah pada sampel TC14-rGO/CNTs/Pt *hybrid* dipercaya karena konduktivitas listrik yang tinggi pada CNTs dan Pt murni yang juga mempengaruhi pada rendahnya nilai energi *band gap* TC14-rGO/CNTs/Pt *hybrid*. Nilai energi *band gap* yang paling rendah ini dikaitkan dengan konduktivitas listrik yang tertinggi dan pergerakan elektron CE tercepat dalam aplikasi DSSCs. Ringkasan nilai transmitansi dan energi *band gap* pada sampel film tipis Pt, TC14-rGO/Pt dan TC14-rGO/CNTs/Pt *hybrid* ditunjukkan dalam Tabel 2.



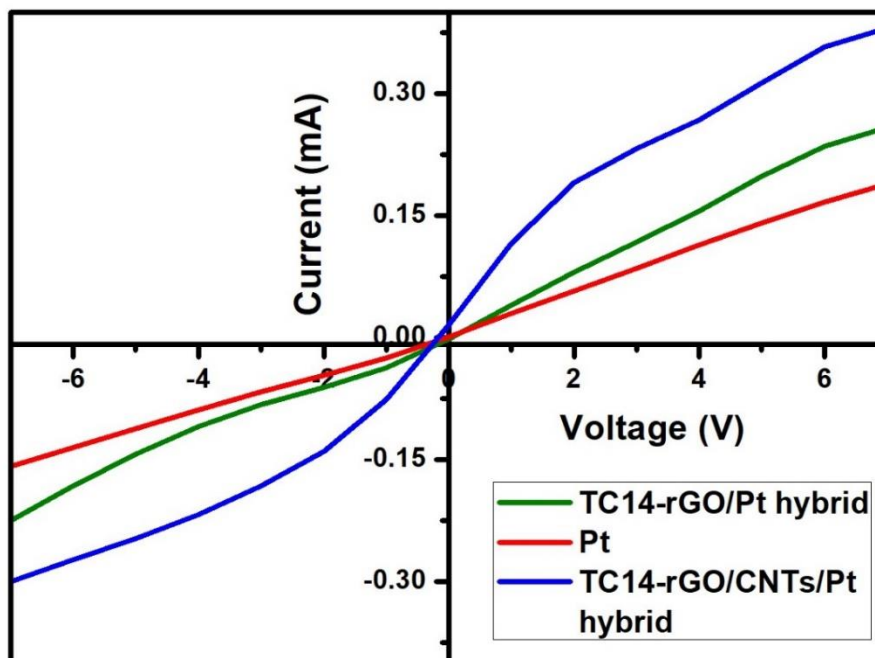
Gambar 4. Energi *band gap* pada sampel film tipis (a) Pt, (b) TC14-rGO/Pt *hybrid*, dan (c) TC14-rGO/CNTs/Pt *hybrid*

Tabel 2. Nilai transmitansi dan *band gap* pada sampel film tipis Pt, TC14-rGO/Pt dan TC14-rGO/CNTs/Pt *hybrid*

Sampel	Transmitansi (%)	Band gap (eV)
Pt	35	3.95
TC14-rGO/Pt <i>hybrid</i>	42	3.92
TC14-rGO/CNTs/Pt <i>hybrid</i>	34	3.89

Pengukuran *Four-point Probe*

Hasil analisis sifat listrik pada sampel-sampel CE dengan menggunakan *four-point probe* ditunjukkan pada Gambar 5. Konduktivitas listrik pada sampel film tipis Pt murni menunjukkan hasil yang paling tinggi yaitu 3.87 S.cm^{-1} dibandingkan pada sampel TC14-rGO/Pt dan TC14-rGO/CNTs/Pt hybrid. Pada sampel film tipis TC14-rGO/CNTs/Pt hybrid menunjukkan hasil konduktivitas listrik yang lebih tinggi (1.01 S.cm^{-1}) dibandingkan dengan sampel TC14-rGO/Pt hybrid ($6.6 \times 10^{-1} \text{ S.cm}^{-1}$). Hasil konduktivitas listrik yang tinggi dan luas permukaan tinggi pada sampel TC14-rGO/CNTs/Pt hybrid ini mengindikasikan pergerakan elektron yang paling cepat sehingga cocok digunakan sebagai bahan CE dalam aplikasi DSSCs. Hasil ini juga dipengaruhi oleh proses pengelupasan (exfoliation process) surfaktan *triple-tail* TC14 yang baik dalam proses sintesis TC14-GO kemudian menjadi TC14-rGO. Nilai energi *band gap* yang rendah pada sampel TC14-rGO/CNTs/Pt hybrid ($\sim 3.89 \text{ eV}$) dan konduktivitas listrik yang tinggi pada CNTs dan Pt murni (3.87 S.cm^{-1}) juga mempengaruhi nilai konduktivitas listrik yang tinggi pada sampel film tipis TC14-rGO/CNTs/Pt hybrid. Ringkasan hasil sifat-sifat listrik pada sampel film tipis Pt, TC14-rGO/Pt dan TC14-rGO/CNTs/Pt hybrid ditunjukkan dalam Tabel 3.

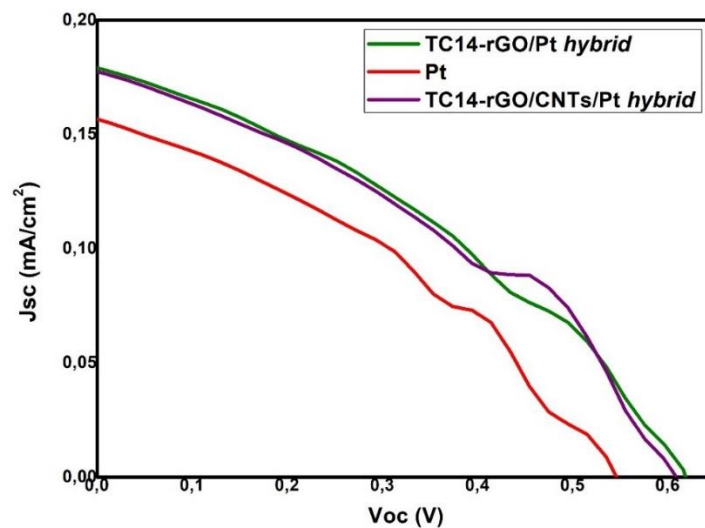


Gambar 5. Kurva I-V pada sampel film tipis Pt, TC14 rGO/Pt, dan TC14 rGO/CNTs/Pt hybrid

Tabel 3. Sifat-sifat listrik pada sampel film tipis Pt, TC14-rGO/Pt dan TC14-rGO/CNTs/Pt hybrid

Sample	Resistivity, ρ ($\Omega.\text{cm}$)	Conductivity, σ (S.cm^{-1})
Pt	0.25	3.87
TC14-rGO/Pt hybrid	1.49	0.66
TC14-rGO/CNTs/Pt hybrid	0.98	1.01

Kinerja DSSCs dapat ditentukan dengan menggunakan solar simulator seperti ditunjukkan dalam kurva *current density-voltage* (*J-V*) (Gambar 6). Di Gambar 6, nilai efisiensi DSSCs yang paling tinggi ditunjukkan oleh sampel CE (TC14-rGO/CNTs/Pt *hybrid*) sebesar 0.0594% dengan nilai J_{sc} , V_{oc} , dan FF berturut-turut yaitu 0.176 mA/cm², 0.622 V and 0.464. Nilai efisiensi yang tinggi ini karena jaringan terkonjugasi pada CNTs berperan sebagai kabel penghubung antara lapisan-lapisan TC14-rGO dan sebagai pengisi kekosongan, tingginya nilai konduktivitas listrik serta luas permukaan yang lebih besar juga menyebabkan pergerakan elektron lebih cepat sehingga menjadikan sifat-sifat ini penting dalam kinerja DSSCs. Nilai FF yang juga paling tinggi pada sampel TC14-rGO/CNTs/Pt *hybrid* sebagai CE juga dipengaruhi oleh strukturnya. Luas permukaan yang tinggi pada CNTs dan TC14-rGO pada sampel TC14-rGO/CNTs/Pt *hybrid* menunjukkan sifat yang penting untuk membangkitkan pewarna (*dye*) setelah injeksi electron dan menyebabkan rute regulasi elektron yang lebih cepat selama proses DSSCs [23]. Sampel TC14-rGO/Pt *hybrid* juga menunjukkan hasil efisiensi (0.0476%), J_{sc} (0.179 mA/cm²), dan V_{oc} (0.626 V) yang lebih tinggi dibandingkan dengan Pt murni yaitu 0.0408%, 0.157 mA/cm² and 0.545 V. Hal ini karena luas permukaan yang lebih tinggi dan energi *band gap* yang lebih rendah pada TC14-rGO/Pt *hybrid* dibandingkan pada Pt murni yang dapat dilihat pada hasil analisis UV-Vis. Ringkasan hasil J_{sc} , V_{oc} , FF dan efisiensi (η) pada aplikasi DSSCs dengan menggunakan sampel film tipis Pt, TC14-rGO/Pt dan TC14-rGO/CNTs/Pt *hybrid* sebagai CE dan zink oksida *nanowires* (ZnO NWRs) yang dikompositkan dengan titanium dioksida (TiO₂) (ZnO NWRs/TiO₂) sebagai fotoanoda ditunjukkan pada Tabel 4.



Gambar 6. Kurva *J-V* dalam DSSCs dengan Pt, TC14-rGO/Pt dan TC14-rGO/CNTs/Pt *hybrid* sebagai sampel-sampel CE

Tabel 4. Ringkasan hasil J_{sc} , V_{oc} , FF dan efisiensi (η) pada Pt, TC14-rGO/Pt dan TC14-rGO/CNTs/Pt *hybrid* sebagai sampel-sampel CE dalam aplikasi DSSCs

Sampel CE	Open Circuit Voltage, V_{oc} (V)	Short Circuit Current Density, J_{sc} (mA/cm ²)	Fill Factor, FF	Efisiensi, η (%)
Pt	0.545	0.157	0.385	0.0408
TC14-rGO/Pt <i>hybrid</i>	0.626	0.179	0.364	0.0476
TC14-rGO/CNTs/Pt <i>hybrid</i>	0.622	0.176	0.464	0.0594

KESIMPULAN

Penggunaan berbagai macam bahan untuk fabrikasi CE yang diaplikasikan untuk DSSCs dapat memperoleh sifat yang bagus dan hasil efisiensi yang tinggi. Sampel film tipis CE TC14-rGO/CNTs/Pt *hybrid* menunjukkan hasil nilai efisiensi yang paling tinggi (0.0594%) dengan J_{sc} , V_{oc} , dan FF berturut-turut yaitu 0.176 mA/cm², 0.622 V and 0.464. Nilai efisiensi yang tinggi ini karena jaringan terkonjugasi pada CNTs berperan sebagai kabel penghubung antara lapisan-lapisan TC14-rGO dan sebagai pengisi kekosongan, tingginya nilai konduktivitas listrik serta luas permukaan yang tinggi juga menyebabkan pergerakan elektron lebih cepat sehingga menjadikan sifat-sifat ini penting dalam kinerja DSSCs. Nilai FF yang juga paling tinggi pada sampel TC14-rGO/CNTs/Pt *hybrid* sebagai CE juga dipengaruhi oleh strukturnya. Luas permukaan yang tinggi pada CNTs dan TC14-rGO pada sampel TC14-rGO/CNTs/Pt *hybrid* menunjukkan sifat yang penting untuk membangkitkan pewarna (*dye*) setelah injeksi electron dan menyebabkan rute regulasi elektron yang lebih cepat selama proses DSSCs. Penemuan ini mengindikasikan bahwa Pt yang dikompositkan dengan bahan yang ramah lingkungan dan murah seperti T14-rGO dan CNTs dapat meningkatkan kinerja CE dalam aplikasi DSSCs. Berdasarkan hal tersebut, penelitian ini dapat digunakan sebagai dasar dalam penelitian selanjutnya mengenai fabrikasi CE dengan bahan dasar grafin.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penelitian ini dilakukan melalui program hibah penelitian dosen pemula (PDP) yang diberikan melalui Pendidikan tinggi (DIKTI) dari kementerian pendidikan dan kebudayaan (Kemendikbud). Peneliti ingin mengucapkan terima kasih kepada pihak-pihak yang terlibat dalam kementerian dan lembaga penelitian, penerbitan, dan pengabdian kepada masyarakat (LP3M) Universitas Sains Al-Qur'an sehingga penulis dapat mengajukan proposal dan mendapatkan hibah penelitian ini,

DAFTAR PUSTAKA

1. Hug, H., Bader, M., Mair, P., & Glatzel, T. 2014. Biophotovoltaics: Natural pigments in dye-sensitized solar cells. *Appl. Energy*, 115, 216–225, doi: 10.1016/j.apenergy.2013.10.055.
2. Jiang, X., Li, H., Li, S., Huang, S., Zhu, C & Hou, L. 2018. Metal-organic framework-derived Ni-Co alloy@carbon microspheres as high-performance counter electrode catalysts for dye-sensitized solar cells. *Chem. Eng. J.*, 334, 419–431, doi: 10.1016/j.cej.2017.10.043.
3. Yoo, M., Yu, Y-S., Ha, H., Lee, S., Choi, J-S., Oh, S., Kang, E., Choi, H., & An, H. 2020. A tailored oxide interface creates dense Pt single-atom catalysts with high catalytic activity. *Energy Environ. Sci.*, 13(4), 1231–1239, doi: 10.1039/c9ee03492g.
4. Fatiatun, F., Bakar, S. A., Marwoto, P., Wibowo, K.M., Muqoyyanah, M., & Firdaus, F. 2020. Effects of Various Semiconducting Oxides as Photoanode and Counter Electrode for Dye Sensitized Solar Cell Application - A Review. *Indones. J. Appl. Phys.*, 10(2), 126, doi: 10.13057/ijap.v10i2.35195.
5. Kim, T.Y., Park, C.H., & Marzari, N. 2016. The Electronic Thermal Conductivity of Graphene. *Nano Lett.*, 16(4), 2439–2443, doi: 10.1021/acs.nanolett.5b05288.
6. Sarkar, A., Bera, S., & Chakraborty, A.K. 2019. CoNi₂S₄-reduced graphene oxide nanohybrid: An excellent counter electrode for Pt-free DSSC. 2019. *Sol. Energy*, 208, 139–149, doi: 10.1016/j.solener.2020.07.075.
7. Pang, B., Zhang, M., Zhou, C., Dong, H., Ma, S., Feng, J., Chen, Y., Yu, L., & Dong, L. 2021. Heterogeneous FeNi₃/NiFe₂O₄ nanoparticles with modified graphene as electrocatalysts for high performance dye-sensitized solar cells. *Chem. Eng. J.*, 405, 126944, doi:

- 10.1016/j.cej.2020.126944.
8. Li, G., Zhang, Y-Y., Guo, H., Huang, L., Lu, H., Lin, X., Wang, Y-L., Du, S., & Gao, H-J. 2018. Epitaxial growth and physical properties of 2D materials beyond graphene: From monatomic materials to binary compounds. *Chem. Soc. Rev.*, 47(16), 6073–6100, doi: 10.1039/c8cs00286j.
 9. Kairi, M.I., Khavarian, M., Bakar, S.A., Vigolo, B., & Mohamed, A.R. 2018. Recent trends in graphene materials synthesized by CVD with various carbon precursors. *J. Mater. Sci.*, 53(2), 851–879, doi: 10.1007/s10853-017-1694-1.
 10. Suriani, A.B., Fatiatun., Mohamed, A., Muqoyyanah, Hashim, N., Rosmi, M.S., Mamat, M.H., Malek, M.F., Salifairus, M.J., Khalil, H.P.S.H. 2018. Reduced graphene oxide/platinum hybrid counter electrode assisted by custom-made triple-tail surfactant and zinc oxide/titanium dioxide bilayer nanocomposite photoanode for enhancement of DSSCs photovoltaic performance. *Optik.*, 161, 70–83, doi: 10.1016/j.ijleo.2018.02.013.
 11. Kumar, P., Penta, S., & Mahapatra, S.P. 2019. Dielectric Properties of Graphene Oxide Synthesized by Modified Hummers' Method from Graphite Powder. *Integr. Ferroelectr.*, 202(1), 41–51, doi: 10.1080/10584587.2019.1674822.
 12. Alkhouzaam, A., Qiblawey, H., Khraisheh, M., Atieh, M., & Al-Ghouti, M. 2020. Synthesis of graphene oxides particle of high oxidation degree using a modified Hummers method. *Ceram. Int.*, 46(15), 23997–24007, doi: 10.1016/j.ceramint.2020.06.177.
 13. Liu, F., Wang, C., Sui, X., Riaz, M.A., Xu, M., Wei, L., & Chen, Y. 2019. Synthesis of graphene materials by electrochemical exfoliation: Recent progress and future potential. *Carbon Energy*, 1(2), 173–199, doi: 10.1002/cey2.14.
 14. Suriani, A.B., Muqoyyanah, Mohamed, A., Mamat, M.H., Othman, M.H.D., Ahmad, M.K., Khalil, H.P.S.A., Marwoto, P., & Birowosuto, M.D. 2019. Titanium dioxide/agglomerated-free reduced graphene oxide hybrid photoanode film for dye-sensitized solar cells photovoltaic performance improvement. *Nano-Structures and Nano-Objects*, 18, 100314, doi: 10.1016/j.nanoso.2019.100314.
 15. Fatiatun., Firdaus, Jumini, S., Suriani, A.B., Marwoto, P., Wibowo, K.M., & Astuti, B. 2020. Enhanced electrical conductivity of counter electrode using hybrid of reduced graphene oxide assisted with customised triple-tail surfactant with multiwalled carbon nanotubes. *J. Phys. Conf. Ser.*, 1517(1), doi: 10.1088/1742-6596/1517/1/012059.
 16. Bakar, S.A., Fatiatun., Mohamed, A., Muqoyyanah, Hashim, N., Mamat, M.H., Ahmad, M.K., & Matwoto, P. 2019. Improved DSSC photovoltaic performance using reduced graphene oxide–carbon nanotube/platinum assisted with customised triple-tail surfactant as counter electrode and zinc oxide nanowire/titanium dioxide nanoparticle bilayer nanocomposite as photoanode. *Graphene Technol.*, 4(1), 17–31, doi: 10.1007/s41127-019-00024-x.
 17. Suriani, A.B., Muqoyyanah, Mohamed, A., Mamat, M.H., Hashim, N., Isa, I.M., Malek, M.F., Mohamed, A.R., & Ahmad, M.K. 2018. Improving the photovoltaic performance of DSSCs using a combination of mixed-phase TiO₂ nanostructure photoanode and agglomerated free reduced graphene oxide counter electrode assisted with hyperbranched surfactant. *Optik* ., 158, 522–534, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2017.12.149>.
 18. Fatiatun, F., & Adi, N.P. 2022. Fabrication of counter electrode for dye sensitized solar cells application using environmentally friendly graphene and carbon nanotubes composite materials. *Gravity: Jurnal Ilmiah Penelitian dan Pembelajaran Fisika.*, 8(1), 1–11, doi: 10.30870/gravity.v8i1.12028.
 19. Kumar, V., Singh, N., Kumar, V., Purohit, L.P., Kapoor, A., & Swart, H.C. 2013. Doped zinc oxide window layers for dye sensitized solar cells. *J. Appl. Phys.*, 114(13), doi: 10.1063/1.4824363.
 20. Kumar, R., Singh, R. K., Singh, D.P., Vaz, A.R., Yadav, R.R., Rout, C.S., Moshkalev, S.A. 2017.

- Synthesis of self-assembled and hierarchical palladium-CNTs-reduced graphene oxide composites for enhanced field emission properties, *Mater. Des.*, 122, 110–117, doi: 10.1016/j.matdes.2017.02.089.
21. Chen, X., He, D., Wu, H., Zhao, X., Zhang, J., Cheng, K., Wu, P., & Mu, S. 2015. Platinized Graphene/ceramics Nano-sandwiched Architectures and Electrodes with Outstanding Performance for PEM Fuel Cells. *Sci. Rep.*, 5, 1–10, doi: 10.1038/srep16246.
 22. Zhao, J., Ma, J., Nan, X., & Tang, B. 2016. Application of non-covalent functionalized carbon nanotubes for the counter electrode of dye-sensitized solar cells. *Org. Electron.*, 30, 52–59, doi: 10.1016/j.orgel.2015.11.032.
 23. Xue, Y., Liu, J., Chen, H., Wang, R., Li, D., Qu, J., & Dai, L. 2012. Nitrogen-doped graphene foams as metal-free counter electrodes in high-performance dye-sensitized solar cells. *Angew. Chemie - Int. Ed.*, 51(48), 12124–12127, doi: 10.1002/anie.201207277.