



## PENGARUH MATERIAL *COUNTER ELECTRODE* PADA *DYE-SENSITIZED SOLAR CELL*

Ellyse Oktaviani<sup>a</sup>, Natalita Maulani Nursam<sup>b,\*</sup>

<sup>a</sup>Program Studi Teknik Fisika Energi, Fakultas Teknik, Universitas Surya,  
F8 & F9 Grand Serpong Mall, Jl MH Thamrin Panunggangan Utara, Pinang, Tangerang, Indonesia 15143

<sup>b</sup>Pusat Penelitian Elektronika dan Telekomunikasi – LIPI  
Komplek LIPI Gedung 20 lantai 4, Jl Sangkuriang Cisitu, Bandung, Indonesia 40135

\*E-mail : natalita.maulani.nursam@lipi.go.id

Masuk tanggal : 3-10-2019, revisi tanggal : 06-10-2019, diterima untuk diterbitkan tanggal 24-11-2019

### Abstrak

Sel surya tersensitasi pewarna atau DSSC (*dye-sensitized solar cell*) merupakan sel surya generasi ketiga yang teknologinya sangat menjanjikan untuk menjadi alternatif sel surya berbasis silikon. DSSC umumnya memiliki dua bagian utama, yaitu *working electrode* (anoda) dan *counter electrode* (katoda). *Counter electrode* memiliki peran krusial pada DSSC, utamanya sebagai katalis untuk mempercepat reaksi reduksi-oksidasi pada elektrolit. Dengan demikian, pemilihan jenis material pada bagian *counter electrode* memiliki pengaruh signifikan terhadap performa DSSC secara keseluruhan. Platina merupakan salah satu material yang sangat umum digunakan pada *counter electrode* DSSC dikarenakan karakteristiknya yang hampir mendekati *counter electrode* ideal. Material *counter electrode* lain seperti karbon dan *poly(3,4-ethylenedioxythiophene) polystyrene sulfonate* (PEDOT:PSS) juga digunakan sebagai alternatif *counter electrode* platina yang memiliki harga yang mahal dan persediaan terbatas. Dalam paper review ini akan dibahas mengenai berbagai usaha yang dilakukan untuk meningkatkan performa DSSC menggunakan *counter electrode* platina, karbon dan PEDOT:PSS. Usaha tersebut meliputi peningkatan aktivitas katalis, konduktivitas, porositas, dan luas permukaan *counter electrode*. Beberapa penelitian telah membuktikan bahwa karbon dan PEDOT:PSS mampu menghasilkan performa DSSC yang mendekati dan bahkan melebihi *counter electrode* platina. Pengaruh variasi metode deposisi dan jenis komponen lain seperti fotoanoda, *dye*, dan elektrolit terhadap performa DSSC dengan *counter electrode* platina, karbon dan PEDOT:PSS juga dibahas dalam paper ini. Pemilihan material dan komponen DSSC yang sesuai, sangat penting dilakukan untuk menghasilkan sel surya dengan performa tinggi.

**Kata Kunci:** Sel surya tersensitisasi warna, *counter electrode*, platina, karbon, PEDOT:PSS

### Abstract

A *dye-sensitized solar cell* (DSSC) is a third-generation solar cell that has a promising technology to be the alternative for replacing silicon-based solar cells. DSSC typically consists of two main components, i.e., *working electrode* (anode) and *counter electrode* (cathode). The *counter electrode* has a crucial role in DSSC, predominantly as a catalyst to accelerate the reduction-oxidation reactions within the electrolyte. Platinum is one of the most widely used *counter electrode* materials in DSSC because of its nearly ideal characteristics as *counter electrode*. Other materials such as carbon and *poly(3,4-ethylene dioxythiophene) polystyrene sulfonate* (PEDOT:PSS) are used as the alternative for the platinum *counter electrode* since platinum is generally high in cost and limited in supply. This review paper will discuss some studies that have been done to improve the performance of DSSC by applying platinum, carbon, and PEDOT:PSS as a *counter electrode*. Several studies have shown that carbon and PEDOT:PSS were capable of producing DSSC performance that approaches and even exceeded that of the platinum *counter electrode*. The effects of deposition methods and the selection of other components such as photoanode, *dye*, and electrolytes on DSSC performance related to the application of platinum, carbon, and PEDOT:PSS *counter electrode* is also discussed in this paper. It is important to consider the materials selection and suitable DSSC components to produce solar cells with high performance.

**Keywords:** *Dye-sensitized solar cell*, *counter electrode*, platinum, carbon, PEDOT:PSS

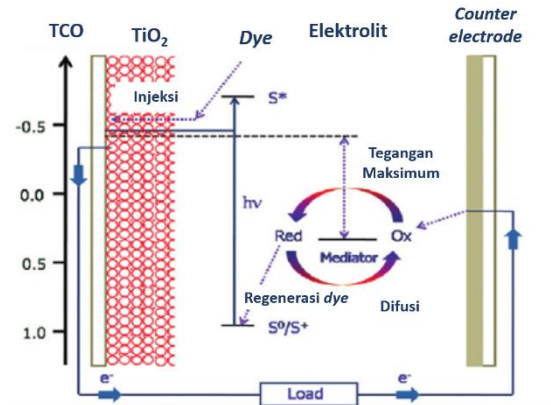
# 1. PENDAHULUAN

Sel surya tersensitisasi warna (*dye sensitized solar cell*-DSSC) pertama kali diperkenalkan oleh O'Regan dan Grätzel pada tahun 1991 yang merupakan imitasi proses fotosintesis [1]. DSSC merupakan perangkat fotovoltaik generasi ketiga yang memiliki kelebihan, diantaranya memiliki harga murah, menggunakan material yang tidak sensitif terhadap kontaminan di lingkungan, mudah difabrikasi, dapat diproduksi dalam bentuk fleksibel, dan memiliki performa yang tinggi, sehingga dianggap mampu menjadi alternatif untuk menggantikan sel surya konvensional berbahan dasar silikon [2]-[3]. Potensi yang dimiliki DSSC ini menarik perhatian para peneliti untuk melakukan penelitian secara intensif. Oleh sebab itu, terjadi perkembangan pesat terhadap performa DSSC yang pada awal diperkenalkannya hanya memiliki PCE (*power conversion efficiency*) sebesar 7,1% [1], hingga saat ini mencapai PCE 14,7% [4].

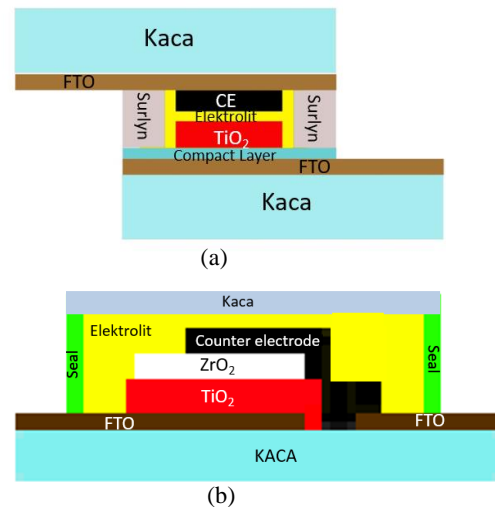
DSSC umumnya tersusun dari berbagai komponen, diantaranya kaca konduktif transparan atau TCO (*transparent conductive oxide*), zat pewarna atau *dye sensitizer*, semikonduktor (umumnya berupa metal oksida), elektrolit sebagai *redox couple*, dan *counter electrode* [5]. Skema diagram prinsip kerja DSSC ditunjukkan pada Gambar 1. Saat DSSC disinari cahaya, molekul *dye* akan mengabsorpsi energi cahaya yang ditransmisi melewati TCO. Energi foton menyebabkan elektron tereksitasi dari HOMO (*highest occupied molecular orbital*) menuju LUMO (*lowest unoccupied molecular orbital*) pada *dye*. Elektron pada LUMO dapat kembali ke *ground state* ataupun dapat terinjeksi menuju CB (*conduction band*) semikonduktor untuk kemudian berkumpul di anode dan meninggalkan *dye* dalam kondisi *oxidized state*. *Dye* yang berada pada kondisi *oxidized state*, perlu dikembalikan ke kondisi semula melalui proses regenerasi *dye*. Regenerasi *dye* melalui iodin mencegah kembalinya elektron yang telah terinjeksi ke *conduction band*. Ion triiodida ( $I_3^-$ ) terbentuk akibat oksidasi iodin ( $I^-$ ) berdifusi dengan *counter electrode* [6]. Siklus transfer dan regenerasi elektron berakhir dengan konversi  $I_3^-$  menjadi ion  $I^-$ . Sedangkan siklus rangkaian elektrik berakhir dengan perpindahan elektron menuju rangkaian eksternal [7].

Terdapat 2 jenis konfigurasi DSSC. Konfigurasi pertama, yaitu konfigurasi *sandwich* yang tersusun dari 2 kaca konduktif (TCO). Di antara kaca TCO, terdapat elektrolit yang berfungsi mereduksi *dye* yang teroksidasi.

Penggunaan 2 TCO menjadi salah satu penyebab harga DSSC mahal, sehingga menyulitkan DSSC diproduksi massal. Oleh sebab itu, diperlukan konfigurasi DSSC *monolithic* yang terdiri dari 1 substrat TCO dengan fotoelektroda, *spacer* dan *counter electrode* yang disusun di atas satu sama lain pada satu substrat [9]. Struktur DSSC berkonfigurasi *sandwich* dan *monolithic* ditunjukkan melalui Gambar 2(a) dan 2(b).



Gambar 1. Proses transfer elektron yang terjadi pada DSSC [8]



Gambar 2. Struktur DSSC berkonfigurasi (a) *sandwich* dan (b) *monolithic*

Salah satu komponen penting yang mempengaruhi performa DSSC, baik berkonfigurasi *sandwich* maupun *monolithic* adalah *counter electrode*. Pada dasarnya, reaksi reduksi elektrolit ( $I_3^- + 2e^- \rightarrow 3I^-$ ) pada kaca TCO (*indium tin oxide*-ITO) atau FTO (*fluorine doped tin oxide*) terjadi dengan lambat sehingga menyebabkan terjadinya *charge transfer overpotential*. Oleh sebab itu, diperlukan material katalis pada *counter electrode* [5]. Pada DSSC, *counter electrode* memiliki 3 fungsi, yaitu: (i) sebagai katalis yang menyempurnakan proses oksidasi sebagai bentuk regenerasi *redox couple*;

(ii) sebagai elektroda positif untuk mengumpulkan elektron dari rangkaian eksternal dan menghantarkan elektron kembali ke dalam sel; dan (iii) sebagai reflektor untuk meningkatkan absorpsi cahaya dengan cara memantulkan cahaya yang tidak diabsorpsi oleh *dye* agar dapat kembali ke dalam sel [10]. Berdasarkan fungsi *counter electrode* terhadap DSSC tersebut di atas, *counter electrode* idealnya harus memiliki aktivitas katalis, konduktivitas dan refleksi tinggi; harga murah; memiliki luas permukaan besar dan berpori; memiliki ketebalan yang optimal dan stabil secara kimiawi, mekanik dan elektrokimia; resistan terhadap korosi; memiliki energi level yang sesuai dengan beda potensial *redox couple*; serta memiliki sifat adhesi yang baik terhadap TCO [11].

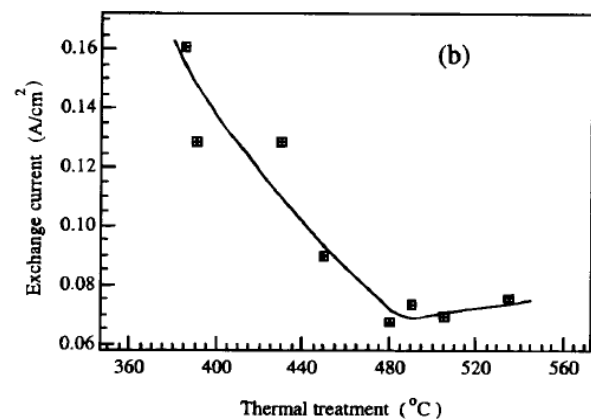
Platina merupakan material yang sering digunakan sebagai *counter electrode* DSSC. Hal ini dikarenakan platina memiliki aktivitas katalis dan stabilitas tinggi terhadap elektrolit  $I_3^-/I^-$  sebagai elektrolit yang umum digunakan pada DSSC [12]. Bahkan DSSC yang memiliki PCE tertinggi, yaitu 14% juga menggunakan platina sebagai *counter electrode* [4]. Akan tetapi, platina merupakan logam mulia yang memiliki harga relatif tinggi, dan terbatasnya persediaan menyebabkan platina sulit digunakan pada DSSC komersial [13]. Oleh karena itu, berbagai penelitian telah dilakukan terhadap material lain, seperti karbon dan PEDOT:PSS, untuk menjadi alternatif pengganti platina sebagai *counter electrode* pada DSSC [7],[12]. Dengan dilakukan berbagai macam teknik fabrikasi, telah terjadi banyak perkembangan pada *counter electrode* DSSC, yang pada akhirnya menyebabkan peningkatan terhadap kinerja DSSC [13]. Dalam makalah ini, akan dibahas perkembangan DSSC berdasarkan material *counter electrode* yang digunakan, baik berupa platina, karbon maupun PEDOT:PSS pada DSSC berkonfigurasi *sandwich* dan *monolithic*.

## 2. PLATINA

Platina merupakan logam berwarna putih yang pertama kali ditemukan oleh Julius Scaliger pada tahun 1735. Platina memiliki sifat fisik dan kimiawi yang stabil (tidak beroksidasi dengan udara, air ataupun pada temperatur tinggi); larut dengan *aqua regia* membentuk *chloroplatinic acid* ( $H_2PtCl_6$ ); memiliki konduktivitas elektrik, panas (*thermal*), dan aktivitas katalis yang baik [14]. Platina merupakan katalis yang baik pada DSSC, sehingga karakteristik material platina menjadi kriteria ideal yang harus dipenuhi oleh material lainnya untuk dapat digunakan sebagai *counter electrode* pada DSSC [6].

Dalam penelitian DSSC pertama yang dipublikasikan oleh Grätzel dan Regan pada tahun 1991, platina merupakan material yang digunakan sebagai *counter electrode*. Dengan menggunakan lapisan  $TiO_2$  dengan ketebalan 10  $\mu m$  dan *roughness factor* sebesar 780 sebagai fotoanoda, metode tersebut berhasil menghasilkan DSSC dengan PCE (*power conversion efficiency*) sebesar 7,1% – 7,9% [1].

Pada tahun 1993, Nazeerudin, dkk. [15] melaporkan percobaan menggunakan *counter electrode* platina dengan ketebalan 2  $\mu m$  yang terdepositasi di atas lapisan FTO. Dengan menggunakan fotoanoda  $TiO_2$  berketebalan 10  $\mu m$ , *dye sensitizer* cis-di(thiocyanato)-bis(2,2-bipyridyl-4,4'-dicarboxylate)ruthenium(II) (N3) dan elektrolit lithium iodida/triiodida, mampu menghasilkan DSSC dengan performa yang sepadan dengan performa *solar cell* konvensional pada saat tersebut. Dalam kondisi sinar AM 1,5 diperoleh  $V_{oc}$  (*open voltage circuit*) 0,72 V;  $J_{sc}$  (*short circuit current density*) 17 mA/cm<sup>2</sup> dan PCE 10% [15].

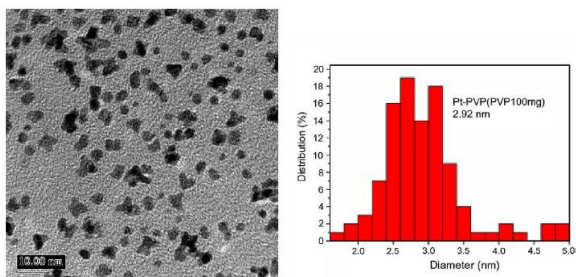


Gambar 3. Pengaruh temperatur pemanasan katalis platina di atas kaca TCO terhadap densitas *exchange current* [16]

Penelitian lain dilakukan oleh Papageoriou, dkk. [16] menggunakan platina berukuran nano sebagai *counter electrode* DSSC yang dilapiskan dengan menyemprotkan larutan  $H_2PtCl_6$ /isopropanol (5 mmol/L) ke atas permukaan kaca konduktif TCO yang dipanaskan pada temperatur 386 °C selama 10 menit (deposisi thermal). Gambar 3 menunjukkan pengaruh variasi temperatur pemanasan platina terhadap kecepatan reduksi triiodide pada *counter electrode* yang ditunjukkan melalui densitas *exchange current*. Temperatur 386 °C merupakan temperatur pemanasan yang paling optimal untuk menghasilkan *exchange current* bernilai maksimum tanpa mengakibatkan penurunan aktivitas reduksi triiodida pada katode dalam jangka panjang. Melalui percobaan tersebut,

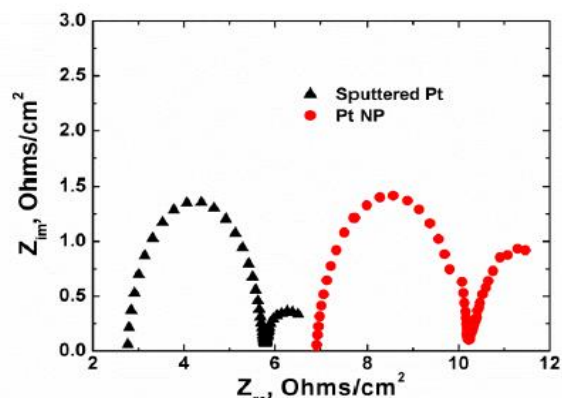
diperoleh katalis platina dengan konsentrasi rendah ( $< 3 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ ) dan resistansi transfer muatan ( $R_{ct}$ ) yang rendah pula ( $< 0,5 \Omega \cdot \text{cm}^2$ ). Hal tersebut menyebabkan DSSC yang dihasilkan memiliki performa kinetik yang baik; stabil baik secara mekanik, kimiawi, maupun elektrokimia; serta memiliki harga yang rendah dan transparan [16].

Lan, dkk. [18] melakukan penelitian yang membandingkan *counter electrode* platina dengan metode deposisi berbeda, diantaranya platina yang dideposisi menggunakan metode *screen printing* dengan jumlah pelapisan sebanyak 10 kali di atas kaca ATO (*antimony tin oxide*) (*screen-printed Pt*), platina yang dideposisi menggunakan metode *sputtering* di atas kaca ITO (*sputtered Pt*), dan *PVP-capped platinum nanocluster* yang dideposisi menggunakan metode *two step dip coating* di dalam larutan kondisioner selama 5 menit dan larutan *PVP-capped platinum* selama 5 menit. Hasil karakterisasi TEM (*transmission electron microscopy*) pada Gambar 4 menunjukkan bentuk *PVP-capped platinum* berstruktur *nanocluster* dengan ukuran partikel rata-rata sebesar 3 nm. Hal tersebut menyebabkan *PVP-capped platinum* memiliki luas permukaan dan rasio volume yang tinggi, sehingga memiliki daerah aktif yang banyak. *PVP-capped platinum* meskipun memiliki jumlah platina yang terdposisi lebih sedikit, namun memiliki performa yang lebih baik sebagai *counter electrode* DSSC dibandingkan *sputtered Pt* dan *screen-printed Pt*. Melalui karakterisasi EIS (*electrochemical impedance spectroscopy*), dapat diperoleh bahwa  $R_{ct}$  *PVP-capped Pt* bernilai lebih rendah ( $3,1 \Omega \cdot \text{cm}^2$ ) dibandingkan dengan *sputtered Pt* ( $8 \Omega \cdot \text{cm}^2$ ) dan *screen-printed Pt* ( $15,2 \Omega \cdot \text{cm}^2$ ). Melalui karakterisasi I-V, *PVP-capped platinum* juga memiliki performa lebih unggul dengan PCE 5,28% dibandingkan *sputtered platinum* yang hanya menghasilkan PCE 4,45% dan *screen printed platinum* dengan PCE terendah 4,09% [18].



Gambar 4. Hasil karakterisasi TEM dan distribusi ukuran partikel *PVP-capped Pt nanocluster* (skala TEM 10 nm) [18]

Fabrikasi *counter electrode* DSSC menggunakan material platina yang dideposisi metode *spray deposition* dilakukan Iefanova, dkk. [19]. Metode *spray deposition* menggunakan larutan nano-partikel platina dan aseton berkonsentrasi 1 g/L mampu mengurangi jumlah platina yang terdposisi hingga 86% dibandingkan metode *sputtering*. Selain itu, *counter electrode* yang dihasilkan di atas kaca FTO memiliki transparansi yang lebih baik hingga 80% dalam penyinaran cahaya tampak. Melalui karakterisasi SEM, diketahui platina terdistribusi secara merata di atas kaca FTO dengan variasi ukuran partikel 5 nm – 70 nm. Melalui karakterisasi EIS yang ditunjukkan melalui *Nyquist plot* seperti pada Gambar 5, diperoleh nilai resistansi seri ( $R_s$ )  $3,45 \Omega/\text{cm}^2$  dan nilai  $R_{ct}$  ( $1,63 \Omega/\text{cm}^2$ ) pada *counter electrode* platina dengan metode *spray deposition*. Nilai tersebut lebih tinggi dibandingkan nilai  $R_s$  dan  $R_{ct}$  ( $1,35 \Omega/\text{cm}^2$  dan  $0,8 \Omega/\text{cm}^2$ ) yang dihasilkan oleh *counter electrode* dengan metode *sputtering*. Akan tetapi, metode *spray deposition* mampu menghasilkan performa DSSC yang tinggi dengan PCE 6,17%, yaitu 96% nilai PCE DSSC dengan metode deposisi *counter electrode sputtering*. Hal tersebut menandakan bahwa teknik *spray deposition* berpotensi digunakan untuk fabrikasi *counter electrode* [19].



Gambar 5. *Nyquist plot counter electrode Pt* yang dideposisi menggunakan *spray-deposition* dan *counter electrode* platina yang dideposisi dengan metode *sputtering* [19]

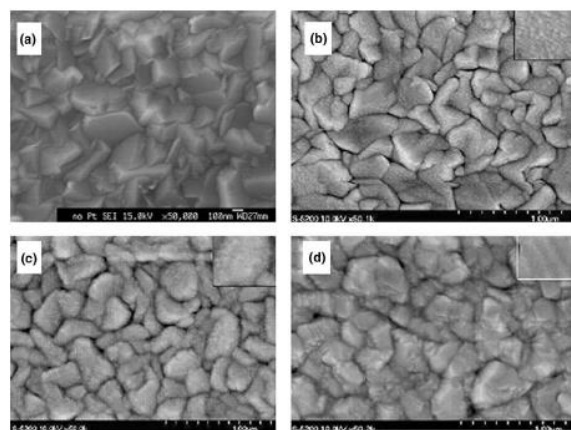
Setiap peningkatan ketebalan lapisan material pada *counter electrode* pada rentang tertentu akan menyebabkan kenaikan terhadap konduktivitas elektroda yang dihasilkan. Hal ini dibuktikan oleh penelitian yang dilakukan oleh Fang, dkk. [20] dengan memvariasikan ketebalan platina pada rentang 2 – 415 nm. Variasi ketebalan dilakukan dengan memvariasikan waktu *sputtering* 7 s – 1500 s. Melalui karakterisasi SEM, Gambar 6(a) menunjukkan



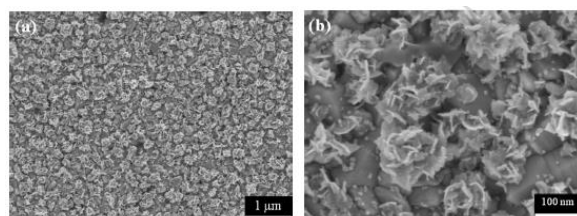
struktur permukaan kasar substrat FTO yang berfungsi untuk meningkatkan adhesi platina di atas permukaan FTO. Gambar 6(b) menunjukkan lapisan *sputtered Pt* dengan ketebalan 100 nm memiliki diameter partikel sekitar 14 nm. Ketika ketebalan platina meningkat menjadi 200 nm pada Gambar 6(c), ukuran partikel bertambah menjadi 40 – 60 nm. Saat ketebalan platina ditingkatkan menjadi 415 nm seperti yang ditunjukkan pada Gambar 6(d), ukuran partikel platina membesar dan beragregasi di atas lapisan FTO, sehingga tidak terlihat permukaan mikrostruktur granular. Peningkatan konduktivitas *counter electrode* terjadi pada rentang ketebalan 2 – 415 nm, namun pada rentang di atas 100 nm, peningkatan konduktivitas yang terjadi tidak signifikan. Peningkatan ketebalan platina menyebabkan partikel platina secara bertahap melapisi hingga ke seluruh permukaan FTO, sehingga interkoneksi antar partikel semakin meningkat. Namun apabila peningkatan ketebalan terus dilakukan di atas 100 nm, partikel platina yang telah melapisi seluruh permukaan FTO, akan semakin rapat dan beragregasi menjadi partikel berukuran lebih besar.  $R_{ct}$  FTO mengalami penurunan drastis setelah dilapisi oleh platina 2 nm dari  $1,5 \times 10^7 \Omega/\text{cm}^2$  menjadi  $0,8 \Omega/\text{cm}^2$ . Sedangkan pada ketebalan 2 – 415 nm,  $R_{ct}$  yang dihasilkan berada di rentang nilai  $0,8 \Omega/\text{cm}^2$  dan  $2,1 \Omega/\text{cm}^2$ . Rentang  $R_{ct}$  yang tidak jauh tersebut menunjukkan bahwa ketebalan *counter electrode* platina tidak mempengaruhi  $R_{ct}$  secara signifikan. Hal tersebut disebabkan oleh adanya faktor yang saling mengimbangi. Peningkatan ketebalan menyebabkan peningkatan terhadap konduktivitas yang berkontribusi terhadap transfer elektron di *counter electrode*. Akan tetapi, peningkatan ketebalan juga menyebabkan peningkatan ukuran partikel platina, sehingga menghambat aktivitas katalis akibat berkurangnya porositas dan luas permukaan. Penelitian tersebut juga melaporkan bahwa perbedaan ketebalan *counter electrode* pada rentang 2 – 415 nm tidak mempengaruhi secara signifikan PCE DSSC yang dihasilkan [20].

Chen, dkk. [21] melakukan fabrikasi PtNRs (*counter electrode platinum nanoroses*) menggunakan metode *electrochemical deposition*. *Counter electrode* tersebut digunakan pada DSSC yang tersusun dari fotoanoda  $\text{TiO}_2$  dan *dye* N719. Melalui karakterisasi SEM yang ditunjukkan pada Gambar 7, partikel PtNR memiliki struktur *macroporous* dengan distribusi partikel merata dan rapat di atas kaca FTO. Tidak terlihat adanya agregasi partikel PtNR yang

menunjukkan bahwa *counter electrode* tersebut memiliki luas permukaan yang besar. Struktur permukaan yang terbentuk dari PtNR menyebabkan elektrolit dapat lebih mudah berdifusi di antara celah-celah partikel sehingga proses redoks terjadi dengan cepat. Hal tersebut ditandai dengan nilai resistansi transfer muatan PtNR lebih kecil ( $8,1 \Omega/\text{cm}^2$ ) dan densitas arus lebih besar ( $17,53 \text{ mA}/\text{cm}^2$ ) dibandingkan *sputtered Pt* ( $10 \Omega/\text{cm}^2$  dan  $16 \text{ mA}/\text{cm}^2$ ). *Counter electrode* PtNR mampu menghasilkan DSSC dengan PCE 6,58%, yaitu 10% lebih tinggi dibandingkan dengan PCE DSSC dengan *counter electrode* yang dideposisi menggunakan metode *sputtering* [21].



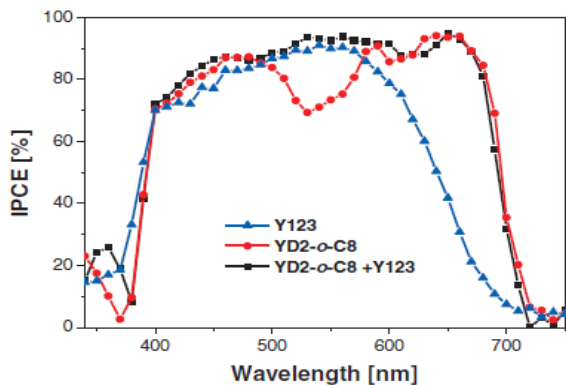
Gambar 6. Morfologi permukaan (a) substrat kaca FTO, (b)-(d) *counter electrode* platina dengan ketebalan 100 nm, 200 nm, dan 415 nm [20]



Gambar 7. Hasil karakterisasi SEM pada permukaan *counter electrode* PtNRs (a) skala 1  $\mu\text{m}$  dan (b) skala 100 nm [21]

Penggunaan platina sebagai *counter electrode* juga dapat dikombinasikan dengan elektrolit berbasis non iodida. Yella, dkk. [23] mengkombinasikan *counter electrode* platina dengan elektrolit  $\text{Co}^{(\text{II/III})}$ tris(bipyridil) yang berkonjugasi dengan *donor- $\pi$ -bridge acceptor zinc porphyrin dye sensitizer* (YD2-o-C8). YD2-o-C8 secara signifikan memperlambat rekombinasi elektron dari *conduction band*  $\text{TiO}_2$  menuju mediator kobal yang teroksidasi, sehingga memungkinkan tegangan yang dihasilkan mendekati 1 volt ( $>0,8 \text{ V}$ ). YD2-o-C8 dan sensitasi *dye* organik Y123 mampu meningkatkan performa DSSC hingga 12,3%.

Seperti yang ditunjukkan pada Gambar 8, DSSC yang difabrikasi menggunakan *dye* YD2-o-C8+Y123 dapat menyerap hampir seluruh spektrum cahaya tampak, dengan IPCE maksimal >90% dengan domain panjang gelombang di bawah 700 nm [23].



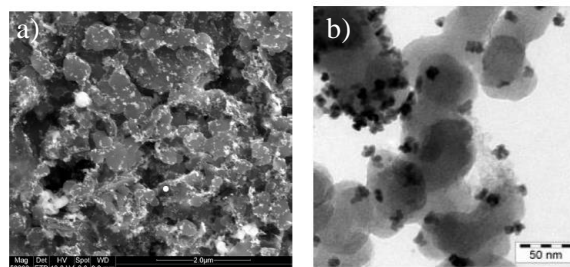
Gambar 8. IPCE DSSC yang menggunakan *dye* YD2-o-C8, Y123, dan YD2-oC8+Y123 [23]

Selain dikombinasikan dengan jenis elektrolit yang berbeda, platina juga dapat digunakan pada DSSC dengan jenis *dye* yang bervariasi. Kakiage, dkk. [4] melakukan fabrikasi DSSC menggunakan *counter electrode* platina, *alkoxysilyl-anchor dye* (ADEKA-1) dan *carboxy-anchor organic dye* (LEG4), dan elektrolit dengan *redox couple*  $I_3^-/I^-$ . DSSC tersebut mampu menghasilkan PCE hingga 11,2%. Melalui hasil tersebut, dilakukan peningkatan tegangan maksimum ( $V_{max}$ ) dengan menggunakan elektrolit yang lebih positif atau potensial redoks lebih rendah dibandingkan  $I_3^-/I^-$ . Melalui pertimbangan tersebut, *Cobalt (III/II) tris (1,10-penanthroline) complex* ( $[Co(phen)^{3+}]^{3+/2+}$ ) digunakan sebagai elektrolit, sedangkan ADEKA-1 dan LEG4 yang memiliki HOMO lebih positif dibandingkan *cobalt (III/II)* digunakan sebagai *dye*, dan digunakan platina sebagai *counter electrode*. Kombinasi komponen tersebut menyebabkan terjadinya *thermodynamic driving force* terhadap regenerasi *dye* yang berasal dari transfer elektron  $Co^{2+}$  menuju *dye* yang teroksidasi, sehingga menghasilkan DSSC dengan PCE tertinggi sebesar 13,8% [4].

Selain digunakan sebagai *counter electrode* pada DSSC *sandwich*, platina juga digunakan sebagai *counter electrode* pada DSSC *monolithic*. Han, dkk. [24] menggunakan platina yang dicampur pada *counter electrode* karbon dengan tujuan meningkatkan aktivitas katalis *counter electrode* terhadap DSSC *monolithic*. Fabrikasi DSSC dilakukan menggunakan *polymer nanocomposite* sebagai elektrolit, dan N719 sebagai *dye sensitizer*. Hasil yang diperoleh menunjukkan terjadi peningkatan konduktivitas

pada *counter electrode* karbon yang dicampur platina dibandingkan dengan *counter electrode* yang tidak dicampur platina. Konduktivitas *counter electrode* meningkat seiring dengan meningkatnya ketebalan *counter electrode*. Adanya penambahan nano-partikel platina, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 9, menyebabkan luas permukaan *counter electrode* meningkat, sehingga reduksi elektrolit terjadi lebih cepat akibat peningkatan area kontak antar elektrolit dengan *counter electrode*. Hal tersebut berpengaruh terhadap performa yang dihasilkan, dimana DSSC *monolithic* dengan kombinasi platina dan karbon sebagai *counter electrode* dapat menghasilkan PCE sebesar 3,65%, sedangkan pada DSSC *monolithic* yang hanya menggunakan karbon sebagai *counter electrode* hanya menghasilkan PCE sebesar 2,44% [24]. Peningkatan performa DSSC menggunakan *counter electrode* campuran platina dan karbon juga disebabkan oleh adanya penurunan resistansi transfer muatan ( $R_{ct}$ ) yang dibuktikan dalam penelitian Skupien, dkk. [25]. *Counter electrode* karbon memiliki  $R_{ct}$  sebesar  $1,64 \Omega \cdot cm^2$ , sedangkan *counter electrode* campuran karbon dan platina memiliki nilai  $R_{ct}$  lebih kecil, yaitu sebesar  $0,39 \Omega \cdot cm^2$  [25].

Penggunaan campuran platina dan karbon juga dapat dikombinasikan dengan material selain elektrolit berbasis iodida, yaitu berupa penghantar *hole* berbasis material organik [26].



Gambar 9. Struktur permukaan *counter electrode* campuran karbon dan platina (a) hasil karakterisasi SEM [24] dan (b) hasil karakterisasi TEM [25]

Meskipun platina merupakan material ideal sebagai *counter electrode* DSSC *sandwich* yang mampu menghasilkan DSSC dengan performa tinggi, namun pada DSSC *monolithic* penggunaan *counter electrode* platina justru menyebabkan DSSC tidak mampu menghasilkan performa yang baik. Hal tersebut ditunjukkan dalam penelitian yang dilakukan oleh Nursam, dkk, yang membandingkan performa DSSC *monolithic* dengan menggunakan *counter electrode* karbon dan *counter electrode* platina yang dideposisi menggunakan metode *screen printing*. Melalui karakterisasi *four-point probe*

menunjukkan *counter electrode* platina memiliki *sheet resistance* (10,9  $\Omega$ /sq) lebih tinggi dibandingkan karbon (9,8  $\Omega$ /sq). Platina berupa pasta memiliki struktur yang kurang berpori, menghalangi adsorpsi *dye* menuju  $\text{TiO}_2$ . Faktor tersebut menyebabkan DSSC *monolithic* yang menggunakan *counter electrode* platina hanya menghasilkan PCE setengah dari DSSC karbon [27]. Perbandingan antara berbagai kombinasi *counter electrode* platina dengan elemen DSSC yang berbeda beserta variasi metode fabrikasinya dapat dilihat pada Tabel 1.

Platina memiliki beberapa kelemahan, yaitu harga yang mahal dan keberadaan material yang terbatas, sehingga mengurangi potensi komersialisasi DSSC. Studi yang dilakukan Olsen, dkk. [28] menunjukkan platina tidak benar-benar stabil terhadap elektrolit  $\text{I}_3^-/\text{I}^-$ . Platina dapat larut dengan elektrolit  $\text{I}_3^-/\text{I}^-$  membentuk senyawa baru berupa  $\text{PtI}_2$  yang menyebabkan penurunan terhadap densitas arus saat reaksi reduksi  $\text{I}_3^-$  berlangsung [28]. Larutnya platina terhadap elektrolit akan memberikan kesempatan platina berinteraksi dengan  $\text{TiO}_2$ , sehingga dapat menyebabkan terjadinya *short circuit* dikarenakan reduksi  $\text{I}_3^-$  yang seharusnya terjadi di *counter electrode* (katoda) justru terjadi di foto elektroda (anoda) [29].

### 3. KARBON

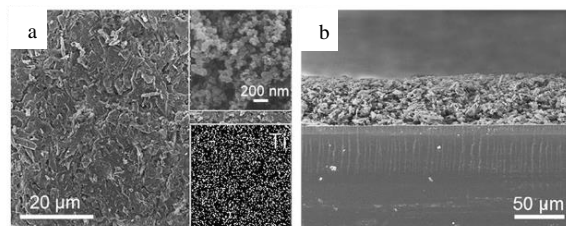
Karbon merupakan material ke-6 dengan persediaan terbanyak di permukaan bumi, dan berharga murah. Selain persediaannya yang banyak, karbon merupakan material yang ramah lingkungan, memiliki aktivitas katalis dan konduktivitas yang tinggi, stabil terhadap temperatur tinggi, dan tahan terhadap korosi, sehingga menjadi material alternatif pengganti platina sebagai *counter electrode* DSSC [3]. Berbagai macam aplikasi material berbasis karbon sebagai *counter electrode* pada DSSC dirangkum pada Tabel 2.

Pada tahun 1996, Kay dan Grätzel pertama kali melakukan percobaan menggunakan *carbon black*-grafit sebagai *counter electrode* DSSC *monolithic*. *Counter electrode* karbon tersebut memiliki konduktivitas dan aktivitas katalis yang tinggi, serta luas permukaan yang besar sehingga mampu menghasilkan PCE sebesar 6,7% [29].

*Amorphous porous carbon* memiliki struktur berpori dan luas permukaan yang tinggi, sehingga cocok digunakan sebagai material *counter electrode* DSSC. *Amorphous carbon* dapat dibedakan menjadi 3 jenis berdasarkan ukuran porinya, diantaranya: *microporous* (<2 nm),

*mesoporous* (2-50 nm) dan *macroporous* (>50 nm) [30].

*Counter electrode microporous carbon* (MC) yang dipreparasi oleh Peng, dkk. [31] dengan menggunakan campuran batang jagung yang telah dikarbonisasi dan diaktivasi (MC aktif), karbon hitam, dan *binder*  $\text{TiO}_2$  memiliki resistansi transfer muatan  $R_{ct}$  rendah (1,32  $\Omega \cdot \text{cm}^2$ ) yang menandakan aktivitas katalis pada reaksi redoks  $\text{I}_3^-/\text{I}^-$  berlangsung dengan baik. MC seperti yang digambarkan pada Gambar 10(a) memiliki luas permukaan yang besar (3000  $\text{m}^2/\text{g}$ .) dan rata-rata diameter pori sebesar 2,21 nm, dimana ukuran tersebut masih memungkinkan  $\text{I}_3^-$  untuk masuk ke dalam pori tersebut dan tereduksi menjadi  $\text{I}^-$ . Gambar 10(a) juga menunjukkan partikel *binder* Ti tersebar secara merata di seluruh permukaan lapisan *counter electrode* yang memiliki ketebalan 50  $\mu\text{m}$  (Gambar 10(b)). DSSC yang difabrikasi menggunakan *counter electrode* MC dapat menghasilkan PCE yang tinggi yaitu 7,36%, di mana nilai tersebut telah mencapai 94% dari PCE DSSC yang menggunakan *counter electrode* platina [31].

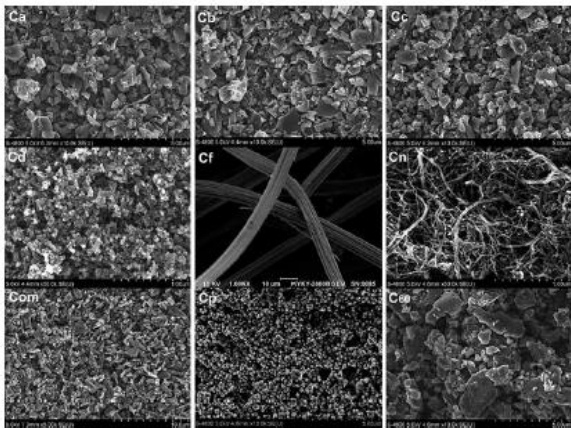


Gambar 10. Morfologi lapisan *counter electrode* MC dilihat dari (a) permukaan lapisan MC, (b) penampang melintang lapisan MC, inset atas (a) permukaan MC dengan perbesaran tinggi, inset bawah (a) *mapping* elemen Ti di permukaan MC [31]

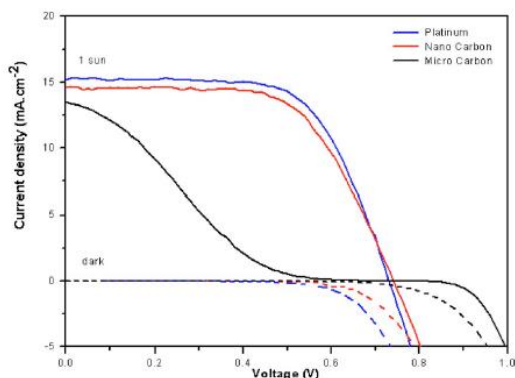
Wu, dkk. [32] melakukan penelitian dengan membandingkan 9 jenis *counter electrode* berbasis karbon. Di antaranya *well ordered mesoporous carbon* (Com), karbon aktif (Ca), karbon hitam (Cb), karbon konduktif (Cc), karbon *dye* (Cd), karbon *fiber* (Cf), karbon *nanotube* (Cn), tinta *printer* (Cp), dan *fullerene* ( $\text{C}_{60}$ ). Hasil karakterisasi SEM yang ditunjukkan pada Gambar 11 menunjukkan bahwa kesembilan jenis karbon tersebut tersusun dari butiran karbon dengan ukuran 50 nm – 2  $\mu\text{m}$ . Cd dan Cp memiliki ukuran partikel yang lebih seragam dengan diameter 20 – 30 nm. Cf memiliki diameter 10  $\mu\text{m}$  dan masing-masing *fiber* nya tersusun oleh benang-benang yang lebih halus dengan diameter 1  $\mu\text{m}$ . Cn berdiameter 20 – 40 nm,  $\text{C}_{60}$  tersusun tumpukan partikel karbon yang berbentuk tidak beraturan dengan ukuran 100 nm – 3  $\mu\text{m}$ . *Counter electrode* Com dan Cd



merupakan katalis yang paling efektif dibandingkan dengan ketujuh *counter electrode* karbon lainnya. DSSC dengan *counter electrode* Com dan Cd mampu menghasilkan PCE sebesar 7,5%. *Counter electrode* Ca, Cb, Cc, Cf, dan Cn, juga memiliki aktivitas katalis yang cukup tinggi, bahkan Cp yang berasal dari tinta *printer* bekas, juga mampu menghasilkan PCE DSSC sebesar 4,5%. Data PCE yang cukup tinggi tersebut menunjukkan bahwa karbon memiliki potensi yang sangat baik untuk menggantikan peran platina sebagai *counter electrode* [32].



Gambar 11. Hasil karakterisasi SEM morfologi karbon Ca, Cb, Cc, Cd, Cf, Cn, Com, Cp, C60 [32]

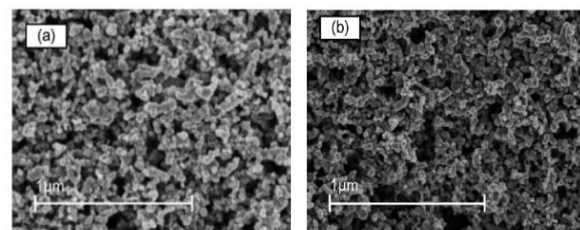


Gambar 12. Perbandingan kurva I-V DSSC menggunakan *counter electrode* mikrokarbon, nanokarbon, dan platina [33]

Ramasamy, dkk. [33] melakukan penelitian menggunakan bubuk nanokarbon berukuran 30 nm dengan luas permukaan 100 m<sup>2</sup>/g. Melalui pengukuran EIS, diperoleh hasil bahwa nilai  $R_{ct}$  *counter electrode* nanokarbon (0,74  $\Omega$ /cm<sup>2</sup>) lebih kecil dibandingkan  $R_{ct}$  *counter electrode* platina yang dideposisi menggunakan metode *screen printing* (1,8  $\Omega$ /cm<sup>2</sup>). Hal tersebut disebabkan oleh luas permukaan karbon lebih besar dibandingkan platina. Meskipun begitu, PCE yang dihasilkan oleh DSSC dengan *counter electrode* nanokarbon yang ditunjukkan melalui kurva I-V di Gambar 12, lebih rendah (6,73%)

dibandingkan dengan DSSC yang menggunakan *counter electrode* platina (7,26%). Dilakukan pula penelitian menggunakan mikrokarbon (ukuran partikel: 2-12  $\mu$ m, luas permukaan: 0,4 m<sup>2</sup>/g) sebagai *counter electrode*. DSSC dengan *counter electrode* mikrokarbon hanya menghasilkan PCE 1,87%. Luas permukaan yang kecil dan tingginya resistansi elektrik partikel mikro karbon menyebabkan peningkatan terhadap resistansi seri dan rendahnya *fill factor* [33].

Joshi, dkk. [34] menggunakan komposit nanokarbon/TiO<sub>2</sub> sebagai *counter electrode* pada DSSC *sandwich*. Hasil karakterisasi SEM pada Gambar 13 menunjukkan lapisan *counter electrode* nanokarbon/TiO<sub>2</sub> memiliki porositas yang tinggi, sehingga proses reduksi I<sub>3</sub><sup>-</sup> dapat berlangsung dengan efektif. Pori yang terdapat pada *counter electrode* memiliki rentang ukuran 20 nm – 200 nm, sehingga I<sub>3</sub><sup>-</sup> yang berdiameter 3 Å dan panjang 6 Å dapat dengan mudah berdifusi ke dalam pori dan tereduksi di permukaan karbon. Ukuran partikel nanokarbon/TiO<sub>2</sub> pada Gambar 13(a) lebih besar dibandingkan nanopartikel TiO<sub>2</sub> murni pada Gambar 13(b) menandakan partikel karbon mendominasi lapisan *counter electrode* karbon/TiO<sub>2</sub> dan secara efektif berfungsi sebagai katalis untuk mereduksi I<sub>3</sub><sup>-</sup>. *Counter electrode* komposit nanokarbon/TiO<sub>2</sub> yang digunakan pada DSSC menghasilkan PCE sebesar 5,5% [34].

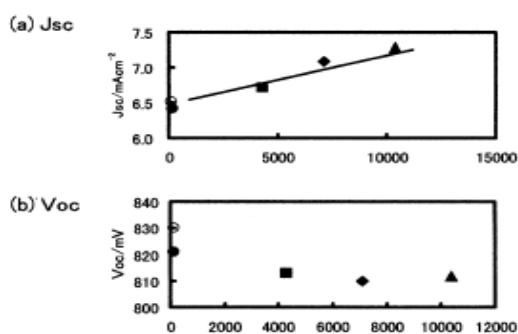


Gambar 13. Morfologi permukaan (a) komposit nanokarbon/TiO<sub>2</sub> dan (b) TiO<sub>2</sub> murni [34]

Imoto, dkk. [35] membandingkan performa yang dihasilkan DSSC menggunakan *counter electrode* karbon aktif dengan *roughness factor* berbeda (4300 – 10400) terhadap DSSC dengan *counter electrode* platina. *Counter electrode* karbon aktif difabrikasi menggunakan metode *doctor blade*, dan dilakukan *annealing* pada suhu 180 °C selama 1 jam (ketebalan 24 – 30  $\mu$ m), sedangkan *counter electrode* platina difabrikasi menggunakan metode *sputtering*. Hasil pengukuran I-V menunjukkan bahwa  $J_{sc}$  *counter electrode* karbon meningkat seiring dengan meningkatnya *roughness factor* (Gambar 14(a)). Akan tetapi, nilai  $V_{oc}$  hampir tidak terpengaruh oleh *roughness factor* (Gambar 14(b)). Dalam penelitian Imoto, dkk. [35] juga membandingkan



performa DSSC dengan ketebalan *counter electrode* karbon berbeda: 30  $\mu\text{m}$ , 99  $\mu\text{m}$ , dan 153  $\mu\text{m}$ . Performa DSSC semakin meningkat seiring dengan meningkatnya ketebalan *counter electrode*. Performa tertinggi dengan PCE 3,89% dihasilkan oleh DSSC menggunakan *counter electrode* karbon berketebalan 153  $\mu\text{m}$  dan *roughness factor* 64700. Nilai tersebut lebih tinggi dibandingkan PCE DSSC dengan *counter electrode* platina (3,61%) [35].

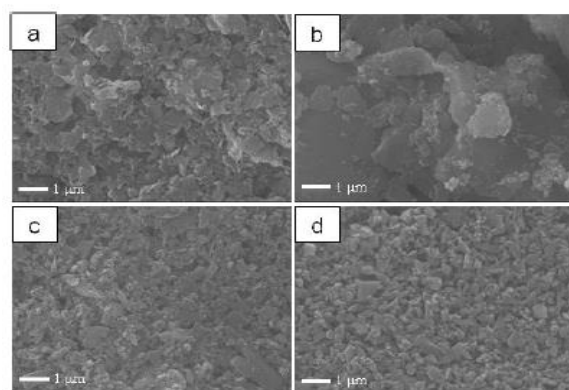


Gambar 14. Efek *roughness factor counter electrode* karbon terhadap (a)  $J_{sc}$  dan (b)  $V_{oc}$  yang dihasilkan DSSC [35]

Wu, dkk. [22] memfabrikasi DSSC menggunakan *counter electrode* berupa *graphite sheet* sebagai katalis dan elektrolit berbasis disulfida/thiolate ( $T_2/T^-$ ). PCE yang dihasilkan mencapai 4,7% dan  $R_{ct}$  1,1  $\Omega \cdot \text{cm}^2$ . Menariknya, nilai PCE yang dihasilkan lebih tinggi dan  $R_{ct}$  lebih rendah dibandingkan nilai PCE 2,33% dan  $R_{ct}$  10,2  $\Omega \cdot \text{cm}^2$  yang dihasilkan oleh DSSC dengan elektrolit triiodide/iodide ( $I_3^-/I^-$ ). Sebaliknya, DSSC yang menggunakan *counter electrode* platina dan elektrolit  $I_3^-/I^-$  memiliki performa yang lebih unggul dengan PCE 7,13% dan  $R_{ct}$  3,0  $\Omega \cdot \text{cm}^2$  dibandingkan dengan elektrolit  $T_2/T^-$  yang hanya menghasilkan PCE 3,97% dengan  $R_{ct}$  7,0  $\Omega \cdot \text{cm}^2$  [22].

Karbon aktif merupakan jenis karbon yang paling banyak dieksplorasi dan telah banyak digunakan untuk menggantikan peran platina sebagai katalis [36]. Selain itu, karbon aktif dan platina memiliki afinitas elektron dan energi *band gap* yang sama [37]. Karbon aktif memiliki luas permukaan yang besar dengan mempertahankan morfologi *multi edge defect rich* yang membentuk area aktif sebagai penyimpan arus dan tempat terjadinya reaksi elektrokimia [38]. Luas area karbon aktif lebih besar dibandingkan platina dan tipe karbon lainnya [39]. Akan tetapi, dikarenakan banyaknya *defect* dan sifatnya tidak stabil secara kimiawi, menyebabkan injeksi ion triiodida dari elektrolit menuju katode menjadi terhalang [40]. Oleh sebab itu, karbon aktif hanya sesuai untuk

digunakan sebagai *filler* bagi material karbon lainnya untuk membentuk komposit.



Gambar 15. Morfologi *counter electrode* karbon dengan variasi komposisi grafit (G) dan karbon aktif (AC) (a) G4:AC1; (b) G1:AC4, dan variasi komposisi grafit (G) dan karbon *nanopowder* (CN) (c) G4:CN1; (d) G1:CN4 [45]

Grafit merupakan material katalis yang efisien dikarenakan memiliki konduktivitas tinggi, stabil, dan memiliki kemampuan transfer elektron yang cepat [41]. Oleh sebab itu, grafit banyak digunakan sebagai elektroda dalam berbagai aplikasi elektrokimia [42]. Akan tetapi, ukuran partikel grafit yang besar dapat menghambat aktivitas katalis pada *counter electrode*. Hal tersebut dikarenakan grafit dengan ukuran partikel besar memiliki *edge planes* yang sedikit sehingga menyebabkan  $R_{ct}$  meningkat dan reduksi elektrolit terjadi dengan lambat [43].

Penggunaan material karbon sebagai *counter electrode* juga dapat diaplikasikan pada DSSC *monolithic*. Fabrikasi DSSC *monolithic* menggunakan *counter electrode* kombinasi karbon aktif dan grafit, berupa pasta dengan campuran terpeneol, air, dan ethyl seluosa, dilakukan oleh Ito dan Takahashi [44]. DSSC *monolithic* tersebut menghasilkan  $J_{sc}$  6,90  $\text{mA}/\text{cm}^2$ ,  $V_{oc}$  0,608 V, dan PCE 2,06% [44]. Pada penelitian lainnya, Arif, dkk. [45] dilakukan perbandingan performa DSSC *monolithic* menggunakan *counter electrode* karbon berupa kombinasi karbon aktif (AC)/grafit (G) dan kombinasi karbon *nanopowder* (CN)/ grafit (G) dengan rasio berbeda. Melalui hasil karakterisasi SEM pada Gambar 15, ukuran rata-rata partikel aglomerat G4:AC1, G1:AC4, G4:CN1, G1:CN4 berurut-turut adalah 1,04  $\mu\text{m}$ ; 0,83  $\mu\text{m}$ ; 1,3  $\mu\text{m}$ ; dan 3,32  $\mu\text{m}$ . Hasil penelitian menunjukkan bahwa karbon aktif dan grafit dengan rasio 4:1 merupakan komposisi yang optimal untuk menghasilkan *counter electrode* dengan struktur berpori, partikel aglomerat berukuran mikro, konduktivitas tinggi, dan nilai *sheet resistance* yang rendah [45].

Tabel 1. Variasi parameter fabrikasi DSSC dengan platina sebagai counter electrode dan performa DSSC yang dihasilkan [26]

No	DSSC	Counter electrode			Metode deposisi	Substrat	Jenis	Semikonduktor		Metode
		Jenis	Ketebalan	Annealing				Ketebalan	Annealing	
1	Sandwich	Platina	2 µm		Sputtering	FTO 8 Ω/sq	TO <sub>2</sub>	10 µm	450 °C, 30 menit	Glass rod sliding
2	Sandwich	Platina	10 µm	385 °C, 10 menit	Spin Coating	FTO 10 Ω/sq	TO <sub>2</sub>	12 µm	450 °C, 30 menit	Spin coating
3	Sandwich	Platina	1.2 nm		Sputtering	ITO	TO <sub>2</sub>	12 µm	450 °C, 30 menit	Spin coating
4	Sandwich	Platina	12 nm		Sputtering	ITO	TO <sub>2</sub>	7 µm	500 °C, 30 menit	Screen printing
5	Sandwich	PVP-capped platinum		270 °C, 10 menit	Dip coating	ITO 7 Ω/sq	TO <sub>2</sub>	7 µm	500 °C, 30 menit	Screen printing
6	Sandwich	Platina		400 °C, 30 menit	Screen printing	ATO 13 Ω/sq	TO <sub>2</sub>	7 µm	500 °C, 30 menit	Screen printing
7	Sandwich	Platina			Sputtering	ITO 7 Ω/sq	TO <sub>2</sub>	7 µm	500 °C, 30 menit	Screen printing
8	Sandwich	Platinum nanoparticle		450 °C, 15 menit	Sputry deposition	FTO	TO <sub>2</sub>			
9	Sandwich	Platina	50 nm		Sputtering	FTO	TO <sub>2</sub>			
10	Sandwich	Platina	2 nm		Sputtering	FTO 10 Ω/sq	TO <sub>2</sub>	14 µm	450 °C, 30 menit	Screen printing
11	Sandwich	Platina	10 nm		Sputtering	FTO 10 Ω/sq	TO <sub>2</sub>	14 µm	450 °C, 30 menit	Screen printing
12	Sandwich	Platina	25 nm		Sputtering	FTO 10 Ω/sq	TO <sub>2</sub>	14 µm	450 °C, 30 menit	Screen printing
13	Sandwich	Platina	50 nm		Sputtering	FTO 10Ω/sq	TO <sub>2</sub>	14 µm	450 °C, 30 menit	Screen printing
14	Sandwich	Platina	100 nm		Sputtering	FTO 10 Ω/sq	TO <sub>2</sub>	14 µm	450 °C, 30 menit	Screen printing
15	Sandwich	Platina	200 nm		Sputtering	FTO 10 Ω/sq	TO <sub>2</sub>	14 µm	450 °C, 30 menit	Screen printing
16	Sandwich	Platina	300 nm		Sputtering	FTO 10 Ω/sq	TO <sub>2</sub>	14 µm	450 °C, 30 menit	Screen printing
17	Sandwich	Platina	415 nm		Sputtering	FTO 10 Ω/sq	TO <sub>2</sub>	14 µm	450 °C, 30 menit	Screen printing
18	Sandwich	Platinum nanoroses (Pt/NRs)			Electrochemical deposition	FTO 8 Ω/sq	TO <sub>2</sub>		550 °C, 30 menit	Screen printing
19	Sandwich	Platina	50 nm		Sputtering	FTO 8 Ω/sq	TO <sub>2</sub>		550 °C, 30 menit	Screen printing
20	Sandwich	Platina	50 nm		Sputtering	FTO	TO <sub>2</sub>	10.5 µm	450 °C, 30 menit	Screen Printing
21	Sandwich	Platina	50 nm		Sputtering	FTO	TO <sub>2</sub>	10.5 µm	450 °C, 30 menit	Screen Printing
22	Sandwich	Platina	50 nm		Sputtering	FTO	TO <sub>2</sub>	5 µm		
23	Monolithic	Platina/karbon	50 µm	380 °C, 20 menit	Doctor blade	FTO 13 Ω/sq	TO <sub>2</sub>		500 °C, 30 menit	Spin coating
24	Monolithic	Platina/ATO		450 °C, 40 menit	Screen printing	FTO 7 Ω/sq	TO <sub>2</sub>	11 µm	450 °C, 60 menit	Screen printing
25	Monolithic	Platina/karbon		450 °C, 40 menit	Screen printing	FTO 7 Ω/sq	TO <sub>2</sub>	11 µm	450 °C, 60 menit	Screen printing
26	Monolithic	Platina/karbon	25 µm	400 °C, 30 menit	Screen printing	FTO	TO <sub>2</sub>	2 µm	500 °C, 30 menit	Screen printing
27	Monolithic	Platina/ karbon	10 µm	400 °C, 30 menit	Screen printing	FTO	TO <sub>2</sub>	2 µm	500 °C, 30 menit	Screen printing
28	Monolithic	Platina	10 µm	400 °C, 40 menit	Screen printing	FTO 15 Ω/sq	TO <sub>2</sub>	8 µm	500 °C, 15 menit	Screen printing

Lanjutan Tabel 1

Elektrodit	Jenis	Konsentrasi	Lama	Metode	Fill Factor	R <sub>sc</sub>	PCE	Ketebalan Surlyn	Kat	R <sub>s</sub>
I <sub>s</sub> /I	N3	0,3 mM	3 Jam	Perendaman	0,73	< 0,5 Ω.cm <sup>2</sup>	10%	20 μm	Pocrtreatment TiCl <sub>4</sub> 200 mM	
I <sub>s</sub> /I										
I <sub>s</sub> /I	N719	0,3 mM	20 Jam	Perendaman	0,65	0,45 Ω.cm <sup>2</sup>	7,3%	60 μm	dlam larutan darkcheer	
I <sub>s</sub> /I	N719	0,3 mM	20 Jam	Perendaman	0,64	0,7 Ω.cm <sup>2</sup>	6,8%	60 μm	dlam larutan darkcheer	
I <sub>s</sub> /I	N719	0,4 mM	12 Jam	Perendaman	0,64	3,1 Ω.cm <sup>2</sup>	5,28%	50 μm		
I <sub>s</sub> /I	N719	0,4 mM	12 Jam	Perendaman	0,54	8 Ω.cm <sup>2</sup>	4,09%	50 μm		
I <sub>s</sub> /I	N719	0,4 mM	12 Jam	Perendaman	0,55	15,2 Ω.cm <sup>2</sup>	4,45%	50 μm		
I <sub>s</sub> /I	N719	0,4 mM	12 Jam	Perendaman	0,67	1,63 Ω.cm <sup>2</sup>	6,17%			
I <sub>s</sub> /I					0,72	0,8 Ω.cm <sup>2</sup>	6,47%			
I <sub>s</sub> /I	N719	0,5 mM	12 Jam	Perendaman	0,6	0,8 Ω.cm <sup>2</sup>	4,9%	50 μm		
I <sub>s</sub> /I	N719	0,5 mM	12 Jam	Perendaman	0,6	1,2 Ω.cm <sup>2</sup>	4,92%	50 μm		
I <sub>s</sub> /I	N719	0,5 mM	12 Jam	Perendaman	5,9	2,1 Ω.cm <sup>2</sup>	4,99%	50 μm		
I <sub>s</sub> /I	N719	0,5 mM	12 Jam	Perendaman	6,2	1,6 Ω.cm <sup>2</sup>	5,18%	50 μm		
I <sub>s</sub> /I	N719	0,5 mM	12 Jam	Perendaman	6,2	2,1 Ω.cm <sup>2</sup>	4,89%	50 μm		
I <sub>s</sub> /I	N719	0,5 mM	12 Jam	Perendaman	6,4	1,7 Ω.cm <sup>2</sup>	5,08%	50 μm		
I <sub>s</sub> /I	N719	0,5 mM	12 Jam	Perendaman	6,3	1,7 Ω.cm <sup>2</sup>	5,03%	50 μm		
I <sub>s</sub> /I	N719	0,5 mM	12 Jam	Perendaman	6,0	2,1 Ω.cm <sup>2</sup>	5,18%	50 μm		
I <sub>s</sub> /I	N719	3 mM	24 Jam	Perendaman	0,53	8,1 Ω.cm <sup>2</sup>	6,58%	60 μm		
I <sub>s</sub> /I	N719	3 mM	24 Jam	Perendaman	0,54	10 Ω.cm <sup>2</sup>	6,00%	60 μm		
I <sub>s</sub> /I	N719	0,5 mM	24 Jam	Perendaman	0,54	7,7 Ω.cm <sup>2</sup>	3,97%	25 μm		
T <sub>s</sub> /T	N719	0,5 mM	24 Jam	Perendaman	0,66	3,0 Ω.cm <sup>2</sup>	7,13%	25 μm		
Co <sup>2+</sup> /Co <sup>3+</sup>	YD2-0-C8 dan Y123			Perendaman	0,74		12,3%			
I <sub>s</sub> /I	ADEKA-1 dan LEG 4			Perendaman	0,75		11,20%			
[Co(polym)] <sup>3+/2+</sup>	ADEKA-1 dan LEG 4			Perendaman	0,77		13,80%			
Polymer Nanocomposite	N719	0,3 mM		Perendaman	0,72		3,65%		Pretreatment TiO <sub>2</sub> , Pocrtreatment TiCl <sub>4</sub> 50 mM	
I <sub>s</sub> /I	N719	1 mM		Perendaman		0,41 Ω.cm <sup>2</sup>		Glass fiber 70 μm		
I <sub>s</sub> /I	N719	1 mM		Perendaman		0,39 Ω.cm <sup>2</sup>		Glass fiber 70 μm		
PSHT	D102	0,5 mM	24 Jam	Perendaman	0,66		3,11%			
Spiro-OM6TAD	D102	0,5 mM	24 Jam	Perendaman	0,63		3,45%			
I <sub>s</sub> /I	Z907	20 mg/L	24 Jam	Perendaman	0,23		0,019%	50 μm	TiCl <sub>4</sub> pocrtreatment 40 mM	



Tabel 2. Variasi parameter fabrikasi DSSC dengan karbon sebagai counter electrode dan performa DSSC yang dihasilkan

No	DSSC	Counter electrode			Semikonduktor			Metode	
		Jenis	Ketebalan	Annealing	Metode deposisi	Substrat	Jenis		Ketebalan
1	Sandwich	Microporous carbon	50 µm	500°C, 30 menit	Doctor blade	FTO 20 Ω/sq	TiO <sub>2</sub>	500°C, 30 menit	Screen printing
2	Sandwich	Karbon hitam	50 µm	500°C, 30 menit	Doctor blade	FTO 20 Ω/sq	TiO <sub>2</sub>	500°C, 30 menit	Screen printing
3	Sandwich	Karbon aktif		500°C, 30 menit	Spray deposition	FTO 14 Ω/sq	TiO <sub>2</sub>	8 µm	Doctor blade
4	Sandwich	Karbon hitam		500°C, 30 menit	Spray deposition	FTO 14 Ω/sq	TiO <sub>2</sub>	8 µm	Doctor blade
5	Sandwich	Karbon konduktif		500°C, 30 menit	Spray deposition	FTO 14 Ω/sq	TiO <sub>2</sub>	8 µm	Doctor blade
6	Sandwich	Karbon dye		500°C, 30 menit	Spray deposition	FTO 14 Ω/sq	TiO <sub>2</sub>	8 µm	Doctor blade
7	Sandwich	Karbon/fiber		500°C, 30 menit	Spray deposition	FTO 14 Ω/sq	TiO <sub>2</sub>	8 µm	Doctor blade
8	Sandwich	Karbon nanotube		500°C, 30 menit	Spray deposition	FTO 14 Ω/sq	TiO <sub>2</sub>	8 µm	Doctor blade
9	Sandwich	Tinta printer		500°C, 30 menit	Spray deposition	FTO 14 Ω/sq	TiO <sub>2</sub>	8 µm	Doctor blade
10	Sandwich	Well ordered mesoporous carbon		500°C, 30 menit	Spray deposition	FTO 14 Ω/sq	TiO <sub>2</sub>	8 µm	Doctor blade
11	Sandwich	Nanokarbon	20 µm	250°C, 60 menit	Doctor blade	FTO 10 Ω/sq	TiO <sub>2</sub>	500°, 60 menit	Screen printing
12	Sandwich	Mikrokarbon	20 µm	250°C, 60 menit	Doctor blade	FTO 10 Ω/sq	TiO <sub>2</sub>	500°, 60 menit	Screen printing
13	Sandwich	Nanokarbon/TiO <sub>2</sub>	11 µm	250°C, 60 menit	Spin coating	FTO 8 Ω/sq	TiO <sub>2</sub>		
14	Sandwich	Graphite sheet	0.2 mm			FTO	TiO <sub>2</sub>	10,5 µm	Screen printing
15	Sandwich	Graphite sheet	0.2 mm			FTO	TiO <sub>2</sub>	10,5 µm	Screen printing
16	Sandwich	Karbon aktif	153 µm	180°C, 60 menit	Doctor blade	FTO	TiO <sub>2</sub>	450 °C, 10 menit	Doctor blade
17	Monolithic	Grafit/ carbon black	60 µm	450 °C, 10 menit	Doctor blade	FTO 10 Ω/sq	TiO <sub>2</sub>	450 °C, 60 menit	Doctor blade
18	Monolithic	Grafit/ carbon black	50 µm	380 °C, 20 menit	Doctor blade	FTO 13 Ω/sq	TiO <sub>2</sub>	500 °C, 30 menit	Spin coating
19	Monolithic	Grafit/ carbon black	30 µm	400 °C, 30 menit	Screen printing	FTO	TiO <sub>2</sub>	500 °C, 30 menit	Screen printing
20	Monolithic	Grafit/ carbon black/ graphene	30 µm	400 °C, 30 menit	Screen printing	FTO	TiO <sub>2</sub>	500 °C, 30 menit	Screen printing
21	Monolithic	Carbon black/ grafit	10 µm	400C, 40 menit	Screen printing	FTO 15 Ω/sq	TiO <sub>2</sub>	500 °C, 15 menit	Screen printing
22	Monolithic	Karbon aktif grafit	13 - 14 µm	400°C, 30 menit	Screen printing	FTO	TiO <sub>2</sub>	500 °C, 120 menit	Screen printing
23	Monolithic	Karbon aktif grafit (1:4)		400°C, 45 menit	Screen printing	FTO 15 Ω/sq	TiO <sub>2</sub>	500 °C, 60 menit	Screen printing
24	Monolithic	Karbon aktif grafit (4:1)		400°C, 45 menit	Screen printing	FTO 15 Ω/sq	TiO <sub>2</sub>	500 °C, 60 menit	Screen printing
25	Monolithic	nanopowder / grafit (1:4)		400°C, 45 menit	Screen printing	FTO 15 Ω/sq	TiO <sub>2</sub>	500 °C, 60 menit	Screen printing
26	Monolithic	nanopowder / grafit (4:1)		400°C, 45 menit	Screen printing	FTO 15 Ω/sq	TiO <sub>2</sub>	500 °C, 60 menit	Screen printing

Lanjutan Tabel 2

No	Elektrolit	Dyes					Metode	Fill Factor	R <sub>ct</sub>	PCE	Ketebalan Surfyn	Ket	Referensi
		Jenis	Konsentrasi	Lama									
1	I <sub>3</sub> <sup>-</sup> /I <sup>-</sup>	N3	0,3 mM	Overnight	Perendaman	0,62		7,36%		Pretreatment dan posttreatment TiCl <sub>4</sub> 50 mM	[31]		
2	I <sub>3</sub> <sup>-</sup> /I <sup>-</sup>	N3	0,3 mM	Overnight	Perendaman	0,52		4,81%		Pretreatment dan posttreatment TiCl <sub>4</sub> 50 mM	[31]		
3	I <sub>3</sub> <sup>-</sup> /I <sup>-</sup>	N719	0,5 mM	12 Jam	Perendaman	0,62	2,29 Ω cm <sup>2</sup>	6,6%			[32]		
4	I <sub>3</sub> <sup>-</sup> /I <sup>-</sup>	N719	0,5 mM	12 Jam	Perendaman	0,63	3,42 Ω cm <sup>2</sup>	6,3%			[32]		
5	I <sub>3</sub> <sup>-</sup> /I <sup>-</sup>	N719	0,5 mM	12 Jam	Perendaman	0,66	2,89 Ω cm <sup>2</sup>	6,7%			[32]		
6	I <sub>3</sub> <sup>-</sup> /I <sup>-</sup>	N719	0,5 mM	12 Jam	Perendaman	0,69	1,36 Ω cm <sup>2</sup>	7,5%			[32]		
7	I <sub>3</sub> <sup>-</sup> /I <sup>-</sup>	N719	0,5 mM	12 Jam	Perendaman	0,62	1,86 Ω cm <sup>2</sup>	6,7%			[32]		
8	I <sub>3</sub> <sup>-</sup> /I <sup>-</sup>	N719	0,5 mM	12 Jam	Perendaman	0,7	1,57 Ω cm <sup>2</sup>	7,00%			[32]		
9	I <sub>3</sub> <sup>-</sup> /I <sup>-</sup>	N719	0,5 mM	12 Jam	Perendaman	0,43	18,5 Ω cm <sup>2</sup>	4,3%			[32]		
10	I <sub>3</sub> <sup>-</sup> /I <sup>-</sup>	N719	0,5 mM	12 Jam	Perendaman	0,75	1,26 Ω cm <sup>2</sup>	7,5%			[32]		
11	I <sub>3</sub> <sup>-</sup> /I <sup>-</sup>	N719	0,3 mM	24 Jam	Perendaman	0,62	0,74 Ω / cm <sup>2</sup>	6,73%			[33]		
12	I <sub>3</sub> <sup>-</sup> /I <sup>-</sup>	N719	0,3 mM	24 Jam	Perendaman	0,19		1,87%			[33]		
13	I <sub>3</sub> <sup>-</sup> /I <sup>-</sup>	Z907			Perendaman	0,57		5,5%			[34]		
14	T <sub>2</sub> <sup>2+</sup> /I <sup>-</sup>	N719	0,5 mM	24 Jam	Perendaman	0,57	1,1 Ω cm <sup>2</sup>	4,79%	25 μm		[22]		
15	I <sub>3</sub> <sup>-</sup> /I <sup>-</sup>	N719	0,5 mM	24 Jam	Perendaman	0,59	10,2 Ω cm <sup>2</sup>	2,33%	25 μm		[22]		
16	I <sub>3</sub> <sup>-</sup> /I <sup>-</sup>	N3	0,5 mM	Overnight	Perendaman	0,61		3,89%			[35]		
17	I <sub>3</sub> <sup>-</sup> /I <sup>-</sup>	cis-(NCS) <sub>2</sub> bis(4,4'-dicarboxy-2,2'-bipyridine)-ruthenium(II)			Perendaman	0,71		6,67%		Menggunakan TiO <sub>2</sub> rutile sebagai spacer layer	[29]		
18	Polymer nanocomposite	N719	0,3 mM		Perendaman	0,72		3,65%		Pretreatment TiO <sub>2</sub> , Posttreatment TiCl <sub>4</sub> 50 mM	[24]		
19	Polymer gel	N719	0,3 mM	24 Jam	Perendaman	0,63	9,48 Ω cm <sup>2</sup>	5,09%		Pretreatment TiO <sub>2</sub>	[26]		
20	Polymer gel	N719	0,3 mM	24 Jam	Perendaman	0,71	6,93 Ω cm <sup>2</sup>	6,27%		Pretreatment TiO <sub>3</sub>	[26]		
21	I <sub>3</sub> <sup>-</sup> /I <sup>-</sup>	Z907	20 mg/L	24 Jam	Perendaman	0,29		0,011%		posttreatment TiCl <sub>4</sub> 40 mM	[27]		
22	I <sub>3</sub> <sup>-</sup> /I <sup>-</sup>	Z907	0,3 mM	12 Jam	Perendaman	0,49	10,5 Ω cm <sup>2</sup>	2,06%	150 μm		[44]		
23	I <sub>3</sub> <sup>-</sup> /I <sup>-</sup>	Z907	20 mg/L	24 Jam	Perendaman	0,25		0,99%	50 μm	posttreatment TiCl <sub>4</sub> 40 mM	[45]		
24	I <sub>3</sub> <sup>-</sup> /I <sup>-</sup>	Z907	20 mg/L	24 Jam	Perendaman	0,25		1,52%	50 μm	posttreatment TiCl <sub>4</sub> 40 mM	[45]		
25	I <sub>3</sub> <sup>-</sup> /I <sup>-</sup>	Z907	20 mg/L	24 Jam	Perendaman	0,29		0,12%	50 μm	posttreatment TiCl <sub>4</sub> 40 mM	[45]		
26	I <sub>3</sub> <sup>-</sup> /I <sup>-</sup>	Z907	20 mg/L	24 Jam	Perendaman	0,27		0,07%	50 μm	posttreatment TiCl <sub>4</sub> 40 mM	[45]		

Tabel 3. Variasi parameter fabrikasi DSSC dengan PEDOT sebagai counter electrode dan performa DSSC yang dihasilkan

No	DSSC	Counter electrode			Metode deposisi	Substrat	Jenis	Ketebalan	Semikonduktor	
		Jenis	Ketebalan	Annealing					Ketebalan	Annealing
1	Sandwich	PEDOT	270 nm	Electrodeposition	FTO	TiO <sub>2</sub>		500 °C, 60 menit	screen printing	
2	Sandwich	PEDOT		Electropolymerization	FTO	TiO <sub>2</sub> (transparan)	8 µm		screen printing	
3	Sandwich	PEDOT		Electropolymerization	FTO	TiO <sub>2</sub> (transparan)	8 µm		screen printing	
4	Sandwich	PEDOT		Electropolymerization	FTO	TiO <sub>2</sub>	8 µm	450 °C, 30 menit	Screen printing	
5	Sandwich	PEDOT		Electropolymerization	FTO	TiO <sub>2</sub>	8 µm	450 °C, 30 menit	Screen printing	
6	Sandwich	PEDOT:PSS	80 °C, 30 menit	Dip coating	FTO 20 - 25 Ω/ sq	TiO <sub>2</sub>	20 µm	500 °C, 30 menit	Glass rod	
7	Sandwich	DMSO-PEDOT:PSS	80 °C, 30 menit	Dip coating	FTO 20 - 25 Ω/ sq	TiO <sub>2</sub>	21 µm	500 °C, 30 menit	Glass rod	
8	Sandwich	PEDOT:PSS (C 0.1 wt%)	80 °C, 30 menit	Dip coating	FTO 20 - 25 Ω/ sq	TiO <sub>2</sub>	22 µm	500 °C, 30 menit	Glass rod	
9	Sandwich	PEDOT:PSS (C 0.02 wt%)	80 °C, 30 menit	Dip coating	FTO 20 - 25 Ω/ sq	TiO <sub>2</sub>	23 µm	500 °C, 30 menit	Glass rod	
10	Sandwich	DMSO-PEDOT:PSS (C 0.1 wt%)	80 °C, 30 menit	Dip coating	FTO 20 - 25 Ω/ sq	TiO <sub>2</sub>	24 µm	500 °C, 30 menit	Glass rod	
11	Sandwich	DMSO-PEDOT:PSS (C 0.02 wt%)	80 °C, 30 menit	Dip coating	FTO 20 - 25 Ω/ sq	TiO <sub>2</sub>	25 µm	500 °C, 30 menit	Glass rod	
12	Sandwich	PEDOT:PSS	10 - 20 nm	Spin coating	FTO	TiO <sub>2</sub>		450 °C, 30 menit	doctor blade	
13	Sandwich	SiNFs / PEDOT:PSS	1 - 2 µm	Spin coating	FTO	TiO <sub>2</sub>		450 °C, 30 menit	Doctor blade	
14	Sandwich	PEDOT:PSS	75 °C, 1.5 menit	Spin coating	FTO 15 Ω/ sq	TiO <sub>2</sub>	400 nm	450 °C, 30 menit	doctor blade	
15	Sandwich	PEDOT:PSS	45 °C, 720 menit	Spin coating	FTO 15 Ω/ sq	TiO <sub>2</sub>		450 °C, 30 menit		
16	Sandwich	PEDOT:PSS	45 °C, 720 menit	Spin coating	FTO 15 Ω/ sq	TiO <sub>2</sub>		450 °C, 30 menit		
17	Sandwich	PEDOT:PSS	45 °C, 720 menit	Spin coating	FTO 15 Ω/ sq	TiO <sub>2</sub>		450 °C, 30 menit		
18	Sandwich	PEDOT:PSS	45 °C, 720 menit	Spin coating	FTO 8 Ω/ sq	TiO <sub>2</sub>		450 °C, 30 menit		
19	Sandwich	MWCNT/PEDOT:PSS	100 °C, 120 menit	Spin coating	FTO 15 Ω/ sq	TiO <sub>2</sub>		500 °C, 30 menit	Screen printing	
20	Sandwich	PEDOT:PSS		Electropolymerization	FTO 8 Ω/ sq	TiO <sub>2</sub>	10 µm	450 °C, 30 menit	Doctor blade	
21	Sandwich	PEDOT:PSS/PPy		Electropolymerization	FTO 8 Ω/ sq	TiO <sub>2</sub>	10 µm	450 °C, 30 menit	Doctor blade	
22	monolithic	PEDOT/ Grafit /Carbon Black	18 µm	Electrodeposition	FTO 10 Ω/ sq	TiO <sub>3</sub>			Spray pyrolysis	
23	Monolithic	PEDOT	120 nm	Spin coating	FTO	TiO <sub>2</sub>		550 °C, 30 menit	screen printing	
24	Monolithic	PEDOT:PSS	6,92 µm	screen printing	FTO 15 Ω/ sq	TiO <sub>2</sub>		450 °C, 30 menit	Screen printing	
25	Monolithic	PEDOT:PSS	8,83 µm	screen printing	FTO 15 Ω/ sq	TiO <sub>2</sub>		450 °C, 30 menit	Screen printing	
26	Monolithic	PEDOT:PSS	10,08 µm	screen printing	FTO 15 Ω/ sq	TiO <sub>2</sub>		450 °C, 30 menit	Screen printing	
27	Monolithic	PEDOT:PSS	12,75 µm	screen printing	FTO 15 Ω/ sq	TiO <sub>2</sub>		450 °C, 30 menit	Screen printing	



Lanjutan Tabel 3

No	Elektrolit	Dyes Jenis	Konsentrasi	Lama	Metode	Fill Factor	Ret	PCE	Ketebalan Surlyn	Keterangan	Referensi
1	$\text{Co}^{2+}/\text{Co}^{3+}$	LEG4	0,2 mM	16 Jam	Perendaman	0,69	0,2 $\Omega$ cm <sup>2</sup>	6,20%	30 $\mu\text{m}$	Pretreatment dan Posttreatment TiCl <sub>4</sub> 40 mM	[47]
2	Co(phen) <sub>3</sub>	Y123				0,7	7,5 $\Omega$ cm <sup>2</sup>	9,30%		Posttreatment TiCl <sub>4</sub> 25 mM	[48]
3	Co(bpy) <sub>3</sub>	Y123				0,74	<0,03 $\Omega$ cm <sup>2</sup>	10,30%		Posttreatment TiCl <sub>4</sub> 25 mM	[48]
4	T <sub>2</sub> T	Z907 / DMF	7 mM	10 menit	drop casting	0,7	7,8 $\Omega$ cm <sup>2</sup>	6,90%	25 $\mu\text{m}$	Pretreatment dan Posttreatment TiCl <sub>4</sub> 40 mM	[49]
5	T <sub>2</sub> T	Z907 / DMF	7 mM	10 Menit	drop casting	0,65	15,2 $\Omega$ cm <sup>2</sup>	5,90%	25 $\mu\text{m}$	Pretreatment dan Posttreatment TiCl <sub>4</sub> 40 mM	[49]
6	I <sub>3</sub> /I	N3	0,3 mM	Overnight	Perendaman	0,24	21,2 $\Omega$	1,90%		Menggunakan cell holder pengganti Surlyn	[53]
7	I <sub>3</sub> /I	N3	0,3 mM	Overnight	Perendaman	0,3	19,4 $\Omega$	2,41%		Menggunakan cell holder pengganti Surlyn	[53]
8	I <sub>3</sub> /I	N3	0,3 mM	Overnight	Perendaman	0,54	7,8 $\Omega$	4,17%		Menggunakan cell holder pengganti Surlyn	[53]
9	I <sub>3</sub> /I	N3	0,3 mM	Overnight	Perendaman	0,57	18,9 $\Omega$	3,21%		Menggunakan cell holder pengganti Surlyn	[53]
10	I <sub>3</sub> /I	N3	0,3 mM	Overnight	Perendaman	0,53	7,2 $\Omega$	5,81%		Menggunakan cell holder pengganti Surlyn	[53]
11	I <sub>3</sub> /I	N3	0,3 mM	Overnight	Perendaman	0,56	13,6 $\Omega$	3,64%		Menggunakan cell holder pengganti Surlyn	[53]
12	I <sub>3</sub> /I	N719	0,3 mM	24 Jam	Perendaman	0,25	4,27 $\Omega$	2,90%	60 $\mu\text{m}$		[54]
13	I <sub>3</sub> /I	N719	0,3 mM	24 Jam	Perendaman	0,51	1,98 $\Omega$	5,70%	60 $\mu\text{m}$		[54]
14	I <sub>3</sub> /I	N719		24 Jam	Perendaman	0,23	7,2 $\Omega$	1,80%			[55]
15	PEO	N3		18 Jam	Perendaman	0,49	59,83 $\Omega$	4,08%			[56]
16	PEG	N3		18 Jam	Perendaman	0,49	66,12 $\Omega$	3,87%			[56]
17	PMMA	N3		18 Jam	Perendaman	0,24	672,76 $\Omega$	0,49%			[56]
18	PVAc	N3		18 Jam	Perendaman	0,2	1412 $\Omega$	0,20%			[56]
19	I <sub>3</sub> /I	N719	0,3 mM	24 Jam	Perendaman	0,56		5,60%	60 $\mu\text{m}$	Posttreatment TiCl <sub>4</sub> 50 mM	[57]
20	I <sub>3</sub> /I	N719	0,3 mM	12 Jam	Perendaman	0,69	22,32 $\Omega$	6,31%		Menggunakan cyanoacrylate adhesive sebagai sealant	[58]
21	I <sub>3</sub> /I	N719	0,3 mM	12 Jam	Perendaman	0,65	4,3 $\Omega$	7,60%		Menggunakan cyanoacrylate adhesive sebagai sealant	[58]
22	I <sub>3</sub> /I	N719		48 Jam	Perendaman	0,67		5,20%	60 $\mu\text{m}$		[59]
23	I <sub>3</sub> /I	N719	50 mM		Perendaman			7,73%		Menggunakan PE sebagai lapisan spacer	[60]
24	I <sub>3</sub> /I	N719	20 mg/L	24 Jam	Perendaman	0,23		0,76%	50 $\mu\text{m}$	Posttreatment TiCl <sub>4</sub> 40 mM	[61]
25	I <sub>3</sub> /I	N719	20 mg/L	24 Jam	Perendaman	0,24		0,98%	50 $\mu\text{m}$	Posttreatment TiCl <sub>4</sub> 40 mM	[61]
26	I <sub>3</sub> /I	N719	20 mg/L	24 Jam	Perendaman	0,27		1,49%	50 $\mu\text{m}$	Posttreatment TiCl <sub>4</sub> 40 mM	[61]
27	I <sub>3</sub> /I	N719	20 mg/L	24 Jam	Perendaman	0,22		0,93%	50 $\mu\text{m}$	Posttreatment TiCl <sub>4</sub> 40 mM	[61]

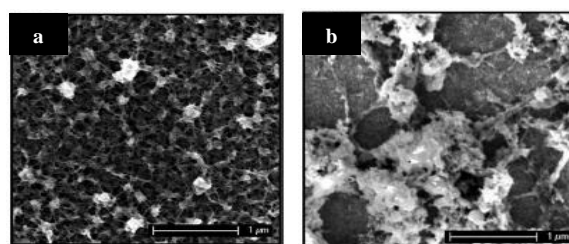
#### 4. PEDOT : PSS

*Polythiophene poly(3,4-ethylenedioxythiophene)* (PEDOT) merupakan polimer turunan yang ditemukan pada tahun 1980 oleh Bayer Lab [6]. PEDOT merupakan jenis polimer yang memiliki sifat stabil, *band gap* kecil, dan konduktivitas elektronik yang tinggi [6]. PEDOT memiliki karakteristik yang berpotensi menghasilkan PCE yang lebih tinggi dibandingkan platina. PEDOT pertama kali diaplikasikan oleh Saito, dkk. [46] sebagai *hole transport layer* pada DSSC. Tabel 3 menunjukkan beberapa contoh aplikasi PEDOT: PSS sebagai *counter electrode* DSSC yang terdapat pada literatur.

Burchaka, dkk. [49] melakukan penelitian yang berfokus membandingkan DSSC dengan *counter electrode* platina, kobalt sulfida (CoS), dan PEDOT. Elektrolit  $T_2/T^-$  digunakan sebagai alternatif elektrolit konvensional  $I_3^-/I^-$  dikarenakan warnanya yang transparan dan tidak korosif. Komposisi elektrolit yang digunakan terdiri atas 0,4 M  $T_2$  dan 0,4 M  $T^-$  (*tetraethylammonium salt*) dalam pelarut 3-*methoxypropionitrile* (MPN). Karakterisasi SEM pada Gambar 16(a), menunjukkan bahwa PEDOT yang dideposisi melalui elektropolimerisasi di atas substrat FTO memiliki struktur *nanoporous* dengan luas permukaan yang tinggi dan terlapisi secara merata pada permukaan FTO. Sebaliknya, PEDOT yang dideposisi di atas substrat ITO/PET yang ditunjukkan pada Gambar 16(b), tidak terdistribusi secara homogen dan permukaan ITO/PET tidak seluruhnya terlapisi oleh PEDOT. Distribusi PEDOT yang tidak homogen tersebut dapat disebabkan oleh buruknya kualitas PET, sehingga saat proses fabrikasi berlangsung, terjadi *crack* akibat *bending* karena sifat substrat yang fleksibel. Performa tertinggi diperoleh DSSC menggunakan *counter electrode* PEDOT/FTO/kaca dengan PCE 6,9% dan  $R_{ct}$  7,8  $\Omega \cdot cm^2$ . Sedangkan DSSC dengan PEDOT/ITO/PET hanya menghasilkan PCE 5,9% dan  $R_{ct}$  15,2  $\Omega \cdot cm^2$ . Dibandingkan dengan PEDOT, DSSC yang menggunakan *counter electrode* platina dan CoS memiliki performa yang lebih rendah dengan PCE dan  $R_{ct}$  platina sebesar 5,6% dan 30,5  $\Omega \cdot cm^2$ , serta PCE dan  $R_{ct}$  CoS sebesar 4,6% dan 33,8  $\Omega \cdot cm^2$ . Performa DSSC dengan *counter electrode* PEDOT/FTO/kaca dapat ditingkatkan hingga PCE 7,9% dengan mengurangi viskositas elektrolit, yaitu dengan komposisi 0,3 M  $T_2$  dan 0,9 M  $T^-$  di dalam campuran asetonitril/ etilena karbonat (6:4 rasio volume). Meskipun memiliki performa yang baik, DSSC dengan *counter*

*electrode* PEDOT dan elektrolit  $T_2/T^-$  cenderung tidak stabil, dikarenakan performanya yang dapat berkurang hingga 20% dalam waktu 1 minggu pada temperatur 60 °C [49].

PEDOT memiliki sifat tidak larut terhadap air maupun pelarut organik lainnya, sehingga mempersulit proses sintesis PEDOT. Oleh sebab itu, diperlukan tambahan doping *poly(styrene sulfonate)* (PSS) [50]. Penambahan PSS mempermudah dispersi PEDOT dalam *aqueous medium* sehingga dihasilkan PEDOT: PSS kompleks berwarna biru tua yang stabil dan mudah diproses [51]. Sifat PEDOT: PSS yang dapat larut dengan air dan mudah diproduksi, menjadikan PEDOT: PSS banyak digunakan dalam dunia perindustrian [6].

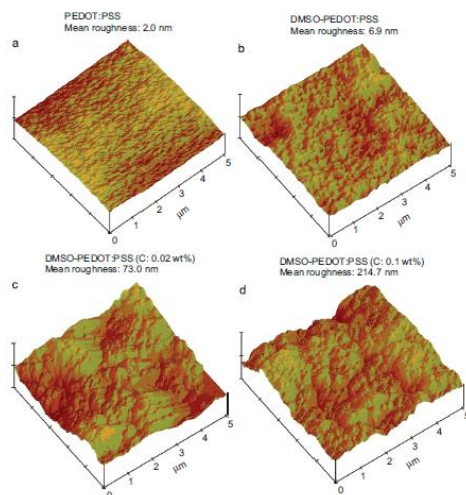


Gambar 16. Hasil karakterisasi SEM morfologi permukaan (a) PEDOT di atas kaca FTO dan (b) PEDOT di atas ITO/PET [49]

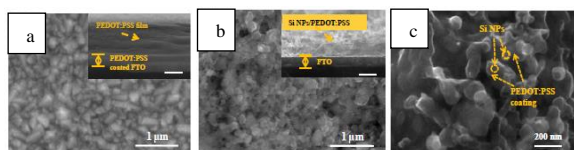
PEDOT: PSS memiliki bentuk fisik transparan dengan stabilitas kimia dan elektrokimia yang baik serta mudah diaplikasikan dengan berbagai metode *wet chemistry* seperti *spin coating* atau *doctor blade*. Akan tetapi, PEDOT: PSS memiliki konduktivitas yang rendah [51]. Umumnya PEDOT: PSS hanya memiliki konduktivitas kurang dari 1 S/cm, yaitu 10-100 kali lebih rendah dibandingkan polimer konduktif lainnya [52]. Hal tersebut dapat berdampak buruk terhadap kualitas DSSC yang menggunakan PEDOT: PSS sebagai *counter electrode*.

Chen, dkk. [53] melakukan penelitian untuk meningkatkan konduktivitas PEDOT:PSS yang awalnya sebesar  $2 \pm 0,05$  S/cm menjadi  $85 \pm 15$  S/cm;  $45 \pm 10$  S/cm;  $36 \pm 7$  S/cm setelah masing-masing diberi tambahan pelarut berupa *dimethyl sulfoxide* (DMSO), *N-dimethyl formamide* (DMF), dan *dichloromethane* (DMC). Konduktivitas tertinggi diperoleh oleh PEDOT: PSS dengan pelarut DMSO. Selanjutnya diberikan tambahan karbon hitam (0,02; 0,1; 0,5; 1,0 dan 2,0 % berat) terhadap campuran PEDOT: PSS, sehingga konduktivitas PEDOT: PSS semakin meningkat berturut-turut menjadi  $95 \pm 9$  S/cm;  $105 \pm 1$  S/cm;  $185 \pm 15$  S/cm; 280 S/cm; dan  $350 \pm 15$  S/cm. Melalui karakterisasi AFM (*atomic force microscopy*) yang ditunjukkan pada

Gambar 17 diperoleh bahwa dengan adanya penambahan pelarut DMSO dan karbon, dapat meningkatkan kekasaran permukaan PEDOT:PSS sehingga meningkatkan aktivitas katalis *counter electrode*. DSSC dengan *counter electrode* DMSO-PEDOT:PSS-karbon hitam 0,1 %berat dapat menghasilkan PCE sebesar 5,88% yang 1,03 kali lebih tinggi dibandingkan PCE DSSC dengan *counter electrode* platina [53].



Gambar 17. Hasil karakterisasi AFM lapisan (a) PEDOT:PSS, (b) DMSO-PEDOT:PSS, (c) DMSO-PEDOT:PSS (C: 0,02 %berat), (d) DMSO-PEDOT:PSS (C: 0,1 %berat) [53]

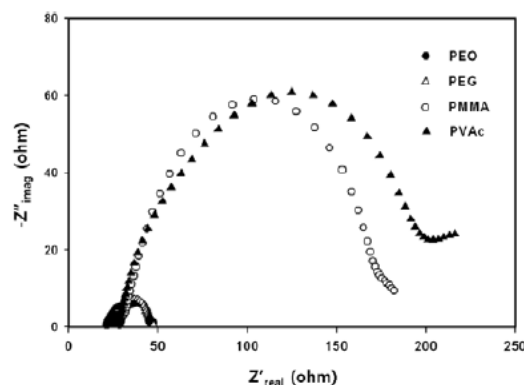


Gambar 18. Hasil karakterisasi SEM morfologi (a) PEDOT:PSS, (b) Si NPs/ PEDOT:PSS, (c) perbesaran tinggi Si NPs/ PEDOT:PSS. Inset (a) (b) menunjukkan penampang melintang lapisan [54]

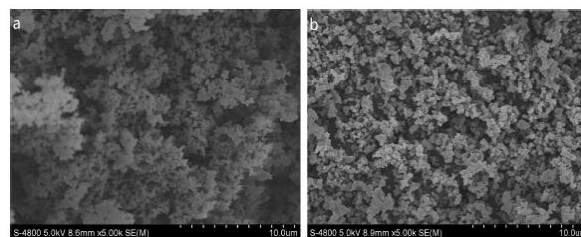
Song, dkk. [54] melakukan fabrikasi DSSC menggunakan *counter electrode* berbasis nanokomposit organik/ anorganik yang tersusun dari campuran bubuk *silicon nanoparticle* (Si NPs) dan larutan *aqueous* PEDOT: PSS. DSSC dengan *counter electrode* Si NPs mampu menghasilkan PCE sebesar 5,7%. Nilai yang diperoleh tersebut lebih tinggi dibandingkan PCE PEDOT: PSS murni yang hanya sebesar 2,9%. Nilai PCE DSSC nanokomposit hampir mendekati nilai PCE DSSC yang menggunakan *counter electrode* platina, yaitu sebesar 6,6%. Adanya tambahan Si NPs menyebabkan struktur permukaan PEDOT: PSS yang pada awalnya kasar dan rapat dengan ketebalan yang hanya sekitar 10 nm (Gambar 18 (a)) menjadi lebih kasar, berpori, ketebalan meningkat menjadi 1-2  $\mu\text{m}$ , dan luas permukaan lebih besar (Gambar 18(b) dan 18(c)). Penambahan Si NPs pada

PEDOT: PSS juga menyebabkan impedansi *counter electrode* menjadi lebih kecil, menandakan aktivitas elektrokatalitik yang lebih baik dibandingkan *counter electrode* PEDOT: PSS murni [54].

Fabrikasi DSSC menggunakan PEDOT: PSS sebagai *counter electrode* dan menggunakan elektrolit berbahan dasar polimer dilakukan oleh Kim, dkk. [56]. Elektrolit *polyethylene oxide* (PEO), *polyethylene glycol* (PEG), *polymethylmethacrylate* (PMMA), dan *polyvinyl acetate* (PVAc) digunakan pada DSSC dan menghasilkan PCE secara berturut-turut 4,08%; 3,87%; 0,49%; dan 0,20%. Karakterisasi EIS melalui Nyquist plot pada Gambar 19 mengindikasikan DSSC dengan elektrolit PEO dan PEG memiliki kontak yang baik dengan *counter electrode* PEDOT: PSS sehingga mengurangi  $R_{ct}$  dan meningkatkan  $J_{sc}$  dan PCE pada divais DSSC [56].



Gambar 19. Nyquist plot hasil pengukuran impedansi DSSC menggunakan *counter electrode* PEDOT:PSS dan elektrolit polimer [56]



Gambar 20. Hasil karakterisasi SEM permukaan *counter electrode* (a) polypyrrole dan (b) PEDOT:PSS/PPy [58]

Yue, dkk. [58] melakukan fabrikasi DSSC menggunakan komposit PEDOT: PSS dan polypyrrole (PPy) sebagai *counter electrode*. Melalui karakterisasi SEM, PEDOT/PSS/PPy memiliki permukaan yang lebih halus dibandingkan lapisan polypyrrole murni (Gambar 20(a) dan 20(b)). Lapisan PEDOT:PSS/PPy beradhesi dengan baik terhadap kaca FTO.

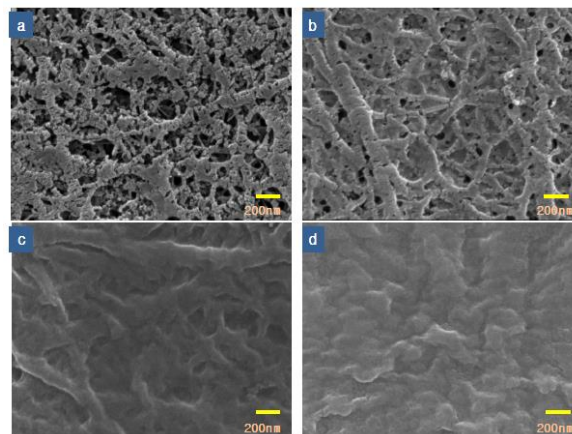


Partikel PEDOT: PSS terdispersi secara homogen dengan monomer PPy sehingga membentuk lapisan berpori yang tersebar merata di seluruh permukaan dan memiliki luas permukaan yang besar. *Counter electrode* PEDOT: PSS/PPy memiliki *sheet resistance* rendah dengan konduktivitas yang tinggi, sehingga aktivitas katalis antar *counter electrode* dengan elektrolit  $I_3^-/I^-$  dapat berlangsung dengan baik. DSSC dengan *counter electrode* PEDOT: PSS/PPy mampu menghasilkan PCE sebesar 7,6%, yaitu 0,98 kali dari PCE DSSC platina. Sedangkan DSSC yang menggunakan *counter electrode* hanya PEDOT: PSS atau hanya PPy menghasilkan PCE yang lebih kecil yaitu masing-masing 6,31% dan 5,23% [58].

Polimer konduktif PEDOT juga digunakan sebagai *counter electrode* pada DSSC *monolithic*. Thompson, dkk. [59] melakukan elektrodeposisi PEDOT pada *counter electrode* karbon (grafit dan karbon hitam 3:1) yang diaplikasikan pada DSSC *monolithic*. Adanya komposit polimer dengan karbon pada *counter electrode* mampu mengurangi resistivitas elektrik, sehingga meningkatkan *fill factor* dan PCE berturut-turut hingga 0,67 dan 5,2% [59].

DSSC *monolithic* umumnya memiliki PCE lebih rendah dibandingkan DSSC *sandwich*, dikarenakan adanya impedansi antar material *counter electrode* dan *spacer layer*. Kwon, dkk. [60] berhasil memfabrikasi DSSC *monolithic* dengan PCE tertinggi sebesar 7,73% menggunakan gabungan material polimer dengan konduktivitas tinggi (PEDOT) sebagai *counter electrode* dan polimer makro-pori sebagai *spacer layer* (m-PE). Gambar 21(a) menunjukkan morfologi *spacer* m-PE sebelum dilapisi oleh *counter electrode* PEDOT. PEDOT memiliki kontak yang baik dengan permukaan m-PE. Saat lapisan PEDOT semakin bertambah di atas *spacer* m-PE, pori pada m-PE semakin terisi oleh PEDOT (sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 21(b), (c) dan (d)) [60].

Putra, dkk. [61] melakukan penelitian dengan memvariasikan temperatur *annealing* dan ketebalan *counter electrode* PEDOT: PSS pada DSSC *monolithic*. Dalam penelitiannya, diperoleh performa terbaik DSSC diperoleh pada temperatur *annealing* PEDOT: PSS 120 °C dan ketebalan lapisan *counter electrode* 10,08  $\mu\text{m}$ . Meningkatnya temperatur *annealing* PEDOT: PSS menyebabkan semakin berkurangnya kekasaran lapisan, sehingga mengurangi luas permukaan *counter electrode*. Semakin meningkat ketebalan lapisan PEDOT: PSS menyebabkan *sheet resistance* berkurang, namun kekasaran lapisan juga berkurang [61].



Gambar 21. Morfologi lapisan *spacer layer* m-PE yang (a) tidak dilapisi PEDOT, dan dilapisi oleh PEDOT sebanyak (b) satu kali, (c) dua kali, (d) tiga kali [60]

## 5. KESIMPULAN

DSSC memiliki potensi yang sangat baik untuk menggantikan sel surya konvensional berbahan silikon. Efisiensi yang dihasilkan oleh DSSC saat ini pun sudah mendekati level efisiensi yang diperlukan untuk beralih dari skala lab menuju skala industri. Salah satu kendala komersialisasi yang dihadapi oleh DSSC terdapat pada faktor performa dan pertimbangan harga. *Counter electrode* merupakan salah satu komponen penting yang mempengaruhi kedua faktor tersebut. *Counter electrode* berfungsi sebagai katalis untuk mempercepat reduksi elektrolit dalam proses regenerasi elektron. Platina memiliki konduktivitas, aktivitas katalis dan stabilitas yang tinggi. Oleh karena itu, platina disebut sebagai *counter electrode* ideal untuk DSSC. Dengan melakukan modifikasi terhadap struktur morfologi platina serta mengubah *dye* yang digunakan, DSSC yang diperoleh mampu menghasilkan efisiensi mencapai 13%. Akan tetapi, platina memiliki harga yang mahal dan persediaan yang terbatas sehingga sulit diaplikasikan secara komersial. Selain itu, platina juga tidak mampu menghasilkan performa yang baik saat digunakan pada DSSC *monolithic*. Material lain seperti karbon dan PEDOT:PSS merupakan material alternatif yang memenuhi kriteria *counter electrode* DSSC. Berbagai usaha sampai saat ini tetap dilakukan untuk meningkatkan konduktivitas, porositas, dan luas permukaan *counter electrode* karbon dan PEDOT:PSS sehingga mampu menghasilkan DSSC dengan performa yang mendekati, bahkan melebihi performa DSSC menggunakan *counter electrode* platina. Dengan beberapa modifikasi, penggunaan karbon dan PEDOT:PSS sebagai *counter electrode* juga terbukti mampu

menghasilkan DSSC dengan performa yang lebih baik dibandingkan platina pada DSSC *monolithic*. Hal ini menunjukkan bahwa konfigurasi DSSC berpengaruh terhadap pemilihan jenis material *counter electrode* yang ideal.

Selain pertimbangan jenis material, sifat katalitik, ketersediaan, dan harga, perlu juga dilakukan penelitian mengenai kesesuaian material *counter electrode* terhadap komponen DSSC yang lain seperti fotoanoda, *dye* dan elektrolit. Beberapa hasil penelitian menunjukkan bahwa efisiensi yang dihasilkan oleh salah satu jenis material *counter electrode* dengan kombinasi komponen DSSC tertentu belum tentu menghasilkan performa DSSC yang sama jika salah satu atau beberapa komponennya diubah. Oleh sebab itu, berbagai upaya penelitian masih perlu terus dilakukan untuk memperoleh pemahaman mengenai korelasi antara karakteristik fisik, kimia, dan elektrokimia dari material *counter electrode* agar menghasilkan DSSC berperforma tinggi. Penelitian yang dilakukan untuk memodifikasi material *counter electrode* berbahan non-logam atau bahkan mencari material *counter electrode* baru dengan harga terjangkau, memiliki sifat katalitik yang baik dan konduktivitas yang tinggi juga menjadi tantangan di masa yang akan datang.

## UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada kelompok penelitian Material dan Divais Sel Surya di Pusat Penelitian Elektronika dan Telekomunikasi – Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia (P2ET-LIPI) serta anggaran kegiatan DIPA LIPI 2019, dan Universitas Surya atas dukungan yang diberikan selama penulisan studi literatur dan kegiatan penelitian dilakukan.

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] B. O'Regan dan M. Grätzel, "A low cost, high efficiency solar cell based on dye-sensitized colloidal TiO<sub>2</sub> films," *Nature*, vol. 353, pp. 737-740, 1991.
- [2] D. Wei, "Review: Dye-sensitized solar cells," *Int. J. Mol. Sci.*, vol. 11, issue 3, pp. 1103-1113, 2010.
- [3] M. Chen dan L. L. Shao, "Review on the recent progress of carbon counter electrode for dye-sensitized solar cells," *Chem. Eng. J.*, vol. 304, pp. 629-645, 2016.
- [4] K. Kakiage, Y. Aoyama, T. Yano, K. Oya, J. I. Fujisawa, dan M. Hanaya. "Highly efficient dye-sensitized solar cells with collaborative sensitization by silyl-anchor and carboxy-anchor dyes," *Chem. Com.*, pp. 1-4, 2015.
- [5] N. Papageorgiou dan M. Grätzel, "An iodine/triiodide reduction electrocatalyst for aqueous and organic media," *J. Electrochem. Soc.*, vol. 248, issues 13-14, pp. 1421-1446, 2004.
- [6] J. H. Wu, Z. Lan, J. M. Lin, M. L. Huang, Y. F. Huang, L. Q. Fan, G. G. Luo, Y. Lin, Y. M. Xie, dan Y. L. Wei, "Counter electrodes in dye-sensitized solar cells," *Chem. Soc. Rev.*, vol. 46, pp. 5975-6023, 2017.
- [7] S. Thomas, T. G. Deepak, G. S. Anjusree, T. A. Arun, S. V. Nair, dan A. S. Nair, "A review on counter electrode materials in dye-sensitized solar cells," *J. Mater. Chem. A.*, vol. 2, pp. 4474-4490, 2014.
- [8] L. Giribabu, R. K. Kanaparthi, dan V. Velkannan, "Molecular engineering of sensitizers for dye-sensitized solar cell applications," *Chem. Rec.*, vol. 12, issue 3, pp. 306-328, 2012.
- [9] N. M. Nursam, P. N. Anggraini, Shobih, dan J. Hidayat, "Low-cost monolithic dye-sensitized solar cells fabricated on single conductive substrate," *Internasional Conference on Radar, Antenna, Microwave, Electronics, and Telecommunications*, pp. 164-168, 2017.
- [10] J. Gong, J. Liang, dan K. Sumathy, "Review on dye-sensitized solar cells: Fundamental concepts and novel material," *Renew. Sust. Energ. Rev.*, vol. 16, pp. 5848-5860, 2012.
- [11] A. Andualem dan S. Demis, "Review on dye-sensitized solar cells (DSSC)," *Edelweis Applied Science and technology*, issue 2, pp. 145-150, 2018.
- [12] M. X. Wu dan T. L. Ma, "Recent progress of counter electrode catalysts in dye-sensitized solar cells," *J. Phys. Chem.*, vol. 118, issue 30, pp. 16727-16742, 2014.
- [13] Y. J. Zhu, H. Y. Gue, H. K. Zheng, Y. N. Lin, C. J. Gao, Q. J. Han, dan M. X. Wu, "Choose a reasonable counter electrode catalyst toward a fixed redox couple in dye sensitized solar cells," *Nano Energy*, vol. 21, pp. 1-18, 2016.
- [14] Y. L. Lee, C. L. Chen, L. W. Chong, C. H. Chen, Y. F. Liu, dan C. F. Chi, "A platinum counter electrode with high electrochemical activity and high transparency for dye-sensitized solar cells," *Electrochem. Commun.*, vol. 12, pp. 1662-1665, 2010.
- [15] M. K. Nazeeruddin, A. Kay, I. Rodicio, H. Baker, E. Muller, P. Liska, N. Vlachopoulos, dan M. Grätzel, "Conversion of light to electricity by cis-X<sub>2</sub>Bis(2,2'-bipyridyl-4,4'-dicarboxylate)ruthenium(II) charge-transfer sensitizer (Z=Cl<sup>-</sup>, Br<sup>-</sup>, I<sup>-</sup>, CN<sup>-</sup>, and SCN<sup>-</sup>) on

- nanocrystalline TiO<sub>2</sub> electrodes,” *J. AM. Chem. Soc.*, vol. 115, pp. 6382-6390, 1993.
- [16] N. Papageorgiou dan M. Grätzel, “An iodine/ triiodide reduction electrocatalyst for aqueous and organic media,” *J. Electrochem. Soc.*, vol. 144, issue 3, pp. 876-884, 1997.
- [17] Y. L. Lee, C. L. Chen, L. W. Chong, C. H. Chen, Y. F. Liu, dan C. F. Chi, “A platinum counter electrode with high electrochemical activity and high transparency for dye-sensitized solar cells,” *Electrochem. Commun.*, vol. 12, pp. 1662-1665, 2010.
- [18] J. L. Lan, T. C. Wei, S. P. Wa, dan G. Z. Cao, “Effects of iodine content in the electrolyte on the charge transfer and power conversion efficiency of dye-sensitized solar cells under low light intensities,” *J. Phys. Chem.*, vol. 116, issue 49, pp. 25727-25733, 2012.
- [19] A. Iefanova, U. Gautam, P. Pudal, D. Davoux, J. Nepal, V. Mallam, Q. Qiao, Louge, dan M. F. Baroughi, “Low cost platinum counter electrode for dye-sensitized solar cells,” *IEEE 39 Photovoltaic Specialists Conference (PVSC)*, 2013. Doi: 10.1109/PVSC.2013.6745034.
- [20] X. M. Fang, T. L. Ma, G. Q. Guan, M. Akiyama, T. Kida, dan E. Abe, “Effect of the thickness of the PT film coated on counter electrode on the performance of a dye-sensitized solar cell,” *J. Electroanal. Chem.*, vol. 570, pp. 257-263, 2014.
- [21] I. C. Chen, Y. H. Wei, M. C. Tsai, F. G. Tseng, S. Y. Wei, H. C. Wu, dan C. K. Hsieh, “Performance of dye-sensitized solar cells based on platinum nanoroses counter electrode,” *Surf. Coat. Tech.*, vol. 320, pp. 409-413, 2017.
- [22] M. X. Wu, X. Lin, T. H. Wang, J. S. Qiu, dan T. L. Ma, “Low cost dye-sensitized solar cell based on nine kinds electrodes,” *Energ. Environ. Sci.*, vol. 4, pp. 2308-2315, 2011.
- [23] A. Yella, H. W. Lee, H. N. Tsao, C. Y. Yi, A. K. Chandiran, M. K. Nazeeruddin, E. W. G. Diau, C. Y. Yeh, S. M. Zakeeruddin, dan M. Grätzel, “Porphyrin-sensitized solar cells with cobalt (II/III)-based redox electrolyte exceed 12 percent efficiency,” *Science*, vol. 334, issue 6056, pp. 629-634, 2011.
- [24] H. Han, u. Bach, Y. Cheng, R. A. Caruso, dan C. Macrae, “Design for monolithic all solid state dye-sensitized solar cells with a platinized carbon counter electrode,” *Appl. Phys. Lett.*, vol. 94, pp. 103102, 2009.
- [25] K. Skupien, P. Putyra, J. Walter, R. H. Kozłowski, G. Khelashvili, A. Hinch, dan U. Würfel, “Catalytic materials manufactured by the polyol process for monolithic dye sensitized solar cells,” *Progress in Photovoltaic: Research and Applications*, vol. 17, issue 1, pp. 67-73. 2009.
- [26] Y. G. Rong, Z. L. Ku, M. Xu, G. H. Liu, H. Wang, dan H. W. Han, “Monolithic all solid state dye-sensitized solar cells,” *Fron. Optoelectron.*, vol. 6, issue 4, pp. 357-372. 2013.
- [27] N. M. Nursam, A. Istiqomah, J. Hidayat, P. Anggraini, dan Shobih, “Analysis of catalytic material effect on the photovoltaic properties of monolithic dye-sensitized solar cells,” *Jurnal Elektronika dan telekomunikasi*, vol. 17, issue 2, pp. 30-35. 2017.
- [28] E. Olsen, G. Hagen, dan S. E. Lindquist, “Dissolution of platinum in methoxy propionitrile containing LiI/I<sub>2</sub>,” *Sol. Energ. Mat. Sol. C.*, vol. 63, pp. 367-373. 2000.
- [29] A. Kay dan M. Grätzel, “Low cost photovoltaic modules based on dye sensitized nanocrystalline titanium dioxide and carbon powder,” *Sol. Energ. Mat. Sol. C.*, vol. 114, pp. 99-117, 1996.
- [30] K. Xia, Q. Gao, J. Jiang, dan J. Hu, “Hierarchical porous carbons with controlled micropores and mesopores for supercapacitor electrode materials,” *Carbon*, vol. 46, issue 13, pp. 1718-1726, 2008.
- [31] S. J. Peng, F. Y. Cheng, J. F. Shi, Z. L. Tao, dan J. Chen, “High surface area microporous carbon as the efficient photocathode of dye-sensitized solar cells,” *Solid State Sci.*, vol. 11, issue 12, pp. 2051-2055. 2009.
- [32] H. W. Wu, Z. B. Lv, Z. Z. Chu, D. Wang, S. C. Hou, dan D. C. Zou, “Graphite and platinum’s catalytic selectivity for disulfide/thiolate (T<sub>2</sub>/T<sup>-</sup>) and triiodide /iodide (I<sub>3</sub><sup>-</sup>/I<sup>-</sup>),” *J. Mater. Chem*, vol. 21, pp. 14815-14820, 2011.
- [33] E. Ramasamy, W. J. Lee, D. Y. Lee, dan J. S. Song, “Nanocarbon counter electrode for dye sensitized solar cells,” *Appl. Phys. Let.*, vol. 90, pp. 173103, 2007.
- [34] P. Joshi, Y. Xie, M. Ropp, D. Galipeau, S. Bailey, dan Q. Q. Qiao, “Dye-sensitized solar cells based on low cost nanoscale carbon/TiO<sub>2</sub> composite counter electrode,” *Energ. Environ. Sci.*, vol. 2, pp. 426-429. 2009.
- [35] K. Imoto, K. Takahashi, T. Yamaguchi, T. Komura, J. I. Nakamura, dan K. Murata, “High performance carbon counter electrode for dye sensitized solar cells,” *Sol. Energ. Mat. Sol. C.*, vol. 79, pp. 459-469. 2003.



- [36] C. H. Yoon, S. K. Chul, H. H. Ko, S. Yi, dan S. H. Jeong, "Enhanced performance of dye-sensitized solar cells with activated carbons." *J. Nanosci. Nanoteknologi*, vol. 13, issue 12, pp. 7875-7879, 2013.
- [37] A. A. Arbab, K. C. Sun, I. A. Sahito, M. B. Qadir, Y. S. Choi, dan S. H. Jeong, "A novel activated-charcoal doped multiwalled carbon nanotube hybrid for quasi solid state dye-sensitized solar cell outperforming PT electrode," *ACS. Appl. Mater. Interfaces.*, vol. 8, Pp. 7471-7482, 2016.
- [38] Y. Wang, H. G. Wei, Y. Lu, S. Y. Wei, E. K. Wujcik, dan Z. H. Gui, "Multifunctional carbon nanostructures for advances energy storage applications," *Nanomaterials*, vol. 5, pp. 755-777, 2015.
- [39] R.H. Lee, Y. W. Chang, J. C. Hwang, Y. C. Chen, dan R. J. Jeng, "Electrochemical impedance characterization and photovoltaic performance of N719 dye-sensitized solar cells using quaternized ammonium iodide containing polyfluorene electrolyte solutions," *Polym. Adv. Technol.*, vol. 22, issue 12, pp. 1650-1657.
- [40] S. W. Lee dan K. S. Ahn, "Effect of TiCl<sub>4</sub> treatment of nanoporous TiO<sub>2</sub> film on morphology light harvesting and charge carrier dynamics in dye sensitized solar cells," *J. Phys. Chem.*, vol. 116, pp. 21285-21290, 2012.
- [41] A. A. Arbab, N. Mengal, I. A. Sahito, A. A. Memon, dan S. H. Jeong, "An organic route for the synthesis of cationic porous graphite nanomaterial used as photocatalyst and electrocatalyst for dye-sensitized solar cell," *Electrochim. Acta.*, vol. 266, pp. 43-53, 2018.
- [42] Q. Liu, Y. Zhou, Y. Duan, M. Wang, dan Y. Lin, "Improved photovoltaic performance of dye-sensitized solar cells (DSSCs) by Zn + Mg Co-doped TiO<sub>2</sub> electrode," *Electrochim. Acta.*, vol. 95, pp. 48-53, 2013.
- [43] G. Veerappan, K. Bojan, dan S. W. Rhee, "Sub-micrometer-sized graphite as a conducting and catalytic counter electrode for dye-sensitized solar cells," *ACS Appl. Mater. Interfaces*, vol. 3, issue 3, pp. 857-862, 2011.
- [44] S. Ito dan K. Takahashi, "Fabrication of monolithic dye-sensitized solar cell using ionic liquid electrolyte," *J. Photoenergy*, pp. 1-6, 2012.
- [45] F. Arif, N. M. Nursam, N. Prastomo, dan Shobih, "Influence of carbon counter electrode composition on the performance of monolithic dye-sensitized solar cells," *J. Phys: Conference Series*, vol. 1191, series 1, pp. 012021, 2019.
- [46] Y. Saito, Kitamura, T, Y. Wada, dan S. Yanagida, "Poly (3,4-ethylenedioxythiophene) as a hole conductor in solid state dye-sensitized solar cells," *Synth. Met.* Vol. 131, pp. 185-187, 2002.
- [47] H. Ellis, N. Vlachopoulos, L. Haggman, C. Perruchot, M. Jouini, G. Boschloo, dan A. Hagfeldt, "PEDOT counter electrodes for dye sensitized solar cells prepared by aqueous micellar electrodeposition," *Electrochim. Acta.*, vol. 107, pp. 45-51, 2013.
- [48] H. N. Tsao, J. Burschka, C. Y. Yi, F. Kessler, M. K. Nazeeruddin, dan M. Grätzel, "Influence of the interfacial charge transfer resistance at the counter electrode in dye sensitized solar cells employing cobalt redox shuttle," *Energ. Environ. Sci.*, vol. 4, pp. 4921-4924, 2011.
- [49] J. Burschka, V. Brault, S. Ahmad, L. Breau, M. K. Nazeeruddin, B. Marsan, S. M. Zakeeruddin, dan M. Grätzel, "Influence of the counter electrode on the photovoltaic performance of dye-sensitized solar cells using a disulfide/thiolate redox electrolyte," *Energ. Environ. Sci.*, vol. 5, pp. 6089-6097, 2011.
- [50] F. Jonas, W. Krafft, dan B. Muys, "Poly(3,4-ethylenedioxythiophene) conductive coatings, technical applications and properties," *Macromol. Symp.*, vol. 100, issue 1, pp. 169-173, 1995.
- [51] S. Kirchmeyer dan K. Reuter, "Scientific importance properties and growing applications of poly(3,4-ethylenedioxythiophene)," *J. Mater. Chem.*, vol. 15, issue 21, pp. 2077-2088, 2005.
- [52] F. Zhang, M. Johansson, M. R. Andersson, J. C. Hummelen, dan O. Ingana, "Polymer photovoltaic cells with conducting polymer anodes," *J. Adv. Mater.*, vol. 14, issue 9, pp. 662-665, 2002.
- [53] J. G. Chen, H. Y. Wei, dan K. Ho, "Using modified poly(3,4-ethylenedioxythiophene): poly(Styrene Sulfonate) film as a counter electrode in dye-sensitized solar cell," *Sol. Energ. Mater. Sol. C.*, vol. 91, issue 91, pp. 1472-1477, 2007.
- [54] D. Song, M. Li, F. Bai, Y. Li, Y. Jiang, dan B. Jiang, "Silicon nanoparticles/ PEDOT: PSS nanocomposite as an efficient counter electrode for dye-sensitized solar cells," *Funct. Mater. Lett.*, vol. 6, issue 4, pp. 1350048, 2013.

- [55] S. Edalati, A. Houshangi, N. Torabi, Z. Baneshi, dan Z. Behjat, "Heuristic method of fabricating counter electrodes in dye-sensitized solar cells based on a PEDOT:PSS layer as a catalytic material," *J. Phys. D: Appl. Phys.*, vol. 50, pp. 065501, 2016.
- [56] Y. K. Kim, S. H. Park, W. P. Hwang, M. H. Seo, H. W. Park, Y. W. Jang, M. R. Kim, dan J. K. Lee, "Impedance spectroscopy on dye sensitized solar cells with a poly(ethylenedioxythiophene): poly(styrene sulfonate) counter electrode," *J. Korean Phys. Soc.*, vol. 60, issue 20, pp. 2049-2053, 2011.
- [57] D. J. Yun, H. Ra, dan S. W. Rhee, "Concentration effect on multiwalled carbon nanotube and poly(3,4-ethylenedioxythiophene) polymerized with Poly(4-Styrenesulfonate) conjugated film on the catalytic activity for counter electrode in dye-sensitized solar cells," *Renewable Energy*, vol. 50, pp. 692-700, 2012.
- [58] G. T. Yue, J. H. Wu, Y. M. Xiao, J. M. Lin, dan M. L. Huang, "Dye sensitized solar cell based on PEDOT:PSS counter electrode," *Chinese. Sci. Bul.*, vol. 58, issue 4-5, pp. 559-566, 2013.
- [59] S. J. Thompson, J. M. Pringle, X. L. Zhang, dan Y. B. Cheng, "A novel carbon PEDOT composite counter electrode for monolithic dye sensitized solar cells," *J. Phys. Chem. C.*, vol 114, pp. 2365-2369, 2010.
- [60] J. Kwon, N. G. Park, J. Y. Lee, M. J. Ko, dan J. H. Park, "Highly efficient monolithic dye sensitized solar cells," *ACS Apl. Mater. Interfaces*, vol 5, issue 6, pp. 2070-2074, 2013.
- [61] K. K. Putra, E. S. Rosa, dan N. Prastomo, "Development of monolithic dye-sensitized solar cell fabrication with polymer based counter electrode," *J. Phys: Conference Series*, pp. Vol. 1191, issue 1, pp. 012029, 2019.