



## Karakteristik Transfer Muatan Pada DSSC dengan Fotoanoda *Triple Layer Ag-TiO<sub>2</sub>*

Received  
25 March 2019

Revised  
09 August 2019

Accepted for Publication  
05 May 2020

Published  
15 June 2020

T Istirohah<sup>1</sup>, S Shah<sup>2</sup>, N A M Nor<sup>2</sup>, T Suprayogi<sup>1</sup>, M Diantoro<sup>1</sup>, A Hidayat<sup>1</sup>,  
A Taufiq<sup>1</sup>, Z A I Supardi<sup>3</sup>, dan A K Arof<sup>2</sup>

1. Jurusan Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Negeri Malang, Jl. Semarang No. 5, Malang, 65145, Indonesia
2. Center for Ionic, Jurusan Fisika, Fakultas Sains, University of Malaya, Jl. Universiti, Kuala Lumpur, 50603, Malaysia
3. Jurusan Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Univesitas Negeri Surabaya, Jl. Lidah Wetan, Surabaya, 60213, Indonesia

\*E-mail: markus.diantoro.fmipa@um.ac.id



This work is licensed  
under a [Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/)

### Abstract

Dye Sensitized Solar Cell (DSSC) is a prospective of the future renewable energy device which has great potential by converting sunlight into electrical energy implementing sensitizer as light absorbing agent. The DSSC converting capability is indicated by the value of  $J_{sc}$  (12.70 mA/cm<sup>2</sup>),  $V_{oc}$  (0.585 V),  $FF$  (0.476), and  $\eta$  (3.54%) obtained from the solar simulator measurement. Furthermore, the characteristics of DSSC can also be indicated by the value of  $\tau_{tr}$  (0.010 s),  $\tau_{rec}$  (0.080 s),  $\eta_{cc}$  (0.874),  $D$  (0.192) and  $L_D$  (0.124 mm) extracted from IMPS (Intensity Modulated Photocurrent Spectroscopy) and IMVS (Intensity Modulated Photovoltage Spectroscopy) measurements. In this article, impedance for each interface of DSSC through EIS (Electrochemical Impedance Spectroscopy) analysis is also reported.

**Keywords:** DSSC, charge transport, triple layer Ag-TiO<sub>2</sub>, IMPS-IMVS, EIS.

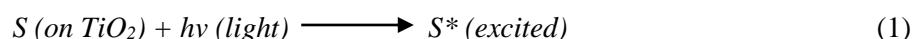
### Abstrak

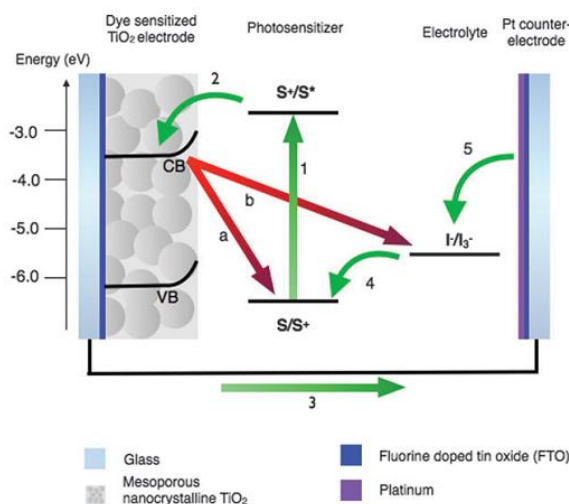
*Dye Sensitized Solar Cell* (DSSC) merupakan salah satu bagian dari energi terbarukan yang memiliki potensi besar dengan memanfaatkan energi dari sinar matahari menjadi energi listrik dengan bantuan *sensitizer* sebagai agen penyerap cahaya. Kemampuan konversi DSSC ditunjukkan oleh nilai  $J_{sc}$  (12,70 mA/cm<sup>2</sup>),  $V_{oc}$  (0,585 V),  $FF$  (0,476), dan  $\eta$  (3,54%) yang diperoleh dari pengujian *solar simulator*. Selain parameter tersebut, karakteristik DSSC dapat juga ditunjukkan dari nilai  $\tau_{tr}$  (0,010 s),  $\tau_{rec}$  (0,080 s),  $\eta_{cc}$  (0,874),  $D$  (0,192), dan  $L_D$  (0,124 mm) melalui IMPS (*Intensity Modulated Photocurrent Spectroscopy*) dan IMVS (*Intensity Modulated Photovoltage Spectroscopy*). Pada artikel ini juga dilaporkan impedansi antar lapisan DSSC melalui analisis EIS (*Electrochemical Impedance Spectroscopy*).

**Kata Kunci:** DSSC, *transport muatan*, *triple layer Ag-TiO<sub>2</sub>*, IMPS-IMVS, EIS.

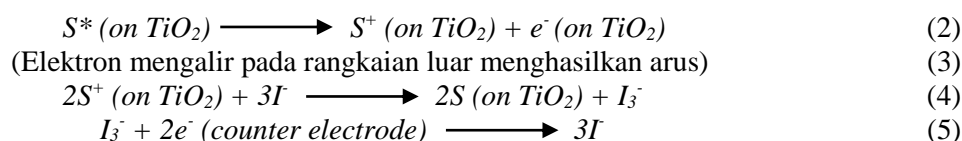
## 1. Pendahuluan

*Dye Sensitized Solar Cell* (DSSC) merupakan salah satu piranti dari energi terbarukan yang paling menjanjikan dengan mengonversi dari energi matahari menjadi energi listrik. Sistem DSSC lengkap tersusun atas fotoanoda yang terbuat dari lapisan material semikonduktor yang dideposisikan pada substrat *glass* konduktif. Elektroda lawan (*counter electrode*) tersusun dari material konduktif, seperti platina (Pt). Komponen lain yang memiliki peran penting dalam struktur DSSC yaitu elektrolit dengan *redox couple*, dan pewarna (*dye*) [1], sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 1. Fenomena konversi cahaya pada DSSC diuraikan dalam persamaan (1)-(5) [2]-[7], yaitu:



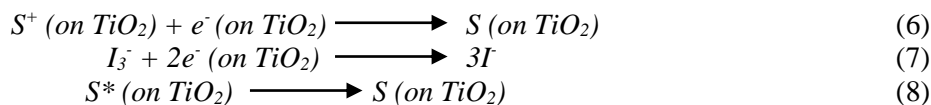


Gambar 1. Sistem kerja DSSC.



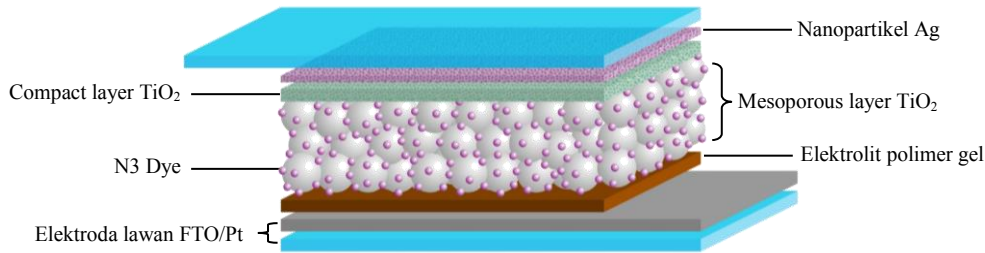
Mekanisme 1, ketika foton ( $h\nu$ ) dari cahaya matahari ditangkap oleh *dye* pada lapisan semikonduktor  $\text{TiO}_2$ , maka  $S$  berpindah dari HOMO (*Highest Occupied Molecular Orbital*) ke LUMO (*Lowest Unoccupied Molecular Orbital*), sehingga terjadi peristiwa *photoexcitation*.  $S$  merupakan *sensitizer/dye* dan  $S^*$  adalah *dye* yang tereksitasi. Mekanisme 2, *sensitizer* pada keadaan tereksitasi ( $S^*$ ) akan berpindah dari LUMO menuju *conduction band* pada lapisan semikonduktor  $\text{TiO}_2$  dan menghasilkan elektron bebas. Pada peristiwa ini, *dye* mengalami peristiwa oksidasi ( $S^+$ ). Mekanisme 3, elektron bebas dihasilkan, dan kemudian melewati substrat konduktif FTO (*Fluorine doped Tin Oxide*) dan menghasilkan arus pada rangkaian luar. Mekanisme 4,  $S^+$  pada  $\text{TiO}_2$  bereaksi dengan *redox couple*  $3I^-$  sehingga terjadi peristiwa *dye regeneration*. *Hole* yang ditinggalkan  $S$  saat terjadi proses eksitasi kemudian terisi kembali pada keadaan semula  $S$ . Mekanisme 5, elektron yang telah melewati rangkaian luar yang kemudian sampai pada *counter electrode* Pt kemudian bereaksi dengan *redox couple*  $I_3^-$ .

Mekanisme 1 sampai 5 merupakan satu siklus lengkap sistem konversi energi pada DSSC. Selain fenomena tersebut, terdapat fenomena lain yang dapat menurunkan nilai efisiensi DSSC.



Mekanisme 5, elektron tidak memiliki cukup energi untuk berpindah ke substrat konduktif dan mengalir ke rangkaian luar, melainkan elektron ini akan mengalami rekombinasi dan kembali ke HOMO untuk mengisi *hole* yang telah ditinggalkan. Mekanisme 6, elektron pada *conduction band* mengalami peristiwa *dark current*, yaitu dimana elektron akan bereaksi dengan *redox couple*  $I_3^-$  (peristiwa b) dan menghasilkan *redox couple*  $I^-$ . Mekanisme 6, jika *dye* yang tereksitasi ( $S^*$ ) tidak memiliki energi yang cukup untuk mengalami oksidasi, maka ia akan kembali lagi ke posisi awal. Peristiwa ini disebut *radiation less relaxation*.

Karakteristik *transport* elektron dalam DSSC dapat dipelajari melalui pengujian *solar simulator*. Melalui pengujian ini dapat diperoleh arus yang mengalir pada saat tanpa tegangan ( $I_{sc}$ ), dan tegangan ketika sudah tidak ada arus yang mengalir ( $V_{oc}$ ). *Fitting* menggunakan persamaan Shockley [8] yang digunakan dalam proses analisis data hasil pengujian *solar simulator* dapat menghasilkan nilai parameter yang lebih lengkap serta memiliki kecocokan yang lebih bagus



Gambar 2. DSSC Triple Layer.

dibandingkan *manual nonlinear fitting* [9]. Pengujian IMPS dan IMVS digunakan untuk mengetahui waktu *transport* serta waktu rekombinasi elektron. Nilai efisiensi *charge collection*, koefisien difusi elektron ( $D$ ), serta panjang difusi efektif ( $L_D$ ) dapat diperoleh dari nilai waktu *transport* dan waktu rekombinasi. Karakteristik impedansi antar lapisan pada sistem DSSC dapat dipelajari dari karakterisasi EIS (*Electrochemical Impedance Spectroscopy*). Metode analisis elektrokimia menjadi media yang efektif untuk mempelajari proses transfer muatan dan fenomena *interfacial* DSSC [10].

## 2. Metode Penelitian

DSSC tersusun dari komponen elektroda konter Pt dan fotoanoda dengan struktur *triple layer*. Fotoanoda *triple layer* terdiri dari tiga lapisan utama, yaitu nanopartikel Ag, lapisan padat TiO<sub>2</sub>, dan lapisan berpori TiO<sub>2</sub>. Nanopartikel Ag sebagai agen resonansi *plasmonic* [11]–[15] dapat meningkatkan efisiensi penyerapan cahaya. Sedangkan permukaan lapisan fotoanoda yang berpori berfungsi untuk meningkatkan penyerapan pewarna (*dye*) N3 [9-10,12,18]. Lapisan pertama adalah nanopartikel Ag yang dideposisikan pada substrat *glass* FTO dengan metode *drop casting*. Deposisi dilakukan dengan meneteskan sebanyak 10  $\mu$ L nanopartikel Ag (10 nm *dispersion*, Sigma Aldrich), kemudian pelarut dibiarkan menguap, hingga hanya tersisa nanopartikel Ag. Lapisan kedua berupa lapisan padat TiO<sub>2</sub> yang dideposisikan dengan metode *spin coating*. Larutan *spin coating* disiapkan dengan cara menggerus nanopartikel TiO<sub>2</sub> (NP90, Sigma Aldrich) kemudian ditambahkan HNO<sub>3</sub> (0,1 M) sebanyak 2 mL hingga diperoleh campuran yang homogen. *Spin coating* dilakukan selama 30 detik dengan kecepatan 2350 rpm, dan kemudian dilakukan *sintering* pada suhu 450 °C selama 30 menit. Lapisan ketiga adalah lapisan nanopartikel TiO<sub>2</sub> berpori yang dideposisikan menggunakan *doctor blade*. Nanopartikel TiO<sub>2</sub> (NP25, Sigma Aldrich) digerus dan ditambahkan HNO<sub>3</sub> (0,1 M), Triton-X 1 tetes, dan PEG 0,25 gram secara berturut-turut hingga diperoleh larutan kental yang homogen. Langkah selanjutnya adalah melakukan *sintering* pada suhu 450 °C selama 30 menit untuk membentuk lapisan berpori TiO<sub>2</sub>.

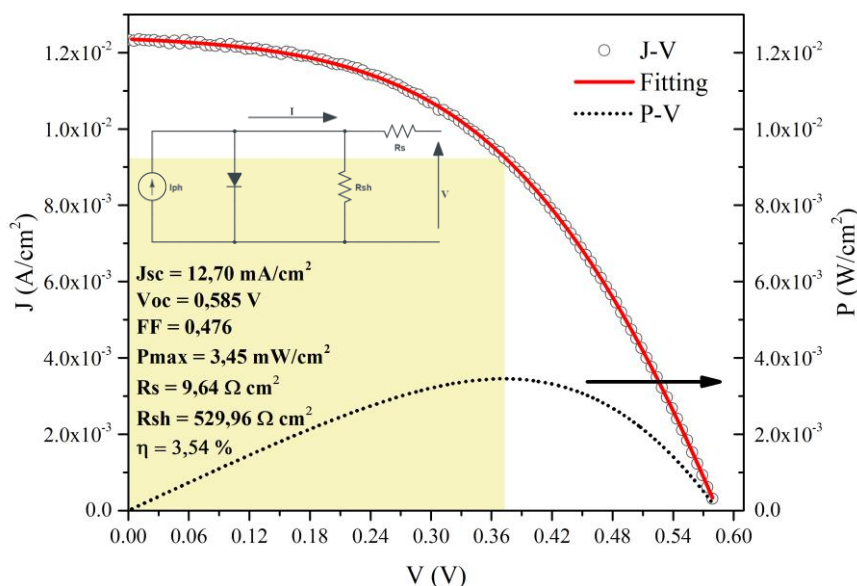
Elektrolit yang digunakan yaitu elektrolit polimer gel, dengan komposisi pada penelitian sebelumnya [5-6,21]. Elektrolit menggunakan polimer PAN karena memiliki kestabilan serta sifat fisis yang baik [22]. Fotoanoda direndam dalam N3 *cis-diisothiocyanato-bis(2,2'-bipyridyl-4,4'-dicarboxylic acid)* ruthenium(II) C<sub>26</sub>H<sub>16</sub>O<sub>8</sub>N<sub>6</sub>S<sub>2</sub>Ru dengan konsentrasi 3 mM selama 24 jam sebelum disusun menjadi sistem lengkap DSSC. Desain lengkap sistem DSSC ditampilkan pada Gambar 2. Piranti DSSC kemudian diuji *solar simulator*, IMPS-IMVS menggunakan (IM6e, Zahner, Germany) dengan diode penghasil cahaya (LED) ( $\lambda = 610$  nm) yang dikendalikan oleh sumber (XPOT, Zahner, Germany), dan EIS menggunakan (Autolab 320, Metrohm, Switzerland) untuk mengetahui karakteristik transfer elektron.

## 3. Hasil dan Pembahasan

### 3.1. Kurva $J$ - $V$ dan Efisiensi DSSC

Sistem lengkap DSSC dalam struktur *sandwich* yang telah direndam dalam pewarna N3 selama 24 jam kemudian dilakukan pengujian  $J$ - $V$  (*solar simulator*). Pada pengujian ini, luasan zona aktif sebesar 0,196 cm<sup>2</sup> disinari dengan sumber cahaya 1000 watt/m<sup>2</sup>. Hasil kurva karakteristik  $J$ - $V$  dianalisis menggunakan persamaan Shockley [3,6], seperti pada Persamaan 6.

$$J = J_{ph} - J_0 \left[ \exp \left\{ \frac{q(V + R_s J)}{nk_B T} \right\} - 1 \right] - \frac{V + R_s J}{R_{sh}} \quad (6)$$



Gambar 3. Analisis parameter DSSC dengan pengujian solar simulator.

Kurva *J-V solar simulator* serta berbagai parameter yang diperoleh ditampilkan pada Gambar 3 dengan rangkaian setara pada Gambar 1 (*inset*), dapat menghasilkan beberapa parameter seperti yang ditampilkan pada Gambar 2, yaitu  $J_{sc}$ ,  $V_{oc}$ ,  $FF$ ,  $P_{max}$ ,  $R_s$ ,  $R_{sh}$ , dan  $\eta$ .  $J_{sc}$  (*short circuit current density*) merupakan arus yang mengalir pada saat sebelum diberikan tegangan,  $V_{oc}$  (*open circuit voltage*) adalah tegangan maksimum yang diberikan hingga  $J_{sc}$  mencapai nilai 0. Nilai  $FF$  (*fill factor*) dari sistem DSSC ideal adalah 1, dimana nilai tersebut merupakan hasil dari  $J_{sc} \cdot V_{oc} / J_{max} \cdot V_{max}$  [24]. Nilai  $FF$  pada Gambar 3 ditunjukkan oleh luasan pada daerah berwarna kuning.  $R_s$  (*hambatan seri*) merupakan nilai  $1/slope$  dari  $J$  dan  $R_{sh}$  (*R shunt/hambatan paralel*) merupakan  $1/slope$  dari  $V$ . Secara ideal, nilai  $R_s$  adalah 0 sedangkan  $R_{sh}$  adalah  $\sim$  (tak terhingga). Sehingga semakin kecil nilai  $R_s$  dan semakin besar nilai  $R_{sh}$ , DSSC memiliki nilai parameter yang lebih baik.

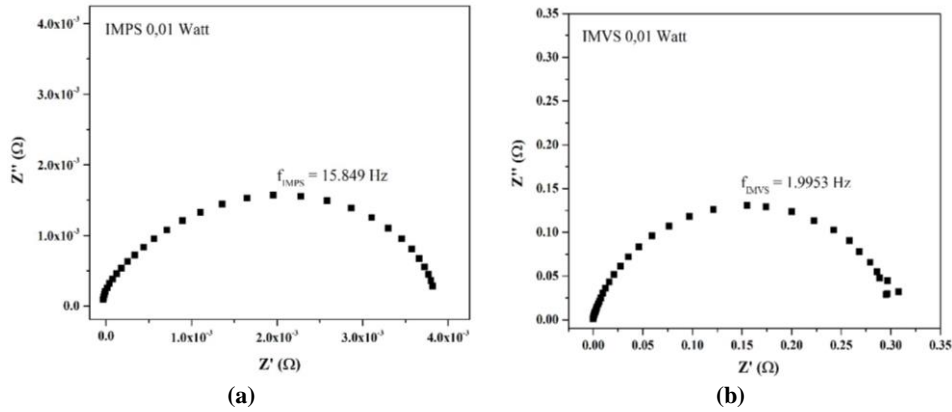
### 3.2. Waktu Transport dan Waktu Rekombinasi Elektron

Karakterisasi *Intensity Modulated Photocurrent Spectroscopy (IMPS)* dan *Intensity Modulated Photovoltage Spectroscopy (IMVS)* dapat menunjukkan nilai waktu *transport* dan waktu rekombinasi elektron yang diperoleh dari data frekuensi pada  $Z''$  maksimum. DSSC yang bagus memiliki nilai  $\tau_{tr}$  yang kecil dan  $\tau_{rec}$  yang besar, hal ini berarti elektron dalam DSSC akan lebih cepat mengalami *transport*, sehingga lebih cepat menghasilkan arus. Besarnya waktu rekombinasi berarti lebih banyak elektron yang mengalir menjadi arus listrik dibandingkan dengan elektron yang mengalami rekombinasi, atau elektron mengalami rekombinasi dalam selang waktu yang lama.

Tabel 1 menampilkan hasil perhitungan nilai waktu *transport* serta waktu rekombinasi yang diperoleh dari frekuensi maksimum pada IMPS dan IMVS. Persamaan yang digunakan untuk memperoleh nilai tersebut ditunjukkan pada Persamaan 7 hingga Persamaan 11.

Tabel 1. Karakteristik *transport* elektron DSSC.

$f(IMPS)$	$f(IMVS)$	$\tau_{tr}(s)$	$\tau_{rec}(s)$	$\eta_{cc}$	$D$	$L_D$
15.849	1.995	0.010	0.080	0.874	0.192	0.124



Gambar 4. (a) IMPS dan (b) IMVS *nyquist plot* pada intensitas cahaya 0,01 watt.

Nilai waktu *transport* elektron pada DSSC dihitung dengan menggunakan persamaan

$$\tau_{tr} = \frac{1}{2\pi \cdot f_{IMPS}} \quad (7)$$

dengan  $\tau_{tr}$  merupakan waktu *transport* elektron dan  $f_{IMPS}$  merupakan frekuensi maksimum pada *Intensity Modulated Photocurrent Spectroscopy*. Untuk nilai waktu rekombinasi elektron pada DSSC dihitung dengan menggunakan persamaan

$$\tau_{rec} = \frac{1}{2\pi \cdot f_{IMVS}} \quad (8)$$

dengan  $\tau_{rec}$  merupakan waktu rekombinasi elektron dan  $f_{IMVS}$  merupakan frekuensi maksimum pada *Intensity Modulated Photovoltage Spectroscopy*. Nilai  $f_{IMPS}$  dan  $f_{IMVS}$  didapatkan dari titik tertinggi pada kurva *semicircle* (Gambar 4). Selanjutnya nilai  $\tau_{tr}$  dan  $\tau_{rec}$  dimasukkan dalam persamaan berikut

$$\eta_{cc} = 1 - \frac{\tau_{tr}}{\tau_{rec}} \quad (9)$$

Nilai  $\eta_{cc}$  merupakan nilai efisiensi pengumpulan muatan (*charge collection efficiency*).

Nilai koefisien difusi elektron pada DSSC diperoleh melalui persamaan berikut

$$D = \frac{L^2}{2,54\tau_{tr}} \quad (10)$$

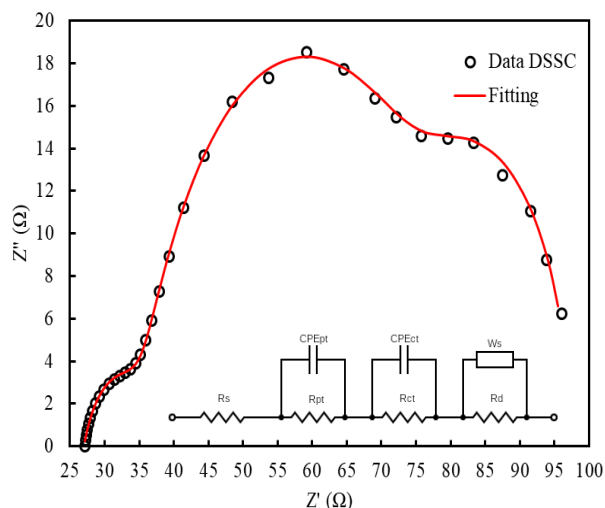
dengan  $D$  adalah koefisien difusi elektron dan  $L$  adalah ketebalan elektroda aktif film yaitu sebesar 0,07 mm. Nilai  $D$  selanjutnya digunakan untuk menghitung panjang difusi efektif dengan menggunakan persamaan berikut

$$L_D = \sqrt{D\tau_{rec}} \quad (11)$$

dengan  $L_D$  merupakan panjang difusi efektif,  $D$  merupakan koefisien difusi elektron, dan  $\tau_{rec}$  merupakan waktu rekombinasi elektron. DSSC yang bagus memiliki nilai  $L_D$  yang lebih besar dibandingkan  $L$ , yang berarti dalam hal ini elektron dapat berdifusi secara efektif di sepanjang elektroda. Hasil penelitian pada Tabel 1 telah sesuai dengan yang diharapkan.

### 3.3. Impedansi Sistem DSSC

Karakteristik elektron transfer dapat juga dipelajari melalui pengujian *Electrochemical Impedance Spectroscopy* (EIS) untuk mengetahui impedansi yang terdapat pada setiap *interface* DSSC dihitung dari setiap *semicircle*. Penentuan nilai hambatan pada kurva EIS dengan melakukan *fitting* dengan rangkaian setara pada Gambar 5 (*inset*).



**Gambar 5.** Fitting *nyquist plot* dari pengujian EIS.

**Tabel 2.** Hambatan listrik setiap *semicircle*.

$R_s$ ( $\Omega$ )	$R_{pt}$ ( $\Omega$ )	$R_{ct}$ ( $\Omega$ )	$R_d$ ( $\Omega$ )
26,987	8,319	36,699	25,205

$R_s$  (hambatan seri) adalah nilai yang menentukan titik awal *nyquist plot*, sedangkan *semicircle* pertama berhubungan dengan nilai  $R_{pt}$  (*photocurrent transient resistance*), yaitu interaksi antara konter elektroda FTO/Pt dengan elektrolit gel polimer. *Semicircle* kedua berhubungan dengan nilai  $R_{ct}$  (*charge transport resistance*), interaksi ini dapat menjelaskan nilai  $\tau_{lifetime}$  (waktu kerja) sistem. Sedangkan fenomena difusi yang terjadi di dalam sistem dijelaskan pada *semicircle* ketiga [26,27]. Hasil *fitting nyquist plot* ditampilkan pada Gambar 5, dan diketahui nilai impedansi dari setiap *semicircle* yang ditampilkan pada Tabel 2.

#### 4. Kesimpulan

Karakteristik *transport* elektron dalam sistem kerja DSSC yang dipelajari dari pengujian *solar simulator*, IMPS (*Intensity Modulated Photocurrent Spectroscopy*)-IMVS (*Intensity Modulated Photovoltage Spectroscopy*), dan EIS (*Electrochemical Impedance Spectroscopy*) dapat menunjukkan kinerja sistem DSSC secara komprehensif.

#### Ucapan Terima Kasih

Ucapan terima kasih disampaikan kepada Direktorat Riset dan Pengabdian Masyarakat yang melalui hibah Penelitian Dasar Unggulan Perguruan Tinggi, Universitas Negeri Malang, telah memberikan dana dalam program *mobility matching research*, serta University of Malaya, Malaysia, yang telah membantu akomodasi dan pengukuran sistem.

#### Daftar Rujukan

- [1] J. N. Clifford, E. Marti, and E. Palomares, "Sensitizer Molecular Structure-Device Efficiency Relationship in Dye Sensitized Solar Cells", *Chem. Soc. Rev.*, vol. 40, no. 3, pp. 1635–1646, 2011.
- [2] Y. Ooyama and Y. Harima, "Photophysical and Electrochemical Properties, and Molecular Structures of Organic Dyes for Dye-Sensitized Solar Cells", *Chem. Phys. Chem.*, vol. 13, no. 18, pp. 4032–4080, 2012.
- [3] M. H. Buraidah *et al.*, "High Efficient Dye Sensitized Solar Cells Using Phthaloylchitosan Based Gel Polymer Electrolytes Electrochimica Acta High Efficient Dye Sensitized Solar Cells Using Phthaloylchitosan Based Gel Polymer Electrolytes," *Electrochim. Acta*, vol. 245, no. June, pp. 846–853, 2017.
- [4] O. Adedokun, K. Titilope, and A. O. Awodugba, "Review on Natural Dye-Sensitized Solar Cells (DSSCs)," *Int. J. Eng. Technol. IJET*, vol. 2, no. 2, p. 34, 2016.

- [5] J. Wu *et al.*, "Counter Electrodes in Dye-Sensitized Solar Cells", *Chem. Soc. Rev.*, vol. 46, no. 19, pp. 5975–6023, 2017.
- [6] J. Gong *et al.*, "Review on Dye-Sensitized Solar Cells (DSSCs): Advanced Techniques and Research Trends," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 68, pp. 234–246, 2017.
- [7] Q. Liu *et al.* "Improved Photovoltaic Performance of Dye Sensitized Solar Cells (DSSCs) by Zn<sup>+</sup> Mg Co-Doped TiO<sub>2</sub> Electrode", *Electrochim. Acta*, vol 95, pp. 48–53, 2013.
- [8] K. Ishibashi, Y. Kimur, and M. Niwano, "An Extensive Valid and Stable Method for Derivation of All Parameters of A Solar Cell from A Single Current-Voltage Characteristic", *J. Applied Phy.*, vol. 103, no. 9, p. 094507, 2008.
- [9] M. Diantoro *et al.*, "Shockley's Equation Fit Analyses for Solar Cell Parameters from I-V Curves", *Int. J. of Photoenergy*, vol. 2018, pp. 1–7, 2018.
- [10] M. Ye *et al.*, "Electrochemical Methods for The Characterization and Interfacial Study of Dye-Sensitized Solar Cell", *Sci. Bull.*, vol. 60, no. 9, pp. 850–863, 2015.
- [11] P. Nbelayim *et al.*, "Systematic Characterization of The Effect of Ag@TiO<sub>2</sub> Nanoparticles on The Performance of Plasmonic Dye Sensitized Solar Cells", *Sci. Rep.*, vol. 7, no. 1, pp. 1–12, 2017.
- [12] A. K. B. M. Arof and M. H. B. A. Buraidah, *Plasmonic Effect in Photoelectrochemical Cells*, London: Plasmonic Intech Open, pp. 223–241, 2018.
- [13] S. Shah *et al.*, "Plasmonic Effects of Quantum Size Metal Nanoparticles on Dye Sensitized Solar Cell", *Opt. Mater. Express*, vol. 7, no. 6, pp. 1–7, 2017.
- [14] Z. A. Garmaroudi and M. R. Mohammadi, "Plasmonic Effects of Infiltrated Silver Nanoparticles Inside TiO<sub>2</sub> Film: Enhanced Photovoltaic Performance in DSSCs", *J. American Ceramic Soc.*, vol. 173, pp. 167–173, 2016.
- [15] N. C. Jeong, C. Prasittichai, and J. T. Hupp, "Photocurrent Enhancement by Surface Plasmon Resonance of Silver Nanoparticles in Highly Porous Dye-Sensitized Solar Cells", *Langmuir*, vol. 27, no. 23, pp. 14609–14614, 2011.
- [16] J. Lungu, A. Georgescu, and A. Dumbrava, "Original Research Paper Enhancing The Efficiency of AZO-Based Dye Sensitized Solar Cells by Surface Treatments", *Sci. Study & Research. Chem. & Chem. Eng. Biotechnology, Food Ind.*, vol. 16, no. 1, pp. 69–74, 2015.
- [17] M. H. Buraidah *et al.*, "Solar Module Using Dye Sensitized Solar Cells", *20<sup>th</sup> Int. Conf. Transparent Opt. Networks*, pp. 1–4, 2018.
- [18] H. Yu *et al.*, "An efficient and Low-Cost TiO<sub>2</sub> Compact Layer for Performance Improvement of Dye-Sensitized Solar Cells", *Electrochim. Acta*, vol. 54, pp. 1319–1324, 2009.
- [19] A. K. Arof *et al.*, "Utilization of Saffron (*Crocus Sativus* L.) as Sensitizer in Dye Sensitized Solar Cells ( DSSCs )", *Opt. Quantum Electron.*, vol 49, no. 1, p. 37, 2017.
- [20] T. M. W. J. Bandara *et al.*, "Efficiency Enhancement in Dye Sensitized Solar Cells with A Novel PAN Based Gel Polymer Electrolyte with Ternary Iodides", *J. of Solid State Electrochemistry*, vol. 19, no. 8, pp. 2353–2359, 2015.
- [21] A. K. Arof *et al.*, "Polyacrylonitrile Gel Polymer Electrolyte Based Dye Sensitized Solar Cells for A Prototype Solar Panel," *Electrochim. Acta*, vol. 251, pp. 223–234, 2017.
- [22] H. C. Hassan *et al.*, "A High Efficiency Chlorophyll Sensitized Solar Cell with Quasi Solid PVA Based Electrolyte", *Int. J. of Photoenergy*, vol. 2016, pp. 1–9, 2016.
- [23] T. Suprayogi, D. Maftuha, and M. Diantoro, "Pembuatan DSSC dengan Fotoanoda dari TiO<sub>2</sub> dan β-Karoten Sebagai Sensitizer dan Analisis Kurva IV," *JPSE (Journal Phys. Sci. Eng.)*, vol. 2, no. 2, pp. 11–18, 2018.
- [24] M. A. Green, *Solar Cells: Operating Principles, Technology, and System Applications*, Englewoods Cliffs: Prentice-Hall Inc., 1982.
- [25] W. S. Chi *et al.*, "Hybrid Electrolytes Prepared from Ionic Liquid-Grafted Alumina for High-Efficiency Quasi-Solid-State Dye-Sensitized Solar Cells", *Nanoscale*, vol. 5, no. 12, pp. 5341–5348, 2013.
- [26] M. Libratoro *et al.*, "Using EIS for Diagnosis of Dye-Sensitized Solar Cells Performance", *J. of Appl. Electrochemistry*, vol. 39, no. 11, pp. 2291–2295, 2009.
- [27] S. S. Sekhon *et al.*, "Gel Electrolyte Based on UV-Cured Polyurethane for Dye-Sensitized Solar Cells", *Curr. Appl. Phys.*, vol. 11, no. 1, pp. S158–S162, 2010.