

## KARAKTERISTIK ZNO NANOROD BERSTRUKTUR SEPERTI LANDAK SEBAGAI FOTOANODA PADA DYE-SENSITIZED SOLAR CELL (DSSC)

FITRI YULIASARI<sup>1,\*</sup>, ALFIETA ROHMAFUL AENI<sup>1</sup>, AULIA WAHYUNINGTYAS<sup>1</sup>, HILMAN IMADUL UMAM<sup>1</sup>, MEKA SAIMA PERDANI<sup>1</sup>, TEGUH PAMBUDI<sup>1</sup>, RAHMAT HIDAYAT<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Program Studi Teknik Kimia, Fakultas Teknik, Universitas Singaperbangsa Karawang  
Jl. H.S Ronggo Waluyo Puseurjaya, Telukjambe Timur, Karawang, Jawa Barat 41361

<sup>2</sup>Program Studi Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Institut Teknologi Bandung.  
Jl. Ganesa No.10, Lb. Siliwangi, Kecamatan Coblong, Kota Bandung, Jawa Barat 40132

\*Corresponding author  
Email: [fitri.yuliasari@ft.unsika.ac.id](mailto:fitri.yuliasari@ft.unsika.ac.id)

Diserahkan : 02/09/2023  
Diterima : 02/09/2023  
Dipublikasikan : 02/02/2024

**Abstrak.** Penelitian ini bertujuan membuat sel surya jenis *dye-sensitized solar cell* (DSSC) dengan memanfaatkan ZnO nanorod (ZnO-NR) berstruktur seperti landak sebagai lapisan fotoanoda. Fotoanoda ZnO-NR dibuat dari lapisan penumbuh (*seed layer*) ZnO nanopartikel (ZnO-NP) diatas substrat ITO menggunakan metode hidrotermal dengan variasi perbandingan konsentrasi larutan penumbuh (*growth solution*) hexamethylenetetramine (HMTA):Zn(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>·6H<sub>2</sub>O adalah 0,1 : 0,1 M dan 0,25 : 0,05 M. Morfologi ZnO nanorod dipelajari melalui karakterisasi *Scanning Electron Microscopy* (SEM) yang menunjukkan bahwa penambahan ZnO-NP pada lapisan penumbuh akan menghasilkan ZnO-NR berstruktur seperti landak. Karakterisasi X-Ray Diffraction (XRD) menunjukkan bahwa ZnO-NR menghasilkan pola puncak difraksi yang sesuai dengan bidang ZnO dan berbentuk *hexagonal wurzite*. Hasil pengukuran Spektroskopi UV-Vis menunjukkan penyerapan *dye* oleh ZnO-NR pada rentang UV hingga cahaya tampak. Pada penelitian ini pembuatan DSSC difabrikasi dengan struktur ITO/ZnO-NR/D358-*dye*/mosalyte/Platina/FTO. Efisiensi DSSC yang dihasilkan mencapai 1,65% dari fotoanoda ZnO-NR dengan konsentrasi larutan penumbuh 0,25:0,05 M.

**Kata kunci:** DSSC, ZnO, nanorod, fotoanoda, dye

**Abstract.** This research aims to study characteristics of *dye-sensitized solar cell* (DSSC) by utilizing ZnO nanorod (ZnO-NR) with a hedgehog-like structure as a photoanode. The ZnO-NR photoanode was prepared from ZnO nanoparticles (ZnO-NP) seed layer deposited on ITO substrate using hydrothermal method with varied ratios of growth solution hexamethylenetetramine (HMTA):Zn(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>·6H<sub>2</sub>O 0,1:0,1 M and 0.25:0.05 M. The morphology of ZnO nanorods was studied through *Scanning Electron Microscopy* (SEM) characterization which showed that the addition of ZnO-NP to the growth solution would produce ZnO-NR with a hedgehog-like structure. X-Ray Diffraction (XRD) characterization shows that ZnO-NR correspond to the ZnO hexagonal wurzite. The results of UV-Vis spectroscopy measurements show the absorption of dye and ZnO-NR in the UV to visible light range. In this research, DSSC was fabricated with the structures ITO/ZnO-NR/D358-*dye*/mosalyte/Platina/FTO. The DSSC parameters, then studied through current-voltage (I-V) measurements while the charge recombination that occurred was studied through Intensity Modulated Photovoltage Spectroscopy (IMVS) characterization. The resulting efficiency reached 1.65% of the ZnO-NR photoanode with 0.25:0.05 M.

**Keywords:** DSSC, ZnO, nanorod, photoanode, dye

## 1. Pendahuluan

Salah satu jenis sel surya pengganti silikon yang masih dikembangkan hingga saat ini adalah sel surya jenis *dye-sensitized solar cell* (DSSC). DSSC terdiri dari tiga bagian utama yaitu, fotoanoda dari lapisan semikonduktor yang tersensitisasi molekul *dye* (zat pewarna), elektrolit untuk proses regenerasi elektron dan elektroda lawan sebagai katalis untuk mempercepat transfer elektron [1]. Namun, performa DSSC tergantung pada banyak faktor seperti pemilihan material untuk lapisan aktif, mekanisme proses transport elektron dan proses rekombinasi muatan yang mungkin terjadi di dalam DSSC [2].

Hingga saat ini  $\text{TiO}_2$  mesopori menjadi material yang paling banyak digunakan pada aplikasi DSSC sebagai fotoanoda karena memiliki celah pita lebar (3,37 eV), luas permukaan yang tinggi dan ukuran partikel kecil 20 – 60 nm sehingga efisien dalam menyerap *dye* [3]. Namun bentuk mesopori meningkatkan faktor rekombinasi muatan pada antar muka  $\text{TiO}_2$ /elektrolit [4]. Selain  $\text{TiO}_2$ , jenis material fotoanoda yang biasa digunakan adalah ZnO karena ZnO lebih mudah disintesis pada suhu rendah, memiliki sifat optoelektronik yang baik, dan tidak beracun. ZnO memiliki celah pita sekitar ~3,2 - ~3,37 eV dan hampir sama dengan  $\text{TiO}_2$  [5]. ZnO dapat disintesis membentuk berbagai macam struktur nano seperti *nanorod*, *nanotube*, *nanobelt*, *nanoflower*, *nanowalls*, *nanosheet*, *sea-urchin*, *hedgehog-like* dan lain-lain [6].

*Zhu et al*, dalam penelitiannya telah menginvestigasi waktu transport dan umur elektron pada struktur  $\text{TiO}_2$  nanopartikel dan  $\text{TiO}_2$  *nanotube*. Hasilnya menunjukkan bahwa transport elektron pada kedua struktur sama, namun umur elektron di dalam *nanotube* lebih panjang satu orde dibandingkan pada nanopartikel. Artinya  $\text{TiO}_2$  *nanotube* memiliki tingkat rekombinasi muatan yang lebih rendah [7]. Sementara itu *Quintana et al* telah mempelajari waktu difusi elektron pada ZnO dan  $\text{TiO}_2$ . Hasilnya adalah bahwa transport elektron di  $\text{TiO}_2$  dan ZnO cukup mirip, namun umur elektron dalam film ZnO lebih lama daripada  $\text{TiO}_2$  [8]. Salah satu bentuk struktur nano ZnO yang menarik untuk dipelajari adalah struktur nano satu dimensi (1-D) seperti *nanorod* dan *nanotube*. Struktur 1-D diyakini memberikan jalur cepat untuk proses transport elektron dan difusi elektron pada DSSC. Proses transport elektron dan difusi elektron pada struktur 1-D cenderung bergerak secara terarah karena dipengaruhi bentuk diameter 1-D dalam membatasi gerakan elektron. Bentuk nano 1-D dengan diameter kecil akan mempercepat proses transport elektron [2].

Oleh karena itu, pada penelitian ini akan diganti semikonduktor metal oksida  $\text{TiO}_2$  pada DSSC menjadi ZnO dan mengubah bentuk nanopartikel menjadi nano 1-D yaitu bentuk *nanorod*. Struktur ZnO *nanorod* (ZnO-NR) yang berbentuk vertikal dimodifikasi menjadi bentuk seperti landak. ZnO-NR dengan struktur seperti landak memberikan keuntungan diantaranya adalah transfer elektron yang lebih efisien, transport elektron yang cepat, mengurangi rekombinasi muatan dan meningkatkan pemuatan *dye* yang mengarah pada peningkatan performa DSSC dengan fotoanoda ZnO *nanorod* [9]. Pada penelitian ini akan dilakukan pembuatan DSSC dengan ZnO-NR berbentuk seperti landak sebagai fotoanoda dengan variasi diameter *nanorod* yang berbeda. Diameter *nanorod* yang kecil dapat mempercepat proses transport elektron sehingga dapat meningkatkan efisiensi devais [2]. ZnO-NR disintesis dengan metode hidrotermal dan kemudian dipelajari karakteristiknya terhadap kinerja DSSC.

## 2. Metode Penelitian

Pembuatan ZnO-NR diawali dengan pembuatan *seed layer* (lapisan penumbuh) diatas substrat ITO. Larutan *seed layer* disintesis dari prekursor *zinc acetylacetonate hydrate*

(Zn(II)-AA) yang dilarutkan pada 2-propanol dan *diethanolamine* (DEA). Kemudian larutan *seed layer* dideposisikan pada substrat ITO menggunakan teknik *spin-coating* dilanjutkan proses annealing pada suhu 500°C. Larutan penumbuh (*growth solution*) disiapkan dari campuran *hexamethylenetetramine* (HMTA) dan *Zincnitrate hexahydrate* ( $\text{Zn}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ) dengan variasi perbandingan 0,1:0,1 M dan 0,25:0,05 M. Proses penumbuhan ZnO mengikuti proses yang telah dilaporkan sebelumnya [10]. Setelah dihasilkan lapisan ZnO-NR diatas substrat ITO kemudian direndam di larutan dye D358 dan diaplikasikan sebagai fotoanoda pada DSSC dengan konfigurasi ITO/ZnO-NR/Dye D358/*mosalyte*/Pt/FTO seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.

Untuk mempelajari morfologi dari ZnO-NR dilakukan karakterisasi *Scanning Electron Microscopy* (SEM, Hitachi SU3500) dan *X-ray diffraction* (XRD, Bruker D8 Advance) dengan radiasi Cu K $\alpha$  digunakan untuk mempelajari struktur kristal yang terbentuk dari ZnO-NR. Karakteristik absorbansi UV-Visible dari ZnO-NR dan larutan dye diukur dengan CDD-based spectrtometer (Ocean optics, USB 2000). Pada pengujian sel surya, pengukuran arus-tegangan dari DSSC diukur dibawah kondisi tanpa disinari dan disinari dengan intensitas daya yang dipancarkan adalah 100 mW/cm<sup>2</sup>. Untuk mempelajari proses rekombinasi muatan yang terjadi pada DSSC dilakukan karakterisasi *Intensity Modulated Photovoltaic Spectroscopy* (IMVS) menggunakan set-up *lock-in amplifier* (Stanford Research 850), current/power amplifier (Rigol PA1011 10 W) dan *white-light-emitting diode* yang termodulasi dengan frekuensi pada rentang 0,1 Hz – 100 kHz.

### 3. Hasil dan Pembahasan

Sampel yang dibuat pada penelitian ini ditunjukkan pada Tabel 1.

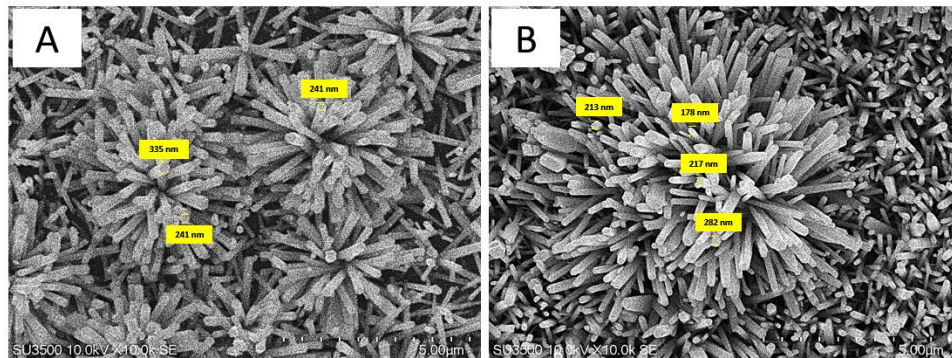
**Tabel 1.** Variasi ZnO-NR pada penelitian

| Sampel | Larutan penumbuh<br>(HMTA): $\text{Zn}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ | Waktu<br>penumbuhan | Bentuk | Diameter<br>per-rod<br>(nm) | Diameter<br>bentuk<br>landak ( $\mu\text{m}$ ) |
|--------|----------------------------------------------------------------------------------|---------------------|--------|-----------------------------|------------------------------------------------|
| A      | 0,1 : 0,1 M                                                                      | 3x2 jam             | Landak | 241 - 335                   | 3,96 – 5,2                                     |
| B      | 0,25 : 0,05 M                                                                    |                     |        | 178 - 282                   | 9,3 - 13                                       |

Sampel A merupakan ZnO-NR yang disintesis dengan perbandingan konsentrasi larutan penumbuh HMTA: $\text{Zn}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  0,1:0,1 M dan sampel B dibuat dengan perbandingan 0,25:0,05 M.

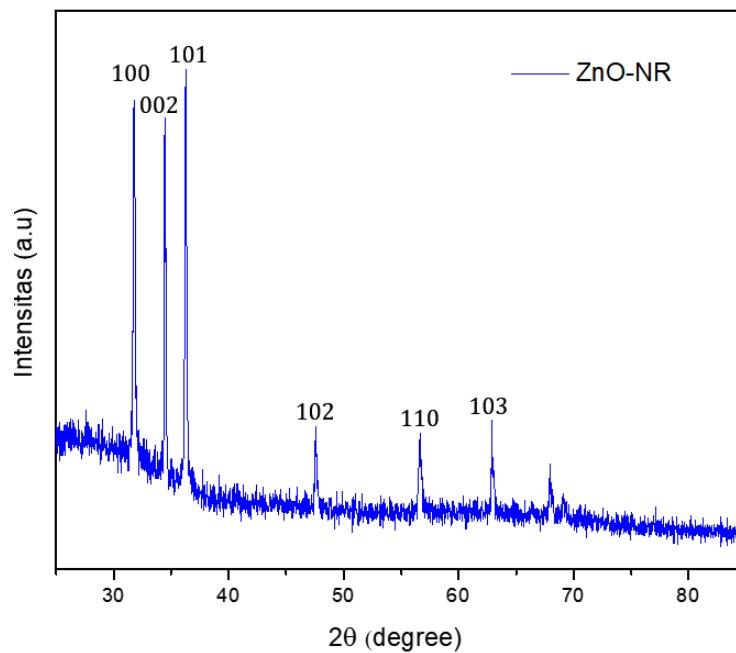
Berdasarkan hasil SEM pada Gambar 1, terlihat bahwa morfologi sampel A dan B menghasilkan ZnO-NR berbentuk seperti landak dengan ukuran diameter rod yang berbeda. Sampel A menghasilkan diameter rod pada rentang 178 – 282 nm sementara Sampel B menghasilkan diameter rod pada rentang 241 – 335 nm. Bentuk landak yang dihasilkan disebabkan karena penambahan ZnO-NP pada *seed layer*. Kehadiran *seed layer* nanokristal ZnO selama tahap awal proses sangat penting karena menyediakan situs nukleasi heterogen untuk pembentukan ZnO. Dalam penyusunannya, atom Zn dikoordinasikan secara tetrahedral dengan empat atom O dan sebaliknya. Untuk sampel A dan B, terlihat bahwa keduanya menunjukkan struktur seperti landak, namun menghasilkan diameter bentuk landak yang berbeda ukurannya. Sampel A menunjukkan diameter bentuk landak 9,3 – 13 nm sementara Sampel B 3,96 – 5,2 nm. Hal ini dipengaruhi oleh rasio konsentrasi antara HMTA dan  $\text{Zn}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ . Jika konsentrasi  $\text{Zn}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  lebih dominan maka akan dihasilkan ZnO-NR dengan diameter yang besar. Hal ini disebabkan karena terjadi pertumbuhan yang dominan ke arah radial

dibandingkan ke arah axial. Namun, ketika konsentrasi HMTA pada larutan prekursor lebih dominan maka akan menghasilkan nanorod dengan diameter yang kecil dan lebih tinggi. Hal ini terkait dengan pasokan ion  $\text{OH}^-$  pada HMTA yang bertugas sebagai pemandu pertumbuhan ZnO-NR ke arah axial. Selain itu, waktu penumbuhan juga mempengaruhi aspek rasio dari ZnO-NR [11].



**Gambar 1.** Morfologi ZnO-NR berstruktur seperti landak sampel A (konsentrasi 0,1:0,1 M) dan B (konsentrasi 0,25:0,05 M)

Pola difraksi dari ZnO-NR dipelajari melalui karakterisasi *X-Ray Diffraction* dan hasilnya diperlihatkan pada Gambar 2.



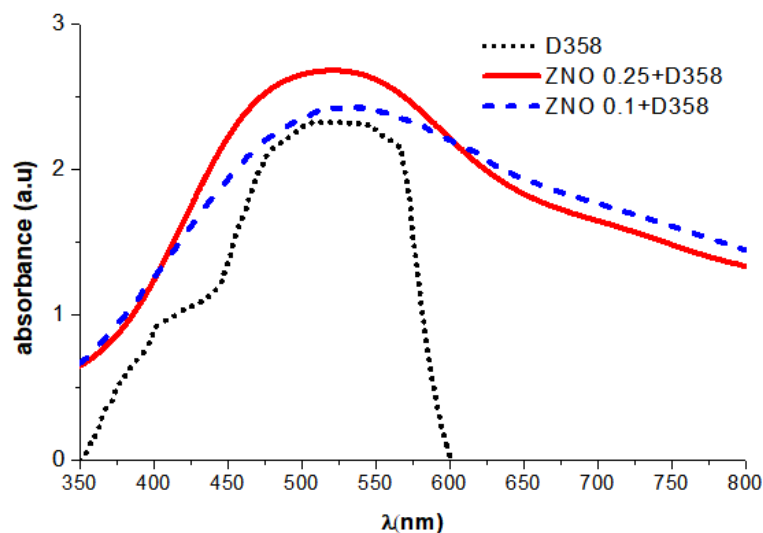
**Gambar 2.** Pola difraksi ZnO-NR berstruktur seperti landak

Pola XRD ZnO-NR berstruktur seperti landak menunjukkan karakteristik struktur *hexagonal wurtzite* dengan nilai parameter kisi  $a = 3,24870 \text{ \AA}$  dan  $c = 5,2330 \text{ \AA}$ . Puncak-puncak difraksi dirangkum dalam Tabel 2.

**Tabel 2.** Variasi ZnO-NR pada penelitian

| 2 $\theta$<br>(°) | Indeks<br>Miller |
|-------------------|------------------|
| 31,79             | 100              |
| 34,47             | 002              |
| 36,28             | 101              |
| 47,58             | 102              |
| 56,63             | 110              |
| 62,93             | 112              |

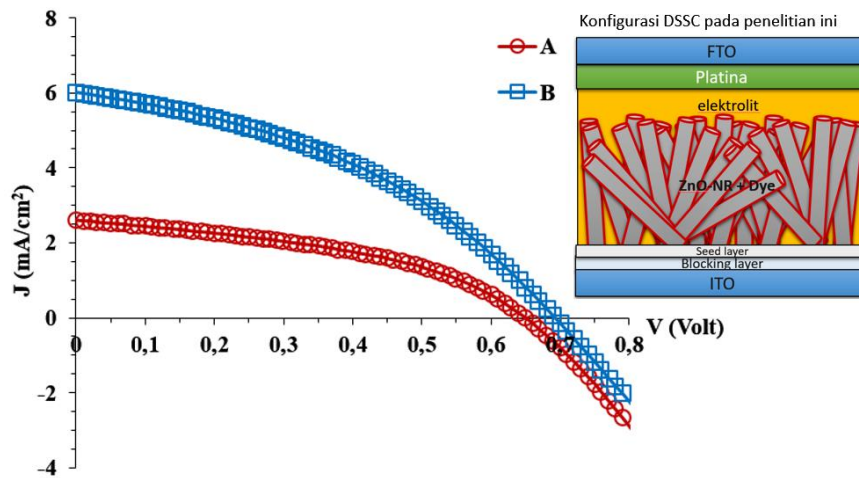
Puncak difraksi intensitas relatif pada bidang kristal (0002) yang menunjukkan bahwa kristal ZnO tumbuh dengan baik membentuk susunan hexagonal disepanjang sumbu-c. Sementara itu, bidang kristal (10 $\bar{1}$ 0), dan (10 $\bar{1}$ 1) menunjukkan adanya pertumbuhan kristal akibat adanya kontribusi dari *seed layer* ZnO-NP yang menyebabkan munculnya ZnO-NR berbentuk seperti landak seperti yang ditunjukkan pada hasil SEM. Bidang kristal yang terekspos pada (0002), (10 $\bar{1}$ 0), dan (10 $\bar{1}$ 1) memberikan keuntungan dalam memuat molekul *dye* ke permukaan ZnO [12].

**Gambar 3.** Spektrum absorbansi UV-Vis dari ZnO-NR dan *dye* D358

Gambar 3 menunjukkan spektrum absorbansi UV-Vis dari ZnO-NR sampel A dan B serta larutan *dye* D358. Garis titik-titik berwarna hitam menunjukkan serapan optik yang luas pada daerah UV dan cahaya tampak dari *dye* D358 pada puncak 392 nm dan 520 nm yang merupakan karakteristik dari *dye* D358. Setelah ZnO-NR direndam di dalam *dye* D358 serapan absorbansi untuk ZnO-NR sampel B menunjukkan serapan yang lebih tinggi dibandingkan ZnO-NR A. Hal ini menunjukkan bahwa penyerapan *dye* dalam jumlah yang relatif besar pada ZnO-NR berbentuk landak dengan diameter rod yang lebih kecil. Semakin banyak *dye* yang diserap maka dapat memaksimalkan pemuatan *dye* yang mengarah pada meningkatnya fotoarus yang dihasilkan sel surya. Pemuatan *dye* yang tinggi mendorong lebih banyak injeksi muatan dari *dye* ke pita konduksi ZnO.

Sampel A dan B adalah ZnO-NR berbentuk seperti landak kemudian diaplikasikan

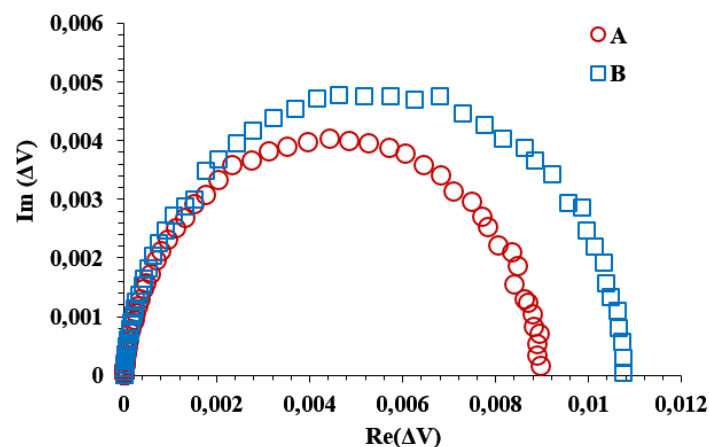
sebagai fotoanoda pada DSSC. Kurva J-V ditunjukkan pada Gambar 4.



**Gambar 4.** Karakteristik J-V DSSC dengan elektroda ZnO-NR berstruktur seperti landak

DSSC dengan elektroda ZnO-NR berbentuk seperti landak dapat meningkatkan luas permukaan dan meningkatkan *dye loading*. Performa dari DSSC berbasis ZnO-NR juga dipengaruhi oleh ukuran diameter. Jika dibandingkan antara DSSC A dan B, terlihat bahwa untuk DSSC B yang memiliki diameter rod lebih besar dan ukuran bentuk landaknya lebih kecil dibandingkan DSSC A dan telah menghasilkan fotoarus yang besar yaitu  $6,01 \text{ mA/cm}^2$  dibandingkan dengan DSSC A yang menghasilkan fotoarus  $2,61 \text{ mA/cm}^2$ . Mengurangi ukuran diameter rod dan memperbesar diameter ukuran landaknya dapat memberikan keuntungan diantaranya adalah molekul *dye* dengan mudah menyerap ke pori-pori lapisan ZnO dan memuat lebih banyak *dye*. Sehingga membuat elektron bergerak lebih terarah dan mengurangi tingkat rekombinasi elektron di dalam ZnO yang mengarah pada peningkatan ekstraksi elektron dan menghasilkan arus fotoarus yang lebih baik.

Untuk mempelajari proses rekombinasi, telah dilakukan karakterisasi *Intensity Modulated Photovoltage Spectroscopy* (IMVS).



**Gambar 5.** Hasil pengukuran IMVS DSSC dengan elektroda ZnO-NR berstruktur seperti landak

Pada Gambar 5, terdapat kurva setengah lingkaran yang menunjukkan bahwa DSSC B menghasilkan setengah lingkaran yang lebih besar dibandingkan dengan DSSC A, artinya rekombinasi elektron untuk menghasilkan fotoarus telah terminimalisir. Dari hasil pengukuran IMVS juga diperoleh aproksimasi waktu rekombinasi elektron ( $\tau_{rec}$ ) yang ditabulasikan pada Tabel 3.

**Tabel 3.** Karakteristik fotovoltaiik DSSC dengan fotoanoda ZnO-NR dan *lifetime* elektron

| Sampel | Larutan Penumbuh<br>(HMTA:<br>$Zn(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$ ) | $V_{OC}$<br>(V) | $J_{SC}$<br>$mA/cm^2$ | <i>Fill factor</i><br>(%) | $\eta$<br>(%) | $\tau$<br>(ms) |
|--------|----------------------------------------------------------|-----------------|-----------------------|---------------------------|---------------|----------------|
| A      | 0,1 : 0,1                                                | 0,63            | 2,61                  | 43,45                     | 0,71          | 5,65           |
| B      | 0,25 : 0,05                                              | 0,70            | 6,01                  | 39,30                     | 1,65          | 10,05          |

Nilai  $\tau_{rec}$  dapat diperoleh dari data frekuensi puncak maksimum pada kurva dan diperoleh melalui persamaan berikut:

$$\tau_{rec} = \frac{1}{2\pi f_{max}} \quad (1)$$

DSSC yang dengan performa yang baik memiliki nilai  $\tau_{rec}$  yang besar, yang artinya lebih banyak elektron yang mengalir menjadi arus listrik dibandingkan dengan elektron yang mengalami rekombinasi atau dengan kata lain elektron akan mengalami rekombinasi pada waktu yang lebih lama. Pada DSSC A nilai  $\tau_{rec} = 5,65$  lebih kecil dibandingkan dengan DSSC B dengan nilai  $\tau_{rec} = 10,05$ , ini menunjukkan bahwa laju transport elektron pada DSSC A lebih lambat dan menyebabkan menurunnya performa pada DSSC sehingga nilai fotoarus yang dihasilkan lebih kecil dibandingkan DSSC B. DSSC B dengan diameter ZnO-NR yang lebih kecil dibandingkan DSSC A akan menyebabkan pemuatan *dye* lebih banyak dan transport elektron lebih cepat sehingga meningkatkan efisiensi pengumpulan muatan. Hal ini lah yang menyebabkan fotoarus pada DSSC B lebih unggul daripada DSSC A.

#### 4. Kesimpulan

ZnO-NR berstruktur seperti landak telah berhasil disintesis diatas substrat ITO dengan metode hidrotermal pada suhu 90°C. Penambahan ZnO-NP pada lapisan penumbuh menghasilkan bentuk ZnO-NR berbentuk seperti landak. Perbandingan antara HMTA:  $Zn(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$  pada larutan penumbuh memberikan kontribusi dalam penumbuhan ZnO-NR yang tumbuh ke arah axial dan radial. Hasil karakterisasi SEM dan XRD menunjukkan keberhasilan pembentukan ZnO-NR dengan fasa heksagonal *wurzite*. ZnO-NR yang disintesis dengan perbandingan larutan penumbuh 0,25:0,05 M menghasilkan diameter rod 178 – 282 nm sementara itu ZnO-NR yang disintesis dengan perbandingan larutan penumbuh 0,1:0,1 M menghasilkan diameter rod 241 – 335 nm. Hasil pengukuran absorbansi UV-Vis menunjukkan bahwa ZnO-NR dengan diameter yang lebih kecil dapat meningkatkan pemuatan *dye* sehingga meningkatkan fotoarus dan fototegangan yang dihasilkan oleh sel surya. Pada penelitian ini DSSC dibuat dengan struktur ITO/ZnO-NR/Dye/*mosalyte*/Pt/FTO dan efisiensi terbaik yang dihasilkan adalah 1,65% dengan nilai  $\tau_{rec} = 10,05$  dan menunjukkan bahwa rekombinasi muatan pada sel surya terminimalisir.

### Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terima kasih atas dukungan finansial terhadap penelitian dari Beasiswa LPDP (Lembaga Pengelola Dana Pendidikan) Kementerian Keuangan, Republik Indonesia dan dukungan fasilitas dari Laboratorium Fotonik Fisika ITB.

### Daftar Pustaka

1. C. Wu *et al.*, Nano Energy Multifunctional nanostructured materials for next generation photovoltaics, *Nano Energy*, vol. 70 (2020), p. 104480
2. R. Jose, V. Thavasi, and S. Ramakrishna, Metal Oxides for Dye-Sensitized Solar Cells, vol. 301 (2009), pp. 289–301
3. Kishore Kumar, D., Kříž, J., Bennett, N., Chen, B., Upadhayaya, H., Reddy, K. R., & Sadhu, V., Functionalized metal oxide nanoparticles for efficient dye-sensitized solar cells (DSSCs): A review., *Materials Science for Energy Technologie*, vol. 3 (2019), pp. 472-481
4. Shakeel Ahmad, M., Pandey, A., & Abd Rahim, N, Advancements in the development of TiO<sub>2</sub> photoanodes and its fabrication methods for dye sensitized solar cell (DSSC) applications. A review, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 77 (2017), pp 89-108
5. W. M. N. M. B. Wanninayake, K. Premaratne, and R. M. G. R. Rajapakse, Enhancing Performance of SnO<sub>2</sub> -Based Dye-Sensitized Solar Cells Using ZnO Passivation Layer, vol. 2016 (2016), pp 1-8.
6. R. Vittal and K. C. Ho, Zinc oxide based dye-sensitized solar cells: A review, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 70, (2017), pp. 920–935
7. K. Zhu, N. R. Neale, A. Miedaner, and A. J. Frank, Enhanced Charge-Collection Efficiencies and Light Scattering in Dye-Sensitized Solar Cells Using Oriented TiO<sub>2</sub> Nanotubes Arrays, *Nano Lett.*, vol. 7 (2007), no. 1, pp. 69–74
8. M. Quintana, T. Edvinsson, A. Hagfeldt, and G. Boschloo, Comparison of Dye-Sensitized ZnO and TiO<sub>2</sub> Solar Cells : Studies of Charge Transport and Carrier Lifetime, (2007) pp. 1035–1041
9. F. Yuliasari, A. Aprilia, and R. Hidayat, Materials Today : Proceedings Improved dye-sensitized solar cell performance with hedgehog-like shaped ZnO nanorods grown using ZnO nanoparticles seed layer, *Mater. Today Proc.*, vol. 52 (2022), pp. 248–251
10. H. Pujiarti, Y. S. Handayani, A. Aprilia, and R. Hidayat, The Cell Performances of DSSCs with ZnO Nanorod Electrodes, vol. 1028 (2021), pp. 168–172
11. Wang, M., Xing, C., Cao, K., Meng, L., and Liu, J, Alignment-controlled hydrothermal growth of well-aligned ZnO nanorod arrays, *Journal of Physics and Chemistry of Solids* vol. 75(7) (2014), pp.808-817.
12. Chang, J., Ahmed, R., Wang, H., Liu, H., Li, R., Wang, P., and Waclawik, E. R, ZnO Nanocones with High-Index { 101<sup>-1</sup> } Facets for Enhanced Energy Conversion Efficiency of Dye-Sensitized Solar Cells, vol. 117 (2013), pp 13836–13844.