



Simple Fabrication and Photocatalytic of ZnO Nanoflower with Spray Coating Method for Photosupercapacitor Application

Rif'atu Nuril Laily¹, Santi Nanda Putri¹, Nurdin Khoirurizka², Markus Diantoro¹

Artikel ini telah dipresentasikan pada kegiatan Seminar Nasional Fisika (Sinafi 9.0)

Universitas Pendidikan Indonesia, Bandung, Indonesia

23 September 2023

Abstract

The increase in consumption of electrical energy makes the energy sector important, so that new and renewable alternative energy sources are needed. Photosupercapacitor is a unique device for harvesting and storing energy that can be used as an alternative energy source composed of supercapacitors and DSSC (Dye-Sensitized Solar Cell). This research shows the character of ZnO which has nanoflower which can improve the performance of photosupercapacitors. In this study, DSSC was fabricated from ZnO nanoflower using a spray coating combined with TiO₂ as a photoanode, while the supercapacitor was fabricated from BaTiO₃. Variations spray coating are used to determine its effect on the performance of the photosupercapacitor. The results of XRD analysis showed that the greater the pressure and the size of the spray, the greater crystallinity and size of the crystal particles. The results of SEM analysis showed that the ZnO nanoflower formed at a pressure of 5 bar with the highest porosity of 57.80%. The effect of pressure and spray ZnO nanoflower on photosupercapacitor performance was investigated by UV-vis characterization. In addition, by using the solar simulator test, the DSSC efficiency of 7.02% was obtained. Supercapacitors that function as energy stores in photosupercapacitors. test charge discharge show that the supercapacitor has a specific capacitance of 29.20 F/g. technique spray coating succeeded in forming ZnO nanoflower and increasing the photosupercapacitor performance.

Keywords: Photo-supercapacitor, spray pressure, sprayer size, ZnO nanoflower

INTRODUCTION

Penyediaan energi dimasa depan menjadi perhatian semua bangsa, karena energi merupakan hal penting dalam kehidupan. Saat ini, konsumsi energi bahan bakar fosil menjadi yang terbesar di Indonesia. Hal tersebut dapat menyebabkan berbagai permasalahan, salah satunya pencemaran lingkungan (Santoso, 2019). Oleh karena itu, dibutuhkan energi terbarukan yang memiliki stabilitas lingkungan sangat baik, efisiensi tinggi, dan memiliki jangka panjang (Brockway et al., 2019).

✉ Rif'atu Nuril Laily
rifatu.nuril.1903226@students.um.ac.id

Nurdin Khoirurizka
khoirurizka@gmail.com

Santi Nanda Putri
santi.nanda.1903226@students.um.ac.id

Markus Diantoro
markus.diantoro.fmipa@um.ac.id

¹ Departemen Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Negeri Malang. Malang, Indonesia.

² Departemen Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Malang. Malang, Indonesia.

Indonesia memiliki potensi energi surya yang merupakan energi alternatif terbesar kedua dengan kapasitas sebesar 4.800 kWh per meter persegi (Nasional, 2019). Energi sel surya menjadi pilihan karena melimpah dan relatif konstan sepanjang tahun (Al Hakim, 2020). Pemanfaatan energi matahari menjadi energi listrik saat ini banyak dikembangkan dalam perangkat fotosuperkapasitor (Assiddiq, 2018). Fotosuperkapasitor merupakan gabungan dari *Dye Sensitized Solar Cell* (DSSC) dengan superkapasitor yang dapat menyimpan sekaligus mengkonversi energi matahari menjadi energi listrik (Masrul *et al.*, 2019).

Superkapasitor berpotensi sebagai sistem penyimpanan energi karena kemampuan daya tinggi, siklus hidup panjang, dan ramah lingkungan (Seval *et al.*, 2019; Tetra *et al.*, 2017). Pada tahun 2019, Shinde *et al.* (2019) telah membuat superkapasitor berbahan *rutheniumoxide*, akan tetapi bahan tersebut tidak ramah lingkungan dan sangat mahal sekitar US\$ 15,00- US\$ 38,00/gram. Untuk sistem konversi energi matahari menjadi energi listrik digunakan DSSC yang efisien, fleksibel, efisiensi konversi tinggi, dan ramah lingkungan (Aksoy *et al.*, 2019; Chatterjee and Karki, 2020). Pada umumnya, DSSC difabrikasi menggunakan bahan semikonduktor TiO_2 yang paling cocok sebagai bahan aktif DSSC (Dubey *et al.*, 2019). Akan tetapi efisiensi yang dihasilkan relatif rendah yaitu sekitar 1,67–2,66% (Luo *et al.*, 2019; Yi *et al.*, 2019).

DSSC terdiri dari elektroda kerja, elektroda lawan, *dye*, dan elektrolit. Elektroda kerja yang banyak digunakan adalah TiO_2 yang dikombinasikan dengan ZnO sebagai penyerap *dye* (Bhattacharya and Datta, 2020). Gabungan dari TiO_2 dengan ZnO *nanoflower* berpotensi menghasilkan *fotoanoda* yang memiliki mobilitas elektron yang tinggi, celah pita yang lebar, serta mampu meningkatkan sifat optik dari DSSC (Bhattacharya and Datta, 2020). Sejauh ini hanya beberapa peneliti yang berhasil membuat fotosuperkapasitor berbasis FTO/ ZnO/TiO_2 untuk DSSC dan bahan karbon/Al/PVDF- BaTiO_3 sebagai bahan superkapasitor. Salah satunya yaitu Masrul *et al.* (M Z Masrul *et al.*, 2019) dan Ramya *et al.* (2021) yang telah berhasil membuat fotosuperkapasitor dengan pengaruh DSSC TiO_2/ZnO berstruktur nanorod dan nanodot menggunakan teknik sol gel. Namun, efisiensi DSSC dari piranti tersebut relatif rendah yaitu 0,068% dan 2,45%. Pada tahun 2020, Borbón *et al.*, (2020) juga melakukan riset DSSC berbasis ZnO berstruktur *nanoflower* yang disintesis menggunakan teknik *solvothermal* dan berhasil meningkatkan efisiensi. Akan tetapi teknik *solvothermal* tidak praktis, membutuhkan waktu yang lama dan mahal (Borbón *et al.*, 2020). Oleh karena itu, pada riset ini digunakan ZnO *nanoflower* kombinasi dengan TiO_2 sebagai bahan semikonduktor yang dideposisikan menggunakan teknik *spray coating*. ZnO berstruktur *nanoflower* mampu meningkatkan penyerapan cahaya dan *dye* sehingga meningkatkan efisiensi DSSC (Shakeel Ahmad *et al.*, 2017). ZnO berstruktur *nanoflower* lebih baik dalam meningkatkan efisiensi DSSC dibandingkan dengan struktur ZnO yang lainnya. Hal tersebut terbukti dengan adanya riset Masrul *et al.* (2019), serta teknik *spray* memiliki keunggulan dapat menutupi area yang luas dengan cepat dalam prosesnya membutuhkan sedikit larutan yang digunakan (BIMANTARA, n.d.).

Struktur *nanoflower* dapat terbentuk jika teknik *spray* yang dilakukan tepat. Pembentukan struktur *nanoflower* yang mampu meningkatkan efisiensi DSSC dipengaruhi oleh beberapa faktor, baik lama *spray*, jarak *spray*, tekanan *spray*, dan ketebalan lapisan *spray* (Vinayagam et al., 2021). Faktor tersebut akan memengaruhi ukuran *sprayer* yang keluar dari alat *spray* (Abdulrahman and Abd-Alghafour, 2022). Sebelumnya pernah dilakukan riset oleh Vita (Vita dkk., 2021) mengenai pengaruh jarak *spray* ZnO dan didapatkan efisiensi 3,07%, namun sejauh ini belum ada laporan riset yang mengkaji berbagai peralatan *spray* yang menghasilkan berbagai ukuran *nanoflower*. Padahal ukuran *nanospray* dan tekanan *spray* sangat menentukan kinerja DSSC.

Berdasarkan hal tersebut, maka sangat penting dilakukan riset mengenai pengaruh tekanan dan ukuran *nanospray* ZnO terhadap karakteristik ZnO *nanoflower* dan performa fotosuperkapasitor. Oleh karena itu penting untuk melakukan riset pengaruh tekanan dan ukuran *nanospray* ZnO *nanoflower* untuk optimasi performa fotosuperkapasitor sebagai media pemanen dan penyimpan energi. Manfaat dan urgensi riset ini adalah untuk memberi solusi permasalahan energi dan sebagai bahan acuan dalam riset selanjutnya. Harapan dalam riset selanjutnya dapat dilakukan rekayasa lanjutan yang berdasarkan material FTO/ZnO *nanoflower*/TiO₂/BaTiO₃/ karbon aktif/*carbon black*.

METODE

Penelitian ini dilakukan di Laboratorium Material Departemen Fisika Universitas Negeri Malang. Variabel bebas dalam riset ini adalah tekanan *spray* 3, 4, dan 5 bar, serta ukuran *sprayer* 0,3, 0,4, dan 0,5 nm. Variabel kontrol meliputi waktu *spray* 10 detik, jarak *spray* 15 cm, massa bahan, suhu, waktu perendaman, dan konsentrasi *dye*. Variabel terikat meliputi struktur *nanoflower*, kristalinitas, ukuran kristal, dan efisiensi DSSC.

1. Material

Bahan yang digunakan dalam riset meliputi BL-1 *Blocking layer* (Greatcell Solar Materials Pty Ltd), FTO (KGC Scientific), 18NR-T *Titania Paste* (Greatcell Solar Materials Pty Ltd), PEG 6000 Sigma Aldrich, HNO₃ Sigma Aldrich, Triton-X Sigma Aldrich, 2-*Propanol Merck*, Titanium (IV) Isopropoxide (Sigma Aldrich), *ethanol absolute for analysis* EMSURE ACS (Merck), N719 *Dye* (Greatcell Solar Materials Pty Ltd), *Acetonitrile Merck*, KI Sigma Aldrich, I₂ (Sigma Aldrich), *Zinc acetate dehydrate* (Zn(CH₃COO)₂·2H₂O) *for analysis* EMSURE ACS (Merck), *Monoethanolamine* (MEA) Merck, *Zinc nitrate tetrahydrate for analysis* EMSURE ACS (Merck), Hexamethylene-tetramine (Merck), DI Water (OneMed), BaTiO₃ EMSURE ACS (Merck), karbon aktif, *carbon black*, NMP *for analysis* EMSURE ACS (Merck), PVDF (Sigma Aldrich), substrat *aluminium foil*, dan Acetone (Sigma Aldrich).

Peralatan yang digunakan dalam riset ini meliputi sonikator 40 MHz, *magnetic stirrer*, oven, gelas beker 20 mL, gelas beker 500 mL, gelas beker 100 mL, gelas beker 50 mL, botol vial 10 mL, termometer by Sigma Aldrich, cawan petri Anumbra, *petridish Onemed* 90 mm, spatula, neraca digital (0,01 gr), kertas timbang, pipet tetes, gelas ukur 10 mL, hot plate *Thermo Scientific*, *doctor blade*, *Agate mortar*,

pH universal Indicator (MQuant), mikro pipet, pinset anatomi, *disposable syringe* 10 mL, *Onemed yellow tip* 200 μ L.

2. Fabrikasi FTO/ZnO nanoflower/TiO₂/N719

Langkah pertama adalah mencampur Zn(CH₃COO)₂.2H₂O dan etanol menggunakan *magnetic stirrer* pada *hotplate* pada 70°C selama 45 menit. Kemudian ditambahkan *Monoethanolamine* (MEA), diaduk menggunakan *magnetic stirrer* 70°C selama 2 jam sampai homogen. Larutan yang dihasilkan dideposisi menggunakan teknik *spray coating* pada substrat FTO di atas *hotplate* pada suhu 90°C. Film tipis ZnO pada substrat glass FTO (ZnO/FTO) dilakukan dengan mendeposisi menggunakan *nanospray* selama 10 detik dengan jarak *spray* 15 cm. Untuk alat *spray* yang digunakan menggunakan 3 merk yang memiliki ukuran berbeda yaitu 0,3, 0,4, dan 0,5 mm kemudian setelah menemukan ukuran terbaik, selanjutnya memberikan variasi tekanan pada alat *spray* yang berbeda yaitu 3, 4, dan 5 bar. Selanjutnya film dilakukan *annealing* selama 1 jam pada suhu 90°C. ZnO *nanoflower* dibentuk dengan merendam film tipis ZnO/FTO ke dalam larutan Zn nitrat pada suhu 100°C selama 6 jam. Film tipis dicuci menggunakan DI *water*, kemudian dilakukan *annealing* pada suhu 550°C selama 2 jam. Film tipis diuji menggunakan XRD, SEM-EDX, dan UV-vis. Bagian DSSC difabrikasi dengan mendeposisikan larutan TiO₂ pada FTO/ZnO *nanoflower* menggunakan teknik *spray coating* (Huang et al., 2018), kemudian direndam dalam larutan *dye* N719 selama 24 jam.

3. Fabrikasi superkapasitor berbasis BaTiO₃/Karbon Aktif/Carbon Black

Fabrikasi superkapasitor dimulai dengan melarutkan 0.2 g PVDF dalam 3 mL NMP di atas *hotplate* dengan suhu 80°C dan kecepatan putar 600 rpm selama 1 jam. Selanjutnya menambahkan 0,2 g *carbon black* + 1 mL NMP, 1,12 g *activated carbon* + 1 mL NMP, 0,48 g BaTiO₃ + 1 mL NMP, dan dilakukan pengadukan selama 22 jam pada suhu ruang dengan kecepatan putar 800 rpm. Larutan yang terbentuk disebut dengan elektroda. Kemudian dideposisi pada substrat *aluminium foil* menggunakan teknik *doctor blade* yakni teknik pelapisan elektroda di atas *aluminium foil* (Hsieh et al., 2020) dan dipanaskan di dalam oven bersuhu 80°C selama 1 jam.

4. Fabrikasi fotosuperkapasitor FTO/ZnO nanoflower/TiO₂/N719/BaTiO₃/Karbon Aktif/Carbon Black

Fabrikasi fotosuperkapasitor menggunakan elektrolit KI pada bagian DSSC dan pada bagian superkapasitor menggunakan elektrolit KOH. Kemudian dilakukan uji karakterisasi XRD. Pola difraksi sinar-X (XRD) dari ZnO *nanoflower* direkam oleh X-Ray Diffractometer Merk Pan Analytical, Type: E`xpert Pro dengan menggunakan penyinaran Cu K α . Morfologi ZnO *nanoflower* diamati menggunakan Scanning Electron Mycroscopy Merk FEI, Type: Inspect-S50 dengan perbesaran 25 ribu kali. Absorbansi dari TiO₂/ZnO *nanoflower* diukur menggunakan spektrofotometer UV-vis tipe UV-1700 Shimadzu dengan jarak panjang gelombang 200-700 nm. Pengukuran kinerja DSSC TiO₂/ZnO *nanoflower* dilakukan menggunakan Elektrometer I-V Keithley 2400 dan Solar simulator Abet 10500. Kapasitansi spesifik superkapasitor diukur menggunakan alat uji *charge discharge* NEWARE.

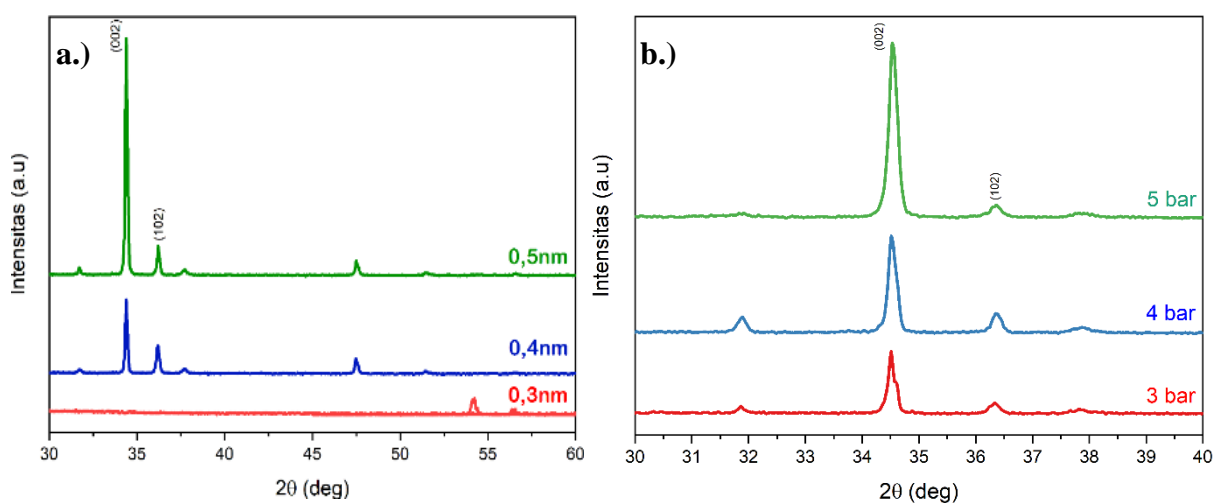
5. Karakterisasi dan analisis data fotosuperkapasitor

Fotosuperkapasitor dikarakterisasi dengan menggunakan berbagai macam uji, ada uji XRD untuk mengetahui fasa kristal material dari ZnO dengan menggunakan X-Ray Diffractometer Merk Pan Analytical. Dengan menggunakan persamaan *Debye Scherrer* didapatkan ukuran kristal serta kristanilitas ZnO terhadap pengaruh tekanan dan ukuran. Dari hasil uji SEM dengan bantuan *software origin* didapatkan porositas dari material ZnO untuk mengetahui besar porinya. Kemudian dari karakterisasi UV-vis juga dapat diketahui *bandgap* dari TiO₂/ZnO menggunakan metode Tauc. Metode ini mengetahui kecepatan eksitasi dari elektron yang ada di DSSC. Untuk mengetahui hubungan antara pengaruh tekanan dan ukuran *nanospray* terhadap performa superkapasitor, digunakan karakterisasi solar simulator. Setelah didapatkan efisiensi dari masing-masing variasi, kemudian dilakukan *fitting* untuk mendapatkan pola grafik efisiensi. Superkapasitor dikarakterisasi dengan *charge discharge* dan analisis untuk mengetahui kapasitas serta ketahanan kerja.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Analisis Kristal ZnO Nanoflower

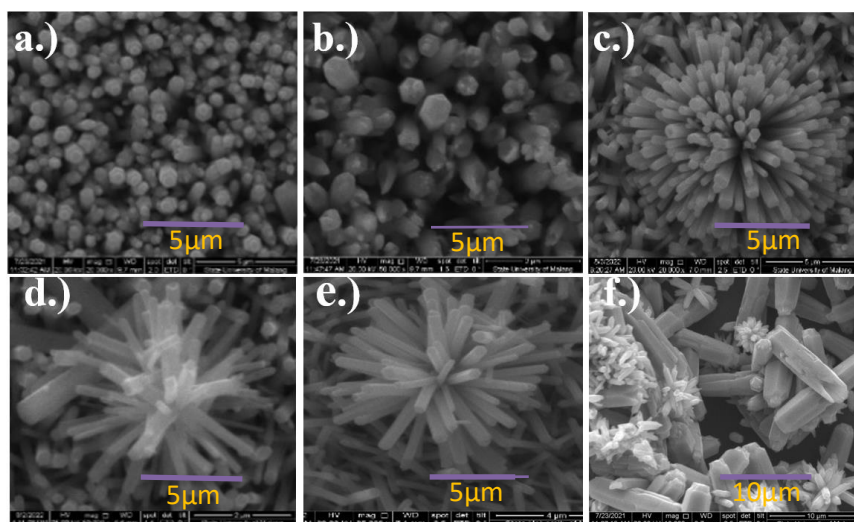
Ukuran kristal untuk variasi ukuran *spray* 0,3 nm, 0,4 nm, dan 0,5 nm berturut-turut adalah 38,60; 38,96; dan 39,15 nm dan variasi tekanan 3, 4, dan 5 bar *spray* adalah 39,93; 42,36; dan 43,25 nm. Ukuran kristal yang diperoleh tidak jauh beda dengan ukuran ZnO *nanoflower* yang diperoleh oleh Qu et al. (2020) berkisar antara 20-32 nm. Hasil riset menunjukkan bahwa penambahan tekanan dan ukuran *spray* secara efektif meningkatkan kristalinitas dan ukuran kristal ZnO. Pada variasi ukuran *spray* didapatkan kristalinitas 54,77%, 55,04%, dan 55,81% dan pada variasi tekanan *spray* didapatkan kristalinitas 55,77%, 58,04%, dan 59,81%. Kristalinitas yang meningkat memberikan peluang rekombinasi elektron lebih rendah yang berdampak pada peningkatan nilai *Voc*. Selain itu, ukuran kristal yang besar meningkatkan kinerja hamburan dan fotovoltaiik yang lebih baik (Lin et al., 2013; Ramya et al., 2021). Untuk lebih jelasnya pola difraksi data XRD ditampilkan oleh Gambar 1



Gambar 1. (a) Pola XRD film ZnO *nanoflower* variasi ukuran *spray* dan (b) tekanan *spray*

Pengaruh Tekanan dan Ukuran *Spray* ZnO pada Morfologi dan Porositas

Gambar 2 menunjukkan gambar struktur ZnO yang terbentuk pada ukuran *spray* 0,3 nm, 0,4 nm, dan 0,5 nm serta tekanan *spray* 3 bar, 4 bar, dan 5 bar. Hasil SEM menunjukkan bahwa ZnO struktur *nanoflower* terbentuk pada tekanan 5 bar, sedangkan pada tekanan dan ukuran lain terbentuk ZnO *nanorod*.

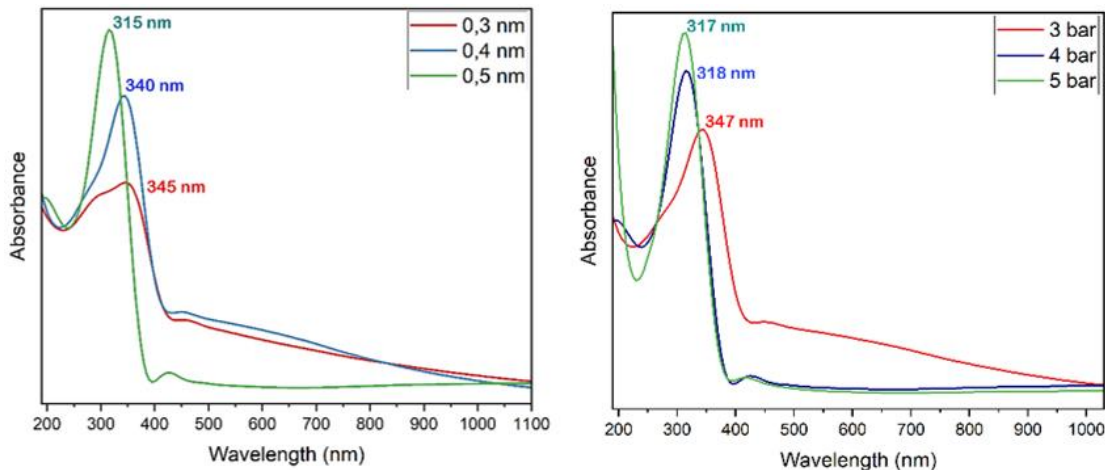


Gambar 2. Gambar SEM ZnO *nanoflower* dari ukuran *spray* (a) 0,3 nm, (b) 0,4 nm, dan (c) 0,5 nm dan tekanan *spray* (d) 3 bar, (e) 4 bar, dan (f) 5 bar

Jika tekanan yang digunakan semakin kecil, maka partikel ZnO yang dideposisi akan menumpuk pada suatu titik tertentu begitu pula untuk ukuran *nanospray*. Sedangkan jika tekanan dan ukuran *spray* yang digunakan semakin besar, maka partikel ZnO yang di *spray* akan menyebar pada semua sisi substrat (Pandey et al., 2021). Sayyed et al. (2020) melaporkan bahwa ZnO berstruktur *nanoflower* mampu meningkatkan *surface area* sehingga dapat menyerap *dye* lebih banyak. Selain itu, melalui analisis gambar SEM diperoleh data porositas masing-masing sampel. Porositas tertinggi dicapai oleh film ZnO/FTO pada tekanan 5 bar dan pada ukuran *spray* 0,5 nm. Hasil menunjukkan kenaikan porositas yang linier dengan tekanan dan ukuran *nanospray* yang semakin besar. Porositas yang tinggi dapat meningkatkan luas permukaan dan dapat meningkatkan saluran transportasi pembawa muatan (Wang et al., 2020).

Pengaruh Tekanan dan Ukuran *Spray* ZnO terhadap *Bandgap*

Spektrum serapan UV-vis TiO₂ yang dispray ZnO *nanoflower* pada variasi ukuran *sprayer* 0,3, 0,4, dan 0,5 nm dan variasi tekanan *spray* 3, 4, dan 5 bar berada kisaran panjang gelombang 200 hingga 700 nm dan ditunjukkan pada Gambar 3.



Gambar 3. Spektrum serapan UV-vis TiO_2/ZnO nanoflower pada ukuran *spray* (kiri) dan tekanan *spray* (kanan)

Dari kurva Gambar 3 dapat dihitung bandgap optik menggunakan metode Tauc. *Bandgap* masing-masing variasi ukuran *spray* berturut-turut adalah 5,06, 4,88, dan 4,56 eV serta variasi tekanan *spray* berturut-turut 4,58, 4,29, dan 4,23 eV. Terlihat bahwa semakin besar tekanan dan ukuran *nanospray* maka *bandgap* yang dihasilkan semakin menurun. *Bandgap* terkecil diperoleh pada tekanan *spray* 5 bar yang ditunjukkan pada Tabel 1. Pergeseran *bandgap* kearah yang lebih kecil menunjukkan adanya peningkatan kristalinitas (Hyunggun Ma, 2019). Gejala pergeseran ini sesuai dengan kristalinitas yang dihasilkan pada riset ini.

Tabel 1. Energi *bandgap* masing-masing variasi tekanan dan ukuran *spray* ZnO nanoflower

Variasi Ukuran dan Tekanan <i>spray</i>	0,3 nm	0,4 nm	0,5 nm	3 bar	4 bar	5 bar
<i>Bandgap</i> (eV)	5,06	4,88	4,56	4,58	4,29	4,23

Performa Konversi Energi DSSC

Performa DSSC dapat dilihat dari efisiensi yang dihasilkan melalui uji solar simulator yang ditunjukkan pada Tabel 2.

Tabel 2. Parameter Hasil Uji Solar Simulator

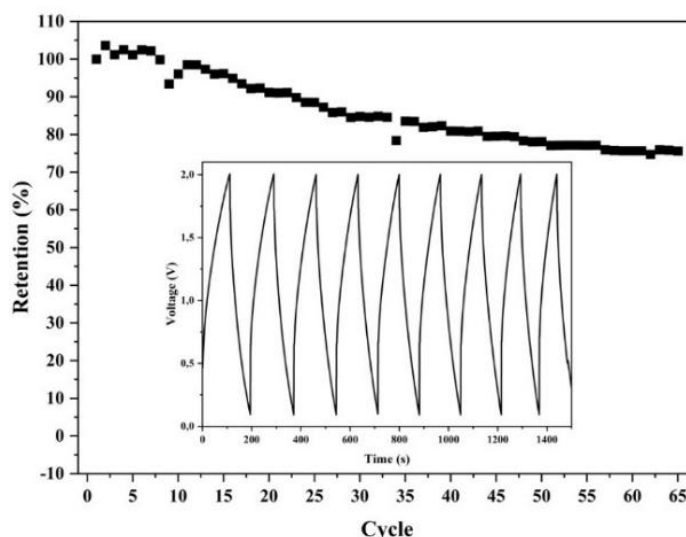
Parameter

Variasi ukuran dan tekanan <i>spray</i> ZnO	I_{sc} (mA)	V_{oc} (V)	P_{max} (mV)	Efisiensi (%)
0,3 nm	3,44	0,748	1,52	6,08
0,4 nm	3,31	0,786	1,54	6,18
0,5 nm	3,67	0,792	1,57	6,26
3 bar	4,02	0,821	1,65	6,59
4 bar	4,48	0,841	1,73	6,94
5 bar	4,67	0,851	1,76	7,02

Berdasarkan Tabel 2, dapat dilihat bahwa efisiensi DSSC meningkat seiring dengan semakin besar ukuran dan tekanan *spray*. Efisiensi terbesar yang diperoleh pada riset ini adalah sebesar 7,02%, yaitu pada tekanan *spray* 5 bar dengan struktur *nanoflower*. Hasil ini sesuai dengan kristalinitas dan ukuran partikel kristal yang semakin meningkat. Ukuran kristal yang meningkat mengarah pada kemungkinan rekombinasi elektron yang lebih rendah yang mengakibatkan nilai Voc pada uji solar simulator menjadi lebih tinggi, sehingga meningkatkan efisiensi dari DSSC (Lin et al., 2013). Ukuran partikel kristal yang besar menunjukkan kinerja hamburan dan fotovoltaiik yang lebih baik (Ramya et al., 2021). Secara garis besar, peningkatan ukuran partikel kristal, dan porositas mengakibatkan peningkatan luas permukaan spesifik yang memungkinkan pemuatan *dye* semakin banyak, sehingga absorpsi dan efisiensi akan meningkat (Mahmood et al., 2016). Tekanan dan ukuran *nanospray* yang semakin besar, performa fotosuperkapasitor juga semakin meningkat yang didukung dengan kristalinitas tinggi sehingga *bandgap* semakin kecil yang membuat efisiensi semakin besar.

Performa Superkapasitor

Performa superkapasitor dapat dilihat dari kapasitansi spesifik superkapasitor yang diperoleh dari hasil analisis uji *Charge Discharge* yang ditunjukkan pada Gambar 4.



Gambar 4. Hasil uji *Charge Discharge Cycle* dan Kapasitansi spesifik

Siklus hidup superkapasitor yang telah dibuat, dapat dilihat berdasarkan *cycle Charge Discharge* dan kapasitansi spesifik yang dihasilkan yang ditunjukkan pada Gambar 4. Pada riset ini, dilakukan uji *charge discharge* sebanyak 65 kali pengisian dan pengosongan secara terus menerus dengan arus yang

diterapkan sebesar 0,05 A/g. Setelah dilakukan 65 kali pengujian, superkapasitor mampu mempertahankan 72,7% kapasitansinya dari kapasitansi awal.

SIMPULAN

ZnO dengan struktur *nanoflower* telah berhasil dibuat dengan teknik *spray coating*. Struktur *nanoflower* telah dikonfirmasi menggunakan hasil analisis XRD dan SEM. Hasil analisis menunjukkan bahwa kristalinitas, ukuran kristal, dan porositas semakin besar seiring bertambahnya tekanan dan ukuran *nanospray*, sehingga mampu menambah luas permukaan spesifik serta menurunkan *bandgap*. Luas permukaan spesifik dapat meningkatkan penyerapan *dye* dan difusi elektrolit, sehingga efisiensi DSSC yang dihasilkan semakin tinggi dan berdampak pada performa fotosuperkapasitor semakin baik. Energi konversi matahari dari DSSC disimpan pada superkapasitor dengan tegangan kerja 2V dan ketahanan 72,70%. Metode yang lebih sederhana dan murah ini mampu menjadi solusi sumber energi alternatif pembangkit listrik tenaga surya dengan kapasitas penyimpanan tinggi.

ACKNOWLEDGMENT

Terima kasih penulis kepada Laboratorium Fisika Material, Laboratorium Sentral, dan Laboratorium Terpadu Universitas Negeri Malang serta berbagai pihak yang terkait sehingga riset dapat dilaksanakan dengan baik.

DAFTAR PUSTAKA

- Abdulrahman, A.F., Abd-Alghafour, N.M., 2022. Synthesis and characterization of ZnO nanoflowers by using simple spray pyrolysis technique. *Solid-State Electron*. 189, 108225.
- Aksoy, S., Gorgun, K., Caglar, Y., Caglar, M., 2019. Effect of loading and standby time of the organic dye N719 on the photovoltaic performance of ZnO based DSSC. *J. Mol. Struct.* 1189, 181–186. <https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2019.04.040>
- Al Hakim, R.R., 2020. Model Energi Indonesia, Tinjauan Potensi Energi Terbarukan untuk Ketahanan Energi di Indonesia: Sebuah Ulasan. *J. Pengabd. Kpd. Masy.* 1.
- Assiddiq, H., 2018. Studi pemanfaatan energi matahari sebagai sumber energi alternatif terbarukan berbasis sel fotovoltaik untuk mengatasi kebutuhan listrik rumah sederhana di daerah terpencil. *Al Jazari* 3, 270993.
- Bhattacharya, S., Datta, J., 2020. Wide-low energy coupled semi-conductor layers of TiO₂-CdX boosting the performance of DSSC. *Sol. Energy* 208, 674–687.
- BIMANTARA, B.A., n.d. Pengaruh Tekanan Udara dan Spray Angle Pelapisan Al₂O₃ (Aluminum Oksida) pada Baja ST41 menggunakan Metode Flame Spray Coating. FAKULTAS TEKNIK.
- Borbón, S., Lugo, S., López, I., 2020. Dye-Sensitized Solar Cells: Improving the Energy Production Through the Application of Nanotechnology, in: Kharissova, O.V., Martínez, L.M.T., Kharisov, B.I. (Eds.), *Handbook of Nanomaterials and Nanocomposites for Energy and Environmental Applications*. Springer International Publishing, Cham, pp. 1–33. https://doi.org/10.1007/978-3-030-11155-7_38-1
- Brockway, P.E., Owen, A., Brand-Correa, L.I., Hardt, L., 2019. Estimation of global final-stage energy-return-on-investment for fossil fuels with comparison to renewable energy sources. *Nat. Energy* 4, 612–621.
- Chatterjee, S., Karki, I.B., 2020. Effect of Photoanodes on the Performance of Dye-Sensitized Solar Cells. *J. Inst. Eng.* 15, 62–68. <https://doi.org/10.3126/jie.v15i3.32008>
- Dubey, R.S., Krishnamurthy, K.V., Singh, S., 2019. Experimental studies of TiO₂ nanoparticles synthesized by sol-gel and solvothermal routes for DSSCs application. *Results Phys.* 14, 102390. <https://doi.org/10.1016/j.rinp.2019.102390>

- Hsieh, C.-H., Lu, Y.-C., Yang, H., 2020. Self-assembled mechanochromic shape memory photonic crystals by doctor blade coating. *ACS Appl. Mater. Interfaces* 12, 36478–36484.
- Huang, J., Yuan, Z., Gao, S., Liao, J., Eslamian, M., 2018. Understanding Spray Coating Process: Visual Observation of Impingement of Multiple Droplets on a Substrate. *J. Shanghai Jiaotong Univ. Sci.* 23, 97–105. <https://doi.org/10.1007/s12204-018-1914-0>
- Hyunggun Ma, 2019. Influence of Heat Treatments on the Properties of ZnO Nanorods Prepared by Hydrothermal Synthesis. *Semiconductors* 53, 1811–1816. <https://doi.org/10.1134/S106378261913013X>
- Lin, Y.-H., Faber, H., Zhao, K., Wang, Q., Amassian, A., McLachlan, M., Anthopoulos, T.D., 2013. High-Performance ZnO Transistors Processed Via an Aqueous Carbon-Free Metal Oxide Precursor Route at Temperatures Between 80-180 °C. *Adv. Mater.* 25, 4340–4346. <https://doi.org/10.1002/adma.201301622>
- Luo, D., Liu, B., Fujishima, A., Nakata, K., 2019. TiO₂ Nanotube Arrays Formed on Ti Meshes with Periodically Arranged Holes for Flexible Dye-Sensitized Solar Cells. *ACS Appl. Nano Mater.* 2, 3943–3950. <https://doi.org/10.1021/acsanm.9b00849>
- Mahmood, M.A., Jan, S., Shah, I.A., Khan, I., 2016. Growth Parameters for Films of Hydrothermally Synthesized One-Dimensional Nanocrystals of Zinc Oxide. *Int. J. Photoenergy* 2016, 1–12. <https://doi.org/10.1155/2016/3153170>
- Masrul, M. Z., Suprayogi, T., Diantoro, M., Fuad, A., Latifah, E., Hidayat, A., 2019. The effect of light irradiation on performance of photo-supercapacitor of FTO/TiO₂-ZnO-β Carotene-Quercetin/Carbon/Al/PVDF-BaTiO₃/Al, in: *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. IOP Publishing, p. 012077.
- Masrul, M Z, Suprayogi, T., Diantoro, M., Fuad, A., Latifah, E., Hidayat, A., 2019. The Effect of Light Irradiation on Performance of Photo-Supercapacitor of FTO/TiO₂ -ZnO-β Carotene-Quercetin/Carbon/Al/PVDF-BaTiO₃ /Al. *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.* 515, 012077. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/515/1/012077>
- Nasional, D.E., 2019. Indonesia energy out look 2019. *J Chem Inf Model* 53, 1689–1699.
- Pandey, S., Bansal, A., Omer, A., Singla, A.K., Goyal, D.K., Singh, J., Gupta, M.K., 2021. Effect of fuel pressure, feed rate, and spray distance on cavitation erosion of Rodojet sprayed Al₂O₃+50%TiO₂ coated AISI410 steel. *Surf. Coat. Technol.* 410, 126961. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2021.126961>
- Qu, Y., Huang, R., Qi, W., Shi, M., Su, R., He, Z., 2020. Controllable synthesis of ZnO nanoflowers with structure-dependent photocatalytic activity. *Catal. Today* 355, 397–407. <https://doi.org/10.1016/j.cattod.2019.07.056>
- Ramya, M., Nideep, T.K., Nampoore, V.P.N., Kailasnath, M., 2021. The impact of ZnO nanoparticle size on the performance of photoanodes in DSSC and QDSSC: a comparative study. *J. Mater. Sci. Mater. Electron.* 32, 3167–3179. <https://doi.org/10.1007/s10854-020-05065-0>
- Santoso, A.D., Salim, M.A., 2019. Penghematan Listrik Rumah Tangga dalam Menunjang Kestabilan Energi Nasional dan Kelestarian Lingkungan Household Electricity Savings to Support National Energy Stability and Environmental Sustainability. *J. Teknol. Lingkung.* 20, 263–270.
- Sayed, S.A.A.R., Beedri, N.I., Bhujbal, P.K., Shaikh, S.F., Pathan, H.M., 2020. Eosin-Y Sensitized Bi-layered ZnO Nanoflower-CeO₂ Photoanode for Dye-Sensitized Solar Cells Application. *ES Mater. Manuf.* <https://doi.org/10.30919/esmm5f939>
- Seval, A., Gorgun, K., Caglar, Y., Caglar, M., 2019. Effect of loading and standby time of the organic dye N719 on the photovoltaic performance of ZnO based DSSC 1189, 181–186. <https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2019.04.040>
- Shakeel Ahmad, M., Pandey, A.K., Abd Rahim, N., 2017. Advancements in the development of TiO₂ photoanodes and its fabrication methods for dye sensitized solar cell (DSSC) applications. A review. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 77, 89–108. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.03.129>
- Shinde, S.K., Mohite, S.M., Kadam, A.A., Yadav, H.M., Ghodake, G.S., Rajpure, K.Y., Lee, D.S., Kim, D.-Y., 2019. Effect of deposition parameters on spray pyrolysis synthesized CuO nanoparticle thin films for higher supercapacitor performance. *J. Electroanal. Chem.* 850, 113433. <https://doi.org/10.1016/j.jelechem.2019.113433>

- Tetra, O.N., Syukri, Alif, A., Fristina, R., Aziz, H., 2017. Utilization of porous carbon from waste palm kernel shells on carbon paper as a supercapacitors electrode material. *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.* 65, 012053. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/65/1/012053>
- Verbič, A., Gorjanc, M., Simončič, B., 2019. Zinc oxide for functional textile coatings: Recent advances. *Coatings* 9, 550.
- Vinayagam, R., Pai, S., Varadavenkatesan, T., Pugazhendhi, A., Selvaraj, R., 2021. Characterization and photocatalytic activity of ZnO nanoflowers synthesized using *Bridelia retusa* leaf extract. *Appl. Nanosci.* 1–10.
- Wang, D., An, Y., Gao, S., 2020. Synthesis and characterization of urchin-like CuO nanorod/TiCu-based metallic glass core-shell powders with surface photovoltage performance. *Appl. Surf. Sci.* 506, 144871. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2019.144871>
- Yi, Z., Zeng, Y., Wu, H., Chen, X., Fan, Y., Yang, H., Tang, Y., Yi, Y., Wang, J., Wu, P., 2019. Synthesis, surface properties, crystal structure and dye-sensitized solar cell performance of TiO₂ nanotube arrays anodized under different parameters. *Results Phys.* 15, 102609. <https://doi.org/10.1016/j.rinp.2019.102609>

