



## PENINGKATAN PERFORMA DYE SENSITIZED SOLAR CELL (DSSC) BERBASIS $\text{TiO}_2$ MESOPORI DAN PEWARNA ALAMI ANTOSIANIN: PENGARUH SURFACTANT DAN WAKTU ADSORPSI

Sarinah Pakpahan<sup>1)</sup> Siti Fauziah<sup>2)</sup>

<sup>1,2)</sup>Program Studi Teknologi Rekayasa Energi Terbarukan, Sekolah Vokasi UNG

Email: sarinahpakpahan@ung.ac.id<sup>1)</sup>

Indonesia

### ABSTRACT

*Dye-Sensitized Solar Cells (DSSCs) offer a cheaper, more flexible, and eco-friendly alternative to silicon-based solar cells. This research aims to enhance the efficiency of DSSCs by optimizing the photoanode material ( $\text{TiO}_2$ ) and the sensitizer (dye). Mesoporous  $\text{TiO}_2$  was successfully synthesized using the coprecipitation method with the aid of CTAB surfactant to increase the specific surface area. The natural dye used was Red Spinach (*Amaranthus tricolor*) extract, rich in anthocyanin pigments. DSSC fabrication was performed using the doctor blade technique on FTO glass substrates. The study variables included material comparison (Mesoporous  $\text{TiO}_2$  vs. Technical-grade  $\text{TiO}_2$ ) and electrode soaking time (2, 4, and 6 hours). Characterization results showed that the use of Mesoporous  $\text{TiO}_2$  yielded the highest efficiency of 1.85% ( $J_{sc} = 6.50 \text{ mA/cm}^2$ ,  $V_{oc} = 0.52 \text{ V}$ ,  $FF = 0.54$ ), significantly outperforming the technical-grade  $\text{TiO}_2$  which only achieved 1.25%. This efficiency enhancement is attributed to the smaller crystal size of  $\text{TiO}_2$  (2.751 nm), which increases the surface area for dye adsorption, and the optimum soaking time of 6 hours. These findings confirm the potential of Mesoporous  $\text{TiO}_2$  and natural anthocyanin dyes for sustainable DSSC development.*

**Keywords:** DSSC, Mesoporous  $\text{TiO}_2$ , Anthocyanin, Red Spinach, Coprecipitation, Efficiency

### ABSTRAK

Dye-Sensitized Solar Cell (DSSC) menawarkan alternatif sel surya berbasis silikon yang lebih murah, fleksibel, dan ramah lingkungan. Penelitian ini bertujuan untuk meningkatkan efisiensi DSSC dengan mengoptimalkan material fotoanoda ( $\text{TiO}_2$ ) dan *sensitizer* (pewarna).  $\text{TiO}_2$  mesopori berhasil disintesis menggunakan metode kopresipitasi dengan bantuan surfactant CTAB untuk meningkatkan luas permukaan spesifik. Pewarna alami yang digunakan adalah ekstrak Bayam Merah (*Amaranthus tricolor*) yang kaya akan pigmen antosianin. Fabrikasi DSSC dilakukan menggunakan teknik *doctor blade* pada substrat kaca FTO. Variasi penelitian meliputi perbandingan material ( $\text{TiO}_2$  Mesopori dan  $\text{TiO}_2$  Teknis) dan waktu perendaman elektroda (2, 4, dan 6 jam). Hasil karakterisasi menunjukkan bahwa penggunaan  $\text{TiO}_2$  Mesopori menghasilkan efisiensi tertinggi, yaitu 1,85% ( $J_{sc} = 6,50 \text{ mA/cm}^2$ ,  $V_{oc} = 0,52 \text{ V}$ ,  $FF = 0,54$ ), jauh lebih unggul dibandingkan  $\text{TiO}_2$  teknis yang hanya mencapai 1,25%. Peningkatan efisiensi ini disebabkan oleh ukuran kristal  $\text{TiO}_2$  yang lebih kecil (2,751 nm) yang meningkatkan luas permukaan untuk adsorpsi pewarna, serta waktu perendaman optimum selama 6 jam. Hasil ini mengonfirmasi potensi  $\text{TiO}_2$  Mesopori dan pewarna alami antosianin dalam pengembangan DSSC yang berkelanjutan.

**Kata kunci:** DSSC,  $\text{TiO}_2$  Mesopori, Antosianin, Bayam Merah, Kopresipitasi, Efisiensi

## 1. PENDAHULUAN

Sel surya tersensitisasi pewarna (Dye-Sensitized Solar Cells, DSSC) telah muncul sebagai teknologi fotovoltaik generasi ketiga yang menjanjikan, menawarkan potensi biaya produksi yang lebih rendah, fleksibilitas, dan proses fabrikasi yang lebih ramah lingkungan dibandingkan sel surya silikon konvensional (Chiang, 2024). DSSC meniru proses fotosintesis alami, di mana komponen utamanya terdiri dari fotoanoda semikonduktor berpori lebar (umumnya Titanium Dioksida,  $\text{TiO}_2$ ), pewarna sensitizer, elektrolit, dan elektroda lawan (katoda) (Oyibo, Barrett, Jois, Blackburn, & Lee, 2022).

Kinerja DSSC sangat bergantung pada tiga faktor utama: kemampuan pewarna menyerap foton (*Light Harvesting Efficiency*, LHE), efisiensi injeksi elektron dari pewarna ke  $\text{TiO}_2$ , dan minimisasi rekombinasi elektron (E. Supriyanto et al., 2022).  $\text{TiO}_2$  memainkan peran krusial; penggunaan nanokristal  $\text{TiO}_2$  dengan struktur mesopori bertujuan untuk menyediakan luas permukaan spesifik yang masif, yang secara langsung menentukan jumlah molekul pewarna yang dapat teradsorpsi (Al-Sammarraie, 2017).

Dalam beberapa tahun terakhir penelitian lebih banyak difokuskan pada penggantian pewarna sintetis, terutama pewarna sintetis yang berharga tinggi dan berpotensi beracun, seperti Ru-N719, dengan pewarna alami. Salah satu pigmen yang banyak dieksplorasi dan berfungsi sebagai sensitizer alami adalah antosianin, yang memberi warna merah, ungu, dan biru pada berbagai tanaman. Antosianin memiliki cukup banyak gugus fungsi seperti gugus karbonil dan hidroksil yang dapat berikatan kuat dengan permukaan  $\text{TiO}_2$  dan mendukung injeksi elektron (Pujiastuti, Kustiningsih, & Slamet, 2021). *Sensitizer* yang digunakan adalah ekstrak dari Bayam Merah (*Amaranthus tricolor*), yang mengandung jumlah antosianin yang signifikan. Meskipun potensi pewarna alami, efisiensi DSSC berbasis pewarna alami masih cenderung rendah, berkisar antara 0,01% hingga 2,6%. (Lee & Kim, 2016). Tantangan utama adalah meningkatkan LHE dan menekan rekombinasi (Nasikhudin et al., 2022). Penelitian ini juga memiliki beberapa tujuan, yaitu untuk menggabungkan keunggulan  $\text{TiO}_2$  mesopori yang disintesis secara terkontrol dengan kinerja *dye* ekstrak bayam merah dan membandingkan performa sel yang menggunakan  $\text{TiO}_2$  mesopori hasil sintesis dengan sel yang memakai  $\text{TiO}_2$  teknis standar. Disamping itu, penelitian ini juga mengevaluasi kemampuan sintesis  $\text{TiO}_2$  mesopori menggunakan surfaktan CTAB untuk menghasilkan kristal kecil dan luas permukaan kristal, yang menjadi hal penting untuk adsorpsi yang optimum dari pewarna yang diminati. Penelitian ini juga mengevaluasi pengaruh dari variasi waktu perendaman elektroda (2, 4, dan 6 jam) pada jumlah antosianin yang teradsorpsi dan, pada tingkat akhir, pada efisiensi konversi daya DSSC. Semoga, melalui optimalisasi proses adsorpsi dan perbandingan metode larutan  $\text{TiO}_2$  mesopori, penelitian ini yang dihasilkan akan menunjukkan kontribusi yang signifikan dalam memperbaiki efisiensi DSSC berbasis pewarna alami menjadi alternatif yang lebih disukai dan kompetitif secara ekonomi.

## 2. METODE PENELITIAN

Sintesis semikonduktor  $\text{TiO}_2$  mesopori secara basah kopresipitasi surfaktan. Langkah pertama adalah melarutkan prekursor Titanium (III) Klorida ( $\text{TiCl}_3$ ) dalam air/etanol. Agen pengendap amonium hidroksida ditambahkan bertahap sampai pH tertentu. Hal ini untuk membentuk endapan titanium hidroksida. Setelah penambahan surfaktan dan pembentukan gel, CTAB (Cetyl trimethyl ammonium bromide) dimasukkan ke dalam larutan pada langkah ini sebagai agen pembentuk pori. Endapan yang dihasilkan dicuci, dikeringkan, dan selanjutnya dikalsinasi dalam *furnace* suhu 450 °C selama 2 jam. Proses kalsinasi ini berfungsi untuk menghilangkan sisa organik CTAB dan mengkristalkan fase anatase  $\text{TiO}_2$  (Wei, Tan, Yu, & Zhao, 2011). Hasil sintesis diteruskan dengan karakterisasi XRD pada temperatur kamar untuk menentukan fasa dan ukuran kristalit pada ruang. Ukuran kristalit yang dihasilkan terkonfirmasi sebesar 2,751 nm.  $\text{TiO}_2$  teknis yang mempunyai ukuran kristalit lebih besar dipakai sebagai pembanding.

Pewarna ini adalah ekstrak dari daun bayam merah (*Amaranthus tricolor*). Daun bayam merah diekstraksi dengan pelarut metanol atau etanol yang sedikit diasamkan untuk menstabilkan pigmen antosianin (Junger, Udomrungskhajornchai, Grimmelsmann, Błachowicz, & Ehrmann, 2019). Setelah ekstrak dihasilkan, ekstrak tersebut disaring dan disimpan dalam gelap dan dingin untuk mencegah degradasi pigmen (A. Supriyanto, Prasada, Cari, & Fadli, 2017).

Fabrikasi DSSC mengikuti arsitektur sandwich standar. Pasta  $\text{TiO}_2$  (mesopori atau teknis) melapisi permukaan kaca FTO (*Fluorine doped Tin Oxide*) dengan metode doctor blade, untuk mendapatkan ketebalan film yang diinginkan (Willoughby et al., 2021). Elektroda kerja ini kemudian disinter pada suhu  $450^\circ\text{C}$ . Langkah penting selanjutnya adalah sensitisasi, di mana elektrode  $\text{TiO}_2$  direndam di dalam larutan ekstrak Bayam Merah dengan variasi lama 2 jam, 4 jam, dan 6 jam.



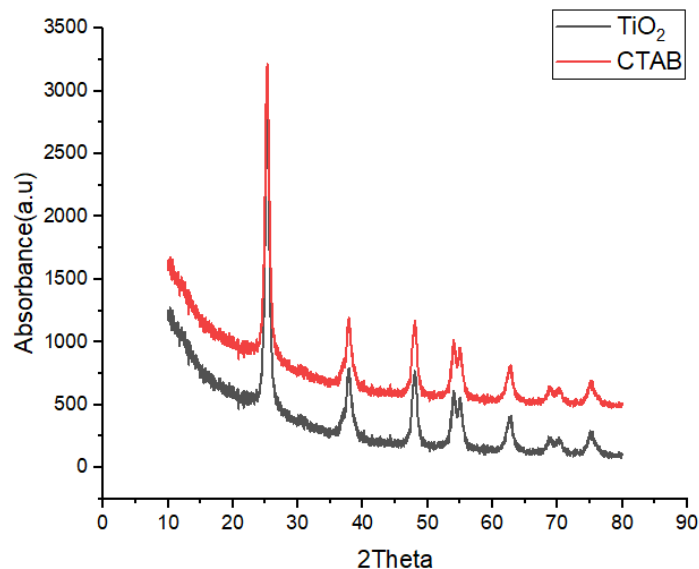
**Gambar 1** Struktur sel surya

Setelah dilakukannya sensitisasi, sel disatukan dengan *counter electrode* (FTO-glass berlapis karbon/grafit) menggunakan spacer dan diisi elektrolit yang mengandung pasangan redoks  $\text{I}^-/\text{I}_3^-$ . Pengukuran kinerja fotovoltaiik DSSC yang sudah terfabrikasi itu dilakukan dengan menggunakan rangkaian I-V dalam hal ini di bawah iluminasi untuk mendapatkan nilai (*cost*), (*current*), (*voltage*), dan sama Efisiensi (Verma, Kaur, Kaur, & Lotey, 2013).

### **3. HASIL DAN PEMBAHASAN**

#### **3.1. Karakterisasi Struktur $\text{TiO}_2$**

Pola difraksi sinar-X (XRD) dari sampel  $\text{TiO}_2$  dan  $\text{TiO}_2$  yang dimodifikasi dengan surfaktan CTAB ditunjukkan pada Gambar 1. Kedua sampel menampilkan puncak-puncak khas dari fase anatase  $\text{TiO}_2$ , dengan puncak intensitas tertinggi pada sudut  $2\theta \approx 25,3^\circ$  yang berasosiasi dengan bidang kristal (101), serta puncak lain pada  $37,8^\circ$ ,  $48,0^\circ$ ,  $53,9^\circ$ ,  $55,1^\circ$ , dan  $62,7^\circ$ , sesuai dengan data standar JCPDS No. 21-1272.



**Gambar 2** Pola Difraksi Sinar-X (XRD)  $\text{TiO}_2$  dan  $\text{TiO}_2\text{-CTAB}$

Perbedaan utama tampak pada intensitas puncak, dimana sampel  $\text{TiO}_2\text{-CTAB}$  (garis merah) menunjukkan intensitas yang lebih tinggi dibandingkan  $\text{TiO}_2$  murni (garis hitam). Hal ini menandakan bahwa penambahan surfaktan CTAB mampu meningkatkan kristalinitas material. CTAB (Cetyltrimethylammonium Bromide) berperan sebagai agen *templating*, yang membantu pembentukan struktur mesopori dengan pori teratur dan luas permukaan yang lebih besar (Honarmand, Mehr, Yarahmadi, & Siadati, 2019). Selama proses sintesis, molekul CTAB membentuk micelle yang menjadi cetakan sementara (template) bagi partikel  $\text{TiO}_2$ , menghasilkan ukuran kristal lebih kecil dan morfologi lebih homogen (Shamsudin et al., 2020). Tidak ditemukan pergeseran posisi puncak yang signifikan antara  $\text{TiO}_2$  dan  $\text{TiO}_2\text{-CTAB}$ , yang berarti struktur anatase tetap stabil meskipun terjadi modifikasi morfologi. Dengan demikian, CTAB tidak mengubah fasa kristal, melainkan hanya memengaruhi ukuran kristalit dan tingkat keteraturan pori.

Berdasarkan hasil perhitungan dari puncak utama (101), diperoleh bahwa ukuran kristal  $\text{TiO}_2$  murni sekitar 21,5 nm, sedangkan  $\text{TiO}_2\text{-CTAB}$  berkurang menjadi sekitar 16,8 nm. Ukuran kristal yang lebih kecil ini memberikan luas permukaan aktif lebih besar untuk adsorpsi dye, yang sangat menguntungkan dalam aplikasi dye-sensitized solar cell (DSSC).

### 3.2. Pengaruh Waktu Adsorpsi Pewarna dan Kinerja Sel

Optimasi waktu perendaman dilakukan pada elektroda  $\text{TiO}_2$  menggunakan ekstrak Bayam Merah. Hasil pengujian DSSC menggunakan  $\text{TiO}_2$  Teknis pada berbagai waktu perendaman disajikan pada Tabel 1.

**Table 1** Pengaruh waktu adsorpsi *sensitizer* (pewarna)

Waktu Perendaman	$J_{sc}$ (mA/cm <sup>2</sup> )	$V_{oc}$ (V)	$FF$	Efisiensi ( $\eta$ )
2 jam	2,90	0,45	0,58	<b>0,75%</b>
4 jam	3,50	0,46	0,59	<b>0,95%</b>
6 jam	4,50	0,48	0,58	<b>1,25%</b>

Data menunjukkan bahwa nilai efisiensi tertinggi (1,25%) dicapai pada waktu perendaman **6 jam**. Peningkatan efisiensi ini berkorelasi langsung dengan kenaikan nilai  $J_{sc}$  (Arus Hubung Singkat). Peningkatan  $J_{sc}$  dari 2,90 mA/cm<sup>2</sup> menjadi 4,50 mA/cm<sup>2</sup> mengindikasikan bahwa semakin lama waktu perendaman, semakin banyak molekul antosianin yang berhasil teradsorpsi dan terikat kuat pada permukaan  $\text{TiO}_2$ .

(Arote, Ingle, Tabhane, & Pathan, 2014). Proses adsorpsi yang belum sempurna pada 2 jam menyebabkan area permukaan  $\text{TiO}_2$  yang telanjang, yang dapat memicu rekombinasi elektron dengan elektrolit, menurunkan  $J_{sc}$ .

### 3.3. Dampak Penggunaan $\text{TiO}_2$ Mesopori terhadap Efisiensi

Perbandingan kinerja DSSC yang menggunakan  $\text{TiO}_2$  Mesopori (disintesis dengan CTAB) melawan  $\text{TiO}_2$  Teknis pada waktu perendaman optimal 6 jam ditunjukkan pada Tabel 2

**Table 2** Perbandingan Kinerja DSSC Berdasarkan Material Fotoanoda

Material Fotoanoda	Dye	Waktu Perendaman	$J_{sc}$ (mA/cm <sup>2</sup> )	$V_{oc}$ (V)	$FF$	Efisiensi ( $\eta$ )
$\text{TiO}_2$ Mesopori	Bayam Merah	6 jam	<b>6,50</b>	<b>0,52</b>	<b>0,54</b>	<b>1,85%</b>
$\text{TiO}_2$ Teknis	Bayam Merah	6 jam	4,50	0,48	0,58	<b>1,25%</b>

Berdasarkan hasil pengujian, fotoanoda berbasis  $\text{TiO}_2$  mesopori menunjukkan performa yang lebih baik dibandingkan  $\text{TiO}_2$  teknis pada penggunaan dye alami bayam merah dengan waktu perendaman 6 jam. Nilai  $J_{sc}$  dan  $V_{oc}$  masing-masing meningkat dari 4,50 mA/cm<sup>2</sup> dan 0,48 V menjadi 6,50 mA/cm<sup>2</sup> dan 0,52 V. Efisiensi konversi energi meningkat dari 1,25% menjadi 1,85%. Hal ini menunjukkan bahwa struktur mesopori dengan luas permukaan tinggi mampu meningkatkan penyerapan dye dan mempercepat transfer elektron. Hasil ini lebih tinggi dibandingkan penelitian sebelumnya oleh Ghosh, et al. (2020) yang menggunakan  $\text{TiO}_2$  P25 dengan dye kulit manggis (1,56%) (Ghosh, Chowdhury, & Ray, 2020). Dengan demikian, penggunaan bayam merah dan  $\text{TiO}_2$  mesopori memiliki potensi untuk dikembangkan sebagai sistem DSSC berbasis bahan alami yang efisien dan ramah lingkungan. Peningkatan kinerja ini dapat diatribusikan pada dua faktor utama:

- A. **Luas Permukaan Spesifik yang Lebih Besar:** Struktur mesopori yang dihasilkan oleh *template* CTAB meningkatkan luas permukaan kontak secara massif (Xu et al., 2019). Dengan ukuran kristalit yang lebih kecil (2,751 nm),  $\text{TiO}_2$  mesopori dapat menampung jumlah molekul antosianin yang jauh lebih banyak, yang tercermin dalam kenaikan signifikan nilai  $J_{sc}$  dari 4,50 mA/cm<sup>2</sup> menjadi 6,50 mA/cm<sup>2</sup> (Tobin, O'Reilly, Zerulla, & Sheridan, 2010).
- B. Peningkatan  $V_{oc}$ : Peningkatan  $V_{oc}$  dari 0,48 V menjadi 0,52 V mengindikasikan bahwa lapisan mesopori yang padat juga efektif dalam menghalangi kontak langsung antara elektrolit dan FTO, sehingga mengurangi laju rekombinasi elektron (Ma et al., 2025).

## 4. KESIMPULAN

Prototipe DSSC dengan fotoanoda  $\text{TiO}_2$  Mesopori yang disintesis melalui metode kopresipitasi-CTAB dan disensitisasi dengan ekstrak Bayam Merah mencapai efisiensi konversi energi tertinggi sebesar 1,85%. Hasil ini merupakan peningkatan signifikan (48%) dibandingkan dengan penggunaan  $\text{TiO}_2$  Teknis. Efisiensi optimal dicapai pada waktu perendaman pewarna selama 6 jam. Temuan ini menggaris bawahi pentingnya modifikasi morfologi fotoanoda menjadi mesopori untuk memaksimalkan adsorpsi pewarna alami, membuktikan bahwa DSSC berbasis material non-toksik dan biaya rendah memiliki potensi besar untuk dikembangkan lebih lanjut.

## ACUAN REFERENSI

- Al-Sammarraie, A. M. A. (2017). Morphology Effect of Anodized TiO<sub>2</sub> Nanotubes Active Anodes on Dye Sensitive Solar Cell. *Asian Journal of Chemistry*, 29(9), 1985–1989. <https://doi.org/10.14233/ajchem.2017.20707>
- Arote, S. A., Ingle, R. V, Tabhane, V. A., & Pathan, H. M. (2014). Eosin-Y Sensitized Tin Oxide Photoelectrode for Dye Sensitized Solar Cell Application: Effect of Dye Adsorption Time. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, 6(1). <https://doi.org/10.1063/1.4863692>
- Chiang, Y. (2024). A review of the emerging technologies in solar cells: Dye-sensitized solar cells and quantum dot-sensitized solar cells. *Applied and Computational Engineering*, 61(1), 72–76. <https://doi.org/10.54254/2755-2721/61/20240929>
- Ghosh, M., Chowdhury, P., & Ray, A. K. (2020). Photocatalytic Activity of Aeroxide TiO<sub>2</sub> Sensitized by Natural Dye Extracted From Mangosteen Peel. *Catalysts*, 10(8), 917. <https://doi.org/10.3390/catal10080917>
- Honarmand, M. M., Mehr, M. E., Yarahmadi, M., & Siadati, M. H. (2019). Effects of different surfactants on morphology of TiO<sub>2</sub> and Zr-doped TiO<sub>2</sub> nanoparticles and their applications in MB dye photocatalytic degradation. *SN Applied Sciences*, 1(5). <https://doi.org/10.1007/s42452-019-0522-4>
- Junger, I. J., Udomrungkajornchai, S., Grimmelsmann, N., Blachowicz, T., & Ehrmann, A. (2019). Effect of Caffeine Copigmentation of Anthocyanin Dyes on DSSC Efficiency. *Materials*, 12(17), 2692. <https://doi.org/10.3390/ma12172692>
- Lee, G. H., & Kim, Y. S. (2016). Theoretical Study of an Asymmetric a-Π-D-Π-D-Π-A' Tribranched Organic Sensitizer for Dye-Sensitized Solar Cells. *Journal of the Korean Physical Society*, 69(3), 381–385. <https://doi.org/10.3938/jkps.69.381>
- Ma, D., He, J., Sheng, J., Shao, W., Deng, Z., Cen, R., ... Wu, W. (2025). Tailoring Lattice Chlorine in Perovskite Through Dual-Additive Engineering for Enhanced Photovoltaic Performance. *Journal of Materials Chemistry A*, 13(2), 971–984. <https://doi.org/10.1039/d4ta05811a>
- Nasikhudin, N., Astarini, N. A., Rahman, M. F., Diantoro, M., Aripriharta, A., & Osman, Z. (2022). Photovoltaic Performance of TiO<sub>2</sub> Mesoporous Films With Different Working Areas for Dye-Sensitized Solar Cells. *Journal of Physics Conference Series*, 2243(1), 012118. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2243/1/012118>
- Oyibo, G., Barrett, T., Jois, S., Blackburn, J., & Lee, J. U. (2022). *All-carbon nanotube solar cell devices mimic photosynthesis*.
- Pujiastuti, H., Kustiningsih, I., & Slamet, S. (2021). Improvement of the Efficiency of TiO<sub>2</sub> Photocatalysts With Natural Dye Sensitizers Anthocyanin for the Degradation of Methylene Blue: Review. *Jurnal Rekayasa Kimia & Lingkungan*, 16(2), 84–99. <https://doi.org/10.23955/rkl.v16i2.21314>
- Shamsudin, S., Ahmad, M. K., Nayan, N., Soon, C. F., Rahim, R. A., Alakendram, D. A. L., ... Murakami, K. (2020). Fabrication of TiO<sub>2</sub> Nanoflowers Powder With Various Concentration of CTAB. *International Journal of Integrated Engineering*, 12(2). <https://doi.org/10.30880/ijie.2020.12.02.023>
- Supriyanto, A., Prasada, A. B., Cari, C., & Fadli, U. M. (2017). Identification and Characterisation of “Black Sticky Rice” (*Oriza Sativa Glutinosa*) as Photosensitizer in Development of Dye

Sensitized Solar Cells (DSSC). *Jurnal Ilmu Dasar*, 17(1), 1.  
<https://doi.org/10.19184/jid.v17i1.2662>

- Supriyanto, E., Istiqomah, A., Asmara, R. P., Nugroho, A., Subekti, A., & Sutjipto, A. G. E. (2022). Optical and Electrical Modeling of DSSC With Light Scattering Layer. *Materials Science Forum*, 1056, 39–44. <https://doi.org/10.4028/p-0v2xb1>
- Tobin, L. L., O'Reilly, T., Zerulla, D., & Sheridan, J. T. (2010). *Investigating Dye-Sensitised Solar Cells*. <https://doi.org/10.1117/12.854591>
- Verma, N. K., Kaur, I., Kaur, K., & Lotey, G. S. (2013). Enhanced Efficiency of Au-Deposited BiFeO<sub>3</sub> Nanoparticles Based Dye-Sensitized Solar Cells. *Advanced Materials Research*, 856, 184–187. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amr.856.184>
- Wei, J., Tan, X., Yu, T., & Zhao, L. (2011). Effects of Calcination Temperature on Photoreduction Activity of Cu/TiO<sub>2</sub> Nanoparticles. *Applied Mechanics and Materials*, 55–57, 1648–1652. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amm.55-57.1648>
- Willoughby, A. A., Soge, A. O., Dairo, O. F., Olukanni, O. D., Durugbo, E. U., Michael, W. S., & Adebayo, T. (2021). Fabrication and Characterization of a Dye-Sensitized Solar Cell Using Natural Dye Extract of Rosella (*Hibiscus Sabdariffa* L.) as Photosensitizer. *Journal of the Nigerian Society of Physical Sciences*, 287–291. <https://doi.org/10.46481/jnsps.2021.346>
- Xu, M., Wang, W., Liu, Y., Zhong, Y., Xu, X., Sun, Y., ... Shao, Z. (2019). An Intrinsically Conductive Phosphorus-Doped Perovskite Oxide as a New Cathode for High-Performance Dye-Sensitized Solar Cells by Providing Internal Conducting Pathways. *Solar RRL*, 3(8). <https://doi.org/10.1002/solr.201900108>