

FABRIKASI SEL SURYA BERBASIS BAHAN PEMEKA ORGANIK MENGGUNAKAN MATERIAL TiO_2 DAN PEWARNA DARI EKSTRAK BAYAM

Bodi Gunawan^{*}

¹Pendidikan Fisika, Universitas Bengkulu
e-mail : bodi.gunawan@unib.ac.id

ABSTRAK

Ekstrak daun bayam telah digunakan sebagai fotosensitizer pada nanopartikel Titanium Dioksida (TiO_2) untuk fabrikasi sel surya berbasis pewarna (*Dye-Sensitized Solar Cell/DSSC*). Nanopartikel TiO_2 diperoleh melalui metode kopresipitasi. Larutan $TiCl_3$ dicampurkan dengan air suling dan NH_4OH . Campuran tersebut diaduk hingga warnanya berubah menjadi putih. Serbuk nanopartikel TiO_2 dan pewarna alami kemudian diukur kemampuan absorbansinya menggunakan spektrofotometer UV-Vis. Sel surya berbasis pewarna (DSSC) dibuat dengan melapiskan TiO_2 pada permukaan lempeng kaca ITO menggunakan metode doctor blade, lalu direndam ke dalam larutan pewarna. Tiga buah DSSC dibuat dengan variasi waktu perendaman, yaitu 2 jam, 4 jam, dan 6 jam. Karakteristik arus-tegangan (I-V) masing-masing DSSC diukur dan hasilnya diplot untuk menentukan efisiensi setiap sel. Efisiensi yang diperoleh masing-masing adalah 0,0444% untuk waktu perendaman 2 jam, 0,0570% untuk 4 jam, dan 0,0589% untuk 6 jam.

Kata kunci: *pewarna alami, DSSC, metode kopresipitasi, sel surya, efisiensi*

ABSTRACT

Spinach leaf extract has been used as a photosensitizer in titanium dioxide (TiO_2) nanoparticles for the fabrication of dye-sensitized solar cells (DSSCs). The TiO_2 nanoparticles were synthesized via the co-precipitation method by mixing $TiCl_3$ with distilled water and NH_4OH . The mixture was stirred until it turned white, indicating precipitate formation. The absorbance properties of both the TiO_2 nanoparticle powder and the natural dye were analyzed using UV-Vis spectrophotometry. DSSCs were fabricated by coating TiO_2 onto indium tin oxide (ITO)-coated glass substrates using the doctor blade method, followed by immersion in the dye solution. Three DSSC devices were prepared with varying dye soaking durations: 2 hours, 4 hours, and 6 hours. The current–voltage (I–V) characteristics of each device were measured and plotted to determine their respective power conversion efficiencies. The obtained efficiencies were 0.0444% for the 2-hour soaking time, 0.0570% for 4 hours, and 0.0589% for 6 hours.

Keywords: *natural dye, DSSC, co-precipitation method, solar cell, efficiency*

I PENDAHULUAN

Krisis energi merupakan masalah utama di banyak negara di seluruh dunia. Saat ini, sebagian besar konsumsi energi global masih bergantung pada energi fosil. Namun, pemanfaatan energi fosil juga menimbulkan dampak negatif karena melepaskan CO_2 selama proses pembakarannya, yang berkontribusi terhadap efek rumah kaca. Selain itu, energi fosil bukanlah sumber energi terbarukan, sehingga cadangannya semakin menipis seiring meningkatnya permintaan energi global. Menurut International Energy Agency (IEA), konsumsi energi dunia diproyeksikan meningkat hingga 50% pada tahun 2050 jika tidak ada transisi signifikan ke sumber energi berkelanjutan (1). Kondisi ini memperparah tekanan terhadap keamanan pasokan energi, stabilitas ekonomi, serta keberlanjutan lingkungan. Oleh karena itu, pencarian sumber energi alternatif yang terbarukan, ramah lingkungan, dan berbiaya rendah menjadi sangat mendesak.

Energi surya, sebagai salah satu sumber energi terbarukan yang paling melimpah dan tersebar luas, menawarkan solusi potensial. Di antara berbagai teknologi konversi energi surya, *Dye-Sensitized Solar Cell (DSSC)* menarik perhatian karena proses fabrikasinya yang sederhana, biaya produksi yang relatif rendah, serta kemampuannya beroperasi pada intensitas cahaya rendah (2-5).

Dye-Sensitized Solar Cell (DSSC) merupakan teknologi yang meniru proses fotosintesis alami pada tumbuhan. DSSC pertama kali diperkenalkan oleh Grätzel dan O'Regan pada tahun 1991 dan sejak itu berkembang sebagai alternatif menarik dalam konversi energi surya (6-8). DSSC memiliki potensi besar untuk dikembangkan karena menawarkan keunggulan seperti fabrikasi sederhana, biaya produksi rendah, penggunaan bahan yang umumnya tidak beracun, serta kompatibilitas dengan prinsip keberlanjutan lingkungan (9). Secara struktural, DSSC terdiri atas semikonduktor oksida logam (umumnya TiO₂) sebagai fotoanoda, pewarna sensitizer (alami atau sintetis), elektrolit redoks (biasanya berbasis iodida/triiodida), dan elektroda lawan (counter electrode) yang umumnya terbuat dari karbon atau platina (10). Penggunaan pewarna alami, seperti ekstrak daun bayam, sebagai fotosensitizer dalam DSSC tidak hanya mengurangi ketergantungan pada bahan kimia sintetis yang mahal dan beracun, tetapi juga mendukung prinsip ekonomi sirkular dan keberlanjutan lingkungan.

Pewarna alami telah menjadi fokus penelitian intensif dalam pengembangan DSSC karena ketersediaannya yang melimpah, biodegradabilitasnya, serta minimnya dampak toksik terhadap lingkungan dibandingkan pewarna sintetis seperti N719 atau Z907 (11-12). Senyawa antosianin, klorofil, karotenoid, dan betasianin yang terkandung dalam berbagai bagian tumbuhan, seperti bunga, buah, dan daun, memiliki struktur molekuler yang memungkinkan penyerapan cahaya pada kisaran spektrum tampak, sehingga mampu menginduksi eksitasi elektron saat terpapar sinar matahari. Meskipun efisiensi konversi energi DSSC berbasis pewarna alami umumnya masih lebih rendah daripada DSSC berbasis pewarna sintetis, upaya optimasi melalui modifikasi material, rekayasa lapisan TiO₂, dan peningkatan afinitas ikatan antara pewarna dan permukaan semikonduktor terus menunjukkan progres signifikan (13).

Salah satu sumber pewarna alami yang menjanjikan adalah daun bayam (*Spinacia oleracea*), yang kaya akan klorofil-a, yaitu pigmen fotosintetik utama yang menyerap kuat pada panjang gelombang sekitar 430 nm (biru) dan 662 nm (merah) (14). Klorofil memiliki gugus karboksilat yang memungkinkan ikatan kovalen dengan permukaan TiO₂, sehingga meningkatkan stabilitas adsorpsi dan efisiensi transfer elektron. Namun, kinerja DSSC berbasis ekstrak bayam sangat dipengaruhi oleh durasi proses perendaman atau soaking time, karena waktu yang terlalu singkat dapat mengakibatkan adsorpsi pewarna yang tidak optimal, sedangkan waktu yang terlalu lama berpotensi menyebabkan agregasi molekul pewarna atau degradasi senyawa aktif. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi pengaruh variasi waktu perendaman, yaitu 2 jam, 4 jam, dan 6 jam, terhadap karakteristik arus-tegangan (I-V) dan efisiensi konversi daya DSSC berbasis ekstrak daun bayam, sebagai langkah awal dalam mengoptimalkan kinerja sel surya berbasis bahan organik lokal yang berkelanjutan.

II METODE PENELITIAN

2.1 Ekstraksi Dye

Pewarna alami diekstraksi dari daun bayam (*Spinacia oleracea*), yang merupakan tanaman yang mudah ditemukan di alam. Ekstraksi dilakukan dengan menggerus sepuluh lembar daun bayam menggunakan mortar. Hasil gerusan daun bayam kemudian dicampurkan dengan 10 mL etanol dan diaduk selama kurang lebih 30 menit menggunakan pengaduk magnetik. Etanol berfungsi untuk melarutkan protein yang mengikat klorofil, sehingga membantu proses ekstraksi klorofil dari daun bayam selama pengadukan. Setelah diaduk minimal selama 30 menit, larutan tersebut disaring untuk memisahkan ekstrak pewarna dari residu padatnya. Kemampuan absorbansi ekstrak pewarna dari daun bayam selanjutnya diukur menggunakan spektrofotometer UV-Vis.

2.2 Sintesis TiO₂

Nanopartikel TiO₂ yang digunakan dalam fabrikasi DSSC disintesis melalui metode kopresipitasi. Metode ini dilakukan dengan mencampurkan larutan asam dan basa untuk menghasilkan endapan bahan yang diinginkan. Sebanyak 20 mL larutan TiCl₃ dicampurkan dengan 100 mL air suling, kemudian diaduk menggunakan pengaduk magnetik. Larutan tersebut dititrasi

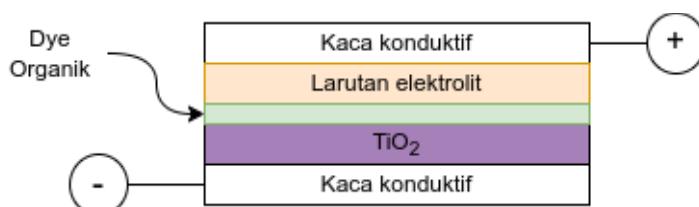
perlahan dengan NH₄OH hingga mencapai pH 9, dan pengadukan dilanjutkan hingga warna larutan berubah menjadi putih. Larutan dibiarkan selama 24 jam untuk memungkinkan terbentuknya endapan putih di dasar wadah. Untuk memperoleh TiO₂ yang lebih murni, endapan putih dipisahkan dari cairan, lalu cairan tersebut digantikan dengan air suling. Ulangi langkah pencucian ini hingga pH 7 tercapai. Setelah pH 7 tercapai, endapan putih dipanaskan pada suhu 400°C selama 3 jam. Proses pemanasan ini menghasilkan nanopartikel TiO₂ dalam fase anatase.

2.3 Katalis Elektroda Karbon

Katalis untuk fabrikasi DSSC dibuat dari grafit. Grafit ini berfungsi sebagai elektroda lawan (*counter electrode*) dalam sistem DSSC dan membantu menginjeksikan elektron dari beban eksternal kembali ke dalam elektrolit. Katalis disiapkan dengan mencampurkan 1 gram serbuk grafit dengan 6 mL etanol, kemudian diaduk menggunakan pengaduk magnetik selama 30 menit. Campuran tersebut dilapiskan pada sisi konduktif kaca ITO, lalu dipanaskan pada suhu 100°C selama 50 menit.

2.4 Elektrolit

Elektrolit yang digunakan dalam pembuatan DSSC berbentuk gel dan berbasis *polimer polietilen glikol* (PEG). Elektrolit berperan sebagai donor elektron bagi molekul pewarna tereksitasi yang telah kehilangan elektron akibat penyerapan foton. Oleh karena itu, elektrolit harus mengandung pasangan redoks. Elektrolit disintesis dengan mencampurkan 3 gram KI dengan 10 mL asetonitril. Larutan tersebut kemudian dicampur dengan 25 mL kloroform dan diaduk menggunakan pengaduk magnetik pada suhu tetap 80°C untuk meningkatkan viskositas cairan.



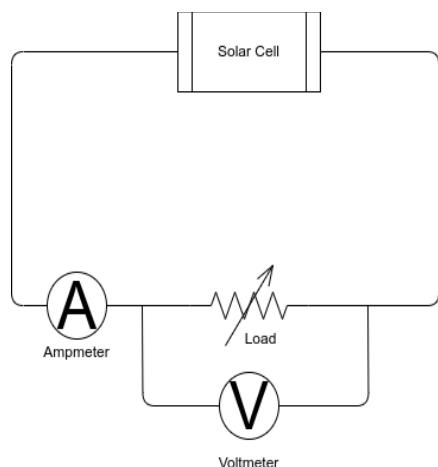
Gambar 1. Diagram penyusunan DSSC

2.5 Fabrikasi DSSC

DSSC disusun dengan lapisan berurutan seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1. Dua lempeng kaca ITO dibersihkan menggunakan pembersih ultrasonik selama 1 jam untuk menghilangkan segala kontaminan organik maupun anorganik pada permukaannya. Serbuk TiO₂ murni yang diperoleh melalui metode kopresipitasi dibuat menjadi pasta dengan penambahan PEG 1000 dan Triton X-100. Lapisan tipis pasta TiO₂ dilapiskan pada permukaan kaca ITO menggunakan teknik *doctor-blade*. Lempeng kaca berlapis TiO₂ yang telah kering dikalsinasi pada suhu 450°C selama 30 menit untuk meningkatkan kontak elektronik antar nanopartikel TiO₂ serta menghilangkan gas dan rongga internal. Fotoanoda tersebut kemudian direndam dalam ekstrak daun bayam dengan variasi waktu perendaman, yaitu 2 jam, 4 jam, dan 6 jam, guna mengikat molekul pewarna pada permukaan TiO₂. Lempeng fotoanoda dan lempeng elektroda lawan dirangkai berhadapan dengan lapisan TiO₂ yang berada di tengah, tanpa membentuk gelembung udara. Elektrolit cair dimasukkan secara hati-hati melalui lubang kecil pada susunan elektroda, lalu lubang tersebut ditutup rapat untuk menghasilkan DSSC berbasis TiO₂.

2.6 Pengukuran

Nanopartikel TiO₂ dan ekstrak daun bayam diukur untuk menentukan kisaran penyerapan spektral menggunakan spektrofotometer UV-Vis Beckman DU-7500. Alat UV-Vis diatur dalam mode pengukuran absorbansi dengan rentang panjang gelombang antara 200 nm hingga 1000 nm. Pengukuran kedua dilakukan untuk mengkarakterisasi kurva arus-tegangan (I-V) dari ketiga spesimen DSSC. Pengukuran karakteristik I-V dilakukan menggunakan dua buah multimeter digital dan rangkaian resistor variabel. Dalam penelitian ini, digunakan 15 buah potensiometer yang dirangkai secara seri. Skema perangkat pengukuran karakteristik I-V dapat dilihat pada Gambar 2.



Gambar 2. Skema rangkaian pengukuran arus-tegangan pada DSSC

III HASIL DAN PEMBAHASAN

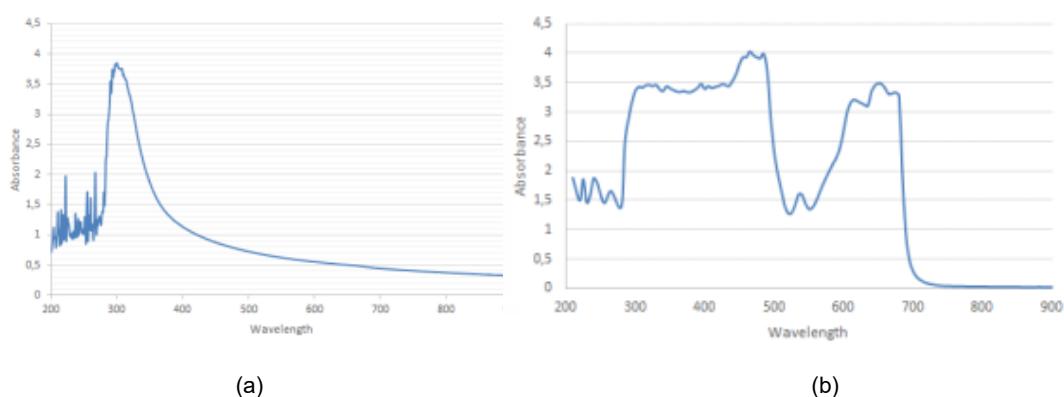
3.1 Spektrum Absorpsi UV-Vis

Spektrum absorpsi nanopartikel TiO₂ dan ekstrak daun bayam diukur menggunakan spektrofotometer UV-Vis Beckman DU-7500. Gambar 3(a) menunjukkan spektrum absorpsi nanopartikel TiO₂, yang mengindikasikan bahwa material ini hanya menyerap foton cahaya pada daerah ultraviolet dan sekitarnya. Oleh karena itu, diperlukan sensitizer pewarna tambahan yang diikatkan pada TiO₂ agar sel surya dapat memanfaatkan cahaya matahari secara efektif, khususnya pada kisaran spektrum tampak.

Berdasarkan spektrum absorpsi TiO₂ murni, panjang gelombang cutoff (λ) terjadi pada 356 nm. Energi celah pita (*band gap*) dapat dihitung menggunakan Persamaan (1).

$$E_g = \frac{1239,8}{\lambda} \text{ eV} \quad (1)$$

Dengan demikian, *band gap* nanopartikel TiO₂ diperoleh sebesar 3,48 eV. Nilai ini sedikit lebih tinggi dibandingkan *band gap* TiO₂ (3,2 eV), yang umumnya disebabkan oleh efek ukuran partikel pada skala nanometer (16-18).



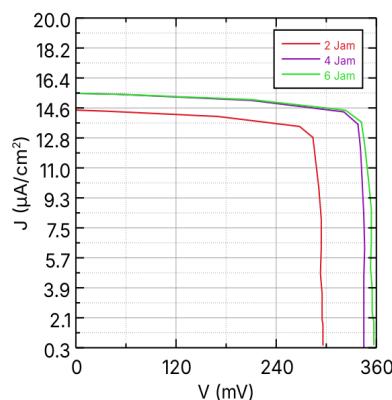
Gambar 3. (a) Spektrum absorpsi TiO₂; (b) Spektrum absorpsi ekstrak daun bayam

Gambar 3(b) menampilkan spektrum absorpsi ekstrak daun bayam. Dibandingkan dengan TiO₂, spektrum absorpsi pewarna alami ini jauh lebih luas dan mencakup sebagian besar kisaran cahaya tampak. Hal ini menunjukkan bahwa ekstrak daun bayam mampu menyerap radiasi matahari pada

panjang gelombang yang relevan untuk aplikasi sel surya. Panjang gelombang cutoff untuk ekstrak daun bayam terjadi pada $\lambda = 685$ nm, yang sesuai dengan serapan klorofil pada daerah merah.

3.2 Studi Efisiensi

Karakteristik arus-tegangan (I-V) dari sel surya terdusensai pewarna (DSSC) berbasis ekstrak daun bayam diukur di bawah pencahayaan LED dengan intensitas 0,3 mW/cm² untuk mengevaluasi kinerja konversi energi. Hasil seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4 menunjukkan bahwa efisiensi DSSC meningkat seiring dengan lama waktu perendaman fotoanoda TiO₂ dalam larutan pewarna alami. DSSC dengan waktu perendaman 2 jam mencatat efisiensi konversi sebesar 0,0444%, dengan densitas arus hubung singkat (J_{sc}) 9,67 μ A/cm², tegangan rangkaian terbuka (V_{oc}) 296 mV, dan *Fill Factor* (FF) 46,48%. Peningkatan waktu perendaman menjadi 4 jam menyebabkan efisiensi meningkat menjadi 0,0570%, didukung oleh peningkatan J_{sc} menjadi 10,33 μ A/cm² dan V_{oc} hingga 345 mV, sementara FF mencapai nilai maksimum 47,95%. Untuk sampel dengan perendaman 6 jam, meskipun J_{sc} tetap pada 10,33 μ A/cm², terjadi sedikit peningkatan V_{oc} menjadi 357 mV, namun FF sedikit menurun menjadi 47,89%, sehingga efisiensi akhir mencapai 0,0589%.



Gambar 4. Karakteristik arus-tegangan DSSC

Peningkatan efisiensi dengan durasi perendaman yang lebih lama dapat diinterpretasikan sebagai hasil dari peningkatan jumlah molekul klorofil yang teradsorpsi pada permukaan nanopartikel TiO₂. Adsorpsi yang lebih optimal memperluas area penyerapan cahaya dan meningkatkan injeksi elektron ke pita konduksi TiO₂, yang tercermin dari kenaikan J_{sc} dan V_{oc} . Namun, stagnasi J_{sc} antara perendaman 4 dan 6 jam menunjukkan bahwa kapasitas adsorpsi permukaan TiO₂ telah mendekati titik jenuh, sehingga penambahan waktu tidak lagi memberikan peningkatan signifikan dalam jumlah pewarna yang terikat. Selain itu, penurunan marginal pada FF pada waktu perendaman terlama mungkin disebabkan oleh aglomerasi molekul pewarna atau hambatan transfer muatan akibat lapisan klorofil yang terlalu tebal. Secara keseluruhan, hasil ini menunjukkan bahwa durasi perendaman merupakan parameter penting dalam proses sensitasi pewarna alami, dan optimasi waktu perendaman sangat diperlukan untuk memaksimalkan kinerja DSSC berbasis ekstrak tumbuhan.

IV SIMPULAN DAN SARAN

Penelitian ini berhasil menunjukkan bahwa ekstrak daun bayam dapat digunakan sebagai pewarna alami pada sel surya terdusensai pewarna (DSSC) berbasis nanopartikel TiO₂ yang disintesis melalui metode ko-presipitasi. Karakterisasi UV-Vis mengonfirmasi bahwa ekstrak bayam memiliki kemampuan serap yang baik pada daerah cahaya tampak (200–685 nm), menjadikannya kandidat potensial sebagai fotosensitizer. Analisis kinerja DSSC menunjukkan adanya korelasi positif antara lama waktu perendaman fotoanoda dalam larutan pewarna dan efisiensi konversi energi. Efisiensi tertinggi sebesar 0,0589% dicapai pada sampel yang direndam selama 6 jam, dengan nilai $J_{sc} = 10,33 \mu\text{A}/\text{cm}^2$, $V_{oc}=357$ mV , dan *fill factor* (FF) sebesar 47,89%. Peningkatan

efisiensi ini diduga disebabkan oleh adsorpsi klorofil yang lebih optimal pada permukaan TiO₂, meskipun tren peningkatan mulai stagnan setelah 4 jam, menunjukkan pendekatan terhadap kapasitas maksimum adsorpsi. Meskipun efisiensi yang diperoleh masih rendah dibandingkan DSSC berbasis pewarna sintetis, hasil ini membuktikan potensi pemanfaatan bahan alami lokal dan murah untuk aplikasi energi terbarukan. Selain itu, proses fabrikasi yang sederhana dan ramah lingkungan mendukung pengembangan teknologi hijau berbiaya rendah.

Sebagai saran untuk penelitian lanjutan, optimasi parameter sensitasi seperti pH larutan pewarna, suhu ekstraksi, dan komposisi pelarut etanol-air perlu dieksplorasi untuk meningkatkan stabilitas dan jumlah molekul klorofil yang teradsorpsi. Selain itu, modifikasi struktur fotoanoda, seperti penggunaan lapisan ganda TiO₂ (nanopartikel + nanotube) atau doping logam, dapat membantu memperluas spektrum serapan dan mengurangi rekombinasi elektron. Studi stabilitas jangka panjang juga penting untuk mengevaluasi degradasi kinerja DSSC berbasis bayam akibat paparan cahaya dan kelembaban. Terakhir, pencampuran ekstrak bayam dengan sumber pewarna alami lain (misalnya antosianin dari buah atau bunga) dapat dilakukan untuk menciptakan sistem pewarna majemuk (*co-sensitization*) yang mampu menyerap cahaya di seluruh rentang tampak, sehingga berpotensi meningkatkan efisiensi secara signifikan.

DAFTAR PUSTAKA

- (1). International Energy Agency. World Energy Outlook 2023. OECD; 2023. <https://doi.org/10.1787/827374a6-en>.
- (2). Wu T-C, Huang W-M, Meen T-H, Tsai J-K. Performance Improvement of Dye-Sensitized Solar Cells with Pressed TiO₂ Nanoparticles Layer. Coatings 2023;13:907. <https://doi.org/10.3390/coatings13050907>.
- (3). Alor KP, Ezekoye BA, Ugwuoke PE, Offiah SU, Ezema FI, Akor S, et al. A Review of Advances on Natural Dye Sensitized Solar Cells (NDSSCs). JERR 2023;25:153–66. <https://doi.org/10.9734/jerr/2023/v25i101008>.
- (4). Sasongko SB, Novasari D, Ramadhan DH, Fadlilah MN, Pratiwi WZ. Study on Making a Prototype Dye Sensitized Solar Cell (DSSC) as an Alternative Electric Energy Source. IOP Conf Ser: Mater Sci Eng 2021;1053:012098. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1053/1/012098>.
- (5). Gong J, Liang J, Sumathy K. Review on dye-sensitized solar cells (DSSCs): Fundamental concepts and novel materials. Renewable and Sustainable Energy Reviews 2012;16:5848–60. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.04.044>.
- (6). Kokkonen M, Talebi P, Zhou J, Asgari S, Soomro SA, Elsehrawy F, et al. Advanced research trends in dye-sensitized solar cells. J Mater Chem A 2021;9:10527–45. <https://doi.org/10.1039/DITA00690H>.
- (7). Kato N, Higuchi K, Tanaka H, Nakajima J, Sano T, Toyoda T. Improvement in long-term stability of dye-sensitized solar cell for outdoor use. Solar Energy Materials and Solar Cells 2011;95:301–5. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2010.04.019>.
- (8). Lee KS, Lee Y, Lee JY, Ahn J, Park JH. Flexible and Platinum-Free Dye-Sensitized Solar Cells with Conducting-Polymer-Coated Graphene Counter Electrodes. ChemSusChem 2012;5:379–82. <https://doi.org/10.1002/cssc.201100430>.
- (9). Schoden F, Dotter M, Knefelkamp D, Blachowicz T, Schwenzfeier Hellkamp E. Review of State of the Art Recycling Methods in the Context of Dye Sensitized Solar Cells. Energies 2021;14:3741. <https://doi.org/10.3390/en14133741>.

- (10). Francis OI, Ikenna A. Review of Dye-Sensitized Solar Cell (DSSCs) Development. NS 2021;13:496–509. <https://doi.org/10.4236/ns.2021.1312043>.
- (11). Adedokun O, Titilope K, Awodugba AO. Review on Natural Dye-Sensitized Solar Cells (DSSCs). IJET 2016;2:34. <https://doi.org/10.19072/ijet.96456>.
- (12). Seithtanabutara V, Chumwangwapee N, Suksri A, Wongwuttanasatian T. Potential investigation of combined natural dye pigments extracted from ivy gourd leaves, black glutinous rice and turmeric for dye-sensitised solar cell. Heliyon 2023;9:e21533. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e21533>.
- (13). Musyaro'ah, Huda I, Indayani W, Gunawan B, Yudhoyono G, Endarko. Fabrication and characterization dye sensitized solar cell (DSSC) based on TiO₂/SnO₂ composite, Solo, Indonesia: 2017, p. 030062. <https://doi.org/10.1063/1.4968315>.
- (14). Hatib R, Anwar K, Soso AY. PENGARUH VARIASI KOSENTRASI PADA EKSTRAK DAUN BAYAM MERAH SEBAGAI DYE TERHADAP KINERJA DYE SENSITIZED SOLAR CELL (DSSC). JTAM ROTARY 2024;6:61. https://doi.org/10.20527/jtam_rotary.v6i1.1112.
- (15). Gunawan B, Musyaro'ah, Huda I, Indayani W, S. SR, Endarko. The influence of various concentrations of N-doped TiO₂ as photoanode to increase the efficiency of dye-sensitized solar cell, Solo, Indonesia: 2017, p. 030128. <https://doi.org/10.1063/1.4968381>.
- (16). Zhang J, Zhou P, Liu J, Yu J. New understanding of the difference of photocatalytic activity among anatase, rutile and brookite TiO₂. Phys Chem Chem Phys 2014;16:20382–6. <https://doi.org/10.1039/C4CP02201G>.
- (17). Alias SH, Abdul Razak FI, Chandren S, Loon Leaw W, Sahnoun R, Nur H. Band Gap Energy of Periodic Anatase TiO₂ System Evaluated with the B2PLYP Double Hybrid Functional. Mal J Fund Appl Sci 2024;20:179–89. <https://doi.org/10.11113/mjfas.v20n1.3223>.
- (18). Ngagaraj G, Dhayal Raj A, Albert Irudayaraj A, Josephine R.L. Tuning the optical band Gap of pure TiO₂ via photon induced method. Optik 2019;179:889–94. <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2018.11.009>.