



Fabrikasi DSSC Berbasis $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ -Karbon Aktif Melalui *Screen Printing* dengan Sensitizer Bit Merah: Analisis Efisiensi pada Berbagai Intensitas Cahaya

Fabrication of $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ -Activated Carbon-Based DSSC via Screen Printing with Red Beet Sensitizer: Analysis of Efficiency under Various Light Intensities

Randy Ahmad Fauzan¹, Agus Supriyanto², Ade Suhara³, Khoirudin Khoirudin⁴, Amir Amir⁵, Dodi Mulyadi⁶, Karina Chintya Lestari⁷, Nafisa Rizki Maulida⁸, Muhamad Taufik Ulhakim⁹

^{1,2,4,5,6,7} Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Buana Perjuangan Karawang, Karawang, Jawa Barat, Indonesia

³ Program Studi Teknik Industri, Fakultas Teknik, Universitas Buana Perjuangan Karawang, Karawang, Jawa Barat, Indonesia

⁸ Program Studi Kimia Tekstil, Politeknik STTT Bandung, Bandung, Jawa Barat, Indonesia

⁹ Program Studi Teknik Tekstil, Politeknik STTT Bandung, Bandung, Jawa Barat, Indonesia

¹tm22.randyfauzan@mhs.ubpkarawang.ac.id, ²agus.supriyanto@ubpkarawang.ac.id, ³ade.suhara@ubpkarawang.ac.id,

⁴khoirudin@ubpkarawang.ac.id, ⁵amir@ubpkarawang.ac.id, ⁶dodi.mulyadi@ubpkarawang.ac.id, ⁷karina.lestari@ubpkarawang.ac.id, ⁸nafisarizki221@gmail.com, ⁹mtaufiku@stttekstil.ac.id

Penulis Korespondensi: Muhamad Taufik Ulhakim | Email: mtaufiku@stttekstil.ac.id

Diterima (Received): 13/07/2026 Direvisi (Revised): 05/08/2026 Diterima untuk Publikasi (Accepted): 06/08/2026

ABSTRAK

Penelitian ini bertujuan untuk memfabrikasi *Dye-Sensitized Solar Cell* (DSSC) berbasis fotoanoda komposit $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ -karbon aktif menggunakan metode *screen printing* dan ekstrak buah bit merah (*Beta vulgaris*) sebagai fotosensitizer alami, serta menganalisis pengaruh variasi intensitas cahaya terhadap efisiensi konversi energi. Fotoanoda dikarakterisasi menggunakan XRD, SEM, EDX, dan UV-Vis. Karakterisasi menunjukkan bahwa komposit memiliki struktur kristalin yang baik, morfologi permukaan berpori, serta komposisi unsur yang sesuai. Analisis UV-Vis memperlihatkan puncak serapan maksimum pada panjang gelombang 530 nm dan perkiraan energi celah optik sebesar 2,34 eV. Pengujian fotovoltaiik dilakukan menggunakan lampu LED berdaya 8, 10, dan 12 W. Pengujian menunjukkan bahwa intensitas cahaya yang lebih besar memperbaiki parameter kinerja DSSC. Performa optimum diperoleh pada daya 12 W, ditandai oleh nilai Voc sebesar 0,71 V, Jsc sebesar 0,131 mA/cm², FF sebesar 45,1%, dan efisiensi konversi energi sebesar 0,053%. Secara keseluruhan, komposit $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ -karbon aktif dan fotosensitizer ekstrak buah bit merah berpotensi digunakan sebagai material ramah lingkungan dalam pengembangan DSSC berbiaya rendah.

Kata Kunci: DSSC; ekstrak buah bit; efisiensi konversi energi; *screen printing*; $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ -karbon aktif.

ABSTRACT

This study aimed to fabricate a dye-sensitized solar cell (DSSC) based on a $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ -activated carbon composite photoanode using the screen-printing method and red beetroot (*Beta vulgaris*) extract as a natural photosensitizer, as well as to analyze the effect of varying light intensity on energy conversion efficiency. The photoanode was characterized using XRD, SEM, EDX, and UV-Vis spectroscopy. The characterization results showed that the composite exhibited good crystallinity, a porous surface morphology, and an appropriate elemental composition. UV-Vis analysis revealed a maximum absorption peak at a wavelength of 530 nm and an estimated optical band gap of 2.34 eV. Photovoltaic testing was conducted using LED lamps with power ratings of 8, 10, and 12 W. The results demonstrated that higher light intensity improved the DSSC performance parameters. The optimum performance was achieved at 12 W, with a Voc of 0.71 V, a Jsc of 0.131 mA/cm², an FF of 45.1%, and an energy conversion efficiency of 0.053%. Overall, the $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ -activated carbon composite and red beetroot extract photosensitizer have potential as environmentally friendly materials for the development of low-cost DSSCs.

Keywords: DSSC; beetroot extract; energy conversion efficiency; screen printing; $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ -activated carbon.

© Author(s) 2026. This is an open access article under the Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0 International License (CC BY-SA 4.0).

1. Pendahuluan

Dye-Sensitized Solar Cell (DSSC) merupakan salah satu teknologi fotovoltaik generasi ketiga yang banyak dikembangkan karena menawarkan proses fabrikasi yang sederhana, biaya produksi yang relatif rendah, serta mampu beroperasi secara optimal pada kondisi intensitas cahaya rendah (Khir et al., 2022; Saud et al., 2024; Vallejo et al., 2025). Berbeda dengan sel surya berbasis silikon, DSSC memanfaatkan molekul pewarna sebagai penyerap cahaya sehingga memiliki potensi yang baik untuk diaplikasikan sebagai sumber energi bagi perangkat elektronik berdaya rendah, sensor yang dapat beroperasi secara mandiri, serta sistem pemanen energi di dalam ruangan (Srivishnu et al., 2023). Sejalan dengan potensi tersebut, pemanfaatan energi surya terus mengalami peningkatan secara global. Pertumbuhan kapasitas energi terbarukan mencapai rekor tertinggi pada tahun 2023 dengan penambahan sekitar 510 GW secara global. Teknologi solar photovoltaic (PV) bersama energi angin mendominasi penambahan kapasitas tersebut dengan kontribusi mencapai sekitar 96%, di mana solar PV menjadi kontributor terbesar (Foqha et al., 2026). Tren tersebut menunjukkan bahwa pengembangan teknologi sel surya semakin menjadi fokus utama dalam mendukung transisi energi, sehingga mendorong berbagai penelitian untuk meningkatkan kinerja dan efisiensi DSSC melalui inovasi material penyusunnya.

Salah satu komponen yang paling menentukan kinerja DSSC adalah fotoanoda karena berperan sebagai media adsorpsi molekul pewarna sekaligus jalur transport elektron menuju rangkaian eksternal. Titanium dioksida (TiO_2) merupakan material fotoanoda yang paling banyak digunakan karena memiliki stabilitas kimia yang tinggi, sifat semikonduktor yang baik, tidak beracun, melimpah di alam, serta biaya produksi yang relatif rendah (Sawal et al., 2023). Meskipun demikian, peningkatan luas permukaan efektif dan jumlah situs adsorpsi pada fotoanoda TiO_2 masih menjadi tantangan untuk meningkatkan kapasitas adsorpsi molekul pewarna serta memperluas antarmuka antara dye dan semikonduktor (Venkatesan et al., 2022). Selain itu, transport elektron pada fotoanoda TiO_2 masih dibatasi oleh terjadinya rekombinasi elektron pada antarmuka TiO_2 -elektrolit, sehingga sebagian elektron tidak dapat dikumpulkan secara efektif oleh elektroda. Kondisi ini menyebabkan penurunan arus fotolistrik dan membatasi efisiensi konversi energi DSSC (J. Li et al., 2024). Oleh karena itu, berbagai penelitian terus dilakukan untuk memodifikasi struktur dan komposisi fotoanoda TiO_2 guna meningkatkan luas permukaan efektif, memperbaiki transport elektron, serta menekan laju rekombinasi muatan.

Berbagai strategi telah dilakukan untuk meningkatkan karakteristik fotoanoda TiO_2 , salah satunya melalui pembentukan material komposit. Penambahan SiO_2 ke

dalam fotoanoda TiO_2 dilaporkan mampu meningkatkan kapasitas adsorpsi molekul pewarna serta memperbaiki karakteristik optik fotoanoda, sehingga berkontribusi terhadap peningkatan kinerja DSSC (Hussein et al., 2025; Kumar, 2023; Sule et al., 2023). Peningkatan kapasitas adsorpsi tersebut berkaitan dengan karakteristik material silika mesopori yang memiliki luas permukaan spesifik sangat tinggi, yaitu dapat mencapai sekitar $1000 \text{ m}^2/\text{g}$. Luas permukaan ini jauh lebih besar dibandingkan TiO_2 nanopartikel yang umumnya hanya berkisar $50\text{--}200 \text{ m}^2/\text{g}$ (Hoval et al., 2026; Oliveira et al., 2023), sehingga menyediakan lebih banyak situs aktif untuk adsorpsi molekul pewarna pada permukaan fotoanoda. Meskipun demikian, penambahan SiO_2 saja belum sepenuhnya mampu mengatasi keterbatasan transport elektron akibat sifat isolator yang dimilikinya. Oleh karena itu, karbon aktif mulai dikembangkan sebagai material pendukung dalam komposit fotoanoda TiO_2 maupun $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ karena memiliki luas permukaan spesifik yang tinggi ($500\text{--}2000 \text{ m}^2/\text{g}$) serta struktur pori yang berkembang. Karakteristik tersebut berpotensi meningkatkan interaksi antara molekul pewarna dan permukaan fotoanoda, sekaligus mendukung proses transport muatan sehingga dapat meningkatkan kinerja fotovoltaik (Mehmood et al., 2016). Dengan demikian, kombinasi TiO_2 , SiO_2 , dan karbon aktif diharapkan mampu menghasilkan fotoanoda dengan kapasitas adsorpsi molekul pewarna yang lebih tinggi, transport elektron yang lebih efisien, serta performa fotovoltaik yang lebih baik dibandingkan penggunaan TiO_2 tunggal.

Selain pemilihan material fotoanoda, metode fabrikasi lapisan semikonduktor juga berperan penting dalam menentukan performa DSSC. Salah satu metode yang banyak digunakan adalah *screen printing* karena mampu menghasilkan lapisan yang seragam, memiliki ketebalan yang dapat dikontrol, serta mudah diaplikasikan pada proses fabrikasi berskala besar (Buchlová et al., 2024; Demir et al., 2024; Wu et al., 2024). Karakteristik lapisan fotoanoda yang dihasilkan melalui metode *screen printing*, seperti ketebalan, morfologi permukaan, kekasaran, dan kualitas antarmuka, berpengaruh terhadap adsorpsi dye, transport elektron, serta efisiensi konversi energi DSSC (Agrawal et al., 2021). Oleh karena itu, penggunaan teknik *screen printing* menjadi salah satu pendekatan yang menjanjikan dalam fabrikasi DSSC berbasis material komposit.

Selain itu, sensitizer merupakan komponen penting yang menentukan kinerja DSSC karena berfungsi menyerap energi cahaya dan menginjeksikan elektron ke pita konduksi material semikonduktor (Saud et al., 2024). Meskipun sensitizer berbasis kompleks *ruthenium* mampu menghasilkan efisiensi konversi energi yang tinggi, penggunaannya masih terkendala oleh biaya yang mahal,

proses sintesis yang kompleks, dan isu keberlanjutan (Korir et al., 2024). Oleh karena itu, pewarna alami menjadi alternatif yang banyak dikembangkan karena tersedia melimpah, mudah diekstraksi, ramah lingkungan, dan berbiaya rendah. Salah satu pewarna alami yang potensial adalah buah bit merah (*Beta vulgaris* L.) karena mengandung pigmen betalain, terutama betasianin, yang memiliki kemampuan menyerap cahaya pada daerah tampak sehingga berpotensi digunakan sebagai sensitizer pada DSSC (Kusumawati et al., 2024; Shah et al., 2023).

Meskipun ekstrak buah bit merah (*Beta vulgaris*) telah banyak dimanfaatkan sebagai sensitizer alami pada DSSC, penelitian yang ada umumnya masih berfokus pada optimasi komposisi fotoanoda, penggunaan kombinasi sensitizer, serta peningkatan karakteristik optik untuk memperbaiki efisiensi konversi energi. Kajian yang mengombinasikan fotoanoda komposit $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ -karbon aktif dengan ekstrak *Beta vulgaris* serta mengevaluasi pengaruh variasi intensitas cahaya terhadap kinerja fotovoltaiik DSSC masih sangat terbatas (Kusumawati et al., 2024; Shah et al., 2023; Srivastava et al., 2022). Penelitian lain melaporkan bahwa ekstrak buah bit merah (*Beta vulgaris*) memiliki karakteristik serapan pada daerah cahaya tampak dengan puncak absorpsi sekitar 480 nm. Kemampuan tersebut menunjukkan potensi ekstrak buah bit merah sebagai sensitizer alami yang mampu menyerap energi cahaya untuk diaplikasikan pada DSSC (Erlia et al., 2022). Namun, belum ditemukan penelitian yang secara simultan mengombinasikan fotoanoda $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ -karbon aktif dengan ekstrak *Beta vulgaris* serta mengevaluasi pengaruh variasi intensitas cahaya terhadap karakteristik fotovoltaiik DSSC. Padahal, intensitas cahaya merupakan parameter operasional yang secara langsung memengaruhi jumlah foton yang diserap sensitizer, laju injeksi elektron, densitas arus, daya keluaran, dan efisiensi konversi energi. Oleh karena itu, analisis kinerja DSSC pada berbagai intensitas cahaya diperlukan untuk memperoleh pemahaman yang lebih komprehensif mengenai karakteristik listrik dan stabilitas performa perangkat pada kondisi pencahayaan yang berbeda.

Berdasarkan uraian tersebut, penelitian ini bertujuan menganalisis efisiensi konversi energi DSSC berbasis fotoanoda $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ -karbon aktif dengan menggunakan ekstrak buah bit merah sebagai sensitizer pada berbagai intensitas cahaya. Hasil penelitian diharapkan dapat memberikan pemahaman mengenai pengaruh intensitas cahaya terhadap karakteristik fotovoltaiik DSSC sekaligus menjadi dasar pengembangan perangkat DSSC berbasis material komposit dan pewarna alami yang memiliki performa lebih baik serta berpotensi diterapkan pada aplikasi energi skala kecil.

2. Data dan Metodologi

2.1. Data Penelitian

Penelitian ini menggunakan data primer yang diperoleh melalui pengujian eksperimental terhadap DSSC berbasis fotoanoda $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ -karbon aktif dengan sensitizer ekstrak buah bit merah (*Beta vulgaris* L.). Data penelitian terdiri atas data karakterisasi material dan data kinerja fotovoltaiik DSSC. Karakterisasi fotoanoda dilakukan menggunakan *X-Ray Diffraction* (XRD) untuk mengidentifikasi fase kristal, struktur kristalin, dan tingkat kristalinitas material $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ -karbon aktif. Selanjutnya, *Scanning Electron Microscopy* (SEM) digunakan untuk mengamati morfologi permukaan, distribusi partikel, struktur pori, serta homogenitas lapisan fotoanoda hasil fabrikasi menggunakan teknik *screen printing*. Analisis komposisi unsur dilakukan menggunakan *Energy Dispersive X-ray Spectroscopy* (EDX) yang terintegrasi dengan SEM untuk mengidentifikasi dan mengonfirmasi keberadaan unsur-unsur penyusun fotoanoda, sehingga dapat diketahui distribusi unsur pada permukaan material. Karakterisasi sensitizer dilakukan menggunakan spektroskopi *Ultraviolet-Visible* (UV-Vis) untuk menentukan karakteristik serapan optik ekstrak buah bit merah, termasuk panjang gelombang serapan maksimum (λ_{max}) yang berkaitan dengan kemampuan pigmen betalain dalam menyerap cahaya tampak. Selanjutnya, kinerja fotovoltaiik DSSC dievaluasi melalui pengukuran karakteristik rapat arus-tegangan (*current density-voltage*, J-V) pada berbagai intensitas cahaya. Data yang diperoleh meliputi tegangan rangkaian terbuka (*open-circuit voltage*, V_{oc}), rapat arus hubung singkat (*short-circuit current density*, J_{sc}), daya maksimum (*maximum power*, P_{max}), *fill factor* (FF), dan efisiensi konversi energi (η). Pengujian pada beberapa variasi intensitas cahaya dilakukan untuk mengevaluasi pengaruh perubahan intensitas pencahayaan terhadap karakteristik listrik dan performa fotovoltaiik DSSC.

2.2. Bahan Penelitian

Material utama yang digunakan meliputi titanium dioksida (TiO_2), silikon dioksida (SiO_2), karbon aktif, kaca konduktif *fluorine-doped tin oxide* (FTO), larutan elektrolit iodida/triiodida (I^-/I_3^-), elektroda lawan berbasis grafit, serta ekstrak buah bit merah sebagai sensitizer alami. Pasta fotoanoda disiapkan dari campuran TiO_2 , SiO_2 , dan karbon aktif dengan komposisi yang telah ditentukan, kemudian diaplikasikan pada substrat FTO menggunakan metode *screen printing*.

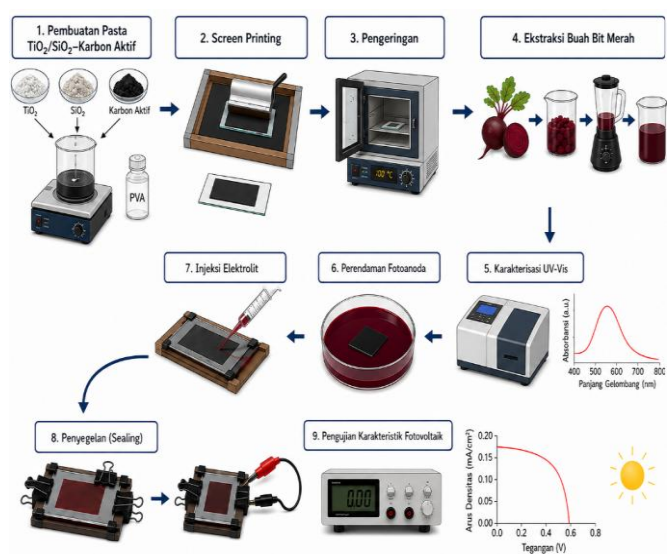
2.3. Fabrikasi DSSC

Proses fabrikasi DSSC dalam penelitian ini secara garis besar ditunjukkan oleh Gambar 1. Prosesnya diawali dengan pembersihan substrat kaca konduktif FTO. Substrat dicuci secara berturut-turut menggunakan akuades, etanol, dan aseton dengan bantuan *ultrasonic cleaner* masing-

masing selama ± 15 menit untuk menghilangkan debu, minyak, dan kontaminan organik (Karakuş, 2025). Setelah itu substrat dikeringkan pada suhu ruang hingga seluruh pelarut menguap.

Pasta fotoanoda dibuat dengan mencampurkan 5 g TiO_2 , 5 g SiO_2 , dan 5 g karbon aktif ke dalam *beaker glass*. Campuran tersebut kemudian ditambahkan larutan *polyvinyl alcohol* (PVA) sebagai bahan pengikat (*binder*) secara bertahap sambil diaduk menggunakan *magnetic stirrer* hingga diperoleh pasta yang homogen dan memiliki viskositas yang sesuai untuk proses *screen printing*. PVA berfungsi meningkatkan homogenitas campuran, memperbaiki adhesi lapisan terhadap substrat FTO, serta memudahkan proses pencetakan sehingga lapisan fotoanoda yang dihasilkan lebih seragam (Kim et al., 2017).

Pasta yang telah homogen selanjutnya diaplikasikan pada permukaan substrat FTO menggunakan teknik *screen printing*. Proses pencetakan dilakukan secara merata pada area aktif elektroda hingga diperoleh lapisan dengan ketebalan yang seragam. Setelah pencetakan selesai, elektroda dikeringkan pada suhu sekitar 100°C selama ± 30 menit untuk menghilangkan kandungan air dan pelarut dari pasta.



Gambar 1. Proses fabrikasi DSSC.

Ekstrak buah bit merah (*Beta vulgaris* L.) diperoleh dengan mencuci buah hingga bersih, mengupas kulitnya, kemudian memotongnya menjadi bagian-bagian kecil. Potongan buah selanjutnya dihancurkan menggunakan blender, kemudian diekstraksi menggunakan pelarut etanol untuk memperoleh ekstrak yang mengandung pigmen betalain sebagai sensitizer alami DSSC (Kusumawati et al., 2024). Larutan hasil ekstraksi kemudian disaring menggunakan kertas saring untuk memisahkan ampas sehingga diperoleh ekstrak yang

homogen. Karakteristik optik ekstrak dianalisis menggunakan spektrofotometer UV-Vis untuk menentukan spektrum absorpsi dan panjang gelombang serapan maksimum (λ_{max}).

Selanjutnya, fotoanoda yang telah difabrikasi direndam dalam larutan ekstrak buah bit merah selama 24 jam agar molekul betalain dapat teradsorpsi secara optimal pada permukaan $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ -karbon aktif. Perakitan DSSC dilakukan dengan memasang fotoanoda yang telah tersensitisasi dengan elektroda lawan yang telah dilapisi grafit sehingga kedua elektroda saling berhadapan. Larutan elektrolit I^-/I_3^- diinjeksi ke dalam celah di antara kedua elektroda hingga memenuhi seluruh area aktif. Setelah itu, kedua elektroda disegel menggunakan perekat untuk mencegah kebocoran elektrolit dan meningkatkan stabilitas perangkat sebelum dilakukan pengujian karakteristik fotovoltak.

2.4. Karakterisasi Fotoanoda DSSC

Karakterisasi fotoanoda DSSC dilakukan untuk mengetahui karakteristik struktur kristal, morfologi permukaan, dan komposisi unsur material penyusun fotoanoda. Karakterisasi diawali dengan pengujian XRD untuk mengidentifikasi fase kristal $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ -karbon aktif (Demir et al., 2024). Selanjutnya, karakterisasi morfologi dilakukan menggunakan SEM untuk mengamati bentuk dan ukuran partikel, distribusi partikel, tingkat porositas, serta homogenitas lapisan fotoanoda (Agrawal et al., 2021). Analisis komposisi unsur pada permukaan fotoanoda dilakukan menggunakan EDX yang terintegrasi dengan SEM untuk memastikan keberadaan unsur-unsur penyusun material (Nizamudeen et al., 2023). Karakterisasi sensitizer dilakukan menggunakan UV-Vis untuk mengetahui karakteristik serapan optik ekstrak buah bit merah (*Beta vulgaris* L.), termasuk menentukan panjang gelombang serapan maksimum (λ_{max}) yang berkaitan dengan kemampuan pigmen betalain dalam menyerap cahaya tampak (Kusumawati et al., 2024). Hasil karakterisasi tersebut digunakan untuk menjelaskan hubungan antara struktur, morfologi, komposisi material fotoanoda, serta karakteristik optik sensitizer terhadap kinerja DSSC yang dihasilkan.

2.5. Pengujian Kinerja DSSC

Pengujian kinerja DSSC dilakukan setelah seluruh komponen sel berhasil dirakit, dengan ilustrasi pengujiannya ditunjukkan pada Gambar 2. Pengujian menggunakan sumber cahaya LED putih berdaya 8 W, 10 W, dan 12 W. Karakteristik listrik DSSC diperoleh melalui pengukuran kurva rapat arus-tegangan (*current density-voltage* atau J-V) sehingga diperoleh nilai tegangan rangkaian terbuka (V_{oc}), rapat arus hubung singkat (J_{sc}), tegangan pada titik daya maksimum (V_{max}), dan rapat arus pada titik daya maksimum (J_{max}). Selanjutnya, nilai Fill

Factor (FF) dihitung menggunakan Persamaan (3.1) (These et al., 2024):

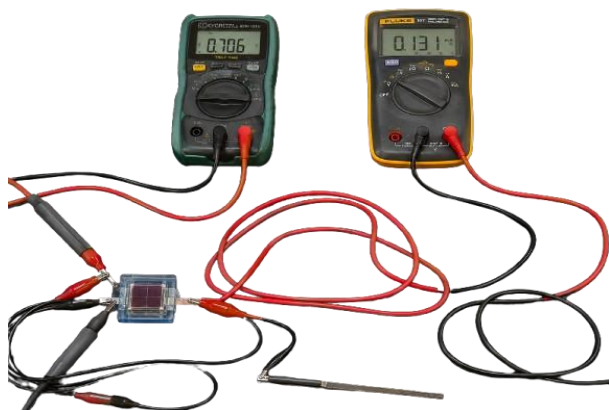
$$FF = \frac{V_{\max} \times J_{\max}}{V_{oc} \times J_{sc}} \quad (3.1)$$

dengan FF merupakan Fill Factor, V_{oc} adalah tegangan rangkaian terbuka (V), J_{sc} merupakan rapat arus hubung singkat (mA/cm^2), sedangkan $V_{\max}$ dan $J_{\max}$ masing-masing merupakan tegangan (V) dan rapat arus (mA/cm^2) pada titik daya maksimum. Efisiensi konversi energi DSSC dihitung menggunakan Persamaan (3.2) (Korir et al., 2024):

$$\eta = \frac{V_{oc} \times J_{sc} \times FF}{P_{in}} \times 100\% \quad (3.2)$$

dengan η merupakan efisiensi konversi energi (%), P_{in} merupakan daya cahaya yang diterima permukaan aktif DSSC (W/m^2 atau mW/cm^2), V_{oc} adalah tegangan rangkaian terbuka (V), J_{sc} merupakan rapat arus hubung singkat (mA/cm^2), dan FF merupakan *Fill Factor*.

Nilai P_{in} diperoleh dari hasil pengukuran intensitas cahaya menggunakan lux meter yang selanjutnya dikonversi menjadi irradiansi (mW/cm^2).



Gambar 2. Ilustrasi pengujian kinerja DSSC.

2.6. Analisis Data

Data hasil karakterisasi fotoanoda dan pengujian kinerja DSSC dianalisis secara deskriptif dan komparatif untuk mengevaluasi karakteristik material fotoanoda serta pengaruh variasi intensitas cahaya terhadap kinerja fotovoltai DSSC. Hasil karakterisasi XRD dianalisis untuk mengidentifikasi fase kristal dan tingkat kristalinitas material, sedangkan hasil SEM-EDX digunakan untuk mengevaluasi morfologi permukaan, distribusi partikel, porositas, homogenitas lapisan, serta komposisi unsur penyusun fotoanoda. Selanjutnya, hasil UV-Vis dianalisis untuk menentukan karakteristik penyerapan cahaya ekstrak buah bit merah sebagai sensitizer. Seluruh hasil karakterisasi tersebut kemudian dikorelasikan dengan parameter kinerja DSSC yang meliputi tegangan rangkaian terbuka (V_{oc}), rapat arus hubung singkat (J_{sc}), tegangan

pada titik daya maksimum ($V_{\max}$), rapat arus pada titik daya maksimum ($J_{\max}$), *Fill Factor* (FF), dan efisiensi konversi energi (η), sehingga diperoleh hubungan antara karakteristik material fotoanoda dan performa fotovoltai DSSC. Data disajikan dalam bentuk tabel dan grafik, kemudian dibandingkan dengan hasil penelitian terdahulu yang relevan sebagai dasar dalam pembahasan dan penarikan kesimpulan penelitian.

3. Hasil dan Pembahasan

Karakterisasi komposit $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ -karbon aktif dilakukan menggunakan XRD dan SEM-EDX untuk mengevaluasi struktur kristal, morfologi permukaan, serta komposisi unsur penyusun material. Hasil karakterisasi yang disajikan pada gambar 3 menunjukkan bahwa komposit berhasil terbentuk dengan struktur kristal yang baik, morfologi permukaan yang berpori, serta komposisi unsur yang sesuai dengan material penyusunnya.

Gambar 3(a) memperlihatkan pola difraksi XRD komposit $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ -karbon aktif dengan beberapa puncak difraksi yang tajam dan puncak dominan pada sudut 2θ sekitar 25° . Puncak tersebut dapat diatribusikan pada bidang kristal (101) fase anatase TiO_2 , sehingga mengonfirmasi bahwa anatase merupakan fase kristalin dominan yang berperan sebagai material aktif pada fotoanoda DSSC (Yue et al., 2024). Puncak-puncak difraksi lainnya menunjukkan bahwa struktur kristal TiO_2 tetap terjaga setelah dikombinasikan dengan SiO_2 dan karbon aktif. Sementara itu, kontribusi SiO_2 dan karbon aktif terhadap pola difraksi relatif lemah karena SiO_2 berada dalam fase amorf, sedangkan karbon aktif memiliki tingkat keteraturan kristal yang rendah dan umumnya menghasilkan puncak difraksi yang melebar (Arain et al., 2025). Hasil ini menunjukkan bahwa proses sintesis komposit tidak mengubah struktur kristal utama TiO_2 sehingga sifat semikonduktornya tetap dipertahankan (Yue et al., 2024b; Zhu et al., 2024).

Gambar 3(b) menunjukkan morfologi permukaan komposit berdasarkan hasil pengamatan SEM. Permukaan material tampak kasar, tidak homogen, dan tersusun atas agregasi partikel dengan ukuran yang bervariasi. Struktur tersebut menunjukkan bahwa partikel TiO_2 dan SiO_2 berhasil terdispersi pada matriks karbon aktif yang berpori. Morfologi seperti ini menguntungkan bagi aplikasi DSSC karena dapat meningkatkan luas permukaan spesifik sehingga menyediakan lebih banyak situs adsorpsi bagi molekul pewarna (Chang et al., 2022). Area yang ditandai dengan kotak merah merupakan lokasi analisis EDX, yang dipilih untuk mengidentifikasi komposisi unsur pada daerah representatif dari permukaan komposit.

Gambar 3(c) menyajikan spektrum EDX beserta hasil analisis kuantitatif unsur penyusun komposit. Spektrum mengonfirmasi keberadaan unsur karbon (C), oksigen (O),

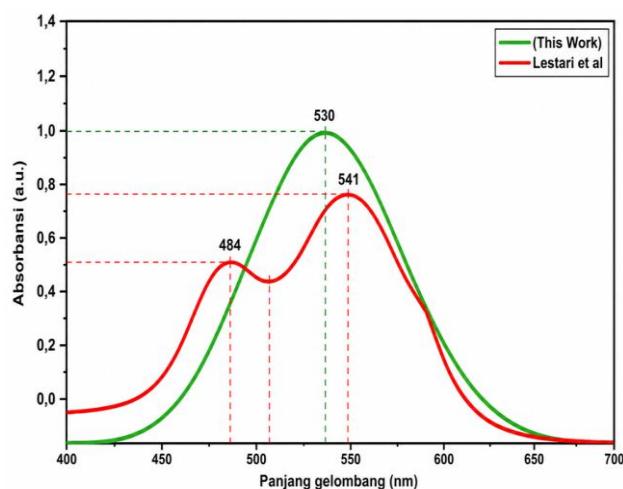
silikon (Si), dan titanium (Ti), yang sesuai dengan bahan penyusun komposit. Hasil kuantifikasi menunjukkan bahwa oksigen memiliki konsentrasi atom tertinggi sebesar 49,408 at%, diikuti karbon sebesar 31,997 at%, silikon sebesar 11,987 at%, dan titanium sebesar 6,609 at%. Berdasarkan fraksi massa, kandungan oksigen mencapai 43,243 wt%, karbon 21,021 wt%, silikon 18,418 wt%, dan titanium 17,317 wt%. Dominasi unsur oksigen mengindikasikan keberadaan senyawa oksida yang berasal dari TiO_2 dan SiO_2 , sedangkan keberadaan unsur karbon mengonfirmasi adanya karbon aktif sebagai salah satu penyusun komposit (Dada et al., 2026). Tidak terdeteksinya unsur pengotor lain pada spektrum EDX menunjukkan bahwa proses sintesis menghasilkan material dengan tingkat kemurnian yang baik, sehingga komposit $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ -karbon aktif berpotensi memberikan performa fotoelektrokimia yang baik sebagai material fotoanoda pada DSSC.

Hasil karakterisasi menunjukkan bahwa setiap komponen dalam komposit memberikan kontribusi yang saling melengkapi terhadap sifat material fotoanoda. Keberadaan SiO_2 berfungsi sebagai material pendukung yang berpotensi mempertahankan distribusi partikel TiO_2 dan meningkatkan luas permukaan komposit, sedangkan karbon aktif menyediakan struktur berpori yang mendukung peningkatan adsorpsi molekul pewarna serta memperbaiki transport elektron pada fotoanoda DSSC (Azam et al., 2022; Hikmah et al., 2022; Joshy et al., 2022). Kombinasi karakteristik tersebut berpotensi menekan laju rekombinasi elektron-hole dan meningkatkan pemanfaatan foton yang diserap oleh dye. Oleh karena itu, komposit $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ -karbon aktif yang berhasil disintesis memiliki prospek yang baik sebagai material fotoanoda untuk meningkatkan kinerja DSSC.

Spektrum UV-Vis ekstrak buah bit merah (*Beta vulgaris*) menunjukkan daerah serapan pada rentang cahaya tampak (*visible region*) dengan puncak absorbansi utama pada panjang gelombang 530 nm, sedangkan penelitian (Lestari & Setiarso, 2021) melaporkan puncak maksimum pada 541 nm, seperti ditunjukkan pada Gambar 4. Pergeseran panjang gelombang maksimum (*blue shift*) sebesar 11 nm dibandingkan hasil (Lestari & Setiarso, 2021) menunjukkan adanya perbedaan karakteristik optik ekstrak buah bit. Fenomena ini kemungkinan dipengaruhi oleh perbedaan metode ekstraksi, jenis pelarut, pH, konsentrasi pigmen, serta kondisi penyimpanan yang memengaruhi stabilitas dan struktur molekul betalain, sehingga terjadi perubahan posisi λ_{max} pada spektrum UV-Vis (Eyshi et al., 2024; Sadowska-Bartosz & Bartosz, 2021). Selain mengalami pergeseran panjang gelombang, ekstrak pada penelitian ini juga menunjukkan nilai absorbansi maksimum yang lebih tinggi dibandingkan penelitian (Lestari & Setiarso, 2021), yang mengindikasikan kandungan senyawa penyerap

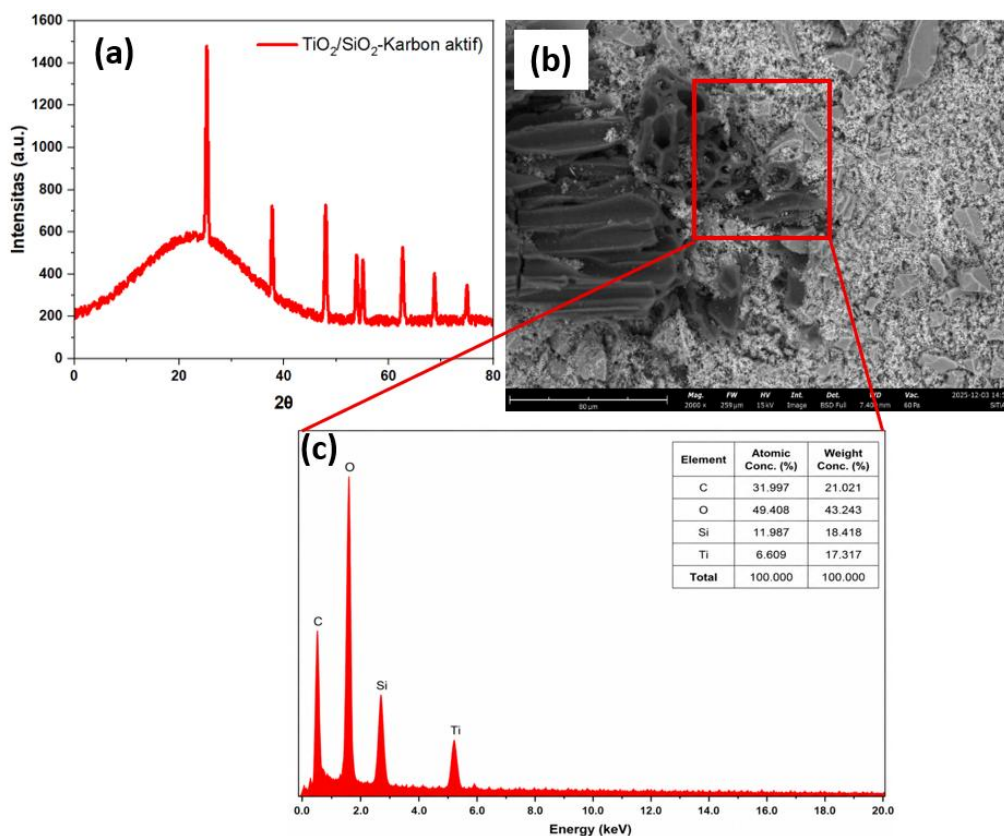
cahaya tampak yang relatif lebih besar atau lebih stabil (Sadowska-Bartosz & Bartosz, 2021).

Berdasarkan panjang gelombang serapan maksimum sebesar 530 nm, diperoleh perkiraan energi celah optik (*estimated optical band gap*) sebesar 2,34 eV menggunakan persamaan $E = 1240/\lambda$. Nilai tersebut menunjukkan bahwa pigmen dalam ekstrak buah bit merah mampu menyerap foton pada wilayah cahaya tampak dengan energi yang cukup untuk mengeksitasi elektron menuju keadaan tereksitasi (Korir et al., 2024; Prajapat et al., 2024). Meskipun nilai ini merupakan estimasi, hasil tersebut memberikan indikasi bahwa ekstrak memiliki karakteristik optik yang sesuai untuk diaplikasikan sebagai fotosensitizer alami. Berdasarkan karakteristik optik tersebut, fotoanoda komposit $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ -karbon aktif yang telah difabrikasi kemudian disensitisasi melalui perendaman dalam larutan ekstrak buah bit merah selama 24 jam untuk mengadsorpsi molekul pewarna secara optimal pada permukaan fotoanoda sehingga meningkatkan kemampuan material dalam menyerap cahaya dan memfasilitasi injeksi elektron ke pita konduksi TiO_2 .



Gambar 4. Hasil karakterisasi UV-Vis ekstrak buah bit merah.

Selain puncak serapan utama, spektrum hasil penelitian (Lestari & Setiarso, 2021) memperlihatkan puncak tambahan pada 484 nm, sedangkan pada penelitian ini puncak tersebut tidak teramati secara jelas. Perbedaan pola serapan tersebut menunjukkan adanya variasi komposisi pigmen betalain, terutama perbandingan antara betasianin dan betaxantin, yang dipengaruhi oleh proses ekstraksi dan kondisi bahan baku. Puncak absorbansi pada kisaran 530–541 nm merupakan karakteristik pigmen betasianin, khususnya senyawa betanin, yang berperan sebagai kromofor utama pada buah bit merah.

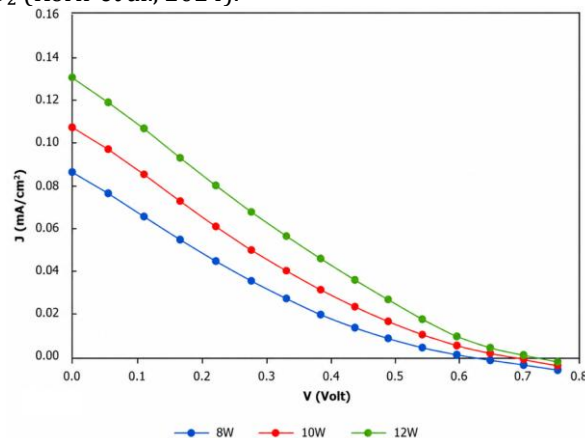


Gambar 3. Hasil karakterisasi material $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ -karbon aktif: (a) XRD, (b) SEM, dan (c) EDX.

Tingginya absorbansi pada daerah tersebut menunjukkan bahwa ekstrak memiliki potensi yang baik sebagai fotosensitizer alami karena mampu menyerap cahaya tampak secara efektif dan menghasilkan eksitasi elektron yang diperlukan dalam proses konversi energi pada DSSC (Eyshi et al., 2024). Dengan waktu sensitisasi selama 24 jam, diharapkan molekul betanin dapat teradsorpsi secara lebih merata pada permukaan fotoanoda sehingga meningkatkan jumlah molekul aktif yang berinteraksi dengan cahaya, memperbesar peluang injeksi elektron ke pita konduksi TiO_2 , dan pada akhirnya berkontribusi terhadap peningkatan kinerja fotovoltaiik DSSC.

Karakteristik fotovoltaiik DSSC yang menggunakan fotoanoda komposit $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ -karbon aktif dan fotosensitizer ekstrak buah bit merah (*Beta vulgaris*) dievaluasi berdasarkan kurva J-V pada variasi intensitas penyinaran LED putih sebesar 8 W, 10 W, dan 12 W, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 4. Kurva menunjukkan bahwa peningkatan intensitas cahaya menghasilkan kenaikan rapat arus hubung singkat (J_{sc}) dan sedikit peningkatan tegangan rangkaian terbuka (V_{oc}). Pada kondisi hubung singkat, nilai J_{sc} meningkat dari 0,085 mA/cm^2 pada penyinaran 8 W menjadi 0,131 mA/cm^2 pada 12 W. Sementara itu, nilai V_{oc} meningkat dari 0,63 V

menjadi 0,71 V. Peningkatan tersebut menunjukkan bahwa semakin besar intensitas cahaya yang diterima fotoanoda, semakin banyak foton yang mampu diserap oleh molekul betanin sehingga menghasilkan elektron tereksitasi dalam jumlah yang lebih besar untuk diinjeksi ke pita konduksi TiO_2 (Korir et al., 2024).



Gambar 5. Pengujian performa DSSC berbasis $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ -karbon aktif.

Berdasarkan kurva J-V, parameter kinerja DSSC yang dianalisis meliputi V_{oc} , J_{sc} , V_{max} , J_{max} , P_{max} , FF, dan η . Nilai-nilai tersebut disajikan pada Tabel 1. Seluruh parameter

fotovoltaik menunjukkan kecenderungan meningkat seiring bertambahnya intensitas penyinaran. Nilai P_{max} hampir dua kali lipat dibandingkan kondisi penyinaran terendah. Selanjutnya, kenaikan nilai FF mengindikasikan bahwa proses transport elektron berlangsung lebih efektif dengan rugi-rugi resistif yang lebih rendah pada intensitas cahaya yang lebih tinggi. Sebagai konsekuensinya, efisiensi konversi energi meningkat dari 0,030% menjadi 0,053%, menunjukkan bahwa peningkatan jumlah foton yang diserap secara langsung meningkatkan kemampuan DSSC dalam mengubah energi cahaya menjadi energi listrik.

Performa fotovoltaik tersebut erat kaitannya dengan karakteristik fotoanoda yang telah dikarakterisasi sebelumnya menggunakan XRD, SEM, dan EDX. Struktur kristalin TiO_2 yang tetap terjaga memberikan jalur transport elektron yang baik, sedangkan penambahan SiO_2 meningkatkan stabilitas struktur dan membantu mengurangi aglomerasi partikel TiO_2 . Di sisi lain, karbon aktif yang memiliki luas permukaan tinggi dan struktur berpori meningkatkan kapasitas adsorpsi molekul betanin selama proses sensitisasi selama 24 jam, sehingga jumlah molekul pewarna yang berinteraksi dengan cahaya menjadi lebih besar. Kombinasi ketiga material tersebut menghasilkan sinergi yang meningkatkan penyerapan cahaya, memperbesar peluang injeksi elektron ke pita konduksi TiO_2 , serta memperlancar transport elektron menuju elektroda transparan. Hal ini tercermin dari peningkatan nilai J_{sc} , P_{max} , dan efisiensi DSSC pada setiap kenaikan intensitas penyinaran.

Untuk mengevaluasi performa fotoanoda yang dikembangkan, hasil penelitian ini dibandingkan dengan beberapa penelitian sebelumnya yang menggunakan fotosensitizer alami pada DSSC. Perbandingan parameter fotovoltaik disajikan pada Tabel 2. Berdasarkan perbandingan tersebut, efisiensi konversi daya yang diperoleh pada penelitian ini, yaitu sebesar 0,030–0,053%, masih berada di bawah sebagian besar penelitian terdahulu yang menggunakan berbagai jenis fotosensitizer alami dan modifikasi fotoanoda. Perbedaan tersebut dapat dipengaruhi oleh variasi jenis pewarna, komposisi material fotoanoda, metode fabrikasi, kondisi sensitisasi, sistem elektrolit, serta kondisi pengujian yang berbeda pada masing-masing penelitian. Meskipun demikian, penelitian ini menunjukkan bahwa penggunaan komposit TiO_2/SiO_2 -karbon aktif yang dipadukan dengan fotosensitizer buah bit merah mampu menghasilkan respons fotovoltaik yang stabil, sehingga memiliki potensi sebagai alternatif material fotoanoda pada DSSC berbasis pewarna alami.

Peningkatan performa yang diperoleh dibandingkan konfigurasi fotoanoda TiO_2 tanpa modifikasi pada penelitian ini berkaitan dengan peran masing-masing komponen dalam komposit fotoanoda. TiO_2 berfungsi sebagai semikonduktor utama yang menerima elektron

dari molekul dye setelah proses eksitasi, sedangkan SiO_2 meningkatkan luas permukaan spesifik dan membantu mempertahankan homogenitas lapisan fotoanoda sehingga menyediakan lebih banyak situs adsorpsi bagi molekul betanin. Di sisi lain, karbon aktif yang memiliki struktur berpori dan luas permukaan tinggi meningkatkan jumlah dye yang teradsorpsi sekaligus menyediakan jalur transport elektron yang lebih baik. Sinergi ketiga material tersebut diperkirakan mampu menekan rekombinasi elektron-hole sehingga lebih banyak elektron dapat ditransfer menuju elektroda luar dan berkontribusi terhadap peningkatan rapat arus hubung singkat (J_{sc}). Mekanisme ini sejalan dengan berbagai penelitian yang melaporkan bahwa penggunaan material berpori dan material berbasis karbon pada fotoanoda mampu meningkatkan luas kontak antarmuka, mempercepat transport elektron, serta memperbaiki karakteristik fotovoltaik DSSC.

Meskipun demikian, efisiensi yang diperoleh masih relatif lebih rendah dibandingkan beberapa penelitian terdahulu yang menggunakan fotosensitizer alami maupun DSSC berbasis pewarna sintesis. Rendahnya efisiensi tersebut kemungkinan disebabkan oleh karakteristik fotosensitizer alami yang umumnya memiliki rentang penyerapan cahaya lebih sempit, stabilitas fotokimia yang lebih rendah, serta efisiensi injeksi elektron yang belum sebaik kompleks logam berbasis ruthenium. Selain itu, kandungan pigmen betanin dalam ekstrak buah bit merah rentan mengalami degradasi akibat paparan cahaya, suhu, dan perubahan pH sehingga dapat menurunkan kemampuan penyerapan cahaya selama proses konversi energi. Di samping itu, optimasi komposisi komposit TiO_2/SiO_2 -karbon aktif, ketebalan lapisan fotoanoda, waktu sensitisasi, dan sistem elektrolit masih berpotensi meningkatkan kinerja DSSC yang dihasilkan.

Secara keseluruhan, penelitian ini memberikan kontribusi dalam pengembangan fotoanoda komposit TiO_2/SiO_2 -karbon aktif berbasis metode *screen printing* yang dikombinasikan dengan fotosensitizer alami buah bit merah (*Beta vulgaris* L.). Meskipun efisiensi konversi daya yang diperoleh belum melampaui sebagian besar penelitian sebelumnya, hasil penelitian ini menunjukkan bahwa pendekatan tersebut layak dikembangkan lebih lanjut melalui optimasi komposisi material, peningkatan stabilitas fotosensitizer, serta penyempurnaan parameter fabrikasi untuk menghasilkan performa DSSC yang lebih baik.

Selain dipengaruhi oleh karakteristik fotoanoda, performa DSSC juga ditentukan oleh kesesuaian tingkat energi antara fotosensitizer, pita konduksi TiO_2 , dan elektrolit. Molekul betanin yang menyerap foton pada daerah cahaya tampak mengalami eksitasi elektron dari tingkat energi HOMO ke LUMO.

Tabel 1. Parameter fotovoltaiik DSSC pada berbagai intensitas penyinaran.

Intensitas LED (W)	Voc (V)	Jsc (mA/cm ²)	Vmax (V)	Jmax (mA/cm ²)	Pmax (mW/cm ²)	FF (%)	η (%)
8	0,63	0,085	0,39	0,054	0,021	39,2	0,030
10	0,67	0,107	0,42	0,072	0,030	41,8	0,041
12	0,71	0,131	0,45	0,093	0,042	45,1	0,053

Tabel 2. Perbandingan performa DSSC berbasis fotosensitizer alami dengan beberapa penelitian sebelumnya.

(Yadav et al., 2022)	<i>Hibiscus sabdariffa</i> (rosella)	TiO ₂ nanorod	Menguji pengaruh counter electrode terhadap performa DSSC. η = 0,07–0,23%.
(Y. Li et al., 2013)	Kubis ungu (<i>Brassica oleracea</i>)	TiO ₂	Mengoptimasi pH dan waktu perendaman dye pada DSSC berbasis kubis ungu. Penelitian ini menghasilkan nilai η = 0.000007 – 2,908%.
(Pratiwi et al., 2016)	Kubis ungu, buah naga, kulit manggis	TiO ₂	Eksperimen membandingkan beberapa pewarna alami dan melaporkan Voc, Jsc, FF, serta efisiensi masing-masing DSSC. Efisiensi tertinggi dalam penelitian ini adalah 0.054%.
(Hatem et al., 2024)	<i>Hibiscus</i>	TiO ₂ /SiO ₂	Penelitian ini memperoleh efisiensi sekitar 1,317%
(Ninan et al., 2024)	<i>Hibiscus rosa-sinensis</i>	TiO ₂ + Carbon Dots	Penelitian ini menghasilkan efisiensi yang tinggi, yaitu 3,50%
<i>This work</i>	Buah bit merah	TiO ₂ /SiO ₂ - karbon aktif	Efisiensi yang dihasilkan dalam penelitian ini berkisar 0,030-0,053%.

Elektron yang berada pada tingkat LUMO kemudian diinjeksi ke pita konduksi TiO₂ dan selanjutnya ditransfer menuju rangkaian luar, sedangkan molekul dye diregenerasi oleh elektrolit I⁻/I₃⁻ sehingga siklus konversi energi dapat berlangsung secara berkelanjutan. Keberadaan SiO₂ dan karbon aktif pada fotoanoda diduga meningkatkan luas permukaan aktif serta memperbaiki kontak antarmuka antarpartikel, sehingga menyediakan lebih banyak situs adsorpsi bagi molekul betanin dan memfasilitasi transport elektron menuju elektroda. Mekanisme tersebut diperkirakan berkontribusi terhadap nilai rapat arus hubung singkat (Jsc) dan *fill factor* yang diperoleh pada penelitian ini. Dengan demikian, komposit TiO₂/SiO₂-karbon aktif tidak hanya berpotensi meningkatkan kapasitas adsorpsi dye pada permukaan fotoanoda, tetapi juga mendukung proses transport muatan yang lebih efisien sehingga berkontribusi terhadap kinerja fotovoltaiik DSSC.

4. Kesimpulan

DSSC berbasis fotoanoda komposit TiO₂/SiO₂-karbon aktif berhasil difabrikasi menggunakan metode *screen printing* dan disensitisasi dengan ekstrak buah bit merah (*Beta vulgaris*) sebagai fotosensitizer alami. Hasil karakterisasi menunjukkan bahwa komposit memiliki struktur kristalin yang baik, morfologi permukaan berpori,

serta komposisi unsur yang mendukung proses adsorpsi dye dan transport elektron. Karakterisasi UV-Vis juga menunjukkan puncak serapan maksimum pada panjang gelombang 530 nm dengan perkiraan energi celah optik sebesar 2,34 eV, yang mengindikasikan potensi ekstrak buah bit merah sebagai penyerap cahaya tampak. Analisis karakteristik fotovoltaiik menunjukkan bahwa peningkatan intensitas penyinaran dari 8 W hingga 12 W meningkatkan parameter kinerja DSSC, yang ditunjukkan oleh kenaikan nilai Voc, Jsc, Pmax, FF, dan efisiensi konversi energi. Kinerja terbaik diperoleh pada intensitas 12 W, dengan Voc sebesar 0,71 V, Jsc sebesar 0,131 mA/cm², FF sebesar 45,1%, dan efisiensi sebesar 0,053%. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa kombinasi fotoanoda TiO₂/SiO₂-karbon aktif dan sensitizer ekstrak buah bit merah berpotensi dikembangkan sebagai material DSSC yang lebih ramah lingkungan dan berbiaya relatif rendah. Potensi tersebut didukung oleh ketersediaan bahan baku yang mudah diperoleh, pemanfaatan sensitizer alami sebagai pengganti pewarna sintesis, serta kemampuan karbon aktif dalam meningkatkan luas permukaan aktif dan mendukung proses adsorpsi molekul pewarna. Selain itu, struktur berpori karbon aktif dan keberadaan SiO₂ berpotensi memperbaiki penyerapan sensitizer serta mendukung transport elektron pada fotoanoda. Meskipun demikian, efisiensi konversi energi yang masih rendah,

kestabilan ekstrak terhadap paparan cahaya, serta keseragaman lapisan fotoanoda menjadi keterbatasan yang perlu diperbaiki. Penelitian selanjutnya dapat diarahkan pada optimasi komposisi fotoanoda, konsentrasi dan proses adsorpsi sensitizer, ketebalan lapisan, serta pengujian stabilitas DSSC dalam jangka panjang.

5. Ucapan Terima Kasih

Penulis menyampaikan terima kasih kepada Universitas Buana Perjuangan Karawang dan Politeknik STTT Bandung atas dukungan akademik dan fasilitas yang diberikan selama pelaksanaan penelitian ini. Apresiasi turut disampaikan kepada seluruh pihak yang telah memberikan masukan, bantuan, dan dukungan sehingga penelitian ini dapat diselesaikan dengan baik.

6. Referensi

- Agrawal, A., Siddiqui, S. A., Soni, A., Khandelwal, K., & Sharma, G. D. (2021). Performance analysis of TiO₂ based dye sensitized solar cell prepared by screen printing and doctor blade deposition techniques. *Solar Energy*, 226, 9–19. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2021.08.001>
- Araín, S., Usman, M., Saeed, F., Feng, S., Rehman, W., Liu, X., & Dai, H. (2025). Microemulsion-Based Synthesis of Highly Efficient Ag-Doped Fibrous SiO₂-TiO₂ Photoanodes for Photoelectrochemical Water Splitting. *Catalysts*, 15(66), 1–18. <https://doi.org/10.3390/catal15010066>
- Azam, K., Shezad, N., Shafiq, I., Akhter, P., Akhtar, F., Jamil, F., Shafique, S., Park, Y. K., & Hussain, M. (2022). A review on activated carbon modifications for the treatment of wastewater containing anionic dyes. *Chemosphere*, 306(135566), 1–19. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.135566>
- Buchlová, T., Hatala, M., Veteška, P., Ház, A., Novák, P., Mackuľák, T., Mikula, M., & Gemeiner, P. (2024). Screen-printed counter-electrodes based on biochar derived from wood-corn silage and titanium isopropoxide binder as a more efficient and renewable alternative to Pt-CE for dye-sensitized solar cells. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 171(108016), 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.mssp.2023.108016>
- Chang, Q., Xu, J., Han, Y., Ehrmann, A., He, T., & Zheng, R. (2022). Photoelectric Performance Optimization of Dye-Sensitized Solar Cells Based on ZnO-TiO₂ Composite Nanofibers. *Journal of Nanomaterials*, 2022(7356943), 1–10. <https://doi.org/10.1155/2022/7356943>
- Dada, A. O., Christianah, O. A., Odufa, O. O. M., Obayomi, K. S., Christiana, A. O., Chang, S. K., Wong, L. S., & Wilson, L. D. (2026). Preparation and characterization of coconut shell activated carbon supported titanium dioxide nanocomposite (CSAC-P-TiO₂NC). *MethodsX*, 16(103862), 1–14. <https://doi.org/10.1016/j.mex.2026.103862>
- Demir, A., Aslan, F., & Esen, H. (2024). TiO₂/ZnO-based composite thin films coated on FTO surface by screen printing method: increasing dye-sensitized solar cell performance. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 35(1481), 1–14. <https://doi.org/10.1007/s10854-024-13213-z>
- Erlia, J., Iswardy, E., Azmi, N., & Mursal, M. (2022). Analysis of purple cabbage (*Brassica oleracea* var. capitata f. rubra) and beetroot (*Beta vulgaris*) extracts as dye for Dye Sensitized Solar Cell (DSSC) application. *Journal of Aceh Physics Society*, 11(3), 65–69. <https://doi.org/10.24815/jacps.v11i3.25170>
- Eyshi, S., Ghareaghajlou, N., Afshar Mogaddam, M. R., & Ghasempour, Z. (2024). Red beet betalains extraction process: A comprehensive review of methods, applications, and physicochemical properties. *Food Science and Nutrition*, 12(11), 8540–8558. <https://doi.org/10.1002/fsn.3.4458>
- Foqha, T., Refaat, S. S., Mohammed, A., Farrag, M., & Gamal, H. (2026). Renewable energy sources: Progress, challenges, and environmental benefits. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 240(117167), 1–27. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2026.117167>
- Hatem, O. A., Saad, N., & Jawad, S. F. (2024). Dye-Sensitized Solar Cell of Silicon Dioxide-Titanium Dioxide Photoanode with Polypyrrole/Sodium Dodecyl Sulfate Low-Cost Counter Electrode. *Material Design and Processing Communications*, 2024(9962496), 1–18. <https://doi.org/10.1155/2024/9962496>
- Hikmah, N., Agustiniingsih, D., Nuryono, N., & Kunarti, E. S. (2022). Preparation of Iron-Doped SiO₂/TiO₂ Using Silica from Sugarcane Bagasse Ash for Visible Light Degradation of Congo Red. *Indonesian Journal of Chemistry*, 22(2), 402–412. <https://doi.org/10.22146/ijc.69501>
- Hoval, R. D., Shinde, S. T., Kale, A. A., Gaikwad, N. S., Yedase, G. S., Bankar, D. B., Kanade, K. G., Dhokale, B., & Amalnerkar, D. P. (2026). TiO₂-based multifunctional catalytic systems for green and sustainable organic transformations: a comprehensive review. *RSC Advances*, 16(33), 30538–30562. <https://doi.org/10.1039/d6ra01453d>
- Hussein, H. A., Hassan, A., & Almutalb, A. (2025). Effect pH on hibiscus sabdarifa dye in TiO₂/SiO₂ nanocomposite in dye sensitized solar cells. *International Journal of Applied Mathematics*, 38(8s), 21–33.

- Joshy, D., Narendranath, S. B., Ismail, Y. A., & Periyat, P. (2022). Recent progress in one dimensional TiO₂ nanomaterials as photoanodes in dye-sensitized solar cells. *Nanoscale Advances*, 73(4), 5202–5232. <https://doi.org/10.1039/d2na00437b>
- Karakuş, M. Ö. (2025). Low-Light Energy Harvesting Beyond Silicon: Role of Boron-Doped TiO₂ Photoanodes in DSSCs. *International Journal of Advanced Natural Sciences and Engineering Researches*, 12(12), 674–679.
- Khair, H., Pandey, A. K., Saidur, R., Shakeel Ahmad, M., Abd Rahim, N., Dewika, M., & Samykano, M. (2022). Recent advancements and challenges in flexible low temperature dye sensitised solar cells. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 53(102745), 1–23. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2022.102745>
- Kim, D. H., Park, M. S., Kim, D. J., Cho, H. H., & Kim, J. H. (2017). Solid polymer electrolyte dye-sensitized solar cells with organized mesoporous TiO₂ interfacial layer templated by poly(vinyl alcohol)-poly(methyl methacrylate) comb copolymer. *Solid State Ionics*, 300, 195–204. <https://doi.org/10.1016/j.ssi.2016.12.033>
- Korir, B. K., Kibet, J. K., & Ngari, S. M. (2024). A review on the current status of dye-sensitized solar cells: Toward sustainable energy. *Energy Science and Engineering*, 12(8), 3188–3226. <https://doi.org/10.1002/ese3.1815>
- Kumar, D. (2023). Enhancement of Optical Properties of Anti-Reflection Coatings on Solar PV Cells through Hybrid TiO₂-SiO₂ Nanoparticles. *Chem. Eng. Research Article*, 42(12), 4291–4306.
- Kusumawati, N., Setiarso, P., Muslim, S., Zakiyah, N., Rahmawati, K., & Fachrirakarsie, F. F. (2024). Optimizing Dye-Sensitized Solar Cell (DSSC) Performance through Synergistic Natural Dye Combinations from Beta vulgaris L., Curcuma longa L., and Pandanus amaryllifolius. *Indonesian Journal of Chemistry*, 24(6), 1675–1687. <https://doi.org/10.22146/ijc.93830>
- Lestari, E. A. I., & Setiarso, P. (2021). Studi Elektrokimia Ekstrak Betalain Umbi Bit Sebagai Pewarna Alami DSSC (Dye Sensitized Solar Cell). *UNESA Journal of Chemistry*, 10(3), 318–325.
- Li, J., Zhang, J., Ling, Y., Zhu, T., Gan, K., & Nong, G. (2024). Introduction of Ti³⁺ within TiO₂ to improve photoanode electron transport performance in dye-sensitized solar cells (DSSCs). *Optical Materials*, 157(116226), 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.optmat.2024.116226>
- Li, Y., Ku, S.-H., Chen, S.-M., Ali, M. A., & Alhemaïd, F. M. A. (2013). Photoelectrochemistry for Red Cabbage Extract as Natural Dye to Develop a Dye-Sensitized Solar Cells. *Int. J. Electrochem. Sci*, 8, 1237–1245.
- Mehmood, U., Zaheer Aslam, M., Shawabkeh, R. A., Hussein, I. A., Ahmad, W., & Ghaffar Rana, A. (2016). Improvement in Photovoltaic Performance of Dye Sensitized Solar Cell Using Activated Carbon-TiO₂ Composites-Based Photoanode. *IEEE Journal of Photovoltaics*, 6(5), 1191–1195. <https://doi.org/10.1109/JPHOTOV.2016.2574127>
- Ninan, G. G., Varghese, M., & Balachandran, M. (2024). Enhancing the stability of DSSC by Co-activation of microwave synthesized TiO₂ with biomass derived carbon dots. *Optical Materials*, 154(115730), 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.optmat.2024.115730>
- Nizamudeen, C., Krishnapriya, R., Mozumder, M. S., Mourad, A. H. I., & Ramachandran, T. (2023). Photovoltaic performance of MOF-derived transition metal doped titania-based photoanodes for DSSCs. *Scientific Reports*, 13(6345), 1–13. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-33565-6>
- Oliveira, A. de N. de, Cardoso, R. da S., Ferreira, I. M., Silva, L. S. da, Costa, A. A. F. da, Pires, L. H. de O., Rocha Filho, G. N. da, Luque, R., Noronha, R. C. R., & Nascimento, L. A. S. do. (2023). Valorization of silica-based residues for the synthesis of ordered mesoporous silicas and their applications. *Microporous and Mesoporous Materials*, 354(112520), 1–50. <https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2023.112520>
- Prajapat, K., Mahajan, U., Sahu, K., Dhonde, M., & Shirage, P. M. (2024). The Evolution of natural Dye-Sensitized solar Cells: Current Advances and future outlook. *Solar Energy*, 284(113081), 1–31. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2024.113081>
- Pratiwi, D. D., Nurosyid, F., Supriyanto, A., & Suryana, R. (2016). Optical properties of natural dyes on the dye-sensitized solar cells (DSSC) performance. *Journal of Physics: Conference Series*, 776(1), 1–7. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/776/1/012007>
- Sadowska-Bartos, I., & Bartosz, G. (2021). Biological properties and applications of betalains. *Molecules*, 26(9), 1–36. <https://doi.org/10.3390/molecules26092520>
- Saud, P. S., Bist, A., Kim, A. A., Yousef, A., Abutaleb, A., Park, M., Park, S. J., & Pant, B. (2024). Dye-sensitized solar cells: Fundamentals, recent progress, and Optoelectrical properties improvement strategies. *Optical Materials*, 150(115242), 1–18. <https://doi.org/10.1016/j.optmat.2024.115242>
- Sawal, M. H., Jalil, A. A., Khusnun, N. F., Hassan, N. S., & Bahari, M. B. (2023). A review of recent modification strategies of TiO₂-based photoanodes for efficient photoelectrochemical water splitting performance.

- Electrochimica Acta*, 467(143142), 1–20.
<https://doi.org/10.1016/j.electacta.2023.143142>
- Shah, W., Faraz, S. M., & Awan, Z. H. (2023). Photovoltaic properties and impedance spectroscopy of dye sensitized solar cells co-sensitized by natural dyes. *Physica B: Condensed Matter*, 654(414716), 1–8.
<https://doi.org/10.1016/j.physb.2023.414716>
- Srivastava, A., Satrughna, J. A. K., Tiwari, M. K., Kanwade, A., Yadav, S. C., Bala, K., & Shirage, P. M. (2022). Effect of Ti1–xFexO2 photoanodes on the performance of dye-sensitized solar cells utilizing natural betalain pigments extracted from Beta vulgaris (BV). *Energy Advances*, 2(1), 148–160.
<https://doi.org/10.1039/d2ya00197g>
- Srivishnu, K. S., Rajesh, M. N., Prasanthkumar, S., & Giribabu, L. (2023). Photovoltaics for indoor applications: Progress, challenges and perspectives. *Solar Energy*, 264(112057), 1–23.
<https://doi.org/10.1016/j.solener.2023.112057>
- Sule, R., Makinde, O. C., Usikalu, M. R., & Olawole, O. C. (2023). Hydrothermal synthesis and characterization of TiO2-silica composites for dye-sensitized solar cell electrode. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1197(012005), 1–8.
<https://doi.org/10.1088/1755-1315/1197/1/012005>
- These, A., Koster, L. J. A., Brabec, C. J., & Le Corre, V. M. (2024). Beginner's Guide to Visual Analysis of Perovskite and Organic Solar Cell Current Density–Voltage Characteristics. *Advanced Energy Materials*, 14(2400055), 1–9.
<https://doi.org/10.1002/aenm.202400055>
- Vallejo, W., Lerma, M., & Díaz-Urbe, C. (2025). Dye sensitized solar cells: Meta-analysis of effect sensitizer-type on photovoltaic efficiency. *Heliyon*, 11(e41092), 1–19.
<https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e41092>
- Venkatesan, S., Chen, Y. Y., Teng, H., & Lee, Y. L. (2022). Enhanced adsorption on TiO2 photoelectrodes of dye-sensitized solar cells by electrochemical methods dye. *Journal of Alloys and Compounds*, 903(163959), 1–10.
<https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2022.163959>
- Wu, T. C., Huang, W. M., Tsai, J. K., Chang, C. E., & Meen, T. H. (2024). Effect of Photoanode Process Sequence on Efficiency of Dye-Sensitized Solar Cells. *Coatings*, 14(304), 1–11.
<https://doi.org/10.3390/coatings14030304>
- Yadav, S. C., Sharma, A., Devan, R. S., & Shirage, P. M. (2022). Role of different counter electrodes on performance of TiO2 based dye-sensitized solar cell (DSSC) fabricated with dye extracted from Hibiscus Sabdariffa as sensitizer. *Optical Materials*, 124(112066), 1–9.
<https://doi.org/10.1016/j.optmat.2022.112066>
- Yue, Y., Yue, X., Tang, X., Han, L., Wang, J., Wang, S., & Du, C. (2024). Synergistic adsorption and photocatalysis study of TiO2 and activated carbon composite. *Heliyon*, 10(e30817), 1–13.
<https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e30817>
- Zhu, J., Zhu, Y., Chen, Z., Zhao, Y., & Chen, G. (2024). Fluorine-doped TiO2/SiO2/ activated carbon ternary hybrids: Enhancing adsorption and photocatalytic degradation of rhodamine B and methyl orange. *Materials Research Bulletin*, 176(112826), 1–11.
<https://doi.org/10.1016/j.materresbull.2024.112826>