

PEMANFAATAN EKSTRAK KULIT BUAH NAGA (*Hylocereus sp.*) SEBAGAI PEWARNA ALAMI DALAM DSSC (DYE-SENSITIZED SOLAR CELLS)

Reski Wahyuni Sarli¹, Kaysha Aziza.S¹, Kirany Paramesty Chuday Halip¹, Zulfaidil^{1,2*},
Wa Ode Tuti Asndari^{1,3}, Achmad Aswal¹

¹SMAN 1 Kendari

Jl. Mayjen Soetoyo, Kota Kendari, 93122, Indonesia

²Kelompok Keahlian Matematika Industri dan Keuangan, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Institut Teknologi Bandung
Jl. Ganesa, Kota Bandung, 40132, Indonesia

³Jurusan Magister Kimia, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Halu Oleo

Jl. H.E.A. Mokodompit, Kota Kendari, 93232, Indonesia

E-mail korespondensi: *zulfaidil01@gmail.com

ABSTRAK

Sejarah Artikel:

Diterima: 21-02-2026

Direvisi: 02-03-2026

Diterima untuk

dipublikasikan: 28-03-2026

Kata Kunci:

Dye-Sensitized Solar Cell (DSSC), Kulit buah naga, antosianin, Energi terbarukan, Fotosensitizer.

Ketergantungan pada bahan bakar fosil yang semakin menipis serta dampak negatifnya terhadap lingkungan mendorong pengembangan energi terbarukan sebagai solusi berkelanjutan. Salah satu teknologi yang dikembangkan adalah Dye-Sensitized Solar Cell (DSSC), yaitu sel surya berbasis pewarna yang berfungsi sebagai fotosensitizer dalam konversi cahaya menjadi listrik. Pewarna alami menjadi alternatif yang menjanjikan karena lebih ramah lingkungan dan ekonomis dibandingkan pewarna sintesis. Penelitian ini bertujuan untuk mengeksplorasi ekstrak kulit buah naga (*Hylocereus sp.*) sebagai pewarna alami dalam DSSC serta menguji tegangan listrik yang dihasilkan. Pigmen antosianin diekstrak menggunakan metode maserasi dengan etanol 96% sebagai pelarut. Pewarna diaplikasikan pada elektroda kerja berbasis kaca ITO/TiO₂, sementara elektroda lawan menggunakan karbon dari pensil 6B. Larutan elektrolit terdiri dari campuran NaI dan iodin dalam etanol. Pengujian dilakukan dengan mengukur tegangan menggunakan multimeter dalam pencahayaan alami. Hasil penelitian menunjukkan bahwa DSSC berbasis ekstrak kulit buah naga menghasilkan tegangan antara 200,9 mV hingga 270,3 mV di bawah cahaya matahari langsung. Saat ditempatkan di tempat teduh, tegangan turun menjadi 111,8 mV, dan setelah lima menit tanpa cahaya, turun lebih lanjut menjadi 44,4 mV. Dibandingkan DSSC berbasis ekstrak daun jati (80 mV), DSSC ini menunjukkan kinerja lebih baik, meskipun masih lebih rendah dibandingkan DSSC berbasis mikroalga laut tropis (300 mV). Hasil ini menunjukkan bahwa DSSC berbasis pewarna alami memiliki potensi sebagai sumber energi terbarukan, tetapi memerlukan optimasi lebih lanjut, terutama dalam aspek stabilitas dan penyimpanan daya agar lebih efektif dalam aplikasi nyata.



This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the [Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/).

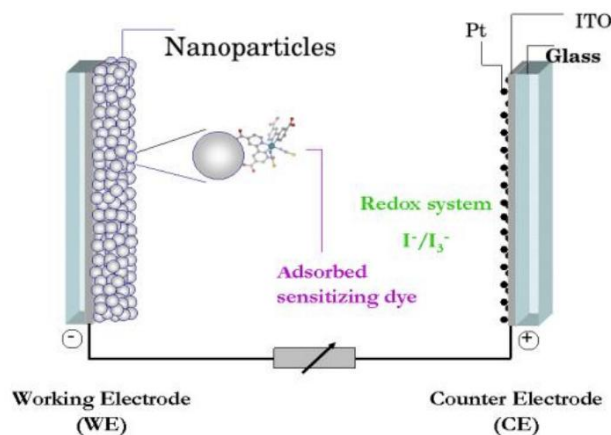
1. PENDAHULUAN

Energi listrik merupakan kebutuhan fundamental dalam kehidupan manusia yang mencakup sektor rumah tangga, industri, pendidikan, hingga transportasi. Seiring meningkatnya jumlah penduduk dan perkembangan teknologi, konsumsi energi listrik juga mengalami peningkatan signifikan. Energi listrik dihasilkan dari pergerakan partikel bermuatan, seperti elektron, dalam suatu rangkaian listrik, dan keberadaannya menjadi tulang punggung aktivitas modern [1]. Namun demikian, ketergantungan dunia terhadap bahan bakar fosil sebagai sumber utama energi listrik masih sangat tinggi. Menurut laporan *World Energy Outlook 2023* oleh *International Energy Agency* [2], lebih dari 80% kebutuhan energi dunia masih bergantung pada bahan bakar fosil, yang berkontribusi terhadap peningkatan emisi gas rumah kaca dan percepatan perubahan iklim global.

Penggunaan energi fosil yang terus-menerus tidak hanya mempercepat penipisan sumber daya alam, tetapi juga menimbulkan dampak lingkungan seperti polusi udara, hujan asam, dan pemanasan global. Oleh karena itu, pengembangan energi terbarukan menjadi solusi strategis dalam mendukung keberlanjutan lingkungan dan ketahanan energi nasional. Salah satu sumber energi terbarukan yang sangat potensial adalah energi surya melalui sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS). Energi surya bersifat melimpah, ramah lingkungan, dan tersedia sepanjang tahun, khususnya di wilayah tropis seperti Indonesia [3].

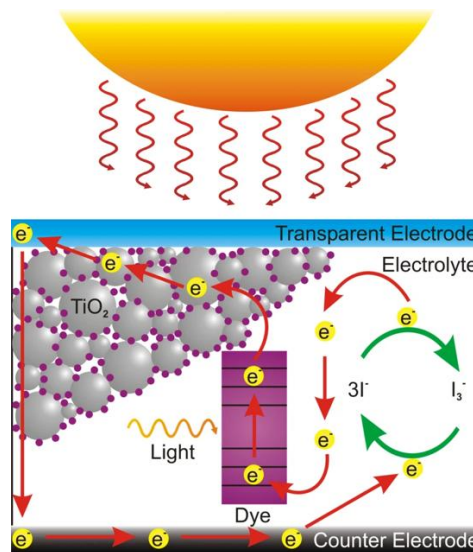
Sel surya (*solar cell*) merupakan perangkat yang mampu mengubah energi cahaya matahari menjadi energi listrik melalui prinsip efek fotovoltaiik. Efek fotovoltaiik adalah fenomena munculnya tegangan listrik akibat adanya kontak dua elektroda dalam suatu sistem semikonduktor ketika menerima energi cahaya [4]. Pada sel surya konvensional berbasis silikon, foton dari cahaya matahari akan mengeksitasi elektron dari pita valensi ke pita konduksi, sehingga menciptakan arus listrik. Namun, proses fabrikasi sel surya silikon relatif mahal dan membutuhkan teknologi tinggi.

Sebagai alternatif, berkembang teknologi sel surya generasi ketiga yang dikenal sebagai *Dye-Sensitized Solar Cell* (DSSC). DSSC pertama kali diperkenalkan oleh O'Regan dan Grätzel pada tahun 1991 [5]. Teknologi ini menarik perhatian karena proses pembuatannya relatif sederhana, biaya produksinya lebih rendah, serta dapat dibuat menggunakan material yang lebih ramah lingkungan [6]. DSSC bekerja dengan memisahkan proses penyerapan cahaya dan transport muatan listrik. Absorpsi cahaya dilakukan oleh zat pewarna (*dye*) sebagai fotosensitizer, sedangkan transfer elektron dilakukan oleh material semikonduktor nanokristalin seperti TiO_2 [7]. Struktur umum DSSC terdiri atas kaca konduktif TCO/ITO, lapisan nanopartikel TiO_2 , molekul *dye* yang teradsorpsi pada permukaan TiO_2 , larutan elektrolit (biasanya pasangan iodida/triiodida), serta elektroda lawan berbasis karbon atau platina.



Gambar 1. Struktur umum DSSC.

Ketika cahaya mengenai DSSC, molekul *dye* menyerap foton dan mengalami eksitasi elektron dari orbital HOMO ke LUMO. Elektron tereksitasi kemudian diinjeksi ke pita konduksi TiO_2 , mengalir melalui rangkaian eksternal menghasilkan arus listrik, dan akhirnya kembali melalui elektrolit untuk meregenerasi molekul *dye* [8], [9].



Gambar 2. Prinsip kerja DSSC [10].

Efisiensi DSSC sangat dipengaruhi oleh jenis *dye* yang digunakan. Pewarna sintetis berbasis kompleks *ruthenium* memiliki efisiensi tinggi, tetapi harganya mahal dan kurang ramah lingkungan. Oleh sebab itu, eksplorasi pewarna alami menjadi alternatif yang menjanjikan. Zat pewarna alami dapat diperoleh dari berbagai bagian tumbuhan seperti daun, bunga, buah, biji, batang, dan akar [11].

Salah satu pigmen alami yang berpotensi sebagai fotosensitizer dalam DSSC adalah antosianin, yaitu senyawa flavonoid yang bertanggung jawab terhadap warna merah, ungu, dan biru pada berbagai tumbuhan. Antosianin memiliki gugus hidroksil ($-\text{OH}$) dan karbonil ($-\text{C}=\text{O}$) yang memungkinkan terbentuknya ikatan koordinasi dengan permukaan TiO_2 , sehingga mendukung proses injeksi dan transfer elektron dalam sistem DSSC. Kemampuan ini menjadikan antosianin sebagai kandidat pewarna alami yang menjanjikan dalam pengembangan sel surya berbasis bahan hayati. Salah satu sumber antosianin yang melimpah adalah kulit buah naga merah (*Hylocereus sp.*). Bagian kulitnya mencapai sekitar 30–35% dari total berat buah dan umumnya masih dikategorikan sebagai limbah pertanian yang belum dimanfaatkan secara optimal [12]. Padahal, kulit buah naga diketahui memiliki kandungan antosianin yang cukup tinggi dan berpotensi digunakan sebagai pewarna alami [13].



Gambar 3. Kulit buah naga.

Penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa ekstrak kulit buah naga dapat dimanfaatkan sebagai *dye* dalam DSSC [14]. Namun, penelitian tersebut dilakukan dalam konteks dan kondisi eksperimental yang berbeda. Dalam penelitian berbasis material alami, kinerja DSSC sangat dipengaruhi oleh faktor-faktor seperti kualitas bahan baku, metode preparasi elektroda, kondisi pencahayaan, serta teknik perakitan sel. Oleh karena itu, penelitian ini dilakukan sebagai bentuk validasi ulang terhadap potensi ekstrak kulit buah naga dalam kondisi laboratorium yang berbeda, sekaligus untuk menguji sejauh mana bahan tersebut dapat diaplikasikan menggunakan teknik fabrikasi sederhana dan berbasis bahan daur ulang, seperti kaca ITO dari LCD bekas dan elektroda karbon dari pensil 6B. Selain itu, penelitian ini bertujuan menunjukkan bahwa DSSC berbasis pewarna alami dapat dibuat dengan pendekatan yang lebih ekonomis dan aplikatif pada skala laboratorium pendidikan, sehingga memperluas peluang implementasi energi terbarukan berbasis bahan lokal dan limbah organik.

Berdasarkan uraian tersebut, pemanfaatan ekstrak kulit buah naga (*Hylocereus sp.*) sebagai pewarna alami dalam DSSC menjadi topik yang relevan dan penting untuk dikaji lebih lanjut. Penelitian ini bertujuan untuk mengeksplorasi potensi ekstrak kulit buah naga sebagai fotosensitizer serta menguji tegangan listrik yang dihasilkan, sebagai langkah awal pengembangan teknologi energi surya berbasis bahan alami yang ramah lingkungan dan ekonomis.

2. METODE PENELITIAN

2.1. Desain Penelitian

Penelitian ini menggunakan metode eksperimen laboratorium untuk menguji pemanfaatan ekstrak kulit buah naga merah (*Hylocereus sp.*) sebagai *dye* alami dalam sistem *Dye-Sensitized Solar Cell* (DSSC). Tahapan penelitian meliputi proses ekstraksi pigmen, pembuatan elektroda kerja dan elektroda lawan, perakitan DSSC, serta pengujian tegangan listrik yang dihasilkan di bawah pencahayaan alami.

2.2. Alat dan Bahan

Alat yang digunakan dalam penelitian ini meliputi alu dan lumpang, *magnetic stirrer*, *hot plate*, oven, evaporator, multimeter, pipet tetes, spatula, batang pengaduk, penjepit kayu, binder klip, serta kaca ITO yang diperoleh dari LCD bekas. Sementara itu, bahan yang digunakan terdiri atas kulit buah naga merah (*Hylocereus sp.*), etanol 96%, serbuk TiO₂, NaI, iodin (I₂), pensil 6B sebagai sumber karbon, kertas saring, dan tisu.

2.3. Prosedur Penelitian

Penelitian diawali dengan proses ekstraksi pigmen antosianin dari kulit buah naga merah (*Hylocereus sp.*). Kulit buah naga dipotong menjadi bagian kecil untuk mempercepat proses pengeringan, kemudian dikeringkan pada suhu 50°C selama 24 jam. Sampel kering selanjutnya dihaluskan hingga menjadi serbuk menggunakan alu dan lumpang. Serbuk kulit buah naga kemudian dimaserasi menggunakan 150 mL etanol 96% dan diaduk dengan *magnetic stirrer* selama 24 jam pada suhu ruang. Setelah proses maserasi selesai, larutan disaring menggunakan kertas saring untuk memisahkan filtrat dari ampasnya. Filtrat yang diperoleh kemudian diuapkan menggunakan evaporator hingga diperoleh ekstrak pekat yang mengandung pigmen antosianin sebagai zat pewarna alami (*dye*).

Selanjutnya dilakukan pembuatan larutan elektrolit dengan melarutkan 0,1 gram natrium iodida (NaI) dan 0,01 gram iodin (I₂) ke dalam 10 mL etanol 96%. Campuran tersebut diaduk hingga homogen dan disimpan dalam wadah tertutup untuk menjaga kestabilan sistem redoks iodida/triiodida. Pembuatan elektroda kerja dilakukan dengan mencampurkan 1 gram serbuk TiO₂ dengan 2 mL etanol hingga membentuk pasta homogen. Pasta TiO₂ kemudian diaplikasikan secara merata pada permukaan kaca ITO menggunakan metode *doctor blade*. Elektroda yang telah dilapisi pasta dipanaskan pada suhu 110°C selama 30 menit untuk menghilangkan pelarut dan meningkatkan adhesi partikel TiO₂ pada substrat. Setelah proses pemanasan dan pendinginan, elektroda direndam dalam ekstrak kulit buah naga selama 30 menit agar molekul antosianin teradsorpsi pada permukaan TiO₂. Elektroda kemudian dikeringkan kembali pada suhu 50°C selama 15 menit. Sementara itu, elektroda lawan dibuat dengan

melapisi kaca ITO lainnya menggunakan grafit dari pensil 6B hingga terbentuk lapisan karbon yang merata. Kaca kemudian dipanaskan menggunakan nyala lilin untuk meningkatkan konduktivitas lapisan karbon.

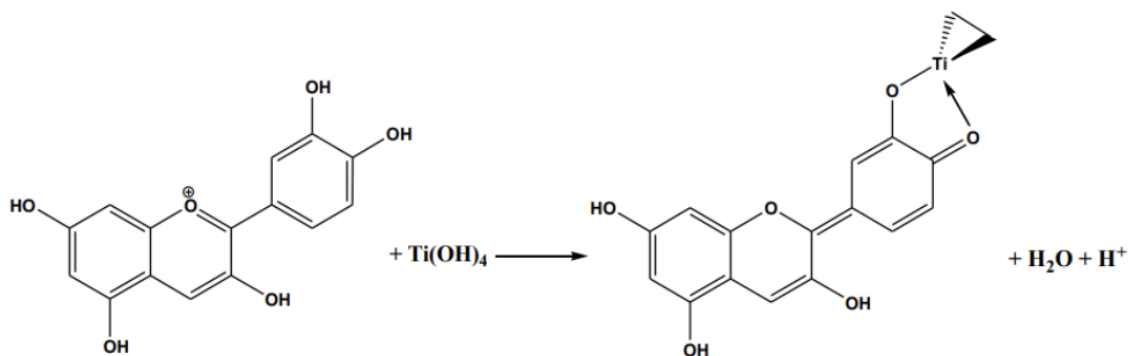
Perakitan DSSC dilakukan dengan menyusun elektroda kerja dan elektroda lawan secara berhadapan dengan bagian aktif saling berhadapan. Larutan elektrolit diteteskan sebanyak 2–3 tetes di antara kedua elektroda, kemudian kedua kaca dijepit menggunakan binder klip agar terbentuk kontak yang stabil. Sel DSSC yang telah dirakit kemudian diuji dengan menempatkannya di bawah cahaya matahari langsung. Tegangan listrik yang dihasilkan diukur menggunakan multimeter hingga diperoleh nilai yang stabil. Pengukuran tambahan dilakukan pada kondisi tempat teduh dan setelah beberapa menit tanpa paparan cahaya untuk mengamati perubahan tegangan akibat variasi intensitas cahaya.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Hasil Ekstraksi dan Preparasi Elektroda

Ekstraksi kulit buah naga merah (*Hylocereus sp.*) menggunakan metode maserasi menghasilkan larutan berwarna merah keunguan yang menunjukkan keberadaan pigmen antosianin. Pemilihan metode maserasi didasarkan pada sifat antosianin yang relatif sensitif terhadap suhu tinggi. Metode ini memungkinkan proses ekstraksi berlangsung pada suhu ruang sehingga mengurangi risiko degradasi senyawa aktif [15]. Penggunaan etanol 96% sebagai pelarut mengacu pada penelitian Amalia [16] yang menyatakan bahwa pelarut etanol mampu menghasilkan stabilitas dan intensitas warna antosianin yang lebih baik dibandingkan pelarut lain. Ekstrak pekat yang diperoleh kemudian digunakan sebagai *dye* pada elektroda kerja DSSC.

Pada tahap preparasi elektroda kerja, pasta TiO_2 yang semula berwarna putih mengalami perubahan warna menjadi kemerahan setelah direndam dalam ekstrak kulit buah naga. Perubahan warna ini menunjukkan bahwa molekul antosianin telah teradsorpsi pada permukaan TiO_2 . Proses adsorpsi ini penting karena keberhasilan DSSC sangat bergantung pada kemampuan molekul pewarna berikatan dengan semikonduktor. Secara kimia, antosianin memiliki gugus hidroksil ($-\text{OH}$) dan karbonil ($-\text{C}=\text{O}$) yang memungkinkan terbentuknya ikatan koordinasi dengan atom titanium pada TiO_2 . Mekanisme adsorpsi sianidin pada permukaan TiO_2 ditunjukkan pada **Gambar 4**.



Gambar 4. Adsorpsi senyawa sianidin pada permukaan TiO_2 [17].

Ikatan tersebut memungkinkan terjadinya transfer elektron ketika molekul *dye* menyerap foton dari cahaya matahari.

Elektroda kerja dan elektroda lawan yang telah selesai dipersiapkan ditunjukkan pada **Gambar 5**.



Gambar 5. Kaca di kanan merupakan elektrode kerja, dan kaca di kiri merupakan elektrode lawan.

Elektroda lawan yang dilapisi grafit dari pensil 6B berfungsi sebagai katalis dalam sistem redoks iodida/triiodida pada elektrolit. Lapisan karbon ini membantu mempercepat proses transfer elektron kembali ke molekul *dye* yang teroksidasi. Setelah kedua elektroda dirakit dan diberi larutan elektrolit, diperoleh rangkaian DSSC seperti ditunjukkan pada **Gambar 6**.



Gambar 6. Hasil perakitan DSSC

3.2 Pengujian Tegangan Listrik DSSC

Pengujian dilakukan di bawah cahaya matahari langsung dengan interval pengukuran setiap satu menit. Hasil pengukuran tegangan ditunjukkan pada **Tabel 1**.

Tabel 1. Hasil pengukuran tegangan di bawah cahaya matahari langsung

Pengujian ke-	Tegangan (mV)
I	225,3
II	208,4
III	270,3
IV	200,9

Berdasarkan hasil pengukuran, DSSC berbasis ekstrak kulit buah naga mampu menghasilkan tegangan dalam rentang 200,9 mV hingga 270,3 mV di bawah cahaya matahari langsung. Nilai tertinggi tercatat sebesar 270,3 mV. Variasi nilai tegangan ini dipengaruhi oleh beberapa faktor, di antaranya intensitas cahaya matahari, ketebalan dan homogenitas lapisan TiO₂, serta efektivitas adsorpsi antosianin pada permukaan semikonduktor. Dalam sistem DSSC, ketika foton diserap oleh molekul antosianin, elektron tereksitasi dari orbital HOMO ke LUMO. Elektron tersebut kemudian diinjeksi ke pita konduksi TiO₂ dan mengalir melalui rangkaian eksternal sehingga menghasilkan tegangan listrik. Ketika DSSC dipindahkan ke tempat teduh setelah paparan cahaya, tegangan menurun menjadi 111,8 mV. Setelah lima menit tanpa paparan cahaya, tegangan kembali turun hingga 44,4 mV. Penurunan ini menunjukkan bahwa sistem DSSC sangat bergantung pada ketersediaan foton sebagai sumber energi eksitasi elektron. Tanpa cahaya, tidak terjadi proses injeksi elektron yang signifikan, sehingga sistem mengalami rekombinasi elektron dan kehilangan potensial listrik.

Jika dibandingkan dengan penelitian lain, DSSC berbasis ekstrak daun jati menghasilkan tegangan sekitar 80 mV [9], [18], sedangkan DSSC berbasis pigmen mikroalga laut tropis menghasilkan tegangan hingga 300 mV [19]. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa ekstrak kulit buah naga memiliki performa yang lebih baik dibandingkan ekstrak daun jati, meskipun masih sedikit lebih rendah dibandingkan pigmen mikroalga.

Perbedaan ini kemungkinan disebabkan oleh perbedaan struktur kimia dan spektrum serapan masing-masing pigmen. Pigmen mikroalga seperti klorofil memiliki rentang penyerapan cahaya yang lebih luas dibandingkan antosianin, sehingga menghasilkan eksitasi elektron yang lebih optimal.

3.3 Implikasi dan Keterbatasan

Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa limbah kulit buah naga merah (*Hylocereus sp.*) memiliki potensi yang cukup signifikan sebagai bahan fotosensitizer alami dalam sistem *Dye-Sensitized Solar Cell* (DSSC). Hal ini dibuktikan melalui kemampuan ekstrak antosianin yang diperoleh dari proses maserasi untuk teradsorpsi pada permukaan TiO₂ dan menghasilkan tegangan listrik hingga 270,3 mV di bawah paparan cahaya matahari langsung. Nilai tersebut menunjukkan bahwa molekul antosianin mampu menyerap energi foton, mengalami eksitasi elektron, dan menginjeksikan elektron ke pita konduksi TiO₂ sehingga menghasilkan aliran elektron pada rangkaian eksternal.

Secara kimiawi, antosianin memiliki gugus hidroksil (-OH) dan karbonil (-C=O) yang berperan penting dalam proses adsorpsi ke permukaan semikonduktor. Gugus-gugus ini memungkinkan terbentuknya ikatan koordinasi antara molekul *dye* dan atom titanium pada TiO₂. Ikatan tersebut menentukan efektivitas transfer elektron serta meminimalkan kemungkinan terjadinya rekombinasi dini. Semakin optimal interaksi antara *dye* dan TiO₂, semakin besar peluang peningkatan performa sel surya yang dihasilkan.

Dari perspektif keberlanjutan, pemanfaatan limbah kulit buah naga memberikan nilai tambah yang penting. Limbah organik yang selama ini kurang dimanfaatkan dapat diolah menjadi material fungsional bernilai ekonomi dan ilmiah. Pendekatan ini sejalan dengan prinsip energi terbarukan yang ramah lingkungan dan berbasis sumber daya lokal. Selain itu, proses fabrikasi yang sederhana dan menggunakan bahan yang relatif mudah diperoleh menunjukkan bahwa teknologi DSSC dapat dikembangkan dengan biaya rendah dan berpotensi diaplikasikan pada skala pendidikan maupun riset tingkat awal. Meskipun demikian, DSSC yang dihasilkan masih memiliki sejumlah keterbatasan. Salah satu tantangan utama terletak pada stabilitas molekul antosianin. Senyawa ini relatif sensitif terhadap cahaya intensitas tinggi, perubahan suhu, serta oksidasi. Paparan cahaya dalam waktu lama dapat menyebabkan degradasi struktur molekul sehingga kemampuan menyerap cahaya dan mentransfer elektron menurun secara bertahap. Kondisi ini berdampak langsung pada penurunan tegangan yang dihasilkan serta umur pakai perangkat.

Selain itu, sistem DSSC juga rentan terhadap proses rekombinasi elektron. Setelah elektron diinjeksi ke dalam TiO₂, terdapat kemungkinan elektron kembali berekombinasi dengan molekul *dye* yang telah teroksidasi atau dengan ion dalam elektrolit sebelum mencapai elektroda lawan. Proses ini menyebabkan kehilangan energi dan menurunkan efisiensi konversi secara keseluruhan. Faktor lain yang turut memengaruhi performa adalah homogenitas lapisan TiO₂, ketebalan lapisan, serta kualitas

kontak antar komponen dalam sel. Keterbatasan lain yang teridentifikasi adalah belum adanya sistem penyimpanan energi pada rangkaian yang dirakit. Listrik yang dihasilkan hanya dapat dimanfaatkan selama sel terpapar cahaya. Ketika intensitas cahaya menurun atau paparan dihentikan, tegangan turun secara signifikan, sebagaimana terlihat pada hasil pengujian yang menunjukkan penurunan drastis hingga puluhan milivolt dalam kondisi tanpa cahaya. Hal ini menegaskan bahwa DSSC bersifat sangat bergantung pada ketersediaan foton sebagai sumber energi eksitasi.

4. KESIMPULAN DAN SARAN

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa limbah kulit buah naga merah (*Hylocereus sp.*) memiliki potensi sebagai fotosensitizer alami dalam sistem *Dye-Sensitized Solar Cell* (DSSC). Ekstrak antosianin yang diperoleh melalui metode maserasi terbukti mampu teradsorpsi pada permukaan TiO_2 dan menghasilkan tegangan listrik ketika terpapar cahaya matahari langsung. Tegangan maksimum yang diperoleh mencapai 270,3 mV, menunjukkan bahwa molekul antosianin mampu menyerap energi cahaya dan menginjeksikan elektron ke pita konduksi TiO_2 sehingga menghasilkan aliran listrik pada rangkaian eksternal. Penelitian ini juga menunjukkan bahwa performa DSSC sangat dipengaruhi oleh intensitas cahaya. Tegangan mengalami penurunan signifikan ketika sel tidak lagi terpapar cahaya, yang menandakan bahwa proses eksitasi elektron sangat bergantung pada keberadaan foton. Hal ini menegaskan karakteristik DSSC sebagai perangkat konversi energi yang bersifat langsung dan tidak menyimpan energi tanpa sistem pendukung tambahan.

Dari sisi keberlanjutan, pemanfaatan limbah kulit buah naga sebagai bahan aktif dalam DSSC memberikan kontribusi terhadap pengembangan energi terbarukan berbasis sumber daya lokal dan ramah lingkungan. Pendekatan ini tidak hanya mengurangi limbah organik, tetapi juga membuka peluang inovasi teknologi energi dengan biaya yang relatif rendah dan metode fabrikasi yang sederhana. Namun demikian, DSSC yang dihasilkan masih memiliki keterbatasan, terutama pada aspek stabilitas molekul antosianin, potensi rekombinasi elektron, serta belum adanya sistem penyimpanan energi. Oleh karena itu, diperlukan penelitian lanjutan untuk meningkatkan efisiensi dan stabilitas perangkat, baik melalui optimasi struktur elektroda, modifikasi komposisi *dye*, maupun pengembangan sistem penyimpanan energi terintegrasi.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis menyampaikan ucapan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada Laboratorium Pengembangan Pendidikan Kimia Beserta Laborannya atas segala bantuan, bimbingan, serta fasilitasi selama proses pelaksanaan penelitian ini, mulai dari tahap persiapan bahan, proses ekstraksi, hingga perakitan perangkat DSSC. Dukungan teknis dan arahan yang diberikan sangat membantu kelancaran serta keberhasilan penelitian ini. Ucapan terima kasih juga disampaikan kepada Laboratorium Pengembangan Pendidikan Fisika atas peminjaman alat pengujian yang digunakan dalam proses pengukuran tegangan listrik DSSC. Fasilitas dan kerja sama yang diberikan sangat berperan dalam memperoleh data hasil penelitian secara optimal. Semoga segala bentuk bantuan dan dukungan yang telah diberikan mendapatkan balasan yang setimpal dan menjadi bagian dari kontribusi bersama dalam pengembangan ilmu pengetahuan, khususnya di bidang energi terbarukan.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] T. A. R. Arunpadang, F. A. Hontong, and L. Tarigan, "Analisis Kebutuhan Energi Listrik dengan Jaringan Syaraf Tiruan," *Jurnal Tekno Mesin*, vol. 4, no. 2, pp. 84–89, 2021.
- [2] IEA, "World Energy Outlook 2023," 2023. [Online]. Available: www.iea.org/terms
- [3] M. Harris, *Macam-Macam Pembangkit Listrik, Apa Saja Ya*. Jakarta: Gramedia, 2021.
- [4] D. Kho, "Pengertian Sel Surya (Solar Cell) dan Prinsip Kerjanya," *Teknik Elektronika*.

- [5] I. Nirmalasari, R. A. Nugrahani, and Budiyanto, "Peningkatan Efisiensi Dye Sensitized Solar Cell (DSSC) dari Antosianin Kulit Manggis (*Garcinia mangostana* L) Menggunakan Papain," *Chimica et Natura Acta*, vol. 10, no. 2, pp. 88–93, 2022, doi: 10.24198/cna.v10.n2.38011.
- [6] Z. Luthfiyyah, N. Hindryawati, and I. A. Hiyahara, "Mini Review: Pembuatan Dye-Sensitized Solar Cell (DSSC) Menggunakan Semikonduktor TiO₂ dengan Zat Warna Antosianin," *Prosiding Seminar Nasional Kimia*, vol. 1, no. 1, pp. 221–226, 2023.
- [7] M. F. Maulana, "Preparasi Dye Sensitized Solar Cell dengan Fotoelektroda ZnO-TiO₂ yang Tersensitiser dari buah Jamblang *Syzygium Cumini* dan Buah Leunca *Solanum Nigrum* L," UIN Syarif Hidayatullah Jakarta, Jakarta, 2020.
- [8] U. Oktavia and H. Sanjaya, "Pembuatan Dye-Sensitized Solar Cell (DSSC) Menggunakan GMR sebagai Substrat dan Ekstrak Ubi Jalar Ungu (*Ipomoea batatas* L.) sebagai Dye Sensitizer," *Chemistry Journal of State University of Padang*, vol. 8, no. 1, pp. 58–67, 2019.
- [9] Y. Kabora, "Pengaruh Penambahan Surfaktan Heksametile Tetraamin (HMT) dan Aplikasinya sebagai Dye-Sensitized Solar Cell (DSSC) Tersensitisasi Ekstrak Daun Jati (*Tectona grandis*)," Universitas Halu Oleo, Kendari, 2021.
- [10] H. Hug, M. Bader, P. Mair, and T. Glatzel, "Biophotovoltaics: Natural pigments in dye-sensitized solar cells," *Appl. Energy*, vol. 115, pp. 216–225, Feb. 2014, doi: 10.1016/j.apenergy.2013.10.055.
- [11] E. B. Lestari and K. A. N. Permatasari, "Pemanfaatan Pewarna Alam dalam Menghasilkan Karya Fesyen," *Jurnal Da Moda*, vol. 4, no. 2, pp. 53–64, May 2023, doi: 10.35886/damoda.v4i2.512.
- [12] W. Meganingtyas and M. Alauhdin, "Ekstraksi Antosianin dari Kulit Buah Naga (*Hylocereus costaricensis*) dan Pemanfaatannya sebagai Indikator Alami Titration Asam-Basa," *agriTECH*, vol. 41, no. 3, p. 278, Aug. 2021, doi: 10.22146/agritech.52197.
- [13] A. Nizori, N. Sihombing, and Surhaini, "Karakteristik Ekstrak Kulit Buah Naga Merah (*Hylocereus Polyrhizus*) dengan Penambahan Berbagai Konsentrasi Asam Sitrat Sebagai Pewarna Alami Makanan," *Jurnal Teknologi Industri Pertanian*, vol. 30, no. 2, pp. 228–233, Sep. 2020, doi: 10.24961/j.tek.ind.pert.2020.30.2.228.
- [14] S. D. Windi, "Dye Sensitized Solar Cell dengan Ekstrak Kulit Buah Naga Merah (*Hylocereus polyrhizus*) sebagai Pemeka Cahaya," Universitas Sriwijaya, Indralaya, 2017.
- [15] D. R. Badaring *et al.*, "Uji Ekstrak Daun Maja (*Aegle marmelos* L.) terhadap Pertumbuhan Bakteri *Escherichia coli* dan *Staphylococcus aureus* INDONESIAN JOURNAL OF FUNDAMENTAL SCIENCES (IJFS)," *Indonesian Journal of Fundamental Sciences*, vol. 6, no. 1, pp. 16–26, 2020.
- [16] F. Amalia, G. N. Afnani, A. Musfiroh, A. N. Fikriyani, S. Ucche, and M. Murrukmihadi, "Extraction and Stability Test of Anthocyanin from Buni Fruits (*Antidesma Bunius* L) as an Alternative Natural and Safe Food Colorants," *Journal of Food and Pharmaceutical Sciences*, vol. 1, no. 2, pp. 49–53, 2013.
- [17] Hardeli, Suwardani, Riky, F. T, Maulidis, and S. Ridwan, "Dye Sensitized Solar Cells (DSSC) Berbasis Nanopori TiO₂ Menggunakan Antosianin dari Berbagai Sumber Alam," *Prosiding Semirata FMIPA Universitas Lampung*, pp. 155–161, 2013.
- [18] Adyatna, "Sintesis TiO₂ Doped Sulfur (TiO₂-S) sebagai Fotoanoda untuk Aplikasi Dye-Sensitized Solar Cells (DSSC) Tersensitisasi Ekstrak Daun Jati (*Tectona grandis*)," Universitas Halu Oleo, Kendari, 2021.
- [19] E. R. M. A. P. Lilipaly, I. Telussa, E. G. Fransina, and A. M. I. Efruan, "Penentuan Nilai Efisiensi Dye Sensitized Solar Cell dari Pigmen Fotosintesis Mikroalga Laut Tropis *Navicula sp galur TAD*," *JC-T (Journal Cis-Trans): Jurnal Kimia dan Terapannya*, vol. 6, no. 2, pp. 5–10, Dec. 2022, doi: 10.17977/um0260v6i22022p005.