



Department of Digital Business

**Journal of Artificial Intelligence and Digital Business (RIGGS)**

Homepage: <https://journal.ilmudata.co.id/index.php/RIGGS>

Vol. 4 No. 2 (2025) pp: 3447-3452

P-ISSN: 2963-9298, e-ISSN: 2963-914X

## Eksplorasi Absorpsi Ekstrak Akar Mengkudu untuk Sel Surya Ramah Lingkungan

Syamsuddin Syamsuddin<sup>1</sup>, Hendra Sani<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup> Program Studi Teknik Pertambangan, Fakultas Teknik, Universitas Pejuang Republik Indonesia, Makassar

<sup>1</sup>[syamsuddin.hamzah71@gmail.com](mailto:syamsuddin.hamzah71@gmail.com), <sup>2</sup>[hendra.sani85@gmail.com](mailto:hendra.sani85@gmail.com)

### Abstrak

Penelitian ini mengeksplorasi potensi ekstrak akar mengkudu (*Morinda citrifolia*) sebagai dye alami untuk aplikasi Dye-Sensitized Solar Cell (DSSC). Pengaruh suhu ekstraksi (350°C dan 500°C) serta waktu rendam (12, 24, dan 48 jam) terhadap kinerja DSSC dievaluasi melalui pengukuran tegangan rangkaian terbuka (Voc), arus hubungan pendek (Isc), fill faktor (FF), dan efisiensi konversi energi. Hasil menunjukkan bahwa suhu ekstraksi 500°C dengan waktu rendam 48 jam memberikan kinerja terbaik, dengan Voc sebesar 3,8 mV, Isc sebesar 0,2 mA, dan efisiensi konversi energi mencapai 1,29%. Sebaliknya, pada suhu 350°C, efisiensi maksimum yang dicapai hanya 0,47%. Peningkatan suhu ekstraksi terbukti memperbaiki struktur molekul dye, meningkatkan eksitasi elektron, dan memperbaiki transfer elektron di dalam perangkat. Meskipun efisiensinya masih di bawah standar dye sintetis seperti N719, hasil ini menunjukkan bahwa akar mengkudu memiliki potensi sebagai dye alternatif yang lebih ramah lingkungan dan hemat biaya. Penelitian ini juga memberikan dasar bagi optimasi lebih lanjut melalui modifikasi molekul dye dan variasi kondisi ekstraksi untuk meningkatkan efisiensi konversi energi DSSC berbasis bahan alami.

Kata kunci: Akar Mengkudu, Dye-Sensitized Solar Cell, Suhu Ekstraksi, Absorpsi, Teknologi Ramah Lingkungan

### 1. Latar Belakang

Meningkatnya permintaan energi yang semakin tinggi telah mendorong berbagai inovasi dalam pengembangan teknologi energi terbarukan [1]. Salah satu solusi yang dianggap potensial untuk mengatasi masalah ini adalah pemanfaatan teknologi *Dye-Sensitized Solar Cells* (DSSC) [2]. DSSC telah menarik perhatian luas karena kemampuannya menggabungkan komponen-komponen alami yang lebih ramah lingkungan dibandingkan teknologi sel surya berbasis silikon konvensional [3]. Pewarna alami, sebagai salah satu komponen utama dalam DSSC, berperan penting dalam menyerap cahaya dan mengonversinya menjadi energi listrik [4]. Penggunaan pewarna alami tidak hanya lebih berkelanjutan, tetapi juga mudah diakses dan berbiaya rendah dan fabrikasi yang mudah, serta tidak beracun [5]. Namun, tantangan utama dalam penggunaannya adalah rendahnya stabilitas dan efisiensi pewarna alami jika dibandingkan dengan pewarna sintetis yang lebih komersial [6].

Meskipun penelitian mengenai DSSC berbasis pewarna alami telah mengalami kemajuan signifikan. Terdapat sejumlah tantangan yang menghambat implementasi praktisnya, terutama terkait dengan stabilitas pewarna dan efisiensi konversi energi relatif rendah [7], [8]. Salah satu permasalahan kritis yang dihadapi oleh DSSC adalah perlunya menemukan bahan alami yang memiliki kemampuan absorpsi cahaya lebih unggul, stabilitas baik, dan daya tahan lebih lama terhadap degradasi lingkungan [9]. Pewarna alami sering digunakan, seperti *anthocyanin* dan *betalain*, masih terdapat kekurangan pada menurunnya performa karena ketidakstabilannya ketika terpapar sinar matahari dalam waktu lama. Oleh karena itu, penelitian ini berfokus pada penemuan sumber pewarna alami yang mempunyai sifat stabil dan efisien.

Penelitian ini bertujuan untuk mengeksplorasi potensi ekstrak akar mengkudu (*Morinda citrifolia*) sebagai pewarna alami yang dapat meningkatkan efisiensi konversi energi pada DSSC. Dengan memanfaatkan komponen bioaktif dalam akar mengkudu, diharapkan dapat dihasilkan absorpsi cahaya lebih baik, pada akhirnya akan

meningkatkan performa sel surya. Lebih jauh lagi, penelitian ini berupaya untuk mengatasi tantangan stabilitas pewarna alami dengan melakukan optimasi pada proses ekstraksi dan aplikasi akar mengkudu dalam DSSC [10]. Melalui pendekatan ini, penelitian ini diharapkan mampu memberikan solusi energi lebih ramah lingkungan dan berkelanjutan dengan memanfaatkan bahan alami yang melimpah dan mudah diakses [11].

Meskipun telah banyak studi yang berfokus pada penggunaan pewarna alami dalam DSSC, seperti *anthocyanin* dari tanaman bunga dan *betalain* dari buah bit, masih terdapat celah penelitian terkait penemuan pewarna alami lebih stabil dan efisien [12]. Sebagian besar penelitian saat ini berfokus pada pewarna alami yang sudah dikenal luas, sementara bahan alami baru, seperti akar mengkudu, belum dieksplorasi secara mendalam sebagai fotosensitizer dalam DSSC. Hal ini menunjukkan adanya kebutuhan akan eksplorasi lebih lanjut terhadap pewarna alami alternatif yang mampu memberikan performa lebih baik dari segi efisiensi dan stabilitas, menjadi fokus utama dalam penelitian ini [6].

Penggunaan akar mengkudu diharapkan mampu memberikan efisiensi yang lebih tinggi dan stabilitas yang lebih baik dibandingkan dengan pewarna alami yang telah ada. Penelitian ini berupaya untuk menemukan bahan pewarna alami yang ramah lingkungan dan memiliki performa tinggi. Dengan memanfaatkan sumber daya alam yang melimpah seperti akar mengkudu, penelitian ini berkontribusi pada pengurangan ketergantungan terhadap bahan kimia sintetis yang berpotensi merusak lingkungan [13].

## 2. Metode Penelitian

Glass substrak/kaca konduktif 2 cm X 2 cm dibersihkan, dikeringkan dan direndam selama 20 menit dengan acetone, pengeringan menggunakan heat gun (Deli Heat Gun 120 – 600 W; 100 °C – 650 °C). [14]. Kaca konduktif dibuat dari larutan Timah (II) Klorida ( $\text{SnCl}_2$  dengan etanol pada perbandingan 25 gram  $\text{SnCl}_2$  dan 75 mL etanol (1:3). Pasta titanium dioksida ( $\text{TiO}_2$ ) dibuat dengan 6 gram serbuk  $\text{TiO}_2$ , 1 gram hidroksietil selulosa (HEC), 25 mL etanol dan 9 mL asam asetat. Kaca konduktif dilapisi dengan pasta  $\text{TiO}_2$  menggunakan metode *doctor blade* [15], [16]. Ekstrak akar mengkudu (*Morinda Cotrifolia*) menggunakan pelarut etanol sebanyak 100 mL dan akar mengkudu dipotong sampai kecil sebanyak 24 gram dan di blender selanjutnya dipanaskan pada suhu 70 – 80 °C dan dilanjutkan kaca konduktif direndam dalam dye akar mengkudu dengan variasi waktu masing-masing 12 jam, 24 jam dan 48 jam dilanjutkan pemanasan pada masing-masing temperatur 350 °C dan 500 °C. Pelapisan kaca konduktif menggunakan nyala lilin yang berjarak sekitar 5 cm di bawah kaca konduktif untuk mendapatkan karbon, selanjutnya penetesan elektrolit Iodine ( $\text{I}^2$ ).

## 3. Hasil dan Diskusi

### Kinerja DSSC Berbasis Ekstrak Akar Mengkudu pada Suhu 500°C

Pada suhu ekstraksi 500°C, DSSC berbasis akar mengkudu menunjukkan peningkatan yang signifikan dalam kinerja seiring dengan bertambahnya waktu rendam dapat dilihat pada tabel 1. Tegangan rangkaian terbuka ( $V_{oc}$ ) meningkat dari 3,2 mV pada waktu rendam 12 jam menjadi 3,8 mV pada 48 jam. Arus hubungan pendek ( $I_{sc}$ ) juga mengalami kenaikan dari 0 mA pada 12 jam menjadi 0,2 mA setelah 48 jam. Peningkatan serupa tercatat pada fill faktor (FF), yang meningkat dari 0,4366 menjadi 0,4774 pada waktu yang sama. Peningkatan parameter ini menghasilkan daya maksimum sebesar 0,3628 mW pada waktu rendam 48 jam, dengan efisiensi konversi energi mencapai 1,29% [8], [11].

Tabel 1. Hasil perhitungan variasi rendaman akar mengkudu pada heat gun 500°C

Sampel dengan Heat Gun 500°C						
Waktu Perendaman	$V_{oc}$ (mV)	$I_{sc}$ (mA)	FF	$P_{max}$ (mW)	$P_{light}$ (mW/cm <sup>2</sup> )	Kinerja (%)
12 jam	3,2	0	0,437	0	27,961	0
24 jam	3,4	0,1	0,509	0,153	27,961	0,55
48 jam	3,8	0,2	0,477	0,363	27,961	1,29

Hasil ini sejalan dengan teori yang menyatakan bahwa suhu yang lebih tinggi dalam proses ekstraksi dapat meningkatkan kinerja dye organik. Penelitian terdahulu oleh [17] menyebutkan bahwa suhu tinggi dapat meningkatkan kecepatan reaksi antara molekul dye dengan lapisan semikonduktor TiO<sub>2</sub>, sehingga memaksimalkan transfer elektron. Oleh karena itu, pada suhu 500°C, molekul dye dari akar mengkudu dapat termodifikasi secara optimal untuk memfasilitasi eksitasi elektron, sebagaimana dibuktikan oleh peningkatan efisiensi.

Meskipun efisiensi 1,29% ini masih relatif rendah jika dibandingkan dengan DSSC berbasis dye sintetis seperti N719, yang umumnya mencapai efisiensi 7-10% [18], hasil ini menunjukkan potensi signifikan. Dalam konteks dye alami, hasil ini sejalan dengan studi sebelumnya yang menggunakan pewarna organik, seperti klorofil yang memiliki efisiensi berkisar antara 2-3% [19]. Hasil ini memberikan bukti bahwa dengan optimasi lebih lanjut, akar mengkudu dapat menjadi alternatif dye yang lebih ramah lingkungan untuk DSSC.

### Kinerja DSSC pada Suhu 350°C

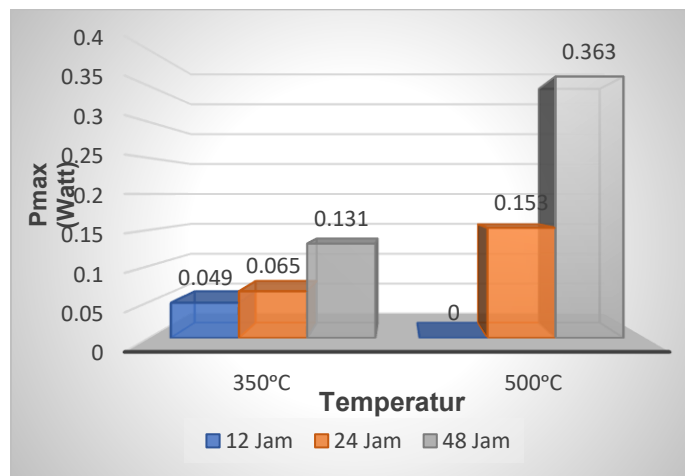
Pada suhu 350°C, kinerja DSSC berbasis akar mengkudu cenderung lebih rendah dibandingkan dengan suhu 500°C dapat dilihat pada tabel 2. Voc tetap rendah pada kisaran 0,7 hingga 1,1 mV, bahkan setelah waktu rendam diperpanjang hingga 48 jam. Isc yang meningkat dari 0,25 mA menjadi 0,5 mA pada waktu rendam 48 jam tidak cukup untuk menghasilkan daya konversi yang signifikan. FF juga relatif rendah, berkisar antara 0,2055 hingga 0,2386. Hal ini menghasilkan daya maksimum sebesar 0,1313 mW pada waktu rendam 48 jam dengan efisiensi konversi energi sebesar 0,47%.

Tabel 2. Hasil perhitungan variasi rendaman akar mengkudu pada heat gun 350°C

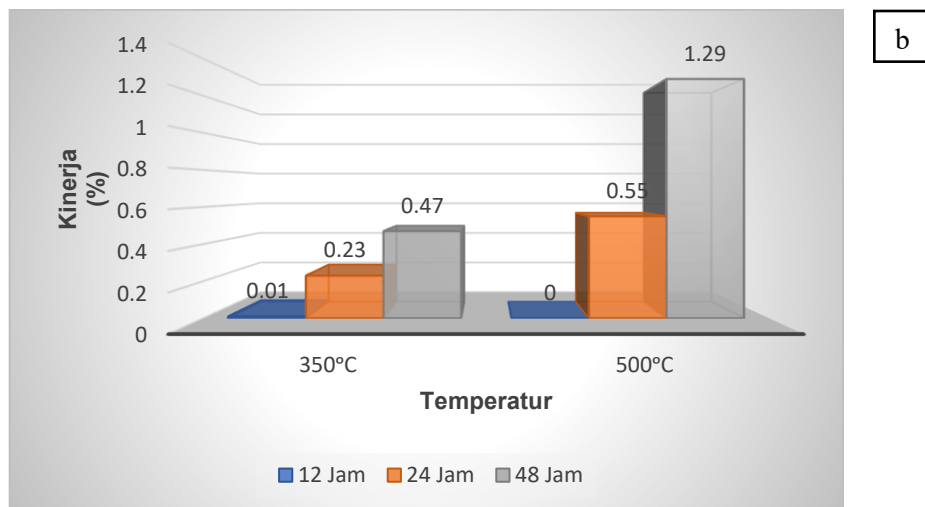
Sampel dengan Heat Gun 350°C						
Waktu Perendaman	V <sub>oc</sub> (mV)	I <sub>sc</sub> (mA)	FF	P <sub>max</sub> (mW)	P <sub>light</sub> (mW/cm <sup>2</sup> )	Kinerja (%)
12 jam	0,9	0,25	0,220	0,049	27,961	0,01
24 jam	0,7	0,45	0,205	0,065	27,961	0,23
48 jam	1,1	0,50	0,239	0,131	27,961	0,47

Efisiensi rendah pada suhu 350°C menunjukkan bahwa akar mengkudu tidak diekstraksi secara optimal pada suhu yang lebih rendah, sehingga proses eksitasi dan transfer elektron tidak berlangsung secara efisien. Hal ini selaras dengan penelitian [20], yang menyatakan bahwa suhu ekstraksi memengaruhi struktur molekul organik, dan suhu yang lebih rendah dapat menghasilkan struktur dye yang kurang stabil, yang berdampak pada penurunan transfer elektron.

Penurunan kinerja pada suhu 350°C dibandingkan dengan 500°C menunjukkan pentingnya optimasi suhu ekstraksi dalam menghasilkan dye organik yang efektif. Penelitian ini memberikan argumen bahwa



a



Gambar 1. a hubungan temperatur dengan daya max, b hubungan temperatur dengan kinerja

penggunaan akar mengkudu sebagai dye organik dalam DSSC memerlukan suhu ekstraksi yang tinggi untuk mencapai kinerja optimal. Walaupun efisiensi tertinggi pada suhu 350°C masih di bawah standar efisiensi dye sintetis, hasil ini tetap memberikan dasar penting untuk eksplorasi lebih lanjut dalam pengembangan bahan dye alami.

#### Perbandingan dengan Dye Alami dan Sintetis

Temuan ini mendukung potensi akar mengkudu sebagai alternatif bahan dye alami dalam DSSC, terutama pada suhu ekstraksi tinggi dan waktu rendam yang diperpanjang. Meskipun demikian, efisiensi yang dicapai masih lebih rendah dibandingkan dengan dye sintetis seperti N719, yang mampu mencapai efisiensi hingga 7-10% [21]. Akan tetapi, keuntungan dari dye alami seperti akar mengkudu, yakni biaya produksi yang lebih rendah dan keberlanjutan lingkungan, menjadikannya kandidat yang menarik untuk pengembangan lebih lanjut.

Sebagai perbandingan, penggunaan dye organik lainnya seperti klorofil dari daun coklat alami [22] atau ekstrak daun jarak pagar dan bunga krisan ungu [23] menghasilkan efisiensi yang sebanding dengan hasil yang diperoleh dalam penelitian ini. Klorofil, misalnya, mampu mencapai efisiensi sekitar 2-3%, sementara daun jarak pagar dan bunga krisan ungu menghasilkan efisiensi lebih rendah di kisaran 0,5-1%. Hal ini menunjukkan bahwa akar mengkudu memiliki potensi yang menjanjikan sebagai dye alami, tetapi memerlukan modifikasi struktural atau penggabungan dengan bahan lain untuk meningkatkan kinerja lebih lanjut.

#### Potensi Pengembangan dan Tindak Lanjut Penelitian

Penelitian ini dapat dilakukan lebih lanjut mengenai penggunaan akar mengkudu sebagai dye organik dalam DSSC. Beberapa strategi tindak lanjut yang direkomendasikan meliputi:

1. Modifikasi Molekul Dye: Penggabungan akar mengkudu dengan dye lain yang memiliki kinerja lebih baik, seperti klorofil, atau penerapan doping kimia dapat meningkatkan efisiensi transfer elektron dan stabilitas molekul dye.
2. Optimasi Kondisi Ekstraksi: Penelitian lebih lanjut dapat dilakukan dengan variasi suhu dan waktu rendam yang lebih luas untuk menemukan kondisi ekstraksi optimal yang dapat meningkatkan kinerja dye dari akar mengkudu.
3. Uji Stabilitas Jangka Panjang: Penting untuk menguji stabilitas dye akar mengkudu dalam paparan sinar UV dan kelembapan, terutama untuk aplikasi jangka panjang pada DSSC komersial.

## Keterbatasan Penelitian

Beberapa keterbatasan hasil dari penelitian ini:

- Rendahnya Efisiensi Secara Keseluruhan: Meskipun terjadi peningkatan kinerja dengan peningkatan suhu dan waktu rendam, efisiensi maksimum yang dicapai masih berada di bawah standar efisiensi DSSC berbasis dye sintetis.
- Variasi Suhu dan Waktu Rendam Terbatas: Hanya dua suhu ekstraksi yang dieksplorasi dalam penelitian ini. Penelitian lebih lanjut diperlukan untuk mengevaluasi rentang suhu dan waktu yang lebih luas.
- Faktor Eksternal Tidak Dieksplorasi: Penelitian ini tidak mengeksplorasi faktor lingkungan seperti kelembapan atau paparan sinar UV dalam jangka panjang, yang mungkin berdampak pada kinerja dan stabilitas dye alami.

## 4. Kesimpulan

Penelitian ini berhasil mengeksplorasi potensi ekstrak akar mengkudu sebagai dye organik untuk aplikasi Dye-Sensitized Solar Cell (DSSC). Berdasarkan hasil eksperimental, beberapa kesimpulan utama dapat ditarik: Pengaruh Suhu Ekstraksi terhadap Kinerja DSSC: Suhu ekstraksi memiliki dampak signifikan terhadap kinerja DSSC berbasis ekstrak akar mengkudu. Pada suhu ekstraksi 500°C, DSSC menunjukkan peningkatan efisiensi konversi energi seiring dengan bertambahnya waktu rendam, mencapai efisiensi maksimum 1,29% pada waktu rendam 48 jam. Sebaliknya, pada suhu ekstraksi 350°C, efisiensi tetap rendah, dengan nilai tertinggi hanya 0,47% pada waktu rendam yang sama. Hasil ini menunjukkan bahwa suhu yang lebih tinggi lebih efektif dalam meningkatkan kemampuan eksitasi elektron dari molekul dye organik. Efisiensi Dye Alami Akar Mengkudu: Meskipun efisiensi DSSC berbasis akar mengkudu masih di bawah kinerja dye sintetis seperti N719, hasil penelitian ini sejalan dengan beberapa penelitian sebelumnya yang menggunakan dye alami. Dengan pencapaian efisiensi maksimum 1,29%, akar mengkudu terbukti memiliki potensi sebagai dye alami yang dapat dioptimalkan untuk aplikasi DSSC. Kinerja ini juga memperkuat bukti bahwa penggunaan dye alami dalam teknologi energi terbarukan dapat memberikan solusi yang lebih ramah lingkungan dengan biaya produksi yang rendah. Optimasi Kondisi Ekstraksi: Temuan ini menekankan pentingnya optimasi kondisi ekstraksi dye organik. Peningkatan suhu dan perpanjangan waktu rendam menghasilkan kinerja yang lebih baik, yang menunjukkan bahwa proses optimasi ini merupakan langkah penting untuk meningkatkan efisiensi dye organik dari bahan alami seperti akar mengkudu. Suhu ekstraksi yang lebih tinggi memfasilitasi peningkatan interaksi antara dye dengan permukaan TiO<sub>2</sub>, yang penting dalam meningkatkan transfer elektron dan efisiensi perangkat. Secara keseluruhan, hasil penelitian ini membuktikan bahwa akar mengkudu memiliki potensi sebagai dye organik dalam DSSC, meskipun masih memerlukan optimasi lebih lanjut untuk mencapai efisiensi yang kompetitif dengan dye sintetis.

## Referensi

- [1] N. Roslan, M. E. Ya'acob, M. A. M. Radzi, Y. Hashimoto, D. Jamaludin, and G. Chen, "Dye Sensitized Solar Cell (DSSC) greenhouse shading: New insights for solar radiation manipulation," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 92. Elsevier Ltd, pp. 171–186, Sep. 01, 2018, doi: 10.1016/j.rser.2018.04.095.
- [2] A. Bist and S. Chatterjee, "Review on Efficiency Enhancement Using Natural Extract Mediated Dye-Sensitized Solar Cell for Sustainable Photovoltaics," *Energy Technology*, vol. 9, no. 8. John Wiley and Sons Inc, Aug. 01, 2021, doi: 10.1002/ente.202001058.
- [3] M. Hosseinneshad, R. Jafari, and K. Gharanjig, "Characterization of a green and environmentally friendly sensitizer for a low cost dye-sensitized solar cell," *Opto-Electronics Rev.*, vol. 25, no. 2, pp. 93–98, Jun. 2017, doi: 10.1016/j.opelre.2017.04.007.
- [4] N. N. A. Hamid, S. Suhaimi, and N. M. Yatim, "Effect of natural dye sensitizers towards the improvement of dye-sensitized solar cell (DSSC) efficiency," in *AIP Conference Proceedings*, Jun. 2018, vol. 1972, doi: 10.1063/1.5041230.
- [5] L. J. Foruzin, Z. Rezvani, and K. Nejati, "Fabrication of TiO<sub>2</sub>@ZnAl-layered double hydroxide based anode material for dye-sensitized solar cell," *RSC Adv.*, vol. 6, no. 13, pp. 10912–10918, 2016, doi:

DOI: <https://doi.org/10.31004/riggs.v4i2.1039>

Lisensi: Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0)

---

- 10.1039/c5ra23384d.
- [6] Vardan, D. M. Kumar, and D. S. Garg, "Natural pigments in dye-sensitized solar cell (DSSC): a DFT-TDDFT study," *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 1248, no. 1, p. 012105, Jul. 2022, doi: 10.1088/1757-899x/1248/1/012105.
- [7] M. Z. Iqbal, S. R. Ali, and S. Khan, "Progress in dye sensitized solar cell by incorporating natural photosensitizers," *Solar Energy*, vol. 181. Elsevier Ltd, pp. 490–509, Mar. 15, 2019, doi: 10.1016/j.solener.2019.02.023.
- [8] S. Datta, A. Dey, N. R. Singha, and S. Roy, "Enhanced performance of dye-sensitized solar cell with thermally stable natural dye-assisted TiO<sub>2</sub>/MnO<sub>2</sub> bilayer-assembled photoanode," *Mater. Renew. Sustain. Energy*, vol. 9, no. 4, Dec. 2020, doi: 10.1007/s40243-020-00185-3.
- [9] H. Nan, H. P. Shen, G. Wang, S. D. Xie, G. J. Yang, and H. Lin, "Studies on the optical and photoelectric properties of anthocyanin and chlorophyll as natural co-sensitizers in dye sensitized solar cell," *Opt. Mater. (Amst.)*, vol. 73, pp. 172–178, Nov. 2017, doi: 10.1016/j.optmat.2017.07.036.
- [10] A. Kusumastuti, S. Anis, and M. Rozana, "Natural Dyes Utilization and Production Technology for Dye-Sensitized Solar Cell," *J. Adv. Res. Fluid Mech. Therm. Sci.*, vol. 91, no. 2, pp. 154–167, Mar. 2022, doi: 10.37934/arfm.91.2.154167.
- [11] A. S. Najm, N. A. Ludin, M. F. Abdullah, M. A. Almessiere, N. M. Ahmed, and M. A. M. Al-Alwani, "Areca catechu extracted natural new sensitizer for dye-sensitized solar cell: performance evaluation," *J. Mater. Sci. Mater. Electron.*, vol. 31, no. 4, pp. 3564–3575, Feb. 2020, doi: 10.1007/s10854-020-02905-x.
- [12] F. Zanjanchi and J. Beheshtian, "Natural pigments in dye-sensitized solar cell (DSSC): a DFT-TDDFT study," *J. Iran. Chem. Soc.*, vol. 16, no. 4, pp. 795–805, Apr. 2019, doi: 10.1007/s13738-018-1561-2.
- [13] G. Nandan Arka, S. Bhushan Prasad, and S. Singh, "Comprehensive study on dye sensitized solar cell in subsystem level to excel performance potential: A review," *Solar Energy*, vol. 226. Elsevier Ltd, pp. 192–213, Sep. 15, 2021, doi: 10.1016/j.solener.2021.08.037.
- [14] K. Soni, A. Sheikh, V. Jain, and N. Lakshmi, "Application of Natural Betalain Dye from Beetroot for Improved Efficiency in Dye Sensitized Solar Cell," *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 1187, no. 1, p. 012005, Sep. 2021, doi: 10.1088/1757-899x/1187/1/012005.
- [15] K. S. Pawar, P. K. Baviskar, Inamuddin, A. B. Nadaf, S. Salunke-Gawali, and H. M. Pathan, "Layer-by-layer deposition of TiO<sub>2</sub>-ZrO<sub>2</sub> electrode sensitized with Pandan leaves: natural dye-sensitized solar cell," *Mater. Renew. Sustain. Energy*, vol. 8, no. 2, Jun. 2019, doi: 10.1007/s40243-019-0148-x.
- [16] S. Tabassum, A. Siddika, M. Sultana, M. Rahaman, and M. S. Bashar, "Dye Sensitized Solar Cell using natural dye as light harvesting sensitizer," *J. Atmos. Sci. Res.*, vol. 2, no. 1, Mar. 2019, doi: 10.30564/jasr.v2i1.469.
- [17] A. S. Teja *et al.*, "Optimal processing methodology for futuristic natural dye-sensitized solar cells and novel applications," *Dyes and Pigments*, vol. 210. Elsevier Ltd, Feb. 01, 2023, doi: 10.1016/j.dyepig.2022.110997.
- [18] A. Supriyanto and L. Batu Ringgit Selatan, "Prosiding SNFA (Seminar Nasional Fisika dan Aplikasinya) 2020 Characteristics Ruthenium (N719) as a Photosensitizer in Dye-Sensitized Solar Cells (DSSC)."
- [19] N. M.Z. and W. Tan, "Dye extracted from *Costus woodsonii* leave as a natural sensitizer for dye-sensitized solar cell," *Sci. Lett.*, vol. 15, no. 1, p. 58, Jan. 2021, doi: 10.24191/sl.v15i1.11794.
- [20] D. Albuлесcu, D. Ursu, L. M. Rusnac, S. Nitu, M. Miclau, and M. Vajda, "Investigation of UV Dye-Sensitized Solar Cells Based on Water Electrolyte: A New Insight for Wavelength-Selective Greenhouse," *Crystals*, vol. 12, no. 1, Jan. 2022, doi: 10.3390/cryst12010098.
- [21] S. Rahman *et al.*, "Research on dye sensitized solar cells: recent advancement toward the various constituents of dye sensitized solar cells for efficiency enhancement and future prospects," *RSC Advances*, vol. 13, no. 28. Royal Society of Chemistry, pp. 19508–19529, Jun. 28, 2023, doi: 10.1039/d3ra00903c.
- [22] P. Dhanasekaran and R. Marimuthu, "Efficiency enhancement of natural cocktail dyes in a TiO<sub>2</sub>-based dye-sensitized solar cell and performance of electron kinetics on the TiO<sub>2</sub> surface," *Front. Energy Res.*, vol. 10, Jan. 2023, doi: 10.3389/fenrg.2022.998038.
- [23] D. Tahir, W. Satriani, P. L. Gareso, and B. Abdullah, "Dye sensitized solar cell (DSSC) with natural dyes extracted from *Jatropha* leaves and purple *Chrysanthemum* flowers as sensitizer," in *Journal of Physics: Conference Series*, Mar. 2018, vol. 979, no. 1, doi: 10.1088/1742-6596/979/1/012056.