

Karakterisasi *Moringa oleifera* Sebagai Pewarna Alam dalam Dye-Sensitized Solar Cell (DSSC)

Wilfrida Mayasti Obina^{1*}, Selestina Kostaria Jua¹, Firda Weri²

¹ Program Studi Pendidikan Fisika, Universitas Musamus, Merauke, Indonesia

² Program Studi Pendidikan Kimia, Universitas Musamus, Merauke, Indonesia

*Corresponding Author: wilfridamayasti@unmus.ac.id

Abstrak

Dye-Sensitized Solar Cell (DSSC) merupakan generasi ke tiga dari sel surya yang memanfaatkan dye dari bahan alam. DSSC menggunakan dye alam untuk menyerap cahaya matahari dan diubah menjadi energi listrik secara langsung. Perubahan energi matahari menjadi energi listrik akan menjawab tantangan dunia dalam keterbatasan energi fosil. Dye yang digunakan dalam penelitian ini adalah dye *Moringa oleifera*. Karakterisasi optik dari dye *Moringa oleifera* diukur menggunakan spektrofotometer UV-VIS dan diperoleh hasil terdapat tiga puncak penyerapan yaitu pada 334 nm, 412 nm, dan 665 nm. Uji konduktivitas menunjukkan dye *Moringa oleifera* memiliki nilai $0,49 \times 10^{-3} \Omega^{-1}m^{-1}$ yang berarti memiliki kemampuan menghantarkan listrik dengan baik. Hasil uji FTIR dye *Moringa oleifera* diperoleh ada gugus fungsi O-H, C-H, $C \equiv C$, C=O dan C-O. Karakterisasi DSSC menggunakan dye *Moringa oleifera* diperoleh efisiensi sebesar $0,50 \times 10^{-1}\%$. Hasil karakterisasi dalam penelitian ini menunjukkan bahwa dye *Moringa oleifera* tepat untuk dijadikan sensitiser dalam DSSC karena memberikan performa yang baik.

Kata Kunci: Karakterisasi; *Moringa oleifera*; Pewarna alam; Dye-sensitized solar cell (DSSC)

Characterization of *Moringa oleifera* Extract as a Natural Dye for Dye-Sensitized Solar Cells (DSSC)

Abstract

Dye-Sensitized Solar Cell (DSSC) is the third generation of solar cells that utilizes dye from natural materials. DSSC uses natural dyes to absorb sunlight and convert it directly into electrical energy. The conversion of solar energy into electrical energy addresses the world's challenges related to the limitations of fossil energy. The dye used in this research is derived from *Moringa oleifera*. The optical characterization of *Moringa oleifera* dye was measured using a UV-VIS spectrophotometer, revealing three absorption peaks at 334 nm, 412 nm, dan 665 nm. Conductivity tests show that *Moringa oleifera* dye has a value of $0,49 \times 10^{-3} \Omega^{-1}m^{-1}$, indicating good electrical conductivity. FTIR testing of *Moringa oleifera* dye identified functional groups including O-H, C-H, $C \equiv C$, C=O, and C-O. Characterization of the DSSC using *Moringa oleifera* dye achieved an efficiency of $0,50 \times 10^{-1}\%$. The results from this research indicate that *Moringa oleifera* dye is suitable for use as a sensitizer in DSSC due to its good performance.

Keywords: Characterization; *Moringa oleifera*; Natural dye; Dye-sensitized solar cell (DSSC)

How to cite: Obina, W. M., Jua, S. K., & Weri, F. (2025). Karakterisasi *Moringa oleifera* Sebagai Pewarna Alam dalam Dye-Sensitized Solar Cell (DSSC). *Lensa: Jurnal Kependidikan Fisika*, 13(1), 12-20. doi: <https://doi.org/10.33394/j-lkf.v13i1.15475>

PENDAHULUAN

Keterbatasan cadangan energi fosil—batubara, minyak bumi, dan gas alam—semakin terasa seiring meningkatnya kebutuhan listrik, transportasi, dan industri di Indonesia. Ketergantungan pada sumber daya tak terbarukan ini bukan hanya menimbulkan kekhawatiran akan krisis pasokan, tetapi juga memperparah emisi gas rumah kaca yang memicu perubahan iklim. Oleh karena itu, pemerintah

maupun kalangan peneliti giat mencari solusi energi alternatif yang bersifat bersih, terjangkau, dan melimpah. Salah satu kandidat yang terus mendapat perhatian adalah *Dye-Sensitized Solar Cell* (DSSC), sel surya generasi ketiga yang mengeksplorasi senyawa pewarna alami sebagai fotosensitizer untuk mengonversi sinar matahari langsung menjadi listrik. Konsep ini menawarkan jalur produksi perangkat fotovoltaik berbiaya rendah, karena dapat dibuat pada suhu relatif rendah dan menggunakan material yang tersedia secara lokal.

Potensi penerapan DSSC di Indonesia kian menguat bila menilik kondisi geografis dan iklimnya. Sebagai negara tropis yang terletak di garis khatulistiwa, Indonesia mendapatkan paparan matahari hampir sepanjang tahun dengan intensitas radiasi yang kompetitif dibandingkan banyak wilayah lain di dunia. Khususnya di kawasan Indonesia Timur, tingkat kecerahan langit dan durasi penyinaran harian relatif tinggi. Penelitian Simanjuntak dan Wibowo (2023) mencatat bahwa Kota Jayapura, Papua, mencapai puncak radiasi sebesar $4,8 \text{ kWh m}^{-2}$ pada bulan Maret, Juni, dan September. Nilai tersebut bukan hanya menandakan kelimpahan energi surya yang dapat dipanen, tetapi juga menegaskan urgensi mengembangkan perangkat konversi energi fotovoltaik yang sederhana, fleksibel, dan cocok diproduksi di daerah dengan infrastruktur terbatas—persis karakteristik utama DSSC.

Prinsip kerja DSSC meniru proses fotosintesis alami: molekul pewarna (dye) menyerap foton, mengekstraksi elektron, dan melalui rangkaian lapisan semikonduktor (biasanya TiO_2) serta elektrolit, elektron tersebut diarahkan untuk menghasilkan arus listrik. Penjelajahan literatur menunjukkan bahwa berbagai ekstrak tumbuhan—daun, bunga, buah, hingga umbi—menampilkan pita serapan cahaya luas pada rentang 400–700 nm, area yang ideal untuk memanen energi surya (Prayitno et al., 2023). Dibandingkan pewarna anorganik yang sanggup menghasilkan efisiensi 7–14 % namun mahal dan berpotensi toksik (Bashir et al., 2022), pewarna organik menawarkan biaya produksi rendah, ketersediaan bahan baku melimpah, serta dampak lingkungan minimal. Tantangannya adalah meningkatkan performa elektromagnetik dan stabilitas kimia agar DSSC berbasis pewarna organik mampu bersaing dalam efisiensi sekaligus mempertahankan keunggulan keberlanjutan.

Dalam konteks ini, *Moringa oleifera* muncul sebagai kandidat strategis. Tanaman berdaun hijau klorofil ini tumbuh subur di wilayah tropis kering maupun lembap, termasuk Indonesia Timur, dan mudah dibudidayakan dengan input agrikultura rendah. Studi awal Silla et al. (2024) melaporkan bahwa ekstrak daunnya memiliki energi celah (band gap) sekitar 2,3 eV—rentang yang ideal untuk menyerap foton di daerah spektrum tampak. Keberadaan gugus fungsi O-H, $\text{C}\equiv\text{C}$, dan $\text{C}=\text{O}$ di dalam molekulnya diduga memperkuat proses injeksi elektron ke permukaan TiO_2 . Meski potensi tersebut menjanjikan, karakteristik optik, kelistrikan, dan kimiawinya dalam konfigurasi DSSC belum didokumentasikan secara komprehensif. Penelitian ini bertujuan mengisi celah tersebut dengan mengkaji profil serapan cahaya, konduktivitas, komposisi gugus fungsi melalui FTIR, serta kinerja fotovoltaik sel surya yang disensitisasi oleh ekstrak *Moringa oleifera*. Hasil penelitian ini diharapkan menjadi rujukan ilmiah untuk mendorong pemanfaatan pewarna alami lokal dalam teknologi energi terbarukan yang ramah lingkungan dan ekonomis.

Kebaruan Penelitian

Penelitian ini menawarkan dua aspek kebaruan yang penting bagi pengembangan Dye-Sensitized Solar Cell (DSSC). Pertama, ekstrak daun *Moringa oleifera* tidak hanya diuji sebagai pewarna alami, tetapi dianalisis secara menyeluruh—meliputi karakter optik, kelistrikan, dan gugus fungsi kimianya—dalam satu rangkaian percobaan terintegrasi. Sebagian besar riset sebelumnya berfokus pada satu parameter saja atau membandingkan beberapa pewarna tanpa kedalaman kimia-fisika yang memadai. Dengan memadukan keempat karakteristik tersebut, studi ini mengungkap korelasi struktur molekul *Moringa*—khususnya keberadaan gugus O-H, C≡C, dan C=O—dengan mekanisme injeksi elektron pada antarmuka TiO₂, yang belum terdokumentasi secara detail di literatur.

Kedua, penelitian ini menonjolkan konteks geografis Indonesia Timur—wilayah dengan intensitas radiasi matahari tinggi namun minim kajian implementasi DSSC—sebagai skenario penerapan nyata. Pemilihan *Moringa oleifera*, tumbuhan yang melimpah dan mudah dibudidayakan secara lokal, memperkuat konsep sirkularitas sumber daya: bahan baku tersedia, biaya produksi rendah, dan rantai pasok berkelanjutan. Pendekatan lokal-spesifik ini menghadirkan model replikasi bagi daerah tropis lain yang serupa iklimnya, sekaligus menambah kontribusi orisinal pada peta riset DSSC global yang selama ini didominasi studi subtropis. Dengan demikian, karya ini tidak hanya memperluas daftar pewarna organik potensial, tetapi juga memosisikan *Moringa oleifera* sebagai kandidat strategis untuk mendukung kemandirian energi terbarukan berbasis sumber daya hayati nusantara.

METODE

Ekstrak dye

Ekstrak dye adalah proses pemisahan pigmen warna dari dye ketika dilarutkan pada suatu pelarut. Dye yang digunakan yaitu daun segar dari *Moringa oleifera*. Ekstrak dye dilakukan dengan melarutkan 20 gr daun segar yang telah dihaluskan pada 80 ml etanol. Larutan dye selanjutnya distirer pada wadah tertutup selama 60 menit dengan suhu ruang. Ekstrak dye hasil *stirrer* disimpan pada suhu ruang tanpa terkena cahaya secara langsung selama 24 jam sebelum disaring menggunakan kertas saring.

Pembuatan elektroda kerja

Elektroda kerja yang digunakan yaitu 0,5 gr TiO₂ nanopartikel yang dilarutkan pada 2,5 ml aquades. Pasta TiO₂ distirer pada suhu ruang selama 30 menit dengan kecepatan 300 rpm. Pasta TiO₂ selanjutnya dideposisi pada kaca FTO menggunakan metode *spin coating* dengan luas area 1 cm x 1 cm. Pasta TiO₂ hasil deposisi di-furnace pada suhu 450°C selama 30 menit.

Pembuatan elektroda lawan dan elektrolit

Daerah aktif untuk elektroda lawan sama seperti pada elektroda kerja. Elektroda lawan: larutan Pt dari pencampuran 1 ml *Hexachloroplatinic (IV) acid* dan 207 ml *isopropanol* yang dideposisikan pada kaca FTO. Elektrolit yang digunakan yaitu larutan NaI diperoleh dari pencampuran 2 gr NaI, 0,2 gr I₂, 1 ml *propylene carbonate*, 3,68 *acetonitrile* dan 14,56 *polyethylene glycol*.

Karakterisasi

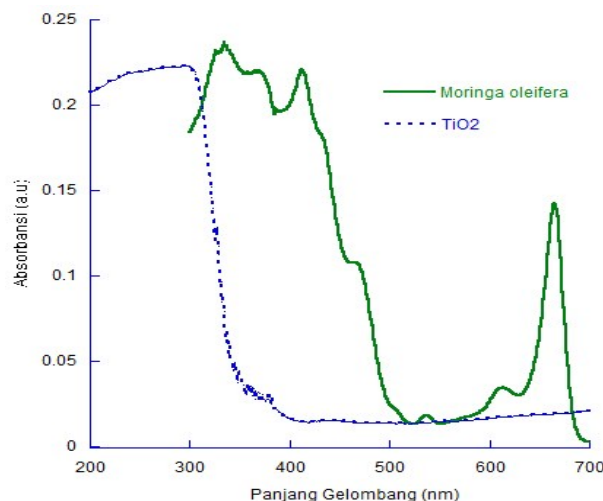
Karakterisasi *dye Moringa oleifera* diperoleh melalui pengujian spektrum absorbansi (UV-Vis), konduktivitas, FTIR dan karakterisasi I-V. Setiap molekul memiliki kemampuan yang berbeda dalam menyerap cahaya matahari. Pengujian spektrum absorbansi bertujuan untuk mengetahui kemampuan molekul *dye* dalam menyerap cahaya matahari. Uji konduktivitas dilakukan untuk mengetahui sifat kelistrikan atau kemampuan molekul *dye* dalam menghantarkan elektron. FTIR bertujuan untuk mengetahui ikatan kimia dan kinerja DSSC dapat diketahui dari hubungan arus - tegangan (I-V) rangkaian. Prinsip kinerja DSSC yang baik adalah terbentuk daerah kurva I-V yang lebih luas pada kuadran IV.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Spektrum absorbansi UV-VIS

Ekstrak *dye Moringa oleifera* yang dihasilkan dalam penelitian ini berwarna hijau menunjukkan pigmen warna yang terkandung dalam klorofil (Sharma et al., 2018). Hasil pengujian spektrum absorbansi *dye Moringa oleifera* dan TiO_2 ditunjukkan oleh Gambar 1.

Gambar 1 menunjukkan terdapat penyerapan cahaya oleh *dye* pada rentang panjang gelombang cahaya tampak yaitu 300-700 nm. Penyerapan maksimal terjadi pada rentang panjang gelombang 300-500 nm. Diperoleh tiga puncak serapan dari spektrum absorbansi *dye Moringa oleifera* yaitu pada panjang gelombang 334 nm, 412 nm dan 665 nm. Hal tersebut sesuai penelitian sebelumnya menggunakan *dye Moringa oleifera* dengan variasi pelarut ethanol diperoleh penyerapan cahaya maksimal pada panjang gelombang 481 nm (Silla et al., 2024). Penelitian tersebut juga memperoleh penyerapan cahaya dari *dye Moringa oleifera* berkisar pada rentang panjang gelombang cahaya tampak.



Gambar 1. Spektrum absorbansi TiO_2 dan *dye Moringa oleifera*

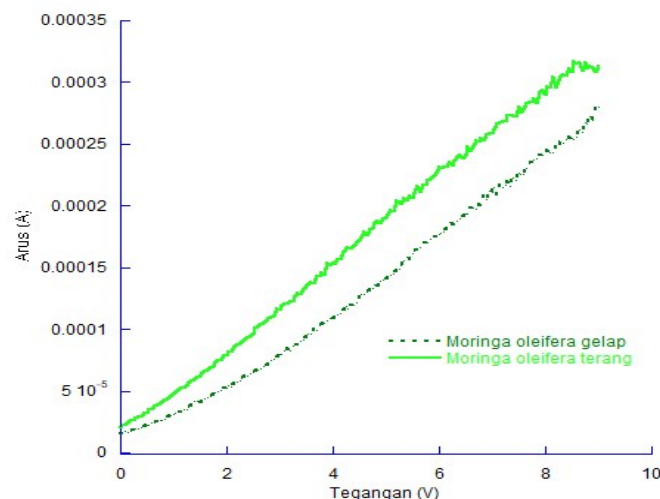
Puncak-puncak absorbansi yang dibentuk oleh *dye Moringa oleifera* menunjukkan banyaknya elektron tereksitasi akibat penyerapan cahaya berupa energi foton oleh molekul *dye*. Peristiwa eksitasi merupakan peristiwa perpindahan elektron ke level yang lebih tinggi bila besar energi foton yang diserap sama atau lebih besar dari energi gapnya. Energi foton yang diserap molekul *dye* digunakan

untuk berpindah dari level HOMO ke level LUMO. Elektron yang telah mencapai level LUMO akan lebih mudah terinjeksi ke pita konduksi TiO_2 . Kemampuan absorbansi dye *Moringa oleifera* pada daerah cahaya tampak menunjukkan potensi sebagai fotosensitizer yang baik.

Gambar 1 juga menunjukkan adanya penyerapan cahaya oleh TiO_2 terjadi pada rentang panjang gelombang 200-400 nm dengan puncak maksimal pada rentang 200-350 nm. Hal ini menunjukkan bahwa TiO_2 sebagai elektroda kerja membutuhkan dye dalam menyerap energi foton di rentang cahaya tampak karena TiO_2 hanya menyerap cahaya pada panjang gelombang di bawah 400 nm (Mustaghfiri & Munasir, 2023). Hasil karakterisasi spektrum absorbansi menunjukkan pewarna alam *Moringa oleifera* dapat membantu semikonduktor TiO_2 dalam penyerapan cahaya secara maksimal.

Konduktivitas

Uji konduktivitas dilakukan untuk mengetahui sifat kelistrikan yang dimiliki oleh dye *Moringa oleifera*. Hasil uji konduktivitas dapat dilihat pada Gambar 2 dan Tabel 1. Uji konduktivitas dilakukan pada keadaan gelap dan terang. Hasil uji konduktivitas dari Gambar 2 menunjukkan bahwa dye *Moringa oleifera* mampu menghantarkan elektron atau arus listrik pada keadaan gelap dan terang. Grafik menunjukkan ada peningkatan arus saat disinari oleh cahaya.



Gambar 2. Konduktivitas dye *Moringa oleifera*

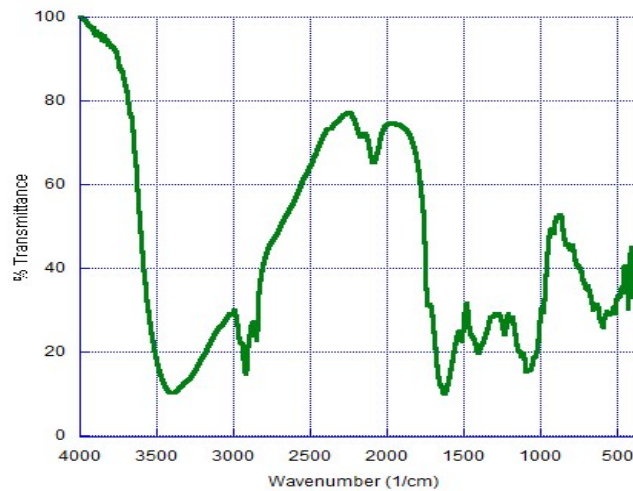
Nilai konduktivitas dari dye *Moringa oleifera* yang dihasilkan dari penelitian ini sebesar $0.49 \times 10^{-3} \Omega^{-1}\text{m}^{-1}$. Hasil ini menunjukkan bahwa dye *Moringa oleifera* memiliki sifat kelistrikan yang dapat menghantar elektron atau mampu menghantarkan arus listrik secara baik. Hal ini juga ditunjukkan pada penelitian sebelumnya bahwa peningkatan nilai perbandingan dye *Moringa oleifera* dan pelarut yang divariasi menunjukkan meningkatnya nilai konduktivitas dari dye *Moringa oleifera* (Rajabiah & Wahyudi, 2022).

Tabel 1. Konduktivitas dye *Moringa oleifera*

Bahan	Kondisi gelap ($\Omega^{-1}\text{m}^{-1}$)	Kondisi terang ($\Omega^{-1}\text{m}^{-1}$)	Konduktivitas ($\Omega^{-1}\text{m}^{-1}$)
<i>Moringa oleifera</i>	$1,31 \times 10^{-3}$	$1,80 \times 10^{-3}$	$0,49 \times 10^{-3}$

FTIR

Karakterisasi FTIR (*Fourier Transform Infrared Spectroscopy*) dilakukan untuk mengidentifikasi gugus fungsi senyawa *dye Moringa oleifera*. Hasil karakterisasi FTIR dapat dilihat pada Gambar 3.

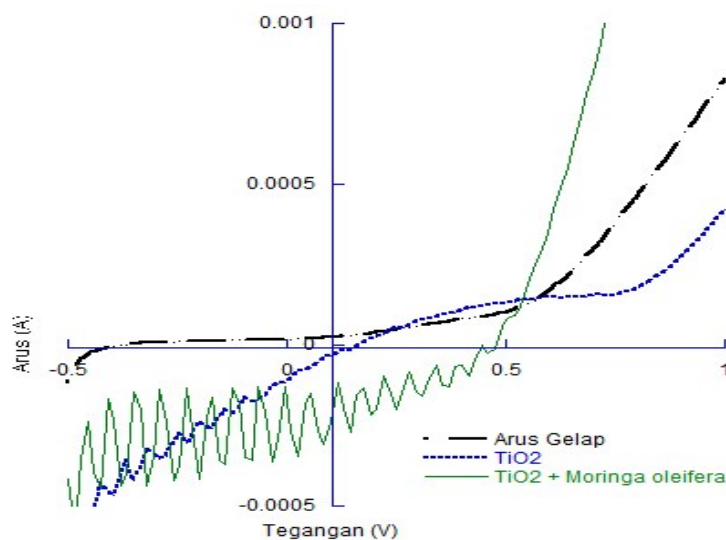


Gambar 3. FTIR *Dye Moringa oleifera*

Hasil karakterisasi FTIR pada *dye Moringa oleifera* menunjukkan ada beberapa puncak serapan yang terbentuk antara lain: 3399.68 cm^{-1} yang menunjukkan gugus fungsi O-H senyawa alkohol, 2920.35 cm^{-1} yang menunjukkan gugus fungsi C-H senyawa alkana, 2088.03 cm^{-1} yang menunjukkan gugus fungsi $\text{C}\equiv\text{C}$ senyawa alkuna, 1626.06 cm^{-1} yang menunjukkan ikatan $\text{C}=\text{O}$, 1407.13 cm^{-1} yang menunjukkan gugus fungsi C-H, 1092.72 cm^{-1} menunjukkan gugus fungsi C-O (Fatiqin et al., 2021; Maheshwari et al., 2023; Stuart, 2005).

Karakterisasi I-V

Performa dan efisiensi DSSC dilihat dari hasil karakterisasi I-V yaitu hubungan antara arus dan tegangan. Hasil karakterisasi I-V pada DSSC menggunakan *dye Moringa oleifera* dapat dilihat pada Gambar 4 dan Tabel 2.



Gambar 4. Karakterisasi I-V DSSC

Grafik pada Gambar 4 menunjukkan pengukuran yang dilakukan pada keadaan gelap dan terang. DSSC dapat bekerja di saat gelap dan ketika keadaan terang atau disinari, kurva I-V akan membelok atau melebar ke wilayah kuadran IV. Semakin lebar daerah kurva pada kuadran IV menunjukkan performa yang baik dari sebuah sel surya. Pada Gambar 4 menunjukkan kurva I-V DSSC menggunakan *dye Moringa oleifera* dan tanpa *dye* mengalami pelebaran pada daerah kuadran IV. DSSC yang menggunakan *dye Moringa oleifera* menghasilkan daerah yang lebih luas pada kuadran IV dibandingkan DSSC tanpa *dye*. Hal ini menunjukkan bahwa *dye Moringa oleifera* memiliki performa yang baik dalam menyerap cahaya.

Tabel 2. Performa DSSC

Bahan	V_{oc} (mV)	$I_{sc} \times 10^{-5}$ (mA)	$P_{max} \times 10^{-5}$	FF	$\eta \times 10^{-1}$ (%)
TiO ₂	0.17	10.39	0.38	0.21	0.04
TiO ₂ + <i>dye</i>	0.49	26.72	5.02	0.38	0.50

Hasil dari Tabel 2 menunjukkan bahwa efisiensi yang dihasilkan oleh DSSC yang menggunakan *dye Moringa oleifera* lebih besar dibandingkan tanpa menggunakan *dye*. Efisiensi yang dihasilkan dalam penelitian ini dari DSSC menggunakan *dye Moringa oleifera* sebesar 0.50×10^{-1} %. Hasil efisiensi ini sejalan dengan penelitian sebelumnya yang menggunakan ekstrak *Moringa oleifera* dan TiO₂ murni menghasilkan efisiensi 0.0101% (Hatib et al., 2024). Efisiensi tersebut lebih kecil dibandingkan penelitian ini, hal tersebut dapat disebabkan oleh elektroda lawan dalam penelitian tersebut menggunakan karbon dari jelaga lilin sedangkan penelitian ini menggunakan platina, dan elektrolit yang digunakan juga berbeda dimana penelitian ini menggunakan elektrolit NaI dan penelitian sebelumnya menggunakan elektrolit KI. Hasil efisiensi dari penelitian ini masih relatif rendah, sehingga dibutuhkan penelitian lanjut terkait pemanfaatan *dye moringa oleifera* dalam meningkatkan performa DSSC. Hasil efisiensi yang relatif rendah dapat disebabkan oleh beberapa faktor antara lain konsentrasi *dye* dan pelarut, elektrolit berbahan cair yang mudah menguap, ketebalan lapisan TiO₂ dan hambatan lainnya sehingga mobilitas elektron tidak dapat mengalir dengan baik.

KESIMPULAN

Hasil karakterisasi *dye Moringa oleifera* diperoleh tiga puncak serapan cahaya pada panjang gelombang 334 nm, 412 nm dan 665 nm. *Dye Moringa oleifera* memiliki sifat kelistrikan dengan nilai konduktivitas $0.49 \times 10^{-3} \Omega^{-1}m^{-1}$. Hasil karakterisasi FTIR *dye Moringa oleifera* menunjukkan ada gugus fungsi O-H, C-H, C≡C, C=O, C-O. Hasil karakterisasi DSSC memberikan efisiensi sebesar 0.50×10^{-1} % dan performa yang baik. Hasil karakterisasi *dye Moringa oleifera* pada rangkaian DSSC menunjukkan bahwa *dye Moringa oleifera* dapat dimanfaatkan sebagai sensitiser. Penelitian ini perlu untuk dikembangkan lagi dan perlu diperhatikan struktur masing-masing rangkaian DSSC agar dapat memberikan performa yang lebih maksimal.

SARAN

Penelitian selanjutnya, penggunaan *dye Moringa oleifera* sebagai sensitiser dalam DSSC dapat dikombinasikan atau dicampur dengan *dye* lainnya untuk memperoleh performa DSSC yang lebih optimal.

UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih disampaikan kepada pihak-pihak yang telah berkontribusi terhadap pelaksanaan penelitian ini.

REFERENSI

- Bashir, S., Iqbal, J., Farhana, K., Jafer, R., hina, M., Kasi, R., & Subramaniam, R. T. (2022). *Dye sensitized solar cells emerging trends and advanced applications*. Academic press.
- Fatiqin, A., Amrulloh, H., Apriani, I., Lestari, A., Erawanti, B., Saputri, A., Gita, M., Fitrianti, M., Sathuluri, R. R., Kurniawan, Y. S., Wulan, R. M. S., & Khan, M. S. (2021). A Comparative Study on Phytochemical Screening and Antioxidant Activity of Aqueous Extract from Various Parts of *Moringa oleifera*. *Indonesian Journal of Natural Pigments*, 3(2), 43. <https://doi.org/10.33479/ijnp.2021.03.2.43>
- Hatib, R., Anwar, K., Magga, R., & Prasetya, A. B. (2024). The role of graphene oxide reduction in increasing the efficiency of DSSC. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1355(1), 1-7. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1355/1/012033>
- Maheshwari, S., Bharti, S., Gusain, A., Khan, S. A., & Matra, N. G. (2023). *FT-IR Analysis of Moringa oleifera L. Leaf Extract and its Insecticidal activity against Callosobruchus chinensis L. (Coleoptera: Bruchidae) FT-IR Analysis of Moringa oleifera L. Leaf Extract and its Insecticidal activity against Callosobruchus chin. October*.
- Rajabiah, N., & Wahyudi, T. C. (2022). Kajian sifat listrik bayam merah dan daun kelor sebagai fotosensitizer pada DSSC solar cell. *Turbo : Jurnal Program Studi Teknik Mesin*, 11(1), 153-158. <https://doi.org/10.24127/trb.v11i1.2119>
- Stuart, B. H. (2005). *Infrared Spectroscopy: Fundamentals and Applications*. In *Infrared Spectroscopy: Fundamentals and Applications*. <https://doi.org/10.1002/0470011149>
- Mustaghfiri, M. A., & Munasir. (2023). Green synthesis of TiO₂ nanoparticles: dye-sensitized solar cells (DSSC) applications: a review. *Jurnal Inovasi Fisika (IFI)*, 12(2), 10-29.
- Prayitno, B., Musyarofah, Fauziyah, N. A., Nuraini, U., & Puspitasari, N. (2023). Extraction and optical study of natural dyes for dye-sensitized solar cell application. *SPECTA Journal of Technology*, 7(2), 533-540.
- Rasyid, A. A., Maha, D. H. S., Irwanto, M., & Ginting, R. T. (2025). Analisis efisiensi dye sensitized solar cell (dssc) yang terbuat dari ekstrak buah naga merah sebagai pewarna dye. *RELE (Rekayasa Elektrikal dan Energi): Jurnal Teknik Elektro*, 8(1), 268-273.
- Sharma, K., Sharma, V., & Sharma, S. S. (2018). Dye-sensitized solar cells: fundamentals and current status. *Nanoscale Research Letter*, 13(381), 1-46.
- Silla, E. M., Pote, F. I., Olla, A., & Boimau, Y. (2024). Fabrikasi studi awal ekstrak klorofil dye moringa oleifera dengan perbandingan pelarut uji spektrofotometer untuk dssc. *Magnetic: Research Journal of Physics and It's Application*, 4(2), 361-366.
- Simanjuntak, P. P., & Wibowo, K. P. (2023). Estimasi intensitas radiasi matahari dengan menggunakan jaringan syaraf tiruan backpropagation di kota jayapura. *Jurnal Fisika - Fisika Sains dan Aplikasi*, 8(1), 44-49.

Stuart, B. H. (2005). Infrared Spectroscopy: Fundamentals and Applications. In *Infrared Spectroscopy: Fundamentals and Applications*. <https://doi.org/10.1002/0470011149>.