

KARAKTERISTIK PIGMEN ANTOSIANIN DARI EKSTRAK KOL UNGU (*BRASSICA OLERACEA*) DAN UBI JALAR UNGU (*IPOMEA BATATAS L. POIR*) SEBAGAI ZAT WARNA PENYERAP CAHAYA UNTUK SEL SURYA JENIS *DYE-SENSITIZED SOLAR CELL (DSSC)*

Riesya Sagita Salsabila¹, Teguh Pambudi¹, Meka Saima Perdani¹, Fitri Yuliasari^{2*}

¹ Program Studi Teknik Kimia, Jurusan Teknik Kimia, Fakultas Teknik, Universitas Singaperbangsa Karawang,
Jl.HS.Ronggowaluyo, Puseur Jaya, Telukjambe Timur, Karawang, Indonesia 43161

² Program Studi Fisika, Jurusan Teknik Kimia, Fakultas Teknik, Universitas Singaperbangsa Karawang,
Jl.HS.Ronggowaluyo, Puseur Jaya, Telukjambe Timur, Karawang, Indonesia 43161
email: fitri.yuliasari@ft.unsika.ac.id

ABSTRAK

Zat warna atau dye, berfungsi sebagai senyawa yang menyerap cahaya matahari dan menghasilkan elektron yang kemudian diteruskan ke lapisan semikonduktor. Penelitian ini bertujuan untuk mengeksplorasi karakteristik pigmen antosianin yang diekstrak dari bahan lam, yaitu kol ungu (*Brassica Oleracea*) dan ubi jalar ungu (*Ipomoea batatas L.Poir*), sebagai dye-sensitizer pada sel surya jenis Dye-Sensitized Solar Cell (DSSC). Pigmen antosianin dipilih karena kemampuannya menyerap cahaya dalam spektrum yang luas, sifatnya yang ramah lingkungan, dan ketersediaannya yang melimpah di alam. Ekstraksi pigmen dilakukan menggunakan pelarut etanol, dan karakterisasi dilakukann dengan Fourier-Transform Infrared Spectroscopy (FTIR) dan UV-Visible Spectroscopy (UV-Vis). Hasil analisis FTIR menunjukkan adanya gugus fungsi O-H, C-H, C=C, C=O dan C-O pada ekstrak kol ungu dan ubi jalar ungu, yang sesuai dengan struktur pigmen antosianin. Analisis UV-Vis menunjukkan puncak serapan pada panjang gelombang 544,5 nm untuk kol ungu dan 542,5 nm untuk ubi jalar ungu. Selain itu, nilai bandgap energy yang diperoleh menunjukkan potensi penggunaan pigmen ini dalam DSSC, dengan nilai bandgap 1,992 eV untuk kol ungu dan 2,043 eV untuk ubi jalar ungu. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa pigmen antosianin dari bahan alam memiliki potensi sebagai dye-sensitizer yang efektif dan ramah lingkungan dalam pengembangan DSSC.

Kata Kunci: Antosianin; DSSC; Dye; Kol ungu; Ubi jalar ungu

ABSTRACT

[Title: Characteristics Of Anthocyanin Pigments From Purple Cabbage (*Brassica Oleracea*) And Purple Sweet Potato (*Ipomea Batatas L.Poir*) Extract As Light Absorbing Dye Substances For Dye-Sensitized Solar Cells (Dssc)]
Dyes function as compounds that absorb sunlight and generate electrons, which are then transferred to a semiconductor layer. This research aims to explore the characteristics of anthocyanin pigments extracted from natural materials, namely purple cabbage (*Brassica Oleracea*) and purple sweet potato (*Ipomoea batatas L. Poir*), as dye-sensitizers in Dye-Sensitized Solar Cells (DSSCs). Anthocyanin pigments were chosen due to their ability to absorb light across a broad spectrum, their environmentally friendly nature, and their abundant availability in nature. Pigment extraction was performed using ethanol as a solvent, and characterization was conducted using Fourier-Transform Infrared Spectroscopy (FTIR) and UV-Visible Spectroscopy (UV-Vis). FTIR analysis results showed the presence of O-H, C-H, C=C, C=O, and C-O functional groups in both purple cabbage and purple sweet potato extracts, which is consistent with the anthocyanin pigment structure. UV-Vis analysis revealed absorption peaks at 544.5 nm for purple cabbage and 542.5 nm for purple sweet potato. Furthermore, the obtained bandgap energy values indicate the potential use of these pigments in DSSCs, with values of 1.992 eV for purple cabbage and 2.043 eV for purple sweet potato. The findings of this study demonstrate that anthocyanin pigments from natural materials have the potential to be effective and eco-friendly dye-sensitizers in the development of DSSCs.

Keywords: Anthocyanin; DSSC; Dye; Purple cabbage; Purple sweet potato

PENDAHULUAN

Pada perkembangan globalisasi saat ini diperlukan upaya untuk pemenuhan kebutuhan energi global, sumber energi terbarukan semakin menjadi fokus pengembangan dunia. Salah satu solusi yang menjajikan adalah sel surya, yang memanfaatkan sinar matahari sebagai sumber energi utama. Sel surya menjadi pilihan utama dibandingkan teknologi energi terbarukan lainnya karena ketersediaan sinar matahari yang melimpah di Indonesia, serta kemampuan teknologi ini untuk diintegrasikan dalam berbagai skala, mulai dari perangkat portabel hingga pembangkit listrik skala besar. Sel surya yang saat ini terus dikembangkan adalah *Dye-Sensitized Solar Cell* (DSSC), yang menawarkan solusi energi murah, efisien dan berkelanjutan.

DSSC didefinisikan oleh O'Regan & Gratzel (1991) sebagai teknologi sel surya fotoelektrokimia yang menggunakan *dye* sebagai *sensitizer* untuk menyerap cahaya matahari dan menghasilkan energi listrik melalui mekanisme transfer elektron pada lapisan semikonduktor. Menurut (Mariotti *et al.*, 2020) DSSC memiliki keunggulan dibandingkan sel surya berbasis silikon karena biayanya yang lebih rendah dan kemampuannya untuk bekerja pada kondisi pencahayaan rendah. Selain itu, penelitian (Dhorkule *et al.*, 2024) menjelaskan bahwa DSSC mendukung prinsip keberlanjutan karena dapat memanfaatkan bahan alami sebagai *sensitizer*, sehingga ramah lingkungan dan mudah diintegrasikan dalam berbagai aplikasi.

Komponen utama dalam DSSC terdiri dari fotoanoda (TiO_2/ZnO), zat warna (*dye*), dan elektrolit. Pasta TiO_2 berfungsi sebagai lapisan semikonduktor yang mendukung transfer elektron dari zat warna ke elektrolit. Zat warna atau *dye*, berfungsi sebagai senyawa yang menyerap cahaya matahari dan menghasilkan elektron yang kemudian diteruskan ke lapisan semikonduktor TiO_2 (Francis and Ikenna, 2021). Dalam pengembangan DSSC, penggunaan zat warna alami (*natural dye*) semakin mendapatkan perhatian sebagai alternatif ramah lingkungan dan lebih murah dibandingkan dengan zat warna sintesis. Zat warna alami ini diperoleh dari berbagai sumber bahan alam, seperti tanaman dan buah-buahan, yang memiliki pigmen-pigmen yang dapat menyerap cahaya dengan efisien. Salah satu metode untuk memperoleh zat warna alami adalah ekstraksi dengan menggunakan teknik maserasi, di mana bahan alami seperti bunga, daun, atau buah dihancurkan dan dicampur dengan pelarut untuk mendapatkan pigmen yang terkandung di dalamnya (Kim *et al.*, 2022).

Pigmen antosianin, yang secara alami terdapat dalam bahan alam seperti bunga, buah-buahan, dan daun, telah menjadi subjek penelitian luas karena kemampuannya untuk menyerap cahaya dalam spektrum yang luas. Antosianin memiliki struktur molekul yang mendukung efisiensi transfer energi dalam DSSC. Keunggulan lain dari pigmen ini adalah sifatnya yang *biodegradable*, tidak beracun, dan melimpah di alam, menjadikannya pilihan yang lebih ramah lingkungan dibandingkan dengan *dye-sensitizer* sintesis yang mahal dan berpotensi merusak lingkungan (Mejica *et al.*, 2022). Meskipun potensi pigmen antosianin sudah banyak diteliti, karakteristik spesifik dari sumber bahan alam yang berbeda dan efektivitas pelarut dalam proses ekstraksi belum sepenuhnya dipahami. Penelitian sebelumnya telah menunjukkan bahwa pigmen alami dapat digunakan sebagai alternatif *dye-sensitizer* untuk DSSC. Penelitian terdahulu meneliti konfigurasi DSSC menggunakan *sensitizer*, termasuk senyawa alami seperti antosianin yang di ekstrak dari promagranate ($\eta = 2\%$) (Erande *et al.*, 2020).

Analisis seperti *Fourier-Transform Infrared Spectroscopy* (FTIR) dan *UV-Visible Spectroscopy* (UV-Vis) dapat memberikan gambaran lebih jelas tentang kandungan gugus fungsi dan kemampuan penyerapan pigmen ini. Selain itu, evaluasi kompatibilitas antara pigmen dan lapisan TiO_2 pada DSSC menjadi langkah penting untuk mengoptimalkan efisiensi konversi energi. Oleh karena itu, penelitian ini akan mengeksplorasi pigmen antosianin dari sumber bahan alam lokal Indonesia. Dengan penelitian ini, bertujuan untuk memberikan alternatif *dye-sensitizer* yang ramah lingkungan. Pada penelitian ini, kami berhasil melakukan sintesis ekstrak *dye* dari ekstrak kol ungu (*Brassica Oleracea*) dan ubi jalar ungu (*Ipomoea batatas L.Poir*) menggunakan teknik maserasi sederhana dengan pelarut etanol.

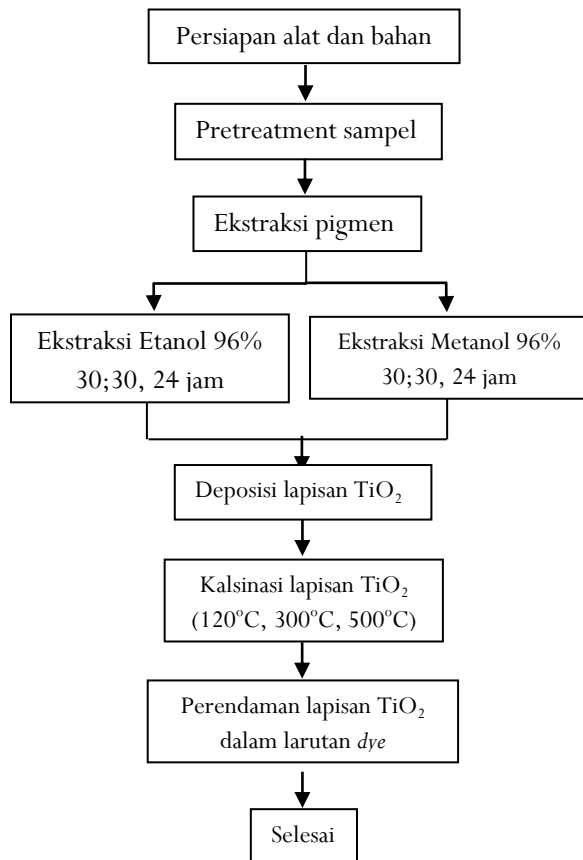
METODE

Bahan dan Alat

Bahan yang digunakan yaitu kol ungu (*Brassica Oleracea*) dan ubi jalar ungu (*Ipomoea batatas L.Poir*). pelarut yang digunakan yaitu etanol 96% (Pro analysis), aseton, pasta TiO_2 (Solaronix SA), aquadest dan kalium bromida (KBr) digunakan untuk membuat pelet untuk analisis FTIR.

Alat yang digunakan yaitu *hotplate* yang digunakan untuk memanaskan kaca substrat, mortal dan alu untuk menghaluskan sampel, neraca analitik digunakan untuk menimbang sampel, kertas saring, gelas beaker 50 dan 100 mL untuk melakukan proses ekstraksi maserasi untuk perendaman sampel, erlenmeyer 50 dan 100 mL untuk tempat proses penyaringan, corong kaca, batang pengaduk,

spatula. Untuk pendeposisian substrat kaca dan pasta TiO₂ (Solaronix SA) menggunakan metode *screen printing* menggunakan alat seperti substrat kaca, rakel. Botol vial 10 dan 50 mL digunakan untuk menyimpan sampel yang sudah di ekstraksi, gelas ukur 10 mL, kain saring, JASCO FTIR-4600 untuk analisis FTIR, JASCO UV-Vis -4600 untuk analisis UV-Vis, dan aluminium foil.



Gambar 1 Diagram alir tahapan penelitian

Ekstraksi Dye

Proses ekstraksi *dye* dilakukan dengan teknik maserasi sederhana seperti yang sudah dilaporkan pada penelitian (Yuliasari *et al.*, 2024). Larutan pewarna alami dibuat dari ekstrak kol ungu dan ubi jalar ungu. Kol ungu dan ubi jalar ungu dicuci terlebih dahulu, kemudian dipotong-potong dan dihaluskan menggunakan mortal dan alu, kemudian ditimbang sebanyak 30gr dan dilarutkan dengan pelarut 30 mL etanol (Merck 99%) untuk dilanjutkan proses maserasi selama 24 jam pada tempat tertutup hingga diperoleh ekstrak pewarna. Setelah itu, larutan hasil dari proses maserasi disaring dengan kertas saring untuk menghilangkan residu. UV-Vis dilakukan untuk melihat kemampuan absorpsi cahaya dan nilai puncak

serapan gelombang UV-Vis, dan pengujian FTIR dilakukan untuk mengidentifikasi gugus fungsi kimia. Dengan analisis FTIR, dapat diketahui apakah *dye* mengandung gugus *anchoring group* seperti hidroksil, karbonil dan karboksilat.

Penyiapan Substrat Kaca

Untuk melapiskan pasta TiO₂ pada substrat kaca, substrat kaca ukuran 7,5 cm x 2,5 cm dipotong setara ukuran kuvet yaitu 2,5 cm x 1 cm untuk memudahkan dalam pengukuran absorpsi. Setelah itu, substrat kaca disterilkan dengan aseton menggunakan *Ultrasonic Cleaner* selama 15 menit.

Pelapisan Pasta TiO₂

Substrat kaca yang telah di sterilkan menggunakan *Ultrasonic Cleaner* selanjutnya dideposisikan menggunakan pasta anoda TiO₂ dengan menggunakan metode *screen printing*. Screen ditempatkan diatas substrat kaca, kemudian pasta TiO₂ dideposisikan sesuai dengan ukuran yang ditentukan pada *screen* dengan menggunakan rakel. Setelah dideposisi pasta TiO₂, selanjutnya substrat kaca yang sudah terlapisi TiO₂ dipanaskan menggunakan hotplate dengan variasi suhu 120°C, 300°C dan 500°C dengan masing-masing waktu selama 10 dan 20 menit.

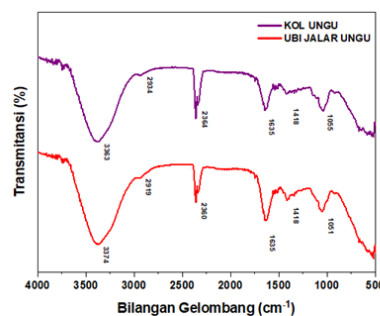
Perendaman Lapisan TiO₂ pada Larutan Dye

Perendaman dilakukan dengan merendam substrat yang telah dilapisi TiO₂ ke dalam larutan *dye* selama 2 jam. Setelah proses perendaman, dilakukan karakterisasi UV-Vis untuk menganalisis serapan absorpsi *dye* pada permukaan TiO₂.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Karakterisasi FTIR

Ekstrak kol ungu dan ubi jalar ungu menggunakan pelarut etanol, dianalisis menggunakan instrumen FTIR. Hasil analisis FTIR terhadap ekstrak *dye* disajikan pada Gambar 2.



Gambar 2 Spektrum FTIR ekstrak *dye* kol ungu dan ubi jalar ungu

Berdasarkan gambar tersebut, ekstrak kol ungu hasil ekstraksi mempunyai karakteristik puncak spesifik pada bilangan gelombang 3363 cm^{-1} yang menunjukkan gugus fungsi O-H (alkohol) sedangkan untuk ekstrak ubi jalar ungu mempunyai puncak spesifik pada bilangan gelombang 3374 cm^{-1} . Pada bilangan gelombang 2934 cm^{-1} menunjukkan gugus fungsi C-H (alkana) untuk ekstrak kol ungu dan untuk ubi jalar ungu karakteristik spesifik muncul pada bilangan gelombang 2928 cm^{-1} .

Gugus fungsi C=C (cincin aromatik) pada ekstrak kol ungu dan ubi jalar ungu menunjukkan bilangan gelombang yang sama pada rentang 1635 cm^{-1} . Pada bilangan gelombang 1418 cm^{-1} untuk ekstrak kol ungu dan ubi jalar ungu yang menunjukkan gugus fungsi karbonil (C=O), Serta bilangan gelombang 1055 cm^{-1} untuk ekstrak kol ungu dan 1051 cm^{-1} pada ekstrak ubi jalar ungu menunjukkan gugus fungsi (C-O). Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa ekstrak kol ungu dan ubi jalar ungu mengandung senyawa yang memiliki ikatan O-H, C-H, C=C, C=O dan C-O. Hal ini sejalan dengan penelitian (Homayoonfal *et al.*, 2022) yang menyatakan bahwa ekstrak yang diperoleh menggunakan pelarut etanol menunjukkan hasil analisis gugus fungsi senyawa pigmen antosianin dengan keberadaan ikatan O-H, C-H, C=O, C=C dan C-O.

Karakterisasi UV-Vis

Pengujian absorbansi *dye* antosianin dilakukan menggunakan spektrofotometer UV-Vis (Gambar 3) dengan rentang panjang gelombang 400-700 nm untuk mengidentifikasi dan menganalisis karakteristik spektrum serapan dari pigmen antosianin. Pigmen ini dikenal sebagai salah satu jenis natural dye yang memiliki kemampuan menyerap cahaya pada rentang panjang gelombang tertentu, yaitu antara 450-580 nm (Sakshi, Singh

and Shukla, 2020).

Berdasarkan hasil uji spektrofotometer UV-Vis ekstrak kol ungu dan ubi jalar ungu menunjukkan hubungan erat dengan sifat kepolaran pelarut yang digunakan. Pelarut polar seperti etanol sangat efektif dalam melarutkan pigmen antosianin karena antosianin merupakan senyawa flavonoid yang bersifat polar (Lianza, Marincich and Antognoni, 2022). Pada sampel kol ungu analisis spektrum UV-Vis menunjukkan puncak serapan pada panjang gelombang 544,5 nm sedangkan untuk ekstrak ubi jalar ungu menunjukkan spektrum serapan pada 542,5 nm.

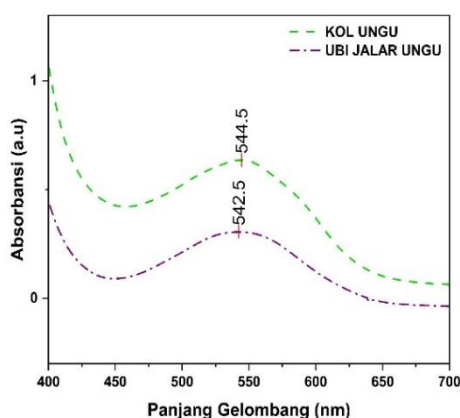
Hasil menunjukkan bahwa ekstrak dari kol ungu dan ubi jalar ungu efektif untuk dimanfaatkan sebagai *dye-sensitizer* untuk aplikasi DSSC dilihat dari puncak penyerapan absorbansi nya menunjukkan keberadaan pigmen antosianin. Posisi puncak yang lebih rendah dibandingkan ekstrak kol ungu menunjukkan bahwa antosianin dalam ubi jalar ungu memiliki struktur yang lebih sederhana atau berbeda dalam konfigurasi molekular. Hal ini mengindikasikan jenis pigmen antosianin yang serupa, dengan struktur molekular yang mendukung interaksi kuat dengan pelarut polar. Variasi kecil pada panjang gelombang maksimum menunjukkan perbedaan kecil dalam stabilisasi molekular yang diberikan oleh pelarut.

Kepolaran pelarut merujuk pada kemampuan molekul pelarut untuk menghasilkan medan listrik yang mempengaruhi molekul lain melalui interaksi dipol. Interaksi ini didasarkan pada prinsip "*like dissolves like*" yang menyatakan bahwa pelarut dengan kepolaran yang sama akan lebih efektif melarutkan senyawa dengan sifat serupa. Dalam konteks ini, antosianin yang merupakan senyawa polar sangat kompatibel dengan pelarut polar seperti etanol (Jeyaraj, Lim and Choo, 2021).

Bandgap Energy

Bandgap energy dilakukan dengan menggunakan metode *Tauc Plot*. Hal ini bertujuan untuk mengetahui berapa besar energi foton cahaya ($h\nu$) yang dibutuhkan untuk dapat diserap oleh larutan *dye*. (Gambar 3) menunjukkan hasil yang didapat dari metode *Tauc Plot* pada lapisan tipis yang menggunakan orijin.

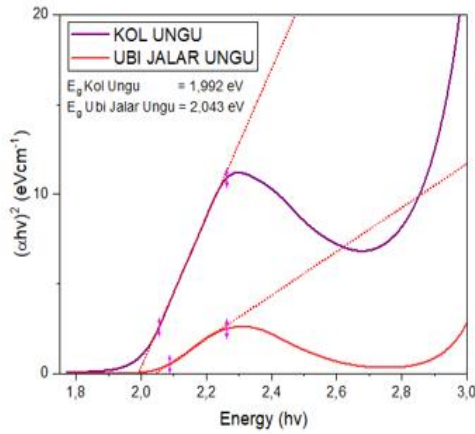
Penggunaan metode *tauc plot* yaitu dengan cara menarik ekstrapolasi pada daerah linear dari kurva hubungan ($h\nu$) sebagai basis dan $(\alpha h\nu)$ sebagai koordinat hingga memotong sumbu energi. Pada sumbu x menyatakan bahwa energi serapan ($h\nu$) dan sumbu y menyatakan koefisien yang diserap terhadap foton $(\alpha h\nu)^2$. Pengeplotan $(\alpha h\nu)^2$ dengan ($h\nu$)



Gambar 3 Spektrum absorbansi UV-Vis ekstrak kol ungu dan ubi jalar ungu

dilakukan dengan cara menarik garis linier dari kurva ke garis absorpsi nol memberikan nilai celah pita energi TiO₂.

Berdasarkan analisis grafik pada Gambar 4 kol ungu yang di ekstrak dengan pelarut etanol ($E_g =$



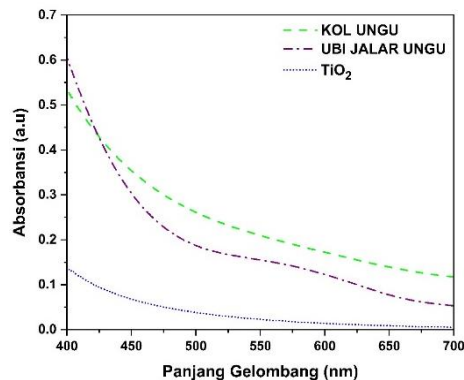
Gambar 4 Celah energi (*energy gap*)

1,992 eV) memiliki potensi terbaik untuk DSSC. Sedangkan ekstrak ubi jalar ungu memiliki bandgap yang lebih tinggi ($E_g = 2,043$ eV).

Energi gap pada semikonduktor TiO₂ yaitu 3,2 eV (Etafa *et al.*, 2024), Nilai bandgap yang rendah diinginkan untuk aplikasi *dye sensitized solar cell* (DSSC) karena memungkinkan penyerapan cahaya pada rentang panjang gelombang yang lebih luas (Rehman *et al.*, 2020).

Penyerapan TiO₂ dengan Larutan Dye

Pigmen yang di ekstrak berkaitan erat dengan panjang gelombang sinar matahari yang diserap. Sensitizer yang efektif harus menyerap cahaya melebihi rentang dari cahaya tampak hingga daerah inframerah, dan keadaan eksitasinya harus lebih besar dari pita konduksi TiO₂. Penyerapan *dye* dilakukan untuk mengetahui karakteristik penyerapan *dye* terhadap semikonduktor TiO₂. Antosianin mempunyai fungsi sebagai penangkap foton pada sinar matahari dan mengubahnya menjadi elektron.



Gambar 5 Penyerapan *dye* pada lapisan semikonduktor TiO₂

Dye akan mengalami eksitasi akibat penyerapan energi foton. Semakin banyak *dye* yang menempel maka akan menghasilkan fotoelektron yang lebih banyak dimana ukuran semikonduktor TiO₂ mempengaruhi *dye* yang melekat atau menempel pada saat proses perendaman (Chandra Sil *et al.*, 2020). Pada Gambar 5 menunjukkan hasil absorbansi pada semikonduktor TiO₂ yang teradsorpsi *dye*. Analisis ini dilakukan untuk mengetahui apakah substrat semikonduktor TiO₂ yang direndam dalam larutan *dye* dapat menempel dengan melihat adanya serapan pada UV-Vis pada rentang panjang gelombang 600-700 nm.

Jika dilihat secara keseluruhan, intensitas absorbansi ekstrak kol ungu dan ubi jalar ungu lebih tinggi dari sampel TiO₂ tanpa perendaman *dye*. Hal ini dapat disimpulkan bahwa larutan *dye* pada lapisan semikonduktor TiO₂ berhasil melakukan penyerapan yang baik dengan *dye*. Berdasarkan grafik absorbansi yang ditampilkan pada Gambar 5, terlihat bahwa intensitas absorbansi dari ekstrak kol ungu dan ubi jalar ungu secara keseluruhan lebih tinggi dibandingkan dengan sampel TiO₂ tanpa perendaman *dye*. Hal ini menunjukkan bahwa larutan *dye* dari kedua bahan tersebut berhasil terserap dengan baik pada lapisan semikonduktor TiO₂, sehingga mampu meningkatkan kemampuan material dalam menyerap cahaya di rentang panjang gelombang 400–700 nm. Dibandingkan antara kedua sampel, ekstrak kol ungu menunjukkan intensitas absorbansi yang lebih tinggi dibandingkan dengan ekstrak ubi jalar ungu. Hal ini disebabkan oleh kandungan senyawa aktif penyerap cahaya, seperti antosianin, yang lebih tinggi pada kol ungu. Jika merujuk pada hasil spektrum UV-Vis dari larutan *dye* sebelum proses perendaman, puncak absorbansi (λ_{max}) dari kol ungu berada pada panjang gelombang yang lebih tinggi dan dengan intensitas yang lebih tajam dibandingkan dengan ubi jalar ungu. Hal ini menunjukkan bahwa kol ungu memiliki kemampuan penyerapan cahaya yang lebih baik, sehingga menghasilkan peningkatan absorbansi yang lebih signifikan saat diaplikasikan pada permukaan TiO₂.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian, dapat disimpulkan bahwa pigmen antosianin yang diekstrak dari kol ungu dan ubi jalar ungu memiliki karakteristik yang menjanjikan untuk digunakan sebagai *dye-sensitizer* pada sel surya jenis DSSC. Analisis FTIR mengidentifikasi adanya gugus fungsi O-H, C-H, C=C, C=O, dan C-O yang mendukung struktur pigmen antosianin. Analisis UV-Vis menunjukkan

bahwa pigmen ini mampu menyerap cahaya pada rentang panjang gelombang yang sesuai untuk aplikasi DSSC, dengan puncak serapan pada 544,5 nm untuk kol ungu dan 542,5 nm untuk ubi jalar ungu. Nilai *bandgap energy* yang rendah (1,992 eV) untuk kol ungu dan 2,043 eV untuk ubi jalar ungu) menunjukkan potensi penggunaan pigmen ini dalam meningkatkan efisiensi DSSC. Selain itu, interaksi antara pigmen antosianin dan lapisan TiO₂ yang terbukti melalui analisis penyerapan UV-Vis menunjukkan bahwa pigmen ini dapat berfungsi efektif dan bisa diaplikasikan sebagai *dye-sensitizer*. Dengan demikian, pigmen antosianin dari bahan alam dapat menjadi alternatif yang ramah lingkungan dan ekonomis dalam pengembangan teknologi sel surya berkelanjutan.

UCAPAN TERIMAKASIH

Penulis mengucapkan terima kasih atas dukungan finansial terhadap penelitian dari Hibah Bersaing Penelitian Pemula - Universitas Singaperbangsa Karawang No.93/SP2H/UN64.10/LL/2024

DAFTAR PUSTAKA

- Chandra Sil, M. *et al.* (2020) 'Enhancement of power conversion efficiency of dye-sensitized solar cells for indoor applications by using a highly responsive organic dye and tailoring the thickness of photoactive layer', *Journal of Power Sources*, 479(July), p. 229095. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2020.229095>.
- Dhorkule, M.R. *et al.* (2024) 'Unveiling the Efficiency of Dye-Sensitized Solar Cells: A Journey from Synthetic to Natural Dyes', *ES Food and Agroforestry*, 16, pp. 1–21. Available at: <https://doi.org/10.30919/esfaf1086>.
- Erande, K.B. *et al.* (2020) 'Extraction of natural dye (specifically anthocyanin) from pomegranate fruit source and their subsequent use in dssc', *Materials Today: Proceedings*, 43(xxxx), pp. 2716–2720. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.06.357>.
- Etafa, Y. *et al.* (2024) 'Results in Chemistry Band gap engineering of titanium dioxide (TiO₂) nanoparticles prepared via green route and its visible light driven for environmental remediation', 11(August).
- Francis, O.I. and Ikenna, A. (2021) 'Review of Dye-Sensitized Solar Cell (DSSCs) Development', *Natural Science*, 13(12), pp. 496–509. Available at: <https://doi.org/10.4236/ns.2021.1312043>.
- Homayoonfal, M. *et al.* (2022) 'Modifying the Stability and Surface Characteristic of Anthocyanin Compounds Incorporated in the Nanoliposome by Chitosan Biopolymer', *Pharmaceutics*, 14(8). Available at: <https://doi.org/10.3390/pharmaceutics14081622>.
- Jeyaraj, E.J., Lim, Y.Y. and Choo, W.S. (2021) 'Effect of Organic Solvents and Water Extraction on the Phytochemical Profile and Antioxidant Activity of Clitoria ternatea Flowers', *ACS Food Science and Technology*, 1(9), pp. 1567–1577. Available at: <https://doi.org/10.1021/acfoodscitech.1c00168>.
- Kim, J.H. *et al.* (2022) 'Toward eco-friendly dye-sensitized solar cells (DSSCs): Natural dyes and aqueous electrolytes', *Energies*, 15(1), pp. 1–18. Available at: <https://doi.org/10.3390/en15010219>.
- Lianza, M., Marincich, L. and Antognoni, F. (2022) 'The Greening of Anthocyanins: Eco-Friendly Techniques for Their Recovery from Agri-Food By-Products', *Antioxidants*, 11(11). Available at: <https://doi.org/10.3390/antiox11112169>.
- Mariotti, N. *et al.* (2020) 'Recent advances in eco-friendly and cost-effective materials towards sustainable dye-sensitized solar cells', *Green Chemistry*, 22(21), pp. 7168–7218. Available at: <https://doi.org/10.1039/d0gc01148g>.
- Mejica, G.F.C. *et al.* (2022) 'Anthocyanin pigment-based dye-sensitized solar cells with improved pH-dependent photovoltaic properties', *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 51, p. 101971. Available at: <https://doi.org/10.1016/J.SETA.2022.101971>.
- Rehman, A.U. *et al.* (2020) 'Jou rna IP', *Optics Communications*, p. 126353. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2020.126353>.
- Sakshi, Singh, P.K. and Shukla, V.K. (2020) 'Widening spectral range of absorption using natural dyes: Applications in dye sensitized solar cell', *Materials Today: Proceedings*, 49(xxxx), pp. 3235–3238. Available at:

<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.12.287>.

Sova, R.R. and Setiarso, P. (2021) 'Studi Elektrokimia Klorofil dan Antosianin Sebagai Fotosensitizer DSSC (Dye-Sensitized Solar Cell)', *Unesa Journal of Chemistry*, 10(2), pp. 191–199. Available at: <https://doi.org/10.26740/ujc.v10n2.p191-199>.

Yuliasari, F. *et al.* (2024) 'Fabrication of dye-sensitized solar cells with natural dye pigments derived from mustard green (*Brassica juncea* L) and turmeric (*Curcuma longa* L)', *Journal of Physics: Conference Series*, 2866(1). Available at: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2866/1/012013>.