

KARAKTERISTIK CAMPURAN DYE ALAMI KLOROFIL - ANTOSIANIN DARI EKSTRAK KULIT BUAH NAGA - DAUN BINAHONG DAN EKSTRAK PAKCOY - KOL UNGU UNTUK DIKEMBANGKAN SEBAGAI DYE PADA SEL SURYA DSSC (DYE- SENSITIZED SOLAR CELL)

**Alzachry Redhaqa Rahmatullah¹, Teguh Pambudi¹, Hilman Imadul Umam²
Fitri Yuliasari²**

1. Jurusan Teknik Kimia, Fakultas Teknik, Universitas Singaperbangsa Karawang, Jl. HS. Ronggowaluyo, Telukjambe Timur, Karawang, 41363, Indonesia
2. Jurusan Fisika, Fakultas Teknik, Universitas Singaperbangsa Karawang, Jl. HS. Ronggowaluyo, Telukjambe Timur, Karawang, 41363, Indonesia
E-mail: fitri.yuliasari@ft.unsika.ac.id

Abstrak

Penelitian ini meneliti potensi campuran dye alami yang mengandung pigmen antosianin dan klorofil untuk aplikasi Dye Sensitized Solar Cell (DSSC). Dua kombinasi dye yang diteliti yaitu: dye dari kulit buah naga (*Hylocereus undatus*) dicampur dengan daun binahong (*Anredera cordifolia*), serta dye dari kol ungu (*Brassica oleracea*) dengan pakcoy (*Brassica rapa*). Proses ekstraksi dilakukan menggunakan etanol sebagai pelarut melalui metode maserasi dan larutan yang telah di ekstraksi kemudian dianalisis dengan spektroskopi FTIR dan UV-Vis). Analisis FTIR menunjukkan adanya gugus fungsi penting seperti hidroksil, karbonil, dan karboksil dalam masing – masing campuran dye. Analisis UV-Vis menunjukkan bahwa dye campuran kulit buah naga dan binahong memiliki penyerapan cahaya yang lebih kuat pada $\lambda = 537$ nm dibandingkan dengan dye campuran kol ungu dan pakcoy pada $\lambda = 540$ nm. Kedua campuran ini menunjukkan luas penyerapan di seluruh spektrum tampak (400–700 nm), yang merupakan faktor penting untuk penyerapan cahaya yang lebih efisien. Kemudian, nilai bandgap yang dihasilkan adalah 2,10 eV untuk dye campuran kulit buah naga dan binahong, sementara itu 2,48 eV untuk dye campuran kol ungu dan mengindikasikan potensi transfer muatan yang lebih baik. Kemudian uji kompatibilitas dye dengan lapisan TiO_2 menunjukkan bahwa dye mampu meningkatkan absorbansi material semikonduktor, menunjukkan potensinya sebagai fotosensitizer dalam DSSC. Keterbaruan terletak pada dua sumber pigmen alami yang secara sinergis memperluas rentang serapan cahaya, sehingga berpotensi meningkatkan efisiensi DSSC dibanding penggunaan dye tunggal pada penelitian sebelumnya. Hasil-hasil membuktikan bahwa campuran dye alami sangat berpotensi sebagai material alternatif dari dye sintetis dalam teknologi DSSC.

Kata kunci: Dye-Sensitized Solar Cell; dye alami; antosianin; klorofil; bandgap

Abstract

This study investigates natural dye mixtures containing anthocyanin and chlorophyll pigments for Dye-Sensitized Solar Cell (DSSC) applications. Two combinations were examined: dragon fruit peel (*Hylocereus undatus*) with binahong leaves (*Anredera cordifolia*), and purple cabbage (*Brassica oleracea*) with pak choy (*Brassica rapa*) leaves. Dyes were extracted using ethanol through maceration and analyzed via FTIR and UV-Vis spectroscopy. FTIR analysis confirmed functional groups (hydroxyl, carbonyl, carboxyl) in both mixtures. UV-Vis analysis revealed that the dragon fruit peel-binahong mixture had stronger absorption at $\lambda = 537$ nm and the purple cabbage-pak choy mixture at $\lambda = 540$ nm. Both combinations show broad absorption across the visible spectrum (400–700 nm), beneficial for efficient light harvesting. Bandgap values were 2.10 eV for dragon fruit peel-binahong and 2.48 eV for purple cabbage-pakcoy mixtures, indicating good charge transfer potential. Compatibility tests with TiO_2 layers demonstrated enhanced semiconductor absorbance, confirming photosensitizer potential. The novelty of this research lies in the combination of two natural pigment, which synergistically expand the light absorption range, thereby improving DSSC efficiency compared to single dye systems in previous studies. These

natural dye mixtures represent promising, cost-effective, environmentally friendly alternatives to synthetic dyes in DSSC technology.

Keywords: *Dye-Sensitized Solar Cell; natural dye; anthocyanin; chlorophyll; bandgap*

PENDAHULUAN

DSSC (*Dye-Sensitized Solar Cell*) adalah sel surya yang menggunakan zat warna organik sebagai *dye-sensitizer* untuk mengoptimalkan proses konversi sinar matahari menjadi energi listrik [1]. Berbeda dengan sel surya konvensional, DSSC memisahkan antara proses absorpsi cahaya dan pemisahan muatan listrik. Molekul *dye* bertanggung jawab untuk menyerap cahaya, sementara pemisahan muatan listrik dilakukan oleh semikonduktor berbasis ion organik nanokristal [2]. Struktur DSSC mencakup fotoanoda yang terbuat dari kaca transparan konduktif (TCO) dengan substrat *indium tin oxide* (ITO) yang dilapisi oleh semikonduktor TiO_2 , ZnO , SnO_2 , atau Nb_2O_5 . Keunggulan utama dari DSSC terletak pada proses fabrikasi yang hemat biaya, ramah lingkungan dan biaya yang lebih terjangkau, dengan efisiensi mencapai lebih dari 14%[3].

Efisiensi *Dye-Sensitized Solar Cell* (DSSC) sangat dipengaruhi oleh karakteristik *dye* yang digunakan. Karakteristik ini termasuk kemampuan untuk menyerap cahaya dalam spektrum cahaya dan cahaya inframerah dekat (*near infrared*) keberadaan gugus fungsional seperti karbonil, hidroksil, dan karboksil untuk memfasilitasi injeksi elektron ke dalam pita konduksi semikonduktor, stabilitas tinggi dalam penyerapan foton, dan tingkat HOMO (*Highest Occupied Molecular Orbital*) harus lebih rendah daripada potensial redoks elektrolit, tingkat LUMO (*Lowest Unoccupied Molecular Orbital*) harus cukup tinggi dibandingkan dengan pita konduksi semikonduktor [4]. Karakteristik ini sangat penting untuk memastikan performa optimal dari DSSC dalam mengonversi energi matahari menjadi listrik secara efisien. *Dye* yang ideal harus menunjukkan penyerapan cahaya dengan spektrum luas, ikatan kimia yang kuat dengan semikonduktor (misalnya, TiO_2), stabilitas fotokimia yang tinggi dan tingkat energi yang memfasilitasi injeksi elektron yang efisien ke dalam pita konduksi semikonduktor yang memastikan regenerasi efektif oleh elektrolit. Faktor – faktor ini menentukan kinerja dan daya tahan sistem DSSC [5].

Sejauh ini *dye* yang digunakan berupa pigmen dari senyawa organik atau sintetis. *Dye* sintetis berbasis Ruthenium menghasilkan efisiensi yang besar pada DSSC yaitu sekitar 11 – 12%. Namun, *dye* jenis ini memiliki beberapa kelemahan seperti harganya mahal, sulit didapat, sifatnya beracun, sulit di sintesis dan tidak ramah lingkungan [6]. Oleh karena itu, *dye* alami terus dikembangkan untuk mengatasi permasalahan ini. *Dye* alami memiliki beberapa keunggulan diantaranya, biaya produksi yang rendah, kemudahan ekstraksi, ketersediaan yang melimpah, sifat tidak beracun dan ramah lingkungan. Keunggulan ini menjadikan *dye* alami sebagai alternatif yang menjanjikan untuk memajukan teknologi DSSC menuju solusi energi terbarukan yang lebih berkelanjutan dan mudah diakses. Meskipun masih menghadapi tantangan dalam meningkatkan efisiensinya, agar dapat bersaing dengan *dye* sintetis, studi berkelanjutan berfokus pada optimalisasi struktur molekuler dan peningkatan kinerja *dye* alami melalui teknik-teknik inovatif. *Dye* alami umumnya berasal dari daun, buah, dan bunga yang mengandung senyawa seperti antosianin, klorofil, betalain, karotenoid, dan xantofil [7].

Penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa penggunaan campuran *dye* antosianin dan klorofil dapat mencapai efisiensi yang lebih tinggi dibandingkan dengan penggunaan pewarna tunggal. studi yang mengombinasikan klorofil yang diekstrak dari pakcoy (*Brassica rapa*) dan antosianin dari bunga asoka (*Saraca asoca*) berhasil menunjukkan efisiensi sebesar 2,39% [8]. Lalu, campuran klorofil dari bayam (*Spinacia oleracea*) dan antosianin dari mawar merah (*Rosa spp.*) dalam berbagai rasio telah mencapai efisiensi yang jauh lebih tinggi, bahkan hingga 5,8% [9]. Dapat dilihat bahwa potensi campuran *dye alami* sebagai *sensitizer* yang efektif dalam aplikasi DSSC. Dengan memanfaatkan sifat penyerapan cahaya komplementer dari berbagai *dye* alami, kombinasi tersebut dapat meningkatkan kemampuan penangkapan cahaya dan meningkatkan proses tranfer muatan.

Penelitian ini bertujuan untuk menggali potensi dan keuntungan dari penggabungan kedua *dye* yaitu, *dye* dari antosianin dan *dye* dari

klorofil. Bahan baku pada penelitian ini adalah kulit buah naga (*Hylocereus undatus*) kol ungu (*Brassica oleracea*), daun binahong (*Anredera cordifolia*) dan pakcoy (*Brassica rapa*) sebagai sensitizer dalam aplikasi DSSC. Keterbaruan penelitian ini terletak pada pendekatan antara antosianin dan klorofil untuk memperluas rentang serapan cahaya dan menurunkan bandgap energi pada DSSC. Dengan memanfaatkan campuran bahan alami sebagai dye, penelitian ini diharapkan dapat menghasilkan efisiensi yang lebih baik dalam proses konversi energi surya menjadi listrik. Hasil penelitian ini diharapkan tidak hanya memberikan kontribusi dalam pengembangan teknologi energi terbarukan, tetapi juga dapat dimanfaatkan sebagai sumber energi listrik alternatif yang lebih ramah lingkungan di masa depan.

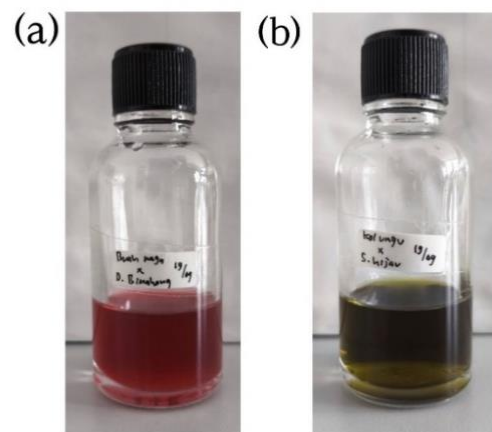
METODE

Dye alami diekstrak dari tumbuhan yang mengandung pigmen klorofil dan antosianin. Untuk pigmen antosianin, kulit buah naga (*Hylocereus undatus*) dan kol ungu (*Brassica oleracea*) dipilih sebagai bahan baku karena tingginya konsentrasi pigmen flavonoid yang larut dalam air, yang dikenal dengan pewarnaan merah-ungu yang khas. Selain itu, pigmen klorofil didapatkan dari daun binahong (*Anredera cordifolia*) dan pakcoy (*Brassica rapa*), yang dikenal karena kandungan klorofilnya yang melimpah, bertanggung jawab atas pigmentasi fotosintetik hijau yang khas.

Metodologi ekstraksi menggunakan pendekatan berbasis pelarut dengan etanol (C_2H_5OH) sebagai medium ekstraksi utama. Pelarut ini dipilih karena efisiensinya dalam melarutkan senyawa tumbuhan yang bersifat hidrofilik dan sedikit lipofilik. Bahan-bahan tersebut dibersihkan secara menyeluruh, dikeringkan, lalu ditumbuk menggunakan mortar dan alu. Proses ekstraksi dilakukan dengan metode maserasi selama 24 jam yang dilakukan pada suhu kamar ($22-25^{\circ}C$) dalam kondisi gelap untuk mencegah fotodegradasi senyawa pigmen yang sensitif seperti yang sudah dilaporkan pada penelitian sebelumnya [10]. Selama proses maserasi, pelarut secara bertahap menembus struktur seluler bahan tumbuhan, melarutkan senyawa target seperti antosianin dan klorofil, yang berfungsi sebagai fotosensitizer untuk aplikasi DSSC. Pemilihan pelarut memiliki dampak signifikan terhadap

efisiensi ekstraksi; pelarut polar seperti etanol dan metanol secara efektif mengekstrak antosianin dan klorofil [11,12]. Setelah proses ekstraksi, ekstrak pewarna alami digabungkan secara spesifik: ekstrak kulit buah naga (kaya antosianin) dicampur dengan ekstrak daun binahong (kaya klorofil) dalam rasio volume 1:1. Selain itu, disiapkan ekstrak daun pakcoy (kaya dengan klorofil) dicampur dengan kol ungu (kaya antosianin dengan rasio volume yang sama). Pencampuran ini menghasilkan warna gabungan antosianin-klorofil yang unik.

Dalam penelitian ini, lapisan tipis titanium dioksida (TiO_2) digunakan sebagai material semikonduktor. Lapisan TiO_2 ini berfungsi sebagai elektroda kerja yang berperan dalam proses transpor elektron dan sensitisasi pewarna [13].



Gambar 1. Campuran dye dari Antosianin-Klorofil; a) Campuran Kulit Buah Naga dan Daun Binahong; b) Campuran Kol Ungu dan Pakcoy

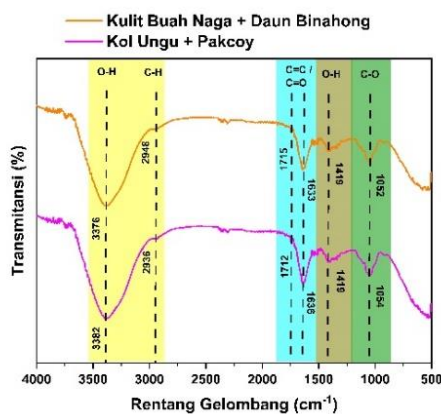
Lapisan pasta titanium dioksida (TiO_2) diaplikasikan menggunakan teknik *screen-printing*. Metode ini dipilih karena kemampuannya dalam menghasilkan film tipis semikonduktor yang sangat reproduibel, *scalable*, dan hemat biaya. Setelah dideposisikan ke substrat kaca dengan teknik *screen-printing*, semikonduktor TiO_2 selanjutnya dilakukan proses *sintering* pada suhu $500^{\circ}C$. Proses *sintering* ini krusial untuk membentuk kristalisasi TiO_2 yang menghasilkan tingkat energi *conduction band* yang diinginkan untuk aplikasi *Dye Sensitized Solar Cell* (DSSC) [14]. Selanjutnya sampel masing-masing dye dikarakterisasi dengan FT-IR (*Fourier Transform Infrared*) untuk mengetahui gugus – gugus fungsi dan UV – Vis

(Ultraviolet – Visible) untuk mengetahui serapan absorbansi dari *dye*. Kemudian dilakukan perhitungan *bandgap* ditentukan melalui *Tauc Plot* dan lapisan tipis TiO_2 yang direndam dalam *dye* dikarakterisasi dengan UV – Vis untuk mempelajari penyerapan *dye*.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR)

Spektroskopi FTIR menunjukkan kehadiran dari gugus pengikat (*anchoring group*) yang dapat diketahui, yaitu gugus hidroksil, karbonil, dan karboksil. Gugus pengikat ini berperan penting sebagai medium yang memfasilitasi ikatan kuat antara *dye* dan semikonduktor. Hasil karakterisasi *Fourier Transform Infrared* (FTIR) yang ditunjukkan pada Gambar 2, memperlihatkan keberadaan gugus fungsional yang krusial untuk aplikasi DSSC.



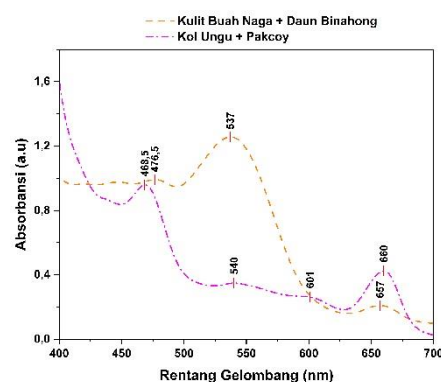
Gambar 2. Spektrum FTIR dari Campuran Kulit Buah Naga + Daun Binahong dan Campuran Kol Ungu + Pakcoy

Puncak serapan pada 3376 cm^{-1} dan 3382 cm^{-1} secara berturut-turut mengindikasikan gugus hidroksil (O-H). Gugus O-H ini berfungsi sebagai pendonor elektron dalam proses transfer elektron menuju semikonduktor TiO_2 . Gugus ini sangat penting untuk memastikan transfer muatan yang efisien dari molekul *dye* ke lapisan TiO_2 pada sel surya [15]. Gugus C-H alifatik pada 2948 cm^{-1} dan 2936 cm^{-1} mencerminkan keberadaan rantai hidrokarbon yang memberikan stabilitas struktural pada *dye*. Selain itu, gugus karbonil (C=O) pada 1715 cm^{-1} dan 1712 cm^{-1} , yang berasal dari senyawa antosianin dan klorofil, mendukung interaksi kuat dengan permukaan

TiO_2 untuk memfasilitasi transfer elektron yang efisien [16]. Gugus (C=C) pada 1633 cm^{-1} dan 1636 cm^{-1} , memiliki peran penting dalam performa DSSC, terutama dalam molekul *dye*. Ikatan ini menciptakan sistem terkonjugasi yang mampu meningkatkan penyerapan cahaya dengan memperluas spektrum serapan dan menggesernya ke arah panjang gelombang yang lebih panjang, memungkinkan *dye* menyerap lebih banyak energi dari cahaya matahari [17]. Deformasi gugus O-H pada 1419 cm^{-1} berkontribusi terhadap peningkatan stabilitas *dye*. Jaringan ini berperan penting dalam menjaga integritas struktural *dye* dan melindunginya dari degradasi [18]. Regangan C-O pada 1052 cm^{-1} dan 1054 cm^{-1} sangat penting untuk adsorpsi pewarna pada permukaan elektroda TiO_2 [19].

Ultra-Violet Visible (UV Vis)

Analisis UV-Vis pada *dye* untuk aplikasi DSSC bertujuan untuk memahami karakteristik penyerapan cahaya oleh *dye* yang akan digunakan sebagai *sensitizer*. Dalam DSSC, *dye* yang efisien harus memiliki serapan yang baik di daerah spektrum cahaya tampak (400-700 nm), sehingga dapat memaksimalkan penyerapan foton matahari. Gambar 3 menunjukkan spektrum serapan UV-Vis dari dua sampel *dye* alami pada rentang cahaya tampak (400-700 nm). Di mana masing-masing memiliki puncak gelombang untuk pigmen antosianin pada rentang (450 – 580 nm) dengan spektrum yang diserap oleh pigmen berwarna hijau dan jingga.



Gambar 3. Spektrum UV-Vis dari Campuran Kulit Buah Naga + Daun Binahong (garis putus - putus) dan Kol Ungu + Pakcoy (garis putus titik - titik)

Di sisi lain, pigmen klorofil memiliki dua puncak absorpsi yang berada pada gelombang (430 – 470 nm) dengan spektrum warna biru yang diserap oleh pigmen, dan puncak ke dua pada gelombang (650 – 700 nm)

dengan spektrum yang diserap oleh pigmen berwarna merah.

Tabel 1. Puncak Absorpsi dari *Dye*

Panjang Gelombang (nm)	Pigmen	Panjang Gelombang Puncak Absorpsi <i>Dye</i> (nm)	
		Kulit Buah Naga + Daun Binahong	Kol Ungu + Pakcoy
435 – 490	Klorofil	476,5	468,5
450 – 580	Antosianin	537	540
610 – 680	Klorofil	657	660

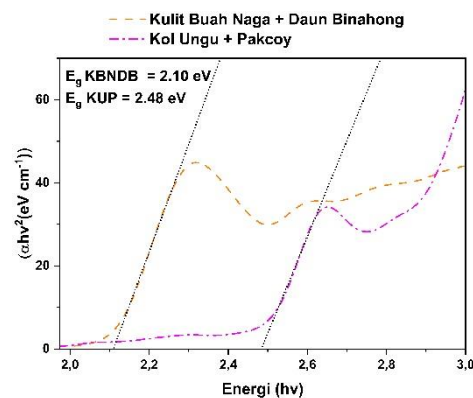
Tabel 1 merangkum perbandingan panjang gelombang puncak serapan untuk pigmen-pigmen berbeda yang ada dalam kedua sampel pewarna. Tabel 1 menunjukkan bahwa kedua sampel mengandung pigmen klorofil dan antosianin, namun dengan puncak serapan yang sedikit berbeda. Sampel 1 (kulit buah naga + daun binahong) menunjukkan serapan cahaya yang jauh lebih kuat dibandingkan Sampel 2 (kol ungu + pakcoy). Puncak serapan utama untuk Sampel 1 terjadi pada 537 nm. Sampel ini juga memiliki puncak sekunder pada 469,5 nm dan 476,5 nm, serta puncak yang lebih kecil pada 601 nm di daerah oranye-merah. Serapan yang kuat ini sebagian besar berasal dari pigmen antosianin dalam kulit buah naga, yang menyerap dengan baik pada rentang cahaya hijau-kuning.

Sampel 2 menunjukkan pola serapan yang berbeda dengan puncak utamanya berada pada 540 nm. Sampel ini memiliki serapan kuat pada 415 nm di daerah biru, serta puncak-puncak yang lebih kecil pada 657 nm dan 660 nm di daerah merah. Karakteristik serapan ini sebagian besar berasal dari pigmen antosianin dalam kol ungu. Ketika membandingkan kedua sampel, Sampel 1 (kulit buah naga + daun binahong) menunjukkan serapan cahaya yang jauh lebih kuat, terutama di daerah hijau, di mana intensitas radiasi matahari sangat tinggi. Namun, Sampel 2 memiliki serapan yang lebih baik di daerah merah (657–660 nm), yang dapat membantu menangkap radiasi cahaya tambahan.

Kedua sampel ini saling melengkapi dengan baik. Menggabungkannya dapat meningkatkan serapan cahaya secara keseluruhan di seluruh spektrum cahaya tampak.

Bandgap Energy

Band-energy (E_g) adalah perbedaan energi antara puncak pita valensi dan dasar pita konduksi. Ini merupakan energi minimum yang dibutuhkan elektron untuk berpindah dari pita valensi ke pita konduksi [20]. Gambar 4 menunjukkan analisis energi *bandgap* (E_g) *dye* menggunakan metode *Tauc Plot*.



Gambar 4. *Band-Energy* setiap campuran *dye*; Kulit Buah Naga + Daun Binahong dan Kol Ungu + Pakcoy

*KBND = Kulit Buah Naga + Daun Binahong;
KUP = Kol Ungu + Pakcoy

Analisis ini bertujuan untuk menentukan besarnya energi foton ($h\nu$) yang harus diserap oleh larutan *dye*. Parameter ini sangat penting untuk mengevaluasi kemampuan fotosensitizer dalam menyerap cahaya matahari secara efektif. Dalam aplikasi DSSC, *dye* alami berperan sebagai fotosensitizer yang menyerap foton pada rentang panjang gelombang tertentu, kemudian menginjeksi elektron yang tereksitasi ke lapisan oksida semikonduktor, seperti TiO_2 [21]. Nilai E_g yang rendah diinginkan untuk aplikasi DSSC karena memungkinkan penyerapan cahaya pada rentang panjang

gelombang yang lebih luas[17]. Berdasarkan grafik pada Gambar 4, campuran *dye* dari kulit buah naga + daun binahong menunjukkan energi *bandgap* sebesar 2,10 eV, jauh lebih rendah daripada campuran pewarna kol ungu + pakcoy yang memiliki 2,48 eV.

Energi *bandgap* yang lebih rendah pada kombinasi buah naga ini memungkinkan penyerapan pada tepi serapan sekitar 590 nm, sehingga efektif memanfaatkan panjang gelombang kuning hingga merah dalam spektrum matahari. Sebaliknya, *dye* kol ungu-pakcoy, dengan energi *bandgap* yang lebih tinggi, memiliki tepi serapan sekitar 500 nm, membatasi penangkapan cahayanya terutama pada panjang gelombang biru dan hijau. Dari perspektif fotovoltaik, kombinasi pewarna kulit buah naga + binahong memiliki energi yang lebih menguntungkan untuk aplikasi DSSC, karena *bandgap*-nya yang lebih rendah membuatnya lebih mudah bagi foton untuk tereksitasi menuju TiO_2 .

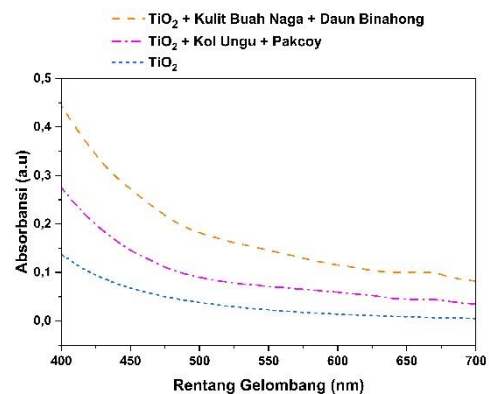
Jika dibandingkan dengan penelitian sebelumnya yang dilakukan oleh Pirim dkk [22] yang menggunakan *dye* tunggal dari daun suji dengan *bandgap* sekitar 2,51 eV, efisiensi sel surya yang dihasilkan masih terbatas karena rentang serapan cahaya yang sempit. Oleh karena itu, kombinasi *dye* dalam penelitian ini menunjukkan peningkatan yang signifikan, karena menggabungkan dua pigmen dengan karakteristik yang menghasilkan serapan yang lebih merata di seluruh spektrum tampak.

Penyerapan TiO_2 dengan *Dye*

Analisis ini bertujuan untuk mengetahui karakteristik penyerapan *dye* pada lapisan tipis TiO_2 yang dideposisikan diatas substrat kaca yang direndam dalam larutan *dye* dengan melihat adanya serapan pada UV-Vis. Lapisan tipis TiO_2 dicelupkan ke dalam larutan *dye* selama 2 jam. Setelah itu, sampel TiO_2 + pewarna dikarakterisasi menggunakan spektroskopi UV-Vis untuk mengevaluasi apakah *dye* telah terserap pada permukaan TiO_2 . Gambar 5 menunjukkan bahwa TiO_2 murni tidak dapat menyerap cahaya tampak secara efisien. Hal ini menjadi kelemahan bagi DSSC, karena sebagian besar sinar matahari terdiri dari cahaya tampak. TiO_2 memiliki energi *bandgap* (E_g) sekitar 3,2 eV, sehingga lebih menyerap sinar UV, bukan cahaya tampak. Namun, ketika *dye* alami diserapkan ke lapisan tipis TiO_2 , penyerapan cahaya pada rentang *visible*

(tampak) meningkat secara signifikan. Ini membuktikan bahwa *dye* berfungsi dengan baik sebagai sensitizer untuk memungkinkan DSSC memanfaatkan spektrum cahaya matahari yang lebih luas.

Peningkatan serapan cahaya merupakan faktor krusial dalam DSSC. *Dye* memainkan peran penting dengan menangkap foton dan menginjeksi elektron ke dalam lapisan TiO_2 . Saat terkena paparan, molekul *dye* akan tereksitasi oleh foton dan selanjutnya mentransfer elektron ke pita konduksi TiO_2 , yang menghasilkan arus listrik [23]. Peningkatan serapan cahaya yang signifikan pada semua sampel yang diberi *dye* menunjukkan terjadinya kemisorpsi (ikatan kimia) yang efektif antara *dye* dan permukaan TiO_2 . Hal ini mengindikasikan potensi yang kuat untuk aplikasi dalam DSSC, dimana ikatan yang stabil dan efisien adalah kunci untuk kinerja sel yang optimal.



Gambar 5. Penyerapan *dye* pada Lapisan Semikonduktor TiO_2 , TiO_2 (garis titik - titik); TiO_2 + Kulit Buah Naga + Daun Binahong (garis putus – putus); dan TiO_2 + Kol Ungu + Pakcoy (garis putus titik – titik)

KESIMPULAN DAN SARAN

Penelitian ini mengeksplorasi penggunaan campuran *dye* alami yang terbuat dari pigmen antosianin dan klorofil sebagai alternatif yang ramah lingkungan dan terjangkau untuk menggantikan *dye* sintetis pada Sel Surya Tersensitisasi *Dye* (DSSC). Meskipun *dye* sintetis menawarkan efisiensi tinggi (sekitar 11–12%), harganya mahal dan menimbulkan risiko lingkungan serta kesehatan. Sebaliknya, *dye* alami lebih aman

dan berkelanjutan, menjadikannya pilihan yang menjanjikan untuk aplikasi energi terbarukan.

Analisis menggunakan spektroskopi FTIR mengonfirmasi keberadaan gugus fungsional utama pada kedua campuran *dye*, seperti ikatan hidroksil, karbonil, dan C=C, yang memainkan peran penting dalam menyerap cahaya dan mentransfer elektron, hal yang sangat krusial untuk kinerja DSSC. Spektroskopi UV-Vis menunjukkan bahwa campuran pertama (kulit buah naga dan binahong) memiliki serapan cahaya yang lebih kuat, terutama di sekitar 537 nm, sedangkan campuran kedua (kol ungu dan pakcoy) menyerap lebih sedikit secara keseluruhan tetapi berkinerja lebih baik di daerah merah pada spektrum cahaya (657–660 nm). Kedua campuran ini mencakup rentang cahaya tampak (400–700 nm) dengan baik, yang sangat penting untuk memanen energi surya secara efektif.

Analisis energi *bandgap*, yang membantu menunjukkan seberapa banyak cahaya yang dapat diserap oleh suatu material, mengungkapkan bahwa campuran *dye* pertama memiliki *bandgap* yang lebih rendah (2,10 eV), membuatnya lebih efisien dalam menyerap sinar matahari. Sebaliknya, campuran kedua memiliki *bandgap* yang lebih tinggi (2,48 eV), yang berarti penyerapannya lebih terbatas pada cahaya biru-hijau. Meskipun TiO₂ murni tidak menyerap cahaya tampak secara efektif karena *bandgap*-nya yang lebar sebesar 3,2 eV, kedua campuran *dye* secara signifikan meningkatkan serapan cahayanya, menegaskan keberhasilan sensitisasi *dye*.

Sebagai kesimpulan, kombinasi kulit buah naga dan daun binahong mengungguli campuran lainnya dalam hal serapan cahaya, cakupan spektral, dan energi *bandgap*, sehingga lebih cocok untuk aplikasi DSSC. Namun, kekuatan campuran kedua di daerah merah menunjukkan bahwa menggabungkan kedua *dye* dalam pendekatan ko-sensitisasi berpotensi meningkatkan kinerja sel surya secara keseluruhan. Studi ini menunjukkan bahwa campuran *dye* alami adalah alternatif yang layak dan berkelanjutan untuk *dye* sintesis dalam teknologi energi surya.

Dari hasil penelitian yang telah dilakukan, ada beberapa saran yang menjadi arah pengembangan berikutnya. Perlu dilakukan eksplorasi lebih jauh terhadap berbagai kombinasi *dye* alami dari beragam sumber bahan, untuk mencari campuran yang

paling efektif dalam meningkatkan efisiensi sel surya DSSC.

Selain itu, penting untuk menguji stabilitas *dye* dalam jangka waktu yang lebih panjang agar diketahui seberapa tahan bahan tersebut terhadap proses degradasi. Penelitian lanjutan bisa mencoba metode ekstraksi lain, seperti sonikasi atau pemanasan pada suhu tinggi, yang mungkin dapat membuat proses pengambilan pigmen lebih efisien.

UCAPAN TERIMAKASIH

Penulis ingin mengucapkan terimakasih atas dukungan finansial dari Hibah Bersaing Penelitian Pemula – Universitas Singaperbangsa Karawang (UNSIKA) No.93/SP2H/UN64.10/LL/2024.

DAFTAR PUSTAKA

- 1 Richhariya G, Kumar A. 2018. Fabrication and characterization of mixed dye: Natural and synthetic organic dye. Opt. Mater. (Amst). **79**(March): 296.
- 2 Parikh N, Pandey M, Kumar M, Prochowicz D, Kalam A, Tavakoli MM, Satapathi S, Yadav P. 2022. Identifying dominant recombination mechanisms in spiro-based conventional perovskite solar cells: Roles of interface and bulk recombination. Energy Reports. **8**: 7957.
- 3 Mahajan U, Prajapat K, Dhonde M, Sahu K, Shirage PM. 2024. Natural dyes for dye-sensitized solar cells (DSSCs): An overview of extraction, characterization and performance. Nano-Structures and Nano-Objects. **37**(February): .
- 4 Kusumawati Y, Utama AS, Wellia D V., Subagyo R. 2021. Natural resources for dye-sensitized solar cells. Heliyon. **7**(12): e08436.
- 5 Nam SH, Lee KH, Yu JH, Boo JH. 2019. Review of the Development of Dyes for Dye-Sensitized Solar Cells. Appl. Sci. Conver. Technol. **28**(6): 194.
- 6 Prima EC, Rusliani PF, Suhendi E, Yuliarto B. 2024. Performance of dye-sensitized solar cells with mixed three natural pigments and reduced graphene oxide as a counter electrode. Results Opt. **14**(October 2023): 100592.
- 7 Sunder Sharma S, Sharma K, Singh R,

- 8 Srivastava S, Bihari Rana K, Singhal R. 2019. Natural pigments: Origin and applications in dye sensitized solar cells. *Mater. Today Proc.* **42**: 1744.
- 8 Teja AS, Srivastava A, Akash Kumar Satrughna J, Kumar Tiwari M, Kanwade A, Lee H, Ogura A, Shirage PM. 2023. Synergistic co-sensitization of environment-friendly chlorophyll and anthocyanin-based natural dye-sensitized solar cells: An effective approach towards enhanced efficiency and stability. *Sol. Energy.* **261**(June): 112.
- 9 Munandar MR, Hakim ASR, Puspitadinda HA, Andiyani SP, Nurosyid F. 2022. The effect of mixing Chlorophyll-Antocyanin as a natural source dye on the efficiency of dye-sensitized solar cell (DSSC). *J. Phys. Conf. Ser.* **2190**(1): 0.
- 10 Yuliasari F, Nuraini U, Aeni AR, Hidayat R. 2024. Fabrication of dye-sensitized solar cells with natural dye pigments derived from mustard green (*Brassica juncea* L) and turmeric (*Curcuma longa* L). *J. Phys. Conf. Ser.* **2866**(1): 1.
- 11 Taghavi T, Patel H, Rafie R. 2022. Anthocyanin Extraction Method and Sample Preparation Affect Anthocyanin Yield of Strawberries. *Nat. Prod. Commun.* **17**(5): .
- 12 Anggestia W, Utami SP, Darmawangsa, Sari WP, Dirgantara D. 2024. EFFECT OF SOLVENT TYPE ON THE AMOUNT OF YIELD FROM MACERATION OF MORINGA PLANTS (*Moringa oleifera*). *Interdental J. Kedokt. Gigi.* **20**(1): 164.
- 13 González-Verjan VA, Trujillo-Navarrete B, Félix-Navarro RM, de León JND, Romo-Herrera JM, Calva-Yáñez JC, Hernández-Lizalde JM, Reynoso-Soto EA. 2020. Effect of TiO₂ particle and pore size on DSSC efficiency. *Mater. Renew. Sustain. Energy.* **9**(2): 1.
- 14 Nejad SAT, Soleimani-Gorgani A, Pishvaei M. 2023. Multifunctional screen-printed films using polymer nanocomposite based on PPy/TiO₂: conductive, photocatalytic, self-cleaning and antibacterial functionalities. *Iran. Polym. J. (English Ed.)* **32**(6): 647.
- 15 Rakesh K, Pandikumar A, Jothivenkatachalam K. 2014. Dye Sensitized Solar Cell : A Summary. **771**: 1.
- 16 Fuziki MEK, Tusset AM, dos Santos OAA, Lenzi GG. 2023. Chlorophyll Sensitization of TiO₂: A Mini-Review. *Reactions.* **4**(4): 766.
- 17 Kusumawati N, Setiarso P, Muslim S, Zakiyah N, Rahmawati K, Fachrirakarsie FF. 2024. Optimizing Dye-Sensitized Solar Cell (DSSC) Performance through Synergistic Natural Dye Combinations from *Beta vulgaris* L., *Curcuma longa* L., and *Pandanus amaryllifolius*. *Indones. J. Chem.* **24**(6): 1675.
- 18 Triyanto A, Ali N, Salleh H, Setiawan J, Yatim NI, Arifin NAM, Alias NS. 2024. Study of Natural Herbal Dyes Photodegradation Effect to Optical Properties for Dye-Sensitized Solar Cells. *Sains Malaysiana.* **53**(10): 3479.
- 19 Li W, Liu Y, Leng J. 2021. Harnessing Wrinkling Patterns Using Shape Memory Polymer Microparticles. *ACS Appl. Mater. Interfaces.* **13**(19): 23074.
- 20 Eddy DR, Permana MD, Sakti LK, Amal G, Sheha N, Hidayat S, Takei T, Kumada N. 2023. Heterophase Polymorph of TiO₂ (Anatase , Rutile , Brookite , TiO₂ (B)) for Efficient Photocatalyst : Fabrication and Activity. **2**: .
- 21 Tontapha S, Uppachai P, Amornkitbamrung V. 2021. Fabrication of Functional Materials for Dye-sensitized Solar Cells. *Front. Energy Res.* **9**(April): 1.
- 22 Setiarso P. 2023. Potential Dye Suji Leaves (*Pleomele angustifolia*) Chlorophyll and Red Dragon Fruit Peel (*Hylocereus polyrhizus*) Anthocyanins as Natural Dyes for Dye-Sensitized Solar Cells PIRIM. *Asian J. Chem.* **35**: .
- 23 Mustaghfiri MA, MUNASIR M. 2023. Green synthesis of TiO₂ nanoparticles: dye-sensitized solar cells (DSSC) Applications: a review. *Inov. Fis. Indones.* **12**(2): 10.