

Studi Elektrokimia Klorofil dan Antosianin Sebagai Fotosensitizer DSSC (*Dye-Sensitized Solar Cell*)

Electrochemical Study of Chlorophyll and Anthocyanin as DSSC (*Dye-Sensitized Solar Cell*) Photosensitizer

Rimbi Rodiyana Sova and Pirim Setiarso*

Department of Chemistry, Faculty of Mathematics and Natural Sciences

Universitas Negeri Surabaya

Jl. Ketintang, Surabaya (60231), Telp. 031-8298761

* *Corresponding author, tel/fax: 081233485871, email: pirimsetiarso@unesa.ac.id*

Abstrak. Pada penelitian ini dilakukan analisis elektrokimia ekstrak klorofil dan antosianin dari daun suji (*Pleomele Angustifolia*) dan kulit buah naga merah (*Hylocereus Polyrhizus*) sebagai sensitizer pada *Dye-Sensitized Solar Cell* (DSSC). Klorofil dari daun suji dan antosianin dari kulit buah naga merah diekstraksi menggunakan pelarut etanol. Karakterisasi klorofil dan antosianin dilakukan dengan menggunakan spektrofotometri UV-Visible untuk mengetahui serapan panjang gelombang dan celah pita energi, karakterisasi elektrokimia klorofil dan antosianin dilakukan menggunakan voltametri siklik. Pada penelitian ini dihasilkan klorofil dengan serapan panjang gelombang sebesar 663 nm dan 439 nm sedangkan antosianin pada panjang gelombang 532 nm. Analisis celah pita energi (*energy gap*) klorofil menghasilkan 2,51 eV dan antosianin 2,1 eV. Karakterisasi elektrokimia menunjukkan bahwa energi HOMO (*Highest Occupied Molecular Orbital*) pada klorofil sebesar -5,68 eV dan pada antosianin sebesar -5,16 eV. Energi LUMO (*Lowest Unoccupied Molecular Orbital*) pada klorofil sebesar -3,17 eV dan pada antosianin sebesar -3,06 eV. Hasil ini menunjukkan bahwa ekstrak klorofil dan antosianin dari daun suji dan kulit buah naga merah cukup menjanjikan untuk digunakan sebagai fotosensitizer pada DSSC.

Kata kunci : antosianin, DSSC, elektrokimia, klorofil

Abstract. In this study, an electrochemical analysis of chlorophyll and anthocyanin extracts from suji (*Pleomele Angustifolia*) leaves and red dragon fruit skin (*Hylocereus Polyrhizus*) was conducted as a sensitizer to *Dye-Sensitized Solar Cell* (DSSC). Chlorophyll from suji leaves and anthocyanins from the skin of red dragon fruit were extracted using ethanol as a solvent. Chlorophyll and anthocyanin characterization was carried out by UV-Visible spectrophotometry to see the absorption of wavelength and energy bandgaps, electrochemical characterization of chlorophyll and anthocyanins was carried out using cyclic voltammetry. In this study, chlorophyll was produced with absorption wavelengths of 663 nm and 439 nm while anthocyanins were at 532 nm wavelengths. Analysis of the energy gap of chlorophyll yields 2.51 eV and anthocyanins 2.1 eV. The electrochemical characterization showed that the energy of HOMO (*Highest Occupied Molecular Orbital*) in chlorophyll was -5.68 eV and in anthocyanins was -5.16 eV. The energy of LUMO (*Lowest Unoccupied Molecular Orbital*) in chlorophyll is -3.17 eV and in anthocyanins is -3.06 eV. These results indicate that chlorophyll and anthocyanin extracts from suji leaves and red dragon fruit peel are sufficient to be used as photosensitizers in DSSC.

Key words: anthocyanin, chlorophyll, DSSC, electrochemical

PENDAHULUAN

Peningkatan kebutuhan energi saat ini disertai dengan menipisnya ketersediaan energi dari bahan bakar fosil. Selanjutnya perlu diciptakan energi alternatif dan terbarukan. Salah satu energi terbarukan yang menjanjikan adalah energi matahari, sumber energi ini sangat menjanjikan karena jumlah dan daya dukungnya yang besar. Indonesia sebagai negara tropis memiliki potensi yang cukup besar. Konversi sinar matahari menjadi listrik oleh sel fotovoltaik menjadi perhatian khusus para peneliti karena memiliki keuntungan yang besar seperti biaya produksi rendah, ramah lingkungan, transformasi energi yang baik bahkan dalam kondisi mendung atau gelap [1–3].

Pada tahun 1991, Michael Grätzel dan Brian O'Regan melakukan penelitian mengenai DSSC (*Dye-Sensitized Solar Cell*) yang berbasis fotoelektrokimia. DSSC adalah sel fotovoltaik generasi ketiga terdiri dari elektrolit, kaca atau substrat konduktif, molekul zat warna. Pewarna merupakan bagian penting dari DSSC yang mampu menyerap cahaya dan mengirimkan elektron ke pita konduksi semikonduktor. Pewarna secara signifikan mempengaruhi keefektifan DSSC. Setiap pewarna harus memiliki beberapa karakteristik khusus seperti: a) absorpsi pada spektra kisaran cahaya tampak dan inframerah dekat, b) mengandung karboksil atau hidroksil yang dapat mengikat kuat dengan oksida semikonduktor untuk mendorong infus elektron ke celah pita konduksi semi konduktor, c) memiliki stabilitas yang baik dalam menyerap foton, d) HOMO (*Highest Occupied Molecular Orbital*) harus lebih rendah dari potensial redoks elektrolitnya, e) LUMO (*Lowest Unoccupied Molecular Orbital*) harus cukup tinggi dari pita konduksi semikonduktor [4–6].

Kinerja DSSC bergantung pada pewarna. Ru (*Ruthenium*) sebagai pewarna logam kompleks menghasilkan efisiensi yang besar pada DSSC [7]. Namun, Ru memiliki banyak kelemahan seperti sulit didapat, tidak ramah lingkungan, sulit untuk disintesis, membutuhkan biaya yang mahal, dan toksik [8]. Pewarna alami terus dikembangkan untuk mengatasi masalah tersebut meskipun pada kenyataannya pewarna alami memiliki efisiensi yang lebih rendah daripada pewarna logam kompleks, hal ini dikarenakan cepatnya laju degradasi pewarna dan kurangnya ikatan terhadap TiO₂ [9, 10]. Pewarna alami memiliki banyak

keunggulan antara lain mudah diperoleh, mudah diekstraksi, tidak beracun, ramah lingkungan, murah, terbarukan, dan biaya produksi rendah [8–11]. Pada umumnya pewarna alami diambil bagian tumbuhan seperti bunga, daun, akar, buah. Setiap bagian dari tanaman memiliki warna alami dan pigmen yang beragam [12]. Jenis pewarna yang biasa digunakan dalam DSSC diantaranya adalah klorofil dan antosianin [14].

Dalam penelitian ini, penulis menganalisis kinerja pewarna alami klorofil daun suji (*Pleomele Angustifolia*) dan antosianin kulit buah naga merah (*Hylocereus Polyrhizus*) sebagai sensitizer pada DSSC. Daun suji dipilih karena mengandung klorofil, klorofil dapat menyerap cahaya dengan panjang gelombang 400-700 nm terutama pada warna biru dan merah [15]. Klorofil dapat berikatan dengan TiO₂ karena memiliki gugus karboksilat sehingga dapat menambah efisiensi dalam konversi energi menjadi lebih baik [16]. Selain itu, daun suji banyak ditemukan di Asia yang melimpah di Indonesia dan Malaysia, namun pemanfaatannya masih belum maksimal, biasanya digunakan sebagai pewarna makanan atau non-pangan [17]. Pada penelitian ini dilakukan pemanfaatan kulit buah naga karena kulit buah naga mengandung antosianin. Antosianin memiliki serapan panjang gelombang pada 450-580 nm [18]. Antosianin dapat membentuk ikatan kelat dengan semikonduktor TiO₂. Ikatan tersebut antara gugus OH (hidroksil) pada antosianin dengan Ti⁴⁺ dari TiO₂ [19]. Dalam pemanfaatan dan pengolahan produk pangan kulit buah naga merah masih menjadi limbah yang perlu dikembangkan pemanfaatannya. Analisis spektrofotometri UV-Visible dilakukan untuk mengetahui serapan panjang gelombang dan celah pita energi pewarna, karakterisasi menggunakan voltametri siklik untuk menentukan keadaan HOMO dan keadaan LUMO klorofil dan antosianin.

METODE PENELITIAN

Bahan

Aquadess, Etanol 96%, *buffer* fosfat, *buffer* sitrat, daun suji, kulit buah naga merah, KCl 3 M.

Alat

Gelas kimia, *blender*, pisau, kabel tembaga, pH meter, timbangan analitik, termometer, instrumen UV-Visible Shimadzu 1800, dan Voltametri 797 VA Computrace.

Prosedur Penelitian

Ekstraksi Pewarna Alami

Daun suji dibersihkan di bawah aliran air, kemudian ditiriskan dan ditimbang sebanyak 8 gram. Setelah itu daun suji yang telah dibersihkan direndam dalam aquades selama 1 menit dengan suhu 100°C untuk memperlambat kinerja enzim klorofilase, enzim ini berfungsi untuk mendegradasi klorofil sehingga kinerjanya perlu diperlambat. Selanjutnya daun suji diangin-anginkan, dipotong, dan diblender dengan kecepatan sedang selama 1 menit [20]. Ekstraksi kulit buah naga dilakukan dengan cara menimbang kulit buah naga sebanyak 8 gram kemudian diblender selama 1 menit. Ekstraksi klorofil dan antosianin dilakukan dengan pelarut etanol 96% dengan perbandingan b:v antara daun suji dan pelarut 1:5 (konsentrasi 20% b/v), buah naga dan pelarut 1:5 (konsentrasi 20% b/v). Ekstraksi dilakukan dalam keadaan gelap selama 24 jam.

Analisis UV-Visible

Panjang gelombang serapan klorofil dan antosianin dianalisis menggunakan spektrofotometer UV-Visible. Panjang gelombang cahaya yang digunakan antara 400-800 nm [21].

Cela pita energi pewarna dianalisis dengan metode Tauc Plot.

Studi Elektrokimia Pewarna

Pengukuran elektrokimia dilakukan dengan instrumen Voltametri tipe 797 VA Computrace. Dalam pengukuran elektrokimia KCl 3 M digunakan sebagai elektrolit pendukung, kawat tembaga digunakan untuk elektroda kerja, Ag/AgCl untuk elektroda referensi, dengan rentang potensial -1,6 V-1,6 V. Parameter seperti waktu deposisi, laju pindai dan pH dipilih setelah pengujian awal [16, 17].

Penentuan pH Terbaik

Penentuan pH terbaik pada ekstrak pewarna alami klorofil menggunakan variasi pH (6, 7, 8) menggunakan *buffer* fosfat dan ekstrak pewarna alami antosianin menggunakan variasi pH (3, 4, 5) menggunakan *buffer* sitrat. Pengukuran pada klorofil dilakukan menggunakan voltameter dengan rentang potensial -1,6 V-1,6 V, waktu deposisi 10 detik dan laju pindai 0,1 V/detik (dalam 25 mL campuran larutan, ekstrak klorofil, KCl 3 M, berbagai variasi *buffer* pH), pada pengukuran antosianin dilakukan dengan cara yang sama. Diperoleh hasil voltamogram berbagai

variasi dan dibandingkan untuk mendapatkan pH terbaik.

Pengukuran Waktu Deposisi Terbaik

Pengukuran waktu deposisi terbaik pada ekstrak pewarna alami klorofil dan ekstrak pewarna alami antosianin menggunakan variasi waktu deposisi (5, 10, 20) detik. Pengukuran pada klorofil dilakukan menggunakan voltameter dengan rentang potensial -1,6 V-1,6 V dan laju pindai 0,1 V/detik (dalam 25 mL campuran larutan ekstrak klorofil, KCl 3 M, pH terbaik), pada pengukuran antosianin dilakukan dengan cara yang sama dan diukur dengan berbagai variasi waktu deposisi. Diperoleh hasil voltamogram berbagai variasi pengukuran waktu deposisi dan dibandingkan untuk mendapatkan pengukuran waktu deposisi terbaik.

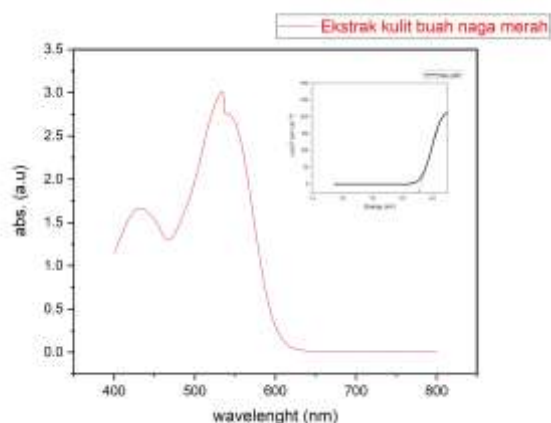
Pengukuran Laju Pindai Terbaik

Pengukuran laju pindai terbaik pada ekstrak pewarna alami klorofil dan ekstrak pewarna alami antosianin menggunakan variasi laju pindai 0,1 V/detik, 0,3 V/detik, 0,5 V/detik. Pengukuran pada klorofil dilakukan menggunakan voltameter dengan rentang potensial -1,6 V-1,6 V (dalam 25 mL campuran larutan, ekstrak klorofil, KCl 3 M, pH terbaik), pada pengukuran antosianin dilakukan dengan cara yang sama dan diukur dengan waktu deposisi terbaik dan berbagai variasi laju pindai. Diperoleh hasil voltamogram berbagai variasi pengukuran laju pindai dan dibandingkan untuk mendapatkan pengukuran laju pindai terbaik.

HASIL DAN PEMBAHASAN

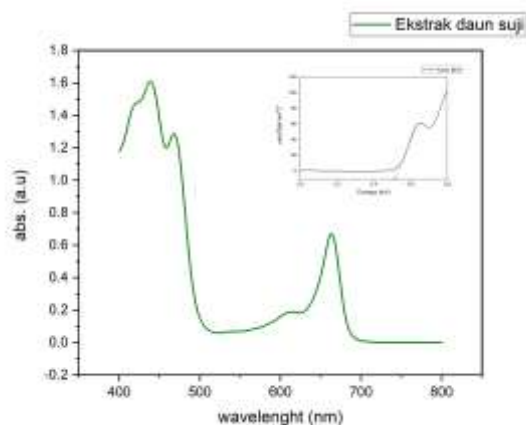
Analisis UV-Visible

Pada penelitian ini dilakukan karakterisasi menggunakan spektrofotometri UV-Visible untuk melihat serapan panjang gelombang dari ekstrak kulit buah naga merah dan ekstrak daun suji. Spektrum serapan panjang gelombang terukur pada 400-800 nm. Spektrum serapan antosianin berada pada panjang gelombang 450-580 nm dan klorofil memiliki dua jenis pigmen yang berbeda yaitu klorofil a dengan panjang gelombang 430 nm dan 663 nm, klorofil b dengan panjang gelombang 480 nm dan 650 nm [5], [18].



Gambar 1. Serapan Panjang Gelombang Ekstrak Antosianin Kulit Buah Naga Merah dan Tauc Plot.

Berdasarkan Gambar 1. terlihat bahwa serapan panjang gelombang antosianin kulit buah naga merah sebesar 532 nm yang menunjukkan daerah serapan antosianin dan gambar bagian dalam merupakan hasil dari analisis menggunakan metode Tauc plot.



Gambar 2. Serapan Panjang Gelombang Ekstrak Klorofil Daun Suji dan Tauc Plot

Berdasarkan gambar 2. memperlihatkan bahwa terdapat dua panjang gelombang puncak serapan ekstrak daun suji yaitu 663 nm dan 439 nm yang menunjukkan serapan molekul klorofil dan gambar bagian dalam merupakan hasil dari analisis menggunakan metode Tauc plot. Hasil karakterisasi klorofil menggunakan spektrofotometri UV-Visible menunjukkan bahwa serapan kedua panjang gelombang pewarna berada pada daerah serapan panjang gelombang tampak.

Celah pita untuk pewarna dihitung menggunakan persamaan Tauc Plot yaitu:

$$(\alpha h\nu)^{\frac{1}{n}} = A(h\nu - E_g) \quad (1)$$

yang mana α merupakan koefisien absorbs, h konstanta planc, E_g energi gap, A

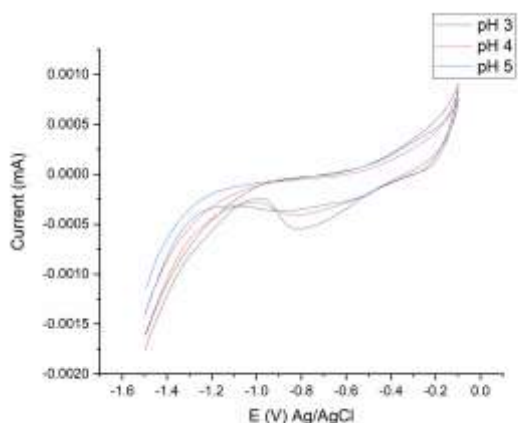
konstanta, eksponen n tergantung pada sifat transisi [24]. Pada analisis celah pita menggunakan analisis Tauc plot didapatkan energi gap klorofil dan antosianin adalah 2,1 eV dan 2,51 eV. Hal tersebut menunjukkan antosianin dari kulit buah naga merah dan klorofil dari daun suji dapat digunakan sebagai pewarna alami/sensitizer pada DSSC karena energi celah (*energy gap*) pewarna lebih kecil dari energi celah semikonduktor TiO_2 yang berfasa anatase, yaitu 3,2 eV [20, 21]. Dalam DSSC, ketika menyerap energi foton dari cahaya tampak, elektron dalam pewarna akan tereksitasi dari keadaan HOMO ke keadaan LUMO kemudian elektron akan berpindah ke pita konduksi semikonduktor TiO_2 dan kemudian berdifusi ke kaca konduktif/substrat ITO (*Indium Tin Oxide*) [27]. Energi celah menunjukkan jumlah energi yang dibutuhkan elektron untuk tereksitasi dari keadaan HOMO ke LUMO.

Studi Elektrokimia Pewarna

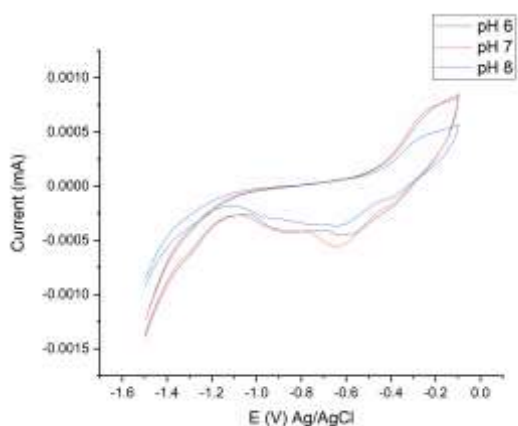
Dalam karakterisasi elektrokimia, penting untuk melihat energi HOMO dan LUMO pada pewarna. Pewarna harus memenuhi persyaratan tertentu seperti HOMO harus lebih rendah dari potensi redoks elektrolit yaitu -4,94 eV untuk meregenerasi pewarna dan terletak jauh lebih rendah dari pita konduksi TiO_2 dan LUMO harus cukup tinggi dari konduksi semikonduktor pita TiO_2 yaitu -3,2 eV [6, 16, 23]. Keadaan energi HOMO dihitung berdasarkan penelitian Gideã T. Tractz dan keadaan energi LUMO dihitung dengan mengurangi energi HOMO dengan E_g dari hasil analisis menggunakan UV-Visible [29].

Penentuan pH Terbaik

Keadaan pH mempengaruhi reaksi yang terjadi dalam analit saat pengukuran menggunakan voltameter. Penentuan pH terbaik dilakukan dengan 25 mL campuran larutan, ekstrak klorofil, KCl 3 M, menggunakan variasi pH (6, 7,8) *buffer* fosfat pada ekstrak klorofil dan pada ekstrak antosianin dilakukan dengan cara yang sama dengan variasi pH (3,4,5) *buffer* sitrat. Pengukuran dilakukan dengan menggunakan rentang potensial -1,6-1,6 V, waktu deposisi 10 detik dan laju pindai 0,1 V/s. Kemudian hasil dari pengukuran ditunjukkan pada gambar berikut yang sebelumnya telah diolah dengan aplikasi *Origin Pro 2018*.



Gambar 3. Hasil Voltamogram Ekstrak Antosianin Penentuan pH Terbaik Berbagai Variasi



Gambar 4. Hasil Voltamogram Ekstrak Klorofil Penentuan pH Terbaik Berbagai Variasi

Pada Gambar 3. dan Gambar 4. menunjukkan bahwa terjadi aktivitas redoks pada antosianin dan klorofil. Kemudian dari hasil voltamogram yang didapat diamati keadaan HOMO dan LUMO. HOMO dianggap sebagai proses oksidasi dan LUMO dianggap proses reduksi pada analit [30].

Tabel 1. Energi HOMO dan Energi LUMO dari Penentuan pH Terbaik

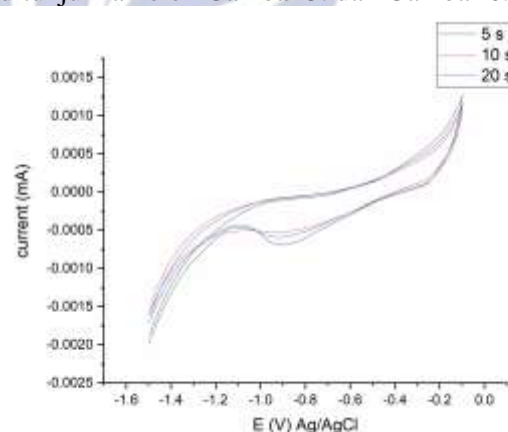
Ekstrak	pH	HOMO ^{CV} (eV)	LUMO ^{CV} (eV)
Kulit Buah Naga Merah	3	-5,06	-2,96
	4	-5,01	-2,91
	5	-5,04	-2,94
Daun Suji	6	-5,40	-2,89
	7	-5,53	-3,02
	8	-5,50	-2,99

Berdasarkan Tabel 1. diketahui bahwa pH terbaik yang digunakan dalam pengukuran energi HOMO-LUMO menggunakan voltameter pada ekstrak antosianin kulit buah naga merah adalah

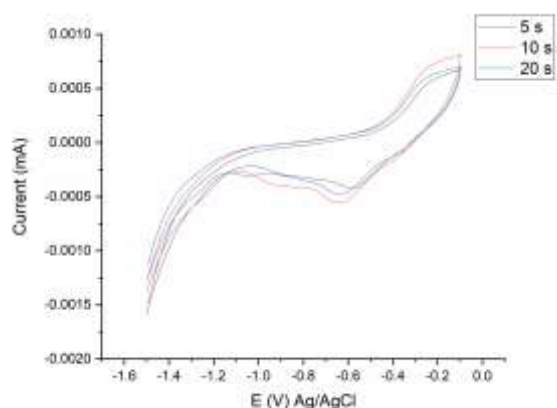
pH 3 karena memiliki energi HOMO di bawah pita konduksi TiO₂. Sedangkan untuk penentuan pH ekstrak klorofil daun suji didapatkan pH 7 yang paling efektif karena memiliki energi HOMO yang lebih rendah dibandingkan variasi lainnya dan energi HOMO yang jauh lebih rendah dibandingkan pita konduksi TiO₂.

Pengukuran Waktu Deposisi Terbaik

Pengukuran waktu deposisi terbaik dilakukan dengan menggunakan variasi waktu deposisi 5, 10, 20 detik. Pengukuran dilakukan dengan 25 mL campuran larutan, ekstrak klorofil, KCl 3 M, pH terbaik dari klorofil, dan pada antosianin dilakukan dengan cara yang sama menggunakan rentang potensial -1,6-1,6 V dalam pengukuran menggunakan voltameter. Waktu deposisi merupakan waktu yang dibutuhkan oleh elektroda dalam mengumpulkan analit pada permukaan elektroda [24]. Waktu pra-konsentrasi (deposisi) memberikan pengaruh pada pengukuran elektrokimia pada klorofil dan antosianin. Hasil voltamogram dari pengukuran waktu deposisi ditunjukkan oleh Gambar 5. dan Gambar 6.



Gambar 5. Hasil Voltamogram Antosianin Pengukuran Waktu Deposisi Terbaik Berbagai Variasi



Gambar 6. Hasil Voltamogram Klorofil Pengukuran Waktu Deposisi Terbaik Berbagai Variasi.

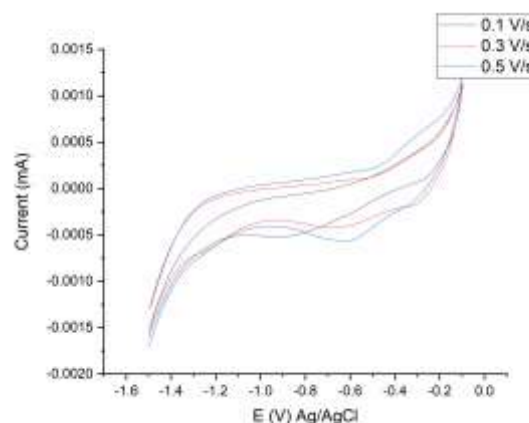
Tabel 2. Energi HOMO dan Energi LUMO dari Pengukuran Waktu Deposi Terbaik.

Ekstrak	Waktu Deposisi (detik)	HOMO ^{CV} (eV)	LUMO ^{CV} (eV)
Kulit Buah Naga Merah	5	-5,11	-3,01
	10	-5,14	-3,04
	20	-5,12	-3,02
Daun Suji	5	-5,46	-2,95
	10	-5,52	-3,01
	20	-5,53	-3,02

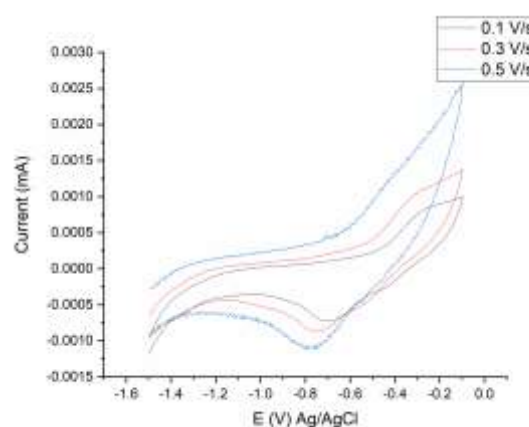
Berdasarkan Tabel 2. diketahui bahwa waktu deposisi 10 detik paling baik digunakan dalam pengukuran elektrokimia antosianin dari kulit buah naga merah karena memiliki energi HOMO yang lebih rendah dibandingkan dengan energi HOMO dari variasi lain dan dari potensial redoks elektrolit. Waktu deposisi 20 detik merupakan waktu deposisi yang terbaik untuk pengukursn elektrokimia klorofil dari daun suji.

Pengukuran Laju Pindai Terbaik

Pengukuran laju pindai digunakan untuk mengetahui laju pindai terbaik dalam pengukuran elektrokimia klorofil dan antosianin. Pengukuran laju pindai terbaik pada analisis elektrokimia klorofil dan antosianin dilakukan dengan menggunakan variasi laju pindai 0,1V/detik, 0,3V/detik, 0,5V/detik, waktu deposisi terbaik dengan 25 mL campuran larutan, ekstrak klorofil, KCl 3 M, pH terbaik dari klorofil, dan pada antosianin dilakukan dengan cara yang sama menggunakan rentang potensial -1,6-1,6 V dalam pengukuran menggunakan voltameter.



Gambar 7. Hasil Voltamogram Antosianin Pengukuran Laju Pindai Terbaik Berbagai Variasi



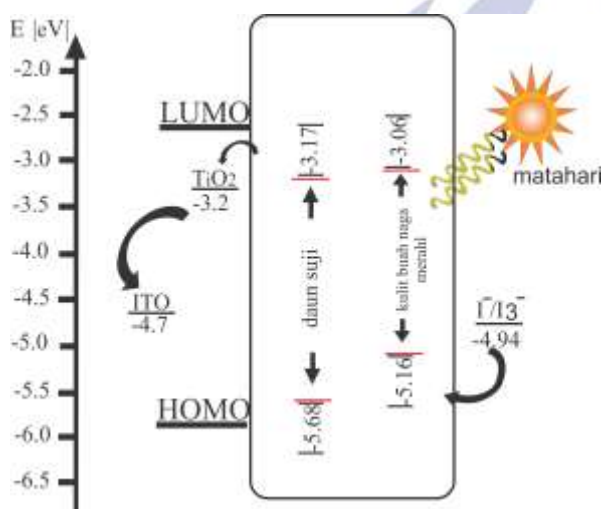
Gambar 8. Hasil Voltamogram Klorofil Pengukuran Laju Pindai Terbaik Berbagai Variasi.

Pada Gambar 7. dan Gambar 8. terlihat bahwa terjadi peningkatan arus puncak pada kedua hasil voltamogram, hal ini dikarenakan karena laju pindai yang semakin tinggi maka semakin cepat pula reaksi elektrolisisnya [31].

Tabel 3. Energi HOMO dan Energi LUMO dari Pengukuran Waktu Deposi Terbaik.

Ekstrak	Laju Pindai (V/detik)	HOMO ^{CV} (eV)	LUMO ^{CV} (eV)
Kulit Buah Naga Merah	0,1	-5,14	-3,04
	0,3	-5,15	-3,05
	0,5	-5,16	-3,06
Daun Suji	0,1	-5,63	-3,12
	0,3	-5,66	-3,15
	0,5	-5,68	-3,02

Berdasarkan Tabel 3. karakterisasi ini menghasilkan laju pindai terbaik 0,5 V/detik untuk klorofil dan antosianin karena memiliki energi HOMO yang paling rendah dibandingkan variasi laju pindai lainnya. Pada Tabel 3. dapat dilihat bahwa energi LUMO pada laju sapuan 0,5 V/detik memiliki energi yang sangat mendekati celah pita konduksi TiO₂ sehingga lebih optimal dalam menginjeksikan elektron. Tingkat energi LUMO sangat penting karena energi LUMO diperlukan untuk menginjeksikan elektron ke dalam pita konduksi TiO₂, semakin dekat energi LUMO pewarna maka akan semakin efektif untuk menginjeksikan elektron ke dalam semikonduktor TiO₂ [32].



Gambar 9. Diagram Level Energi pada DSSC Berbasis Ekstrak Klorofil daun Suji dan Ekstrak Antosianin Kulit Buah Naga Merah

Berdasarkan Gambar 9. dapat diperkirakan bahwa pewarna antosianin dari kulit buah naga merah akan memiliki efisiensi yang lebih tinggi dari pada pewarna klorofil daun suji karena energi gap pada pewarna kulit buah naga merah lebih rendah daripada energi gap pada daun suji sehingga regenerasi zat warna lebih mudah dilakukan dan transfer elektron tidak memerlukan energi yang besar.

KESIMPULAN

Pada penelitian ini disimpulkan bahwa ekstrak antosianin dari kulit buah naga merah dan ekstrak klorofil dari daun suji berpotensi untuk digunakan sebagai fotosensitizer pada DSSC. Spektrum serapan UV-Visible menunjukkan klorofil daun suji memiliki serapan panjang gelombang sebesar 663 nm dan 439 nm sedangkan

ekstrak antosianin kulit buah naga merah memiliki serapan panjang gelombang 532 nm. Celah pita energi (energi gap) klorofil adalah 2,51 eV dan antosianin 2,1 eV. Karakterisasi elektrokimia menunjukkan bahwa energi HOMO pada klorofil sebesar -5,68 eV dan pada antosianin sebesar -5,16 eV. Energi LUMO pada klorofil sebesar -3,17 eV dan pada antosianin sebesar -3,06 eV. Dari hasil penelitian ini diperkirakan antosianin dari kulit buah naga merah akan memiliki efisiensi yang lebih tinggi karena energi gap ekstrak antosianin kulit buah naga merah lebih rendah dari energi gap ekstrak klorofil daun suji sehingga regenerasi pewarna lebih mudah dilakukan dan transfer elektron tidak memerlukan energi yang besar.

DAFTAR PUSTAKA

1. M. A. M. Al-Alwani, A. B. S. A. Al-Mashaan, and M. F. Abdullah. 2019. Performance of the dye-sensitized solar cells fabricated using natural dyes from *Ixora coccinea* flowers and *Cymbopogon schoenanthus* leaves as sensitizers. *Int. J. Energy Res.* 43(13): 7229–7239. doi: 10.1002/er.4747.
2. S. R. Alfidharisti, F. Nurosyid, A. Supriyanto, R. Suryana, and Y. Iriani. 2017. Influence of electrode spacing on the efficiency of dye-sensitized solar cell. *J. Phys. Conf. Ser.* 909(1): 36–40. doi: 10.1088/1742-6596/909/1/012026.
3. J. Gong, K. Sumathy, Q. Qiao, and Z. Zhou. 2017. Review on dye-sensitized solar cells (DSSCs): Advanced techniques and research trends. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 68(2017): 234–246. doi: 10.1016/j.rser.2016.09.097.
4. U. Mehmood, S. U. Rahman, K. Harrabi, I. A. Hussein, and B. V. S. Reddy. 2014. Recent advances in dye sensitized solar cells. *Adv. Mater. Sci. Eng.* 2014:1–12. doi: 10.1155/2014/974782.
5. M. Rossi. 2017. Chlorophylls and xanthophylls of crop plants as dyes for Dye-Sensitized Solar Cells (DSSC). *J. Plant Sci. Phytopathol.* 1(2): 087–094. doi: 10.29328/journal.jpssp.1001011.
6. K. Sharma, V. Sharma, and S. S.

- Sharma. 2018. Dye-Sensitized Solar Cells: Fundamentals and Current Status. *Nanoscale Res. Lett.* 13(2018): 381. doi: 10.1186/s11671-018-2760-6.
7. Y. Qin and Q. Peng. 2012. Ruthenium sensitizers and their applications in dye-sensitized solar cells. *Int. J. Photoenergy.* (2012): 1–21. doi: 10.1155/2012/291579.
8. N. Patni, S. G. Pillai, and P. Sharma. 2020. Effect of using betalain, anthocyanin and chlorophyll dyes together as a sensitizer on enhancing the efficiency of dye-sensitized solar cell. *Int. J. Energy Res.* 44(13): 10846–10859. doi: 10.1002/er.5752.
9. R. Amelia, D. D. Risanti, and D. Sawitri. 2014. Fabrikasi Dye Sensitized Solar Cell (DSSC) dengan Sintesis Dye Komposit dari Garcinia mangostana, Celosia cristata, Beta vulgaris rubra dan Musa aromatica pada Fraksi Volume TiO₂ Optimum. *J. Tek. POMITS.* 1(1): 1–5.
10. W. A. Ayalew and D. W. Ayele. 2016. Dye-sensitized solar cells using natural dye as light-harvesting materials extracted from Acanthus sennii chiovenda flower and Euphorbia cotinifolia leaf. *J. Sci. Adv. Mater. Devices.* 1(4): 488–494. doi: 10.1016/j.jsamd.2016.10.003.
11. E. Supriyanto, H. A. Kartikasari, N. Alviati, and G. Wiranto. 2019. Simulation of Dye-Sensitized Solar Cells (DSSC) Performance for Various Local Natural Dye Photosensitizers. *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.* 515(2019): 012048. doi: 10.1088/1757-899X/515/1/012048.
12. N. Jamalullail, I. S. Mohamad, M. N. Norizan, N. A. Baharum, and N. Mahmed. 2017. Short review: Natural pigments photosensitizer for dye-sensitized solar cell (DSSC). *IEEE Student Conference on Research and Development: Inspiring Technology for Humanity, SCOReD 2017 – Proceedings.* 2017: 344–349. doi: 10.1109/SCOReD.2017.8305367.
13. M. Hosseinezhad, R. Jafari, and K. Gharanjig. 2017. Characterization of a green and environmentally friendly sensitizer for a low cost dye-sensitized solar cell. *Opto-electronics Rev.* 25(2): 93–98. doi: 10.1016/j.opelre.2017.04.007.
14. M. A. Ridwan, E. Noor, M. S. Rusli, and Akhiruddin. 2018. Fabrication of dye-sensitized solar cell using chlorophylls pigment from sargassum,” *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.* 144(2018): 012039. doi: 10.1088/1755-1315/144/1/012039.
15. A. H. Ahliha, F. Nurosyid, and A. Supriyanto. 2018. The chemical bonds effect of Amaranthus hybridus L . and Dracaena Angustifolia on TiO₂ as photo-sensitizer for dye-sensitized solar Cells (DSSC) The Chemical Bonds Effect of Amaranthus Hybridus L . and Dracaena Angustifolia on TiO₂ as Photo-sensitizer. in *AIP Conf. Proc.* 1868, 2018. 060001(2017): 1–6. doi: 10.1063/1.4995165.
16. D. R. Adawiyah and T. Muhandri. 2019. Pengaruh Fortifikasi Zat Besi Menggunakan Fe-Sulfat , Fe-Fumarat dan Na Fe EDTA Terhadap Kualitas Sensori Produk-Produk Olahan Tepung Terigu The Effect of Iron Fortification using Fe-Sulfat , Fe-Fumarata and Na Fe EDTA on Sensory Quality of Wheat Products. 6(2): 54–62. doi: 10.29244/jmpi.2019.6.54.
17. D. Indrasti, N. Andarwulan, E. H. Purnomo, and N. U. R. Wulandari. Stability of chlorophyll as natural colorant: A review for suji (dracaena angustifolia (medik.) roxb.) leaves’ case. *Curr. Res. Nutr. Food Sci.* 6(3): 609–625. doi: 10.12944/CRNFSJ.6.3.04.
18. A. H. Ahliha, F. Nurosyid, A. Supriyanto, and T. Kusumaningsih. 2018. Optical properties of anthocyanin

- dyes on TiO₂ as photosensitizers for application of dye-sensitized solar cell (DSSC). *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.* 333(2018): 012018. doi: 10.1088/1757-899X/333/1/012018.
19. J. Suryadi, Gunawan, and A. Haris. 2010. Pembuatan dan Penentuan Nilai Efisiensi Sel Surya Berpewarna Tersensitisasi dengan Senyawa Antosianin dari Buah Manggis (*Garcinia mangostana* L.) sebagai Pewarna Pensesensitisasi. *J. Kim. Sains dan Apl.* 13(3): 88–94.
20. N. Aryanti. 2016. Ekstraksi Dan Karakterisasi Klorofil Dari Daun Suji (*Pleomele Angustifolia*) Sebagai Pewarna Pangan Alami. *J. Apl. Teknol. Pangan.* 5(4): 129–135. doi: 10.17728/jatp.196.
21. D. Ganta, J. Jara, and R. Villanueva. 2017. Dye-sensitized solar cells using Aloe Vera and Cladode of Cactus extracts as natural sensitizers. *Chem. Phys. Lett.* 679(2017): 97–101. doi: 10.1016/j.cplett.2017.04.094.
22. S. Kavitha, K. Praveena, and M. Lakshmi. 2017. A new method to evaluate the feasibility of a dye in DSSC application. *Int. J. Energy Res.* 41(14): 2173–2183. doi: 10.1002/er.3778.
23. L. G. Oktariza, B. Yulianto, and Suyatman. 2018. Performance of dye sensitized solar cells (DSSC) using Syngonium Podophyllum Schott as natural dye and counter electrode. *AIP Conf. Proceeding.* 1958(2018): 020022. doi: 10.1063/1.5034553.
24. A. Suprasetyo and P. Setiarso. 2016. Pembuatan Elektroda Pasta Karbon Termodifikasi Zeolit Untuk Analisis Fenol Secara Cyclic Stripping Voltammetry. *UNESA J. Chem.* 5(3): 86–93.
25. D. Dahlan, T. S. Leng, and H. Aziz. 2016. Dye Sensitized Solar Cells (DSSC) dengan Sensitiser Dye Alami Daun Pandan, Akar Kunyit dan Biji Beras Merah (Black Rice). *J. Ilmu Fis. / Univ. Andalas.* 8(1): 1–8. 10.25077/jif.8.1.1-8.2016.
26. I. Imelda. 2020. Rekayasa Struktur Akseptor Pada Zat Warna Organik Tipe D- II -a Dengan Kerangka Tiofen. *J. Res. Educ. Chem.* 2(1): 30. doi: 10.25299/jrec.2020.vol2(1).4857.
27. I. Hikmah and G. Prajitno. 2015. Pengaruh Penggunaan Gel-Electrolyte pada Prototipe. *J. SAINS DAN SENI ITS.* 4(1): 2337–3520.
28. E. Cahya Prima, B. Yulianto, Suyatman, and H. K. Dipojono. 2015. Theoretical Investigation of Anthocyanidin Aglycones as Photosensitizers for Dye-Sensitized TiO₂ Solar Cells. *Adv. Mater. Res.* 1112(2015): 317–320. doi:10.4028/www.scientific.net/amr.1112.317.
29. G. T. Tractz *et al.* 2019. Recombination study of dye sensitized solar cells with natural extracts. *J. Braz. Chem. Soc.* 30(2): 371–378. doi: 10.21577/0103-5053.20180186.
30. D. Sinha, D. De, and A. Ayaz. 2020. Photo sensitizing and electrochemical performance analysis of mixed natural dye and nanostructured ZnO based DSSC. *Sadhana - Acad. Proc. Eng. Sci.* 45(2020): 175. doi: 10.1007/s12046-020-01415-0.
31. N. P. Sari and P. Setiarso. 2020. Pembuatan Elektroda Kerja Graphene Oxide Termodifikasi Nano Termodifikasi Nano Bentonit Untuk Analisis Asam Nikotinat Secara Voltametri Siklik. *UNESA J. Chem.* 9(3): 171–178.
32. M. Mojiri-Foroushani, H. Dehghani, and N. Salehi-Vanani. 2013. Enhancement of dye-sensitized solar cells performances by improving electron density in conduction band of nanostructure TiO₂ electrode with using a metalloporphyrin as additional dye. *Electrochim. Acta.* 92(2013): 315–322.