

**STUDI ELEKTROKIMIA EKSTRAK BETALAIN UMBI BIT SEBAGAI PEWARNA ALAMI
DSSC (DYE SENSITIZED SOLAR CELL)**

**ELECTROCHEMICAL STUDY OF BEETROOT BETALAIN EXTRACT AS NATURAL DYES
DSSC (DYE SENSITIZED SOLAR CELL)**

*Elma Alfianti Indri Lestari 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. Penelitian ini dilakukan untuk menggali dan memanfaatkan umbi bit segar sebagai bahan baku pewarna alami pada DSSC. DSSC (Dye Sensitized Solar Cell) merupakan sel fotovoltaik yang dapat mengkonversi sinar matahari menjadi listrik menggunakan bahan baku yang ramah lingkungan dan biaya produksi yang rendah. Pada penelitian ini, DSSC dibuat dengan menggunakan metode doctor blade dengan menggunakan pewarna alami yang berasal dari ekstrak betalain umbi bit. Pewarna alami dipilih karena mudah didapatkan, serta murah dan ramah lingkungan. Betalain dari umbi bit diestraksi secara maserasi dengan pelarut ethanol. Karakterisasi pewarna alami dilakukan dengan menggunakan spektrofotometri UV-Visible untuk mengetahui serapan panjang gelombang, karakterisasi elektrokimia pewarna dilakukan menggunakan voltametri siklik, dan untuk mengetahui efisiensi pada DSSC dilakukan dengan karakterisasi I-V. Pada penelitian ini dihasilkan serapan panjang gelombang yaitu pada 534 nm yang menunjukkan serapan pigmen betasianin. Karakterisasi elektrokimia menunjukkan bahwa energi HOMO (Highest Occupied Molecular Orbital) pada pewarna sebesar -5,00 eV. Energi LUMO (Lowest Unoccupied Molecular Orbital) pada pewarna sebesar -3,71 eV. Analisis celah pita energi (energi gap) pewarna menghasilkan 1,29 eV artinya dye yang dipreparasi dapat digunakan sebagai sensitizer pada DSSC. Karakterisasi I-V menunjukkan nilai efisiensi DSSC dengan pewarna alami umbi bit sebesar 0,004 %. Hasil ini menunjukkan bahwa pewarna alami ekstrak betalain umbi bit dapat digunakan sebagai zat warna alami pada DSSC.

Kata kunci : betalain, DSSC, elektrokimia

Abstract. This research was conducted to explore and utilize fresh beetroot as raw material for natural dyes in DSSC. DSSC (Dye Sensitized Solar Cell) is a photovoltaic cell that can convert sunlight into electricity using environmentally friendly raw materials and low production costs. In this study, DSSC was made using the doctor blade method using natural dyes derived from betalain tuber extract. beet. Natural dyes were chosen because they are easy to obtain, as well as cheap and environmentally friendly. The betalain from the beetroot is macerated with ethanol as a solvent. Characterization of natural dyes was carried out using UV-Visible spectrophotometry to determine the wavelength absorption, electrochemical characterization of dyes was carried out using cyclic voltammetry, and to determine the efficiency of the DSSC was carried out by I – V characterization. In this study, an absorption wavelength of 534 nm was produced which showed the uptake of the pigment betasianin. The electrochemical characterization showed that the energy of the HOMO (Highest Occupied Molecular Orbital) in the dye was -5.00 eV. The LUMO (Lowest Unoccupied Molecular Orbital) energy in dye is -3.71 eV. Analysis of the energy bandgap (energy gap) of the dye yields 1.29 eV, meaning that the prepared dye can be used as a sensitizer on the DSSC. I-V characterization showed that the efficiency value of DSSC with natural dye for beetroot was 0.004%. These results indicate that the natural dye extract of beetroot betalain can be used as a natural dye in DSSC.

Key words: betalain, DSSC, electrochemical

PENDAHULUAN

Krisis energi merupakan masalah besar yang mempengaruhi kelangsungan hidup manusia karena pertumbuhan ekonomi yang pesat dan kebutuhan sumber energi yang semakin meningkat. Kebutuhan energi listrik di dunia khususnya di Indonesia semakin meningkat dari waktu ke waktu. Berdasarkan Indonesia Energy Outlook 2019, kebutuhan listrik diproyeksikan mencapai 2.214 TWh pada tahun 2050 atau meningkat sekitar 9 kali lipat dari kebutuhan listrik tahun 2018 sebesar 254,6 TWh. Untuk memenuhi kebutuhan listrik yang meningkat 9 kali lipat dari tahun 2018 pada tahun 2050, skenario pembangunan berkelanjutan terbesar untuk produksi listrik energi baru dan terbarukan berasal dari Pembangkit Listrik Tenaga Surya sebesar 421,3 TWh diikuti oleh Pembangkit Listrik Tenaga Air dengan produksi listrik sebesar 109,5 TWh. Besarnya produksi listrik dari tenaga surya disebabkan oleh penggunaan solar-rooftops yang menggunakan solar cell dengan porsi 25%, serta dipengaruhi oleh perkembangan industri baterai di beberapa provinsi untuk mendukung produksi listrik tenaga surya [1]. Untuk mengatasi krisis energi tersebut diperlukan energi terbarukan yang salah satunya bersumber dari energi matahari. Pemanfaatan energi surya merupakan pemikiran terbaik untuk mengatasi krisis energi karena energi ini keberadaannya tidak terbatas dan juga tidak menimbulkan pencemaran yang dapat merusak lingkungan. Cahaya atau sinar matahari dapat diubah menjadi listrik dengan menggunakan sel surya atau teknologi *photovoltaik*.

Sel surya merupakan teknologi yang dapat mengubah energi dari sinar matahari langsung menjadi listrik. Sel surya dibagi menjadi tiga generasi. Sel surya generasi pertama menggunakan silikon kristal dan silikon poli kristal. Sel surya generasi pertama dapat mencapai efisiensi konversi daya hingga 25% dan telah mendominasi total PV, namun biaya produksi yang tinggi telah mencegah penerapannya secara luas dan mendorong pencarian yang ramah lingkungan dan berbiaya rendah alternatif sel surya. Sel surya generasi kedua merupakan teknologi sel surya yang dibuat dengan teknologi film tipis. Namun, mirip dengan sel generasi pertama, kerugian dari produksi tinggi dan kurang ramah lingkungan masih ada. Setelah kurang lebih 20 tahun penelitian dan

pengembangan, film hibrida generasi ketiga sel surya muncul. Generasi baru fotovoltaik, terdiri dari DSSC, sel surya organik, sel surya kuantum dot, dan sel surya perovskit. Pada generasi ini, teknologi fotovoltaik masih tertinggal dari sel surya konvensional berbasis Si dalam nilai efisiensinya. Namun, penggunaan bahan baku yang ramah lingkungan dan biaya produksi yang rendah membuat sel surya ini menjadi subjek penelitian dan pengembangan yang intensif [2].

Pada tahun 1991, peneliti Michael Grätzel dan Brian O'Regan menyelidiki pembuatan DSSC berbasis fotoelektrokimia. Struktur DSSC terdiri dari elektroda fotoanoda berlapis, titanium dioksida sebagai semikonduktor, elektroda counter yang digunakan sebagai katoda, sensitizer, dan elektrolit. Anoda yang digunakan terbuat dari lembaran kaca yang diberi lapisan oksida konduktif transparan. Dalam penelitian ini digunakan *Indium Thin Oxide* (ITO) sebagai

anoda. Semikonduktor Titanium dioksida (TiO_2) disimpan di anoda untuk mengaktifkan konduksi elektronik. *Sensitizer* terbagi menjadi tiga jenis, yaitu *sensitizer* kompleks logam, *sensitizer* organik bebas logam, dan pewarna alami [2]. *Sensitizer* yang digunakan berupa pewarna alami yang bekerja sebagai transfer muatan yang terikat secara kovalen ke permukaan lapisan oksida mesopori untuk meningkatkan penyerapan cahaya. Pada penelitian ini, *sensitizer* yang digunakan merupakan pewarna alami ekstrak betalain umbi bit. *Sensitizer* merupakan komponen yang sangat penting karena berfungsi menyerap radiasi matahari sehingga meningkatkan daya hantar sel. Sensitizer harus memiliki gugus karboksil dan hidroksil untuk berikatan dengan semikonduktor [4]. Elektrolit mengandung mediator redoks yang mempengaruhi regenerasi zat warna. Pada penelitian ini digunakan elektrolit gel yang terbuat dari polimer. Katoda kemudian dibuat dari lembaran kaca yang dilapisi dengan katalis karbon yang berfungsi untuk mengumpulkan elektron [5].

Pewarna alami digunakan sebagai sensitizer alternatif DSSC karena murah dan ramah lingkungan. Namun, secara keseluruhan kinerja fotovoltaik DSSC alami lebih rendah dari itu pewarna berbasis rutenium karena energi ikat dengan TiO_2 yang lemah [6]. Dalam penelitian ini digunakan zat pewarna alami yang berasal dari ekstrak betalain dari umbi bit. Umbi bit dipilih

sebagai pewarna alami karena umbi bit merupakan salah satu sumber pewarna alami yang belum banyak dimanfaatkan. Warna merah pada umbi bit yang berasal dari pigmen betalain memberikan warna pekat. Senyawa betalain digunakan karena senyawa betalain merupakan senyawa fenol yang tersubstitusi oleh gugus glikosida pada posisi orto dan memiliki gugus kromofor, sehingga terdapat gugus hidroksil yang dapat mengikat kuat pada semikonduktor tersebut.

Pada DSSC, pewarna akan mengalami reaksi redoks dengan elektrolit. Kondisi elektron yang tereksitasi pada pewarna harus lebih tinggi energinya daripada tepi pita konduksi tipe-n semikonduktor, sehingga proses transfer elektron antara pewarna tereksitasi dan pita konduksi semikonduktor dapat berlangsung efisien [7]. Sifat redoks pada pewarna dapat diketahui berdasarkan HOMO dan LUMO pewarna menggunakan voltametri siklik. HOMO mewakili energi yang diperlukan untuk mengangkut elektron dari molekul yang merupakan proses oksidasi dan LUMO berasosiasi dengan energi yang diperlukan untuk menyuntikkan elektron ke molekul dan ini merupakan proses reduksi [8]. Perbedaan antara tingkat energi LUMO dan HOMO menggambarkan energi celah pita pewarna sehingga dapat diketahui apakah pewarna dapat dijadikan sebagai *sensitizer* pada DSSC. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengeksplorasi dan menggali potensi umbi bit sebagai bahan baku untuk produksi pewarna alami pada DSSC. Keberhasilan pemanfaatan umbi bit sebagai bahan pewarna alami untuk DSSC akan membawa dampak positif yaitu bertambahnya potensi pemanfaatan umbi bit sebagai pewarna alami pengganti Ruthenium pada DSSC sekaligus dapat digunakan sebagai sumber energy terbarukan yang efisien dan ramah lingkungan sehingga mengurangi dampak dari krisis energy yang akan datang.

METODE PENELITIAN

Alat

Peralatan yang digunakan adalah *Indium Thin Oxide* (ITO) Glass 2.5 x 2.5 cm, peralatan gelas, *magnetic stirrer*, *hotplate*, *scotch tape*, clip binder, timbangan analitik, instrumen UV-Visible Shimadzu 1800, dan Voltametri 797 VA Computrace.

Bahan

Bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah umbi bit, surfaktan non ionik Tween-80, Kalium Iodida (KI), Iodium (I_2), Ethanol 96% p.a, serbuk TiO_2 anatase, larutan Asam Nitrat 0,1 M, Polivinil Etilen Glikol (PEG 400), grafit.

Prosedur Penelitian

Ekstraksi pewarna Alami

Umbi bit diekstraksi secara maserasi dengan perbandingan bit segar dan ethanol 96% p.a adalah 1: 3 selama 24 jam dalam wadah gelap.

Persiapan pasta TiO_2

0,2 g bubuk TiO_2 anatase, 0,4 ml larutan asam nitrat 0,1 M, dan 0,08 g polivinil etilen glikol (PEG) dicampur menggunakan *magnetic stirrer* sampai terbentuk pasta yang homogen. Setelah itu 0,05 ml surfaktan Tween-80 non ionik ditambahkan ke suspensi koloid, diaduk menggunakan magnetic stirrer selama 30 menit sampai campuran berbentuk pasta.

Pembuatan Gel Elektrolit

Larutan gel elektrolit dibuat dengan menggunakan kalium iodida (KI), polietilen glikol (PEG) 400, dan iodium (I_2). Larutan pertama dibuat dari campuran 10 ml PEG dan 0,8 gram KI. Kemudian dicampur dengan larutan kedua yang terbuat dari campuran 0,127 gram I_2 dan 10 ml PEG. Larutan elektrolit diaduk selama 30 menit sampai diperoleh larutan yang homogen.

Pembuatan sandwich DSSC

Gelas Indium Thin Oxide (ITO) dibersihkan menggunakan larutan etanol. Setelah itu pasta TiO_2 ditutup dengan kaca ITO dan dipanaskan menggunakan hotplate pada suhu $450^\circ C$ selama satu jam. Kaca konduktif ITO yang telah dilapisi TiO_2 direndam dalam pewarna yang terbuat dari ekstrak betalain dari buah bit selama 24 jam. Kemudian, elektroda yang berlawanan (untuk katoda) dibuat dengan melapisi kaca konduktif ITO dengan katalis karbon. Katalis karbon ini dibuat dari grafit pensil 2b di area aktif disposisi lapisan TiO_2 dengan luas 2 x 2 cm. Katoda ditempatkan pada bidang datar menghadap ke atas yang saling berhadapan dan sesuai dengan luas aktif, kemudian ditambahkan elektrolit gel. Sel-sel direkatkan dengan menggunakan pengikat klip.

Karakterisasi dan pengukuran Analisis UV-Visible

Pengujian spektrofotometri UV-Vis dilakukan untuk mengetahui spektrum absorpsi zat warna yang diekstrak dari umbi bit menggunakan spektrofotometer UV-Vis. Panjang gelombang cahaya yang digunakan antara 400-800 nm setelah pengaturan baseline.

Analisis Elektrokimia

Voltametri siklik dilakukan untuk menganalisis sifat elektrokimia yang dihasilkan dari pewarna. Pengukuran elektrokimia dilakukan dengan instrumen Voltametri tipe 797 VA Computrace. Dalam pengukuran elektrokimia KCl 3M digunakan sebagai elektrolit, kabel tembaga digunakan untuk elektroda kerja, Ag/AgCl untuk elektroda referensi, dengan rentang potensial -1,6 V - 1,6 V. Parameter yang diamati berupa variasi waktu deposisi, laju sapuan dan pH dipilih setelah pengujian awal. Karakterisasi elektrokimia dilakukan untuk mengetahui besarnya celah pita energi (E_g) molekul yang merupakan aspek utama dalam meningkatkan efisiensi arus fotosensitizer. E_g dapat dinyatakan sebagai Persamaan 1 [9, 10].

$$E_g = E_{LUMO} - E_{HOMO} \dots\dots\dots(1)$$

Tingkat LUMO dari sensitizer yang sesuai harus lebih besar dari pita konduksi semikonduktor dan tingkat HOMO lebih rendah dari elektrolit potensial redoks [11].

Analisis I-V

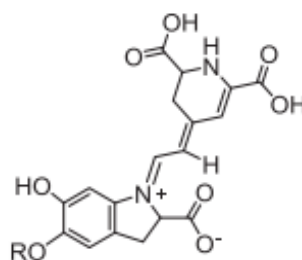
Pengukuran I-V dilakukan untuk melihat sifat kelistrikan serta efisiensi yang dihasilkan DSSC.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Analisis UV-Visible

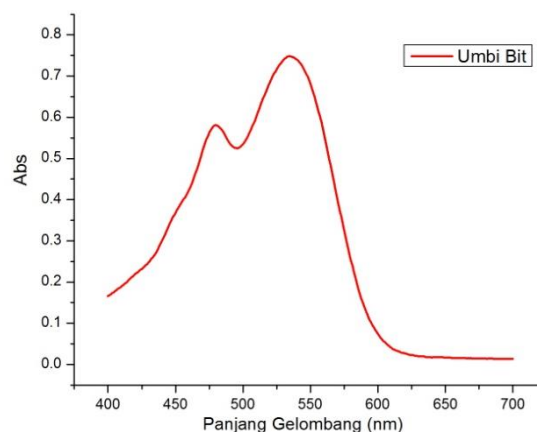
Pada penelitian ini untuk mengetahui sifat optik ekstrak umbi bit digunakan spektrofotometri UV-Vis untuk mengetahui sensitivitasnya. Pewarna yang dihasilkan terhadap panjang gelombang cahaya tampak.

Ada dua kategori betalain (i) betasianin yang termasuk pigmen betalain kemerahan sampai ungu dan (ii) betaxanthin yang tampak kuning ke jingga [12]. Pigmen betalain dicirikan dengan absorpsi maksimum sekitar 535 nm untuk betasianin merah-ungu dan mendekati 480 nm untuk betaxanthins kuning [13]. Pigmen betalain memiliki struktur senyawa yang digambarkan pada gambar 1.



Gambar 1. Struktur senyawa pigmen Betalain.

Berdasarkan Gambar 2, ekstrak umbi bit memiliki 2 spektrum serapan yaitu pada 534 nm yang menunjukkan serapan pigmen betasianin. Sehingga dapat diketahui bahwa pada umbi bit terdapat pigmen betalain.



Gambar 2. Serapan Panjang Gelombang Ekstrak Betalain Umbi Bit

Studi Elektrokimia Pewarna

Karakterisasi elektrokimia dilakukan untuk melihat energi HOMO dan LUMO pada zat warna. Transisi paling mungkin terjadi dalam pewarna, karena penyerapan energi terkuantisasi melibatkan promosi satu elektron dari orbital molekul terisi tertinggi (HOMO) ke orbital molekul tak terisi terendah (LUMO). Perhitungan HOMO dan LUMO dapat dihitung dengan persamaan 2 dan 3.

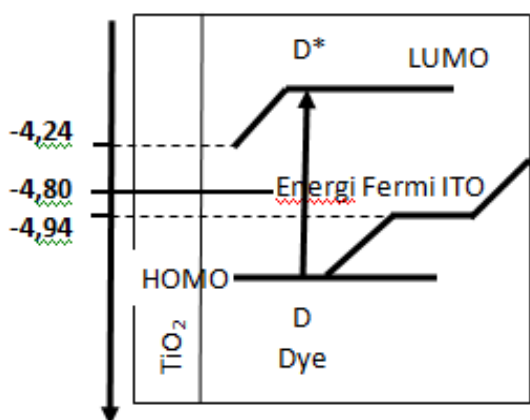
$$E_{HOMO} = - [E_{ox}(onset) - E_{ox}(ferosen)] - 4.8 \text{ eV} \dots\dots\dots(2)$$

$$E_{LUMO} = - [E_{ox}(onset) - E_{ox}(ferosen)] - 4.8 \text{ eV} \dots\dots\dots(3)$$

Dalam persamaan, 4,8 eV adalah tingkat energi referensi ferosen dan Eox. (Ferosen) adalah potensial ketika ferosen mulai teroksidasi (0,40 eV vs. Ag / AgCl) [14].

HOMO mewakili energi yang dibutuhkan untuk mengekstraksi elektron dari molekul, yang merupakan proses oksidasi, dan LUMO adalah energi yang diperlukan untuk menyuntikkan

elektron ke molekul, sehingga menyiratkan proses reduksi [15]. Untuk pertukaran elektron yang efisien, potensi elektrokimia dari keadaan LUMO pewarna harus lebih positif daripada pita konduksi TiO₂ yang berada pada -4,24 V. Nilai untuk tingkat Fermi dari ITO berada pada -4,8 eV [16]. Demikian pula, potensi elektrokimia dari tingkat pewarna HOMO harus berada pada potensi yang lebih negatif daripada sistem redoks I⁻/I₃³⁻ untuk regenerasi pewarna yang efisien [17]. Potensi sistem redoks I⁻/I₃³⁻ adalah -4,94 V [18]. Seperti yang digambarkan pada gambar 3.



Gambar 3. Tingkat energi fotosensitizer yang baik untuk aplikasi DSSC.

Penentuan pH terbaik

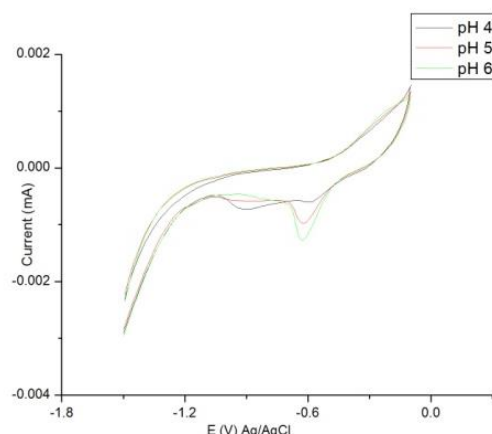
Tabel 1. Energi HOMO dan Energi LUMO dari Penentuan pH Terbaik

Pewarna	pH	HOMO (eV)	LUMO (eV)	Band gap (eV)
Umbi Bit	4	-4,95	-3,51	1,44
	5	-4,96	-3,79	1,17
	6	-5,00	-3,78	1,22

pH mempengaruhi reaksi analit selamapengukuran voltametri. pH optimal adalah keadaandimana analit memberikan arus reduksi dan oksidasi tertinggipada instrumen voltametri [19]. Variasi pH yang digunakan dalam pengujian ini yaitu pH 4, 5, dan 6. Variasi ini dipilih karena menurut Stinzing dan Carle nilai pH untuk betalain adalah pH 4 – 6 [20], sehingga variasi pH 4 – 6 dipilih untuk mengetahui pH optimum pada umbi bit.

Berdasarkan Tabel 1. diketahui bahwa pH terbaik yang digunakan dalam pengukuran energi HOMO-LUMO pada pewarna alami umbi bit adalah pH 6 karena memiliki energi HOMO yang

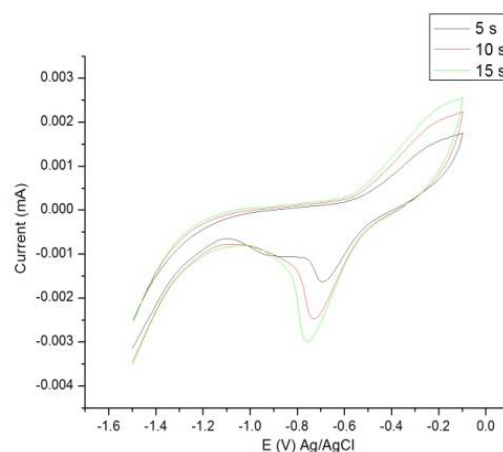
berada pada potensi yang lebih negatif daripada sistem redoks I⁻/I₃³⁻.



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

Penentuan waktu deposisi terbaik

Pengujian selanjutnya yaitu pengujian waktu deposisi optimum. Pengujian ini menggunakan variasi waktu 5, 10, dan 15 detik. Variasi waktu deposisi ini digunakan untuk melihat kestabilan elektroda dala, mengukur sampel yang diujikan. Waktu deposisi atau waktu prakonsentrasi yaitu waktu yang diperlukan elektroda untuk pengumpulan analit pada permukaannya [19].



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

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

Pewarna	Waktu deposisi (s)	HOM O	LUMO	Band gap (eV)
Umbi Bit	5	-4,99	-3,70	1,29

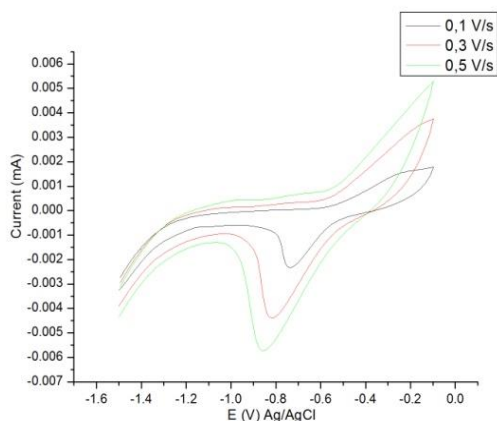
	10	-5,02	-3,70	1,32
	15	-5,00	-3,67	1,33

Berdasarkan Tabel 2. diketahui bahwa waktu deposisi terbaik yang digunakan dalam pengukuran energi HOMO-LUMO pada pewarna alami umbi bit adalah 10 detik karena memiliki energi HOMO yang berada pada potensi yang lebih negatif daripada sistem redoks I⁻/ I₃³⁻.

Penentuan laju pindai terbaik

Penentuan laju pindai bertujuan untuk mengetahui transfer elektron pada elektroda kerja. Pengujian laju pindai optimum menggunakan variasi laju pindai 0,1 V/s, 0,3 V/s, dan 0,5 V/s.

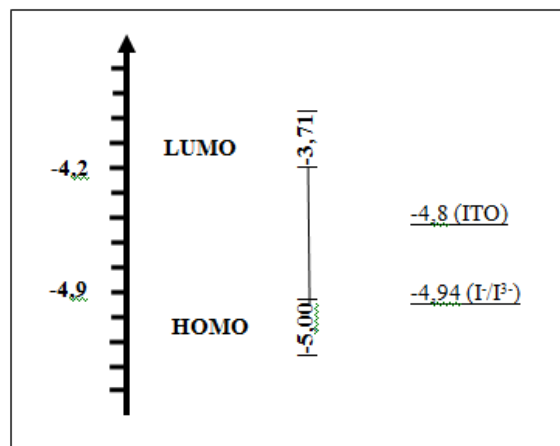
Berdasarkan Tabel 3. diketahui bahwa laju pindai optimum terbaik yang digunakan dalam pengukuran energi HOMO-LUMO pada pewarna alami umbi bit adalah 0,3 V/s karena memiliki energi HOMO yang berada pada potensi yang lebih negatif daripada sistem redoks I⁻/ I₃³⁻. Kemudian, energi LUMO pada laju pindai 0,3 V/s memiliki energi yang sangat mendekati celah pita konduksi ITO sehingga lebih optimal dalam menginjeksikan elektron seperti yang digambarkan pada gambar 6.



Gambar 6. Hasil Voltamogram Betalain Pengukuran Laju Pindai Terbaik Berbagai Variasi

Tabel 3. Energi HOMO dan Energi LUMO dari Laju Pindai Terbaik.

Pewarna	Laju Pindai (V/s)	HOMO (eV)	LUMO (eV)	Band gap (eV)
Umbi Bit	0,1	-4,97	-3,71	1,26
	0,3	-5,00	-3,71	1,29
	0,5	-4,99	-3,66	1,33



Gambar 7. Level energy HOMO dan LUMO ekstrak betalain Umbi Bit

Terlihat energi gap dye umbi bit 1,29 eV. Energi gap semikonduktor TiO₂ dalam fase anatase sekitar 3,2 eV, artinya dye yang dipreparasi dapat digunakan sebagai sensitizer pada DSSC, karena nilai energi gap dye harus lebih kecil dari energi gap semikonduktor yang digunakan. Hal ini dikarenakan pada DSSC terjadi separasi muatan, di mana saat menyerap energi foton dari cahaya tampak, elektron pada dye akan tereksitasi dari keadaan HOMO (highest occupied molecular orbital) ke daerah LUMO (lowest unoccupied molecular orbital) yang selanjutnya elektron akan ditransfer ke pita konduksi semikonduktor TiO₂. Energi gap dye menunjukkan lebar energi dari keadaan HOMO ke LUMO.

Karakteristik I-V

Efisiensi merupakan output dari sel surya yang menunjukkan kemampuan sel surya untuk mengubah sel matahari menjadi energi listrik. Efisiensi suatu sel surya dapat diketahui dengan meninjau kurva karakteristik I-V (arus-tegangan). Saat cahaya membawa energi foton mengenai DSSC, akan ada elektron dari dye yang mendesak elektron dari TiO₂ tereksitasi dari pita konduksi ke pita valensi dan menuju elektroda kerja sehingga tercipta arus dalam DSSC. Parameter efisiensi ditabulasikan dalam Tabel 1 dan efisiensi dihitung dengan menggunakan rumus,

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100 \% \dots\dots\dots (1)$$

$$P_{out} = V_{oc} I_{sc} FF \dots\dots\dots (2)$$

Dimana, P_{out} merupakan daya yang dihasilkan sel (mW/cm^2), I_{sc} merupakan kuat arus saat kondisi short circuit (mA/cm^2), V_{oc} merupakan tegangan pada saat kondisi open circuit (V), FF merupakan Fill Factor sehingga dihasilkan :

Pewarna	V_{oc} (V)	I_{sc} (A)	P_{out} (W/m^2)	Efisiensi (%)
Umbi Bit	0,21	$6,2 \times 10^{-6}$	4×10^{-2}	4×10^{-3}

Pengukuran dilakukan di luar ruangan pada siang hari. Perhitungan efisiensi DSSC menggunakan persamaan 1 dan 2. dimana dalam pengukuran sel surya radiasi matahari berada pada kondisi normal yaitu $1000 W/m^2$. Dalam menentukan efisiensi DSSC, diketahui efisiensi DSSC pewarna ekstrak umbi bit adalah 4×10^{-3} %.

KESIMPULAN

Pada penelitian ini dapat disimpulkan bahwa pewarna alami ekstrak umbi bit dapat digunakan sebagai pewarna alami pada DSSC. Spektrum serapan pewarna alami menggunakan spektrofotometer UV-Vis menunjukkan bahwa pewarna alami ekstrak umbi bit mengandung ekstrak betalain yaitu betasianin yang menyerap foton pada panjang gelombang cahaya tampak yang memiliki energi celah yang lebih kecil daripada pita semikonduktor TiO_2 sehingga dapat digunakan sebagai sensitizer DSSC. Pada karakterisasi elektrokimia menggunakan voltametri siklik ditemukan bahwa energi LUMO pewarna lebih positif daripada pita konduksi TiO_2 dan potensi elektrokimia dari tingkat pewarna HOMO harus berada pada potensi yang lebih negatif daripada sistem redoks I^-/I_3^{3-} . Karakterisasi elektrokimia menunjukkan bahwa energi HOMO (*Highest Occupied Molecular Orbital*) pada pewarna alami umbi bit sebesar $-5,00 eV$. Energi LUMO (*Lowest Unoccupied Molecular Orbital*) pada pewarna alami umbi bit sebesar $-3,71 eV$. Sehingga didapatkan celah pita sebesar $1,29 eV$ sehingga dye yang dipreparasi dapat digunakan sebagai sensitizer pada DSSC, karena nilai energi gap dye lebih kecil dari energi gap semikonduktor yang digunakan. Karakterisasi I-V menunjukkan bahwa DSSC menggunakan pewarna alami ekstrak betalain dari umbi bit memiliki efisiensi sebesar $0,004$ %. Pengujian awal pada prototype DSSC ini belum digunakan untuk menyalakan ataupun menggerakkan sesuatu dikarenakan ukuran prototype yang sangat kecil sehingga arus

harus terlebih dahulu disimpan dalam kondensator untuk dapat digunakan, namun berdasarkan hasil yang diperoleh bahwa prototype DSSC ini mampu menghasilkan arus listrik. Sehingga, dari hasil penelitian ini pewarna betalain dari umbi bit dapat digunakan sebagai sensitizer pada DSSC.

DAFTAR PUSTAKA

1. Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral. 2019. Kajian Indonesia Energy Outlook. Pusat Data dan Informasi Energi dan Sumber Daya Mineral.
2. J. Wu, Z. Lan, J. Lin. (2014). Electrolytes in Dye-Sensitized Solar Cells. *American Chemical Society, Chemical Review* .
3. N. Sekar, V. Y. Gehlot (2010). Metal complex dyes for dye-sensitized solar cells : recent development. *Resonance* , 19-31.
4. J. Gong, J. Liang, K. Sumathy. (2012). Review on dye sensitized solar cells (DSSCs) : fundamental concepts and novel materials . *Renew Sustain Energy* , 48-60.
5. M. R Narayan. (2012). Review : dye sensitized solar cels based on natural photosensitizer . *Renew Sustain Energy* , 08-15.
6. E. Guzela, B. S. Arslana, V. Durmaza, etc. (2018). Photovoltaic performance and photostability of anthocyanins, isoquinoline alkaloids and betalains as natural sensitizers for DSSCs. . *Solar Energy* , 34-41.
7. A. Hagfeldt, G. Boschloo, L. Sun, L. Kloo, H. Pettersson. (2010). Dye-Sensitized Solar Cells . *Chemical Review* , 6595-6663.
8. P. I. Djurovich, E. I. Mayo, S.R. Forrest, M. E. Thompson. (2009). Measurement of the lowest unoccupiedmolecular orbital energies of molecular organic semiconductors organic electronics. *Org Electron* , 515-520.
9. J. J.Fu, Y, A. Duan, J. Z. Zhang, etc. (2014). Theoretical Investigation Of Novel Phenothiazinebased D-II-A Conjugated

- Organic Dyes As Dye-Sensitizer In Dye-Sensitized Solar Cells. . *Compute Theory Chem* , 145-153.
10. M. Raftani, T. Abram, M. N. Bennani, etc. (2020). Theoretical study of new conjugated compounds with a low bandgap for bulk heterojunction solar cells: DFT and TD-DFT study. *Result in Chemistry* .
 11. A. Fitri, A. T. Benjelloun, M. Benzakour, etc. (2014). Theoretical investigation of new thiazolothiazole-based D- π -A organic dyes for efficient dye-sensitized solar cell. . *Spectrochim Acta* , 646-654.
 12. A. S. Al-Horaibi, M. T. Ighamdi, S. T. Gaikwad, etc. (2018). Comparison and Determine Characteristics Potentials of HOMO/ LUMO and Relationship between E_a and I_p for Squaraine Dyes (SQ1, SQ2) by Using Cyclic Voltammetry and DFT/TD-DFT. . *Moroccan Journal of Chemistry* , 404-413.
 13. D. Zhang, S. M. Lanier, J. A. Downing, J. L. Avent, J. Lum, J. L. McHale. (2008). Betalain pigments for dye-sensitized solar cells. *Journal of Photochemistry and Photobiology* , 72-80.
 14. C. P. Sagita, (2021). Enhancing the Conversion Efficiency of Dye Sensitized Solar Cells based on Betalain Natural Dye as The Potential Photosensitizer : A Review. . *Indonesian Journal Natural Pigment* , 1-9.
 15. J. Hou, B. Zhang, D. Li, etc. (2019). Enabling Superior Stretchable Resistive Switching Memory via Polymer Functionalized Graphene Oxide Nanosheets. *Royal Society of Chemistry* .
 16. D. J. Coutinho , G. C. Faria , R. M. Faria , H. V. Seggern. (2015). Dynamics of energy level alignment at ITO/organic semiconductor interfaces. *Organic Electronics* , 408-414.
 17. S. Kavitha, K. Praveena, M. Lakshmi. (2017). A new method to evaluate the feasibility of a dye in DSSC application . *International Journal Energy* .
 18. K. Sharma, V. Sharma, and S. Sharma. (2018). Dye-Sensitized Solar Cells: Fundamentals and Current Status,” . *Nanoscale Res Lett* .
 19. P. Setiarso, N. P. Sari. (2021). Graphene Oxide-Paraffin-Nanobentonite as Working Electrode for Cyclic Voltammetry Analysis for Nicotinic Acid. *Asian Journal of Chemistry* , 757-761.
 20. F. C. Stintzing, R. Carle, (2007). Betalains-emerging prospects for food scientists. *Trends Food Sci. Technology*, 514 – 525