

Pengaruh Kombinasi Ekstrak Kayu Secang (*Caesalpinia sappan L.*) dan Bunga Telang (*Clitoria ternatea*) pada pH Asam dan Basa sebagai Sensitizer Alami terhadap Efisiensi DSSC.

The Effect of Combination of Sappan wood (*Caesalpinia sappan L.*) and Butterfly pea (*Clitoria ternatea*) Extracts on Acidic and Basic pH as Natural Sensitizer on DSSC Efficiency.

Riska Nur Safitri, Nita Kusumawati*

Jurusan Kimia, Universitas Negeri Surabaya, Ketintang, Kota Surabaya, Indonesia

*corresponding author: nitakusumawati@unesa.ac.id

Abstrak. Pewarna merupakan komponen penting dalam Dye Sensitized Solar Cell (DSSC) sebagai fotosensitizer yang dapat mempengaruhi efisiensi kinerja DSSC. Inovasi dalam fabrikasi sistem DSSC berbasis pewarna alam terus dilakukan sebagai bentuk upaya peningkatan efisiensi kinerja DSSC. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui variasi terbaik pada kombinasi pewarna brazilin dari kayu secang (*Caesalpinia sappan L.*) dan antosianin dari bunga telang (*Clitoria ternatea*) sebagai dye sensitized DSSC berbasis pewarna alam terhadap efisiensi DSSC. Pewarna diekstraksi menggunakan metode maserasi dengan pelarut aquades dan dilakukan eliminasi dari komposisi terbaik berdasarkan nilai energi *bandgap*. Pembuatan rangkaian DSSC dan analisis fotovoltai dilakukan berdasarkan hasil terbaik dari variasi komposisi dengan nilai *bandgap* terbaik yang dioptimasi pada pH asam, netral, dan basa. Serapan panjang gelombang pewarna dikarakterisasi menggunakan instrument UV-Vis. Campuran brazilin dan antosianin pada variasi komposisi terbaik yaitu (3:1) didapatkan serapan panjang gelombang maksimum pada rentang 425-480 nm dan 520-580 nm dalam kondisi pH netral. Sifat elektrokimia dari pewarna dikarakterisasi menggunakan voltametri siklik, didapatkan hasil kombinasi pewarna terbaik pada komposisi (3:1) dengan nilai HOMO -4,24316 eV dan LUMO -4,06713 eV. Sementara itu celah pita energi dihasilkan 0,17603 eV. Pada pengukuran efisiensi dari rangkaian dilakukan pengukuran tegangan dan arus menggunakan multimeter sehingga dihasilkan nilai Voc 350 mV; Jsc $2,47 \times 10^{-3}$ mA; FF 3,41%; dan efisiensi 2,94% dari variasi komposisi (3:1) pada pH asam (pH 2).

Kata-kata kunci: Pewarna, brazilin, antosianin, DSSC, efisiensi.

Abstract. Dye is an important component in a Dye-Sensitized Solar Cell (DSSC) as a photosensitizer that can affect the efficiency of DSSC performance. Innovations in the fabrication of natural dye-based DSSC systems continue to be made to increase the efficiency of DSSC performance. The purpose of this study was to determine the best variation in the combination of brazilin dye from sappan wood (*Caesalpinia sappan L.*) and anthocyanin from butterfly pea (*Clitoria ternatea*) as dye-sensitized DSSC based on natural dyes on the efficiency of DSSC. The dye was extracted using the maceration method with distilled water and eliminated from the best composition based on the *bandgap* energy value. The making of the DSSC circuit and photovoltaic analysis was carried out based on the best results from various compositions with the best-optimized *bandgap* values at acidic, neutral, and alkaline pH. The absorption wavelength of the dye was characterized using a UV-Vis instrument. The mixture of brazilin and anthocyanin at the best composition variation (3:1) obtained maximum wavelength absorption in the range of 425-480 nm and 520-580 nm under neutral pH conditions. The electrochemical properties of the dyes were characterized using cyclic voltammetry, and the best combination of dyes was found in the composition (3:1) with HOMO values of -4,24316 eV and LUMO of -4,06713 eV. Meanwhile, the energy *bandgap* is 0.17603 eV. In measuring the efficiency of the circuit, voltage and current measurements were carried out using a multimeter so that the Voc value of 350 mV was produced; Jsc 2.47×10^{-3} mA; FF 3.41%; and 2.94% efficiency of the composition variation (3:1) at acidic pH (pH 2).

Keywords: Dyes, brazilin, anthocyanins, DSSC, efficiency.

1. Pendahuluan

Energi listrik merupakan salah satu kebutuhan utama dalam setiap kegiatan manusia di bumi. Saat ini penggunaan energi listrik dalam kebutuhan sehari-hari, baik untuk keperluan rumah, transportasi, industri, dan lain-lain semakin meningkat. Total konsumsi energi di Indonesia meningkat sebesar 3,4% per tahun dari tahun 2013-2019 dan menurun sekitar 10% pada tahun 2020. Sedangkan pada tahun 2021 konsumsi listrik per kapita meningkat sekitar 4% mencapai 978 kWh [1]. Bertambahnya jumlah penduduk berbanding lurus dengan meningkatnya kebutuhan energi, sehingga cadangan energi bahan bakar fosil di Indonesia semakin menipis. Tercatat hingga saat ini penggunaan energi bahan bakar fosil masih mendominasi kebutuhan energi di pasar dunia sejak 1965 [2-3]. Sementara itu, di Indonesia sebagian besar energi listrik yang digunakan bersumber pada bahan bakar fosil yang tidak dapat diperbaharui, sebesar 35,36% berasal dari batu bara; 34,38% dari minyak bumi; 19,36% dari gas bumi; dan 10,9% berasal dari Energi Baru dan Terbarukan (EBT) [4]. Hal tersebut mengakibatkan energi fosil semakin menipis seiring dengan meningkatnya kebutuhan energi, sedangkan penggunaan energi alternatif seperti energi angin, geothermal, dan matahari masih sedikit dalam penggunaannya [5-6]. Teknologi energi alternatif perlu dikembangkan untuk menunjang kebutuhan dan keberlangsungan sumber energi yang dibutuhkan. Salah satu sumber energi yang tidak akan habis yaitu energi matahari. Panas sinar matahari merupakan energi matahari yang dapat dimanfaatkan untuk memenuhi kebutuhan energi dalam jangka panjang. Energi panas matahari merupakan salah satu energi alternatif yang ramah lingkungan. Salah satu pemanfaatan energi panas matahari yaitu pemanfaatan teknologi sel surya atau fotovoltaik. Teknologi sel surya merupakan salah satu bentuk pengaplikasian energi matahari menjadi listrik [7]. Energi sel surya yang telah dikembangkan yaitu *Dye Sensitized Solar Cell* (DSSC) yang merupakan teknologi sel surya generasi ketiga dalam perkembangan teknologi dan bahan manufaktur [8-9].

Indonesia merupakan negara yang memiliki iklim tropis, sehingga energi surya berpotensi untuk dikembangkan di negara ini. Potensi energi surya di Indonesia yang telah dimanfaatkan sekitar 10 MWp dari 50 MWp/tahun dalam target kapasitas PLTS yang akan terpasang hingga tahun 2025. Hal ini menggambarkan potensi yang cukup besar dalam pengembangan PLTS di Indonesia. Sementara itu, dalam perkembangannya sel surya konvensional yang sudah komersial masih menggunakan teknologi wafer silikon kristalin dimana proses pembuatannya tergolong sulit dan mahal. Selain itu penggunaan pewarna sintesis seperti, ruthenium kompleks dalam komponen DSSC tersebut juga menjadi kendala dikarenakan sifatnya yang karsinogenik dan tidak ramah lingkungan [10]. Perlu dikembangkan inovasi untuk mengatasi hal tersebut. Salah satu inovasi yang dikembangkan yaitu *Dye Sensitized Solar Cell* (DSSC) berbasis pewarna alami. DSSC berbasis pewarna alami banyak menarik perhatian kalangan peneliti hingga industri, karena proses produksinya yang mudah dengan biaya terjangkau, serta dampaknya yang ramah pada lingkungan [11].

DSSC memiliki kemampuan menyerap cahaya yang tinggi. Susunannya dibentuk berlapis seperti sandwich yang terdiri dari empat bagian, yaitu kaca Fluorine Thin Oxide (FTO); dye fotosensitizer sebagai pendonor elektron; TiO_2 sebagai reseptor elektron, dan cairan elektrolit sebagai media transport elektron [12]. Pada sistem DSSC, pewarna memiliki peran penting dalam peyerapan sinar matahari yang merubahnya menjadi energi listrik. Salah satu fotosensitizer yang dikenal memiliki efisiensi tinggi yaitu pewarna sintesis dari senyawa kompleks ruthenium polipridil. Pada penelitian sebelumnya, ruthenium kompleks dapat mencapai efisiensi 11-12% [13]. Meskipun memiliki efisiensi yang tinggi, pewarna sintesis ruthenium memiliki dampak yang buruk terhadap lingkungan. Pewarna sintesis umumnya bersifat karsinogenik, menyebabkan pencemaran, dan tidak ramah lingkungan. Selain itu proses pembuatannya yang rumit serta membutuhkan biaya yang mahal. Penggunaan bahan pewarna yang ramah lingkungan dan tidak beracun merupakan aspek penting yang harus diperhatikan dalam pembuatan DSSC. Maka dari itu upaya untuk

membuat fotosensitizer alami yang memiliki efisiensi tinggi terus dilakukan. Beberapa peneliti telah melakukan percobaan pembuatan fotosensitizer alami berasal dari pigmen alami yang banyak ditemukan pada tumbuhan [14].

Selain ramah lingkungan dalam proses pembuatannya, ekstraksi pewarna alami sangat sederhana, tidak beracun, dan mudah terurai secara hayati di lingkungan. Indonesia memiliki SDA yang berlimpah khususnya tumbuh-tumbuhan yang dapat dimanfaatkan sebagai sumber pewarna alami seperti pewarna yang mengandung pigmen antosianin, dan brazilin. Beberapa sumber daya alam yang berpotensi sebagai pewarna alami yang ramah lingkungan yaitu kayu secang (*Caesalpinia sappan L.*) dan bunga telang (*Clitoria ternatea*). Kayu secang merupakan salah satu sumber daya alam yang mengandung pigmen brazilin berwarna merah dapat digunakan sebagai pewarna alami yang tidak bersifat toksik [15]. Sementara itu, bunga telang mengandung pigmen antosianin, berwarna biru yang dapat larut dalam air, warnanya tergantung pada struktur dan keasaman buah. Pada kondisi asam antosianin berwarna merah dan ketika netral menuju basa antosianin berwarna biru [16-17]. Pada penelitian sebelumnya didapatkan efisiensi DSSC dengan pewarna alami brazilin dari kayu secang sebesar 1,1% [18], sementara pada pewarna antosianin didapatkan 1,47% [19]. Meskipun pewarna alami memiliki kelebihan seperti di atas, pewarna alami juga memiliki kelemahan yaitu efisiensinya yang masih sangat rendah jika dibandingkan dengan pewarna sintesis ruthenium kompleks.

Berdasarkan latar belakang di atas untuk meningkatkan efisiensi DSSC berbasis pewarna alam, pada penelitian ini dilakukan pembuatan sistem DSSC berbasis double komponen pewarna alam brazilin dan antosianin sebagai fotosensitizer alami pada sistem DSSC. Kombinasi ekstrak pewarna brazilin dari kayu secang (*Caesalpinia sappan L.*) dan antosianin dari bunga telang (*Clitoria ternatea*) dengan perbandingan komposisi serta variasi pH asam; netral; dan basa. Hasil kombinasi dari variasi komposisi dan pH terbaik, diharapkan mampu meningkatkan efisiensi Dye Sensitized Solar Cell (DSSC) dibandingkan sistem Dye Sensitized Solar Cell (DSSC) berbasis pewarna alam tunggal yang diukur pengaruhnya terhadap efisiensi kinerja DSSC. Pembuatan Dye Sensitized Solar Cell (DSSC) berbasis double komponen pewarna alam pada penelitian ini menggunakan Solid Polymer Electrolyte PVDF. Dimana cairan elektrolit terjebak dalam membran PVDF yang dicetak dengan metode casting dimana elektrolit dapat bertahan lebih lama dalam sistem DSSC sehingga dapat menjaga kestabilan transpor elektron.

2. Bahan dan Metode

2.1. Bahan dan Alat

Bahan yang digunakan dalam penelitian ini meliputi kayu secang; bunga telang kering; aquades; Polyvinilidene fluoride (PVDF); DMAC 99%; aseton; TiO₂; etilen karbonat (EC) anhydrous 99%; propilen karbonat (PC) anhydrous 99,7%; PEG-1000; HNO₃ 0,1 M; HCl 0,1 M; NaOH 0,1 M; dan kaca FTO. Alat yang digunakan meliputi neraca analitik OHAUS PAJ1003, magnetic stirrer NESCO LAB MS-H280-Pro, pH meter, instrument UV-Vis Shimadzu 1700, dan Voltametri 797VA Computrace.

2.2. Pembuatan Double Fotosensitizer Alami

Pembuatan pewarna dilakukan dengan metode maserasi dan evaporasi. Ekstraksi pewarna kayu secang dan bunga telang dilakukan secara bersamaan dengan variasi perbandingan komposisi 1:1; 3:1; dan 1:3 menggunakan pelarut aquades dengan perbandingan 1:6. Kayu secang dan bunga telang dipotong kecil-kecil dan ditimbang dengan berat masing-masing 10 gr, selanjutnya direndam dalam satu gelas yang sama dengan pelarut aquades sebanyak 120 mL dan dimaserasi selama 30 menit dalam kondisi tertutup. Filtrat kemudian dievaporasi selama 10 menit. Hasil evaporasi filtrat kemudian dianalisis serapan panjang gelombangnya menggunakan instrumen UV-Vis serta dianalisis energi bandgap yang dihasilkan. Hasil

evaluasi analisis voltametri didapatkan variasi komposisi terbaik yang kemudian dioptimasi dengan pengkondisian pH larutan pewarna. Larutan pewarna dikondisikan pada pH 2; 7; dan 12 dengan menambahkan HCl 0,1 M dan NaOH 0,1 M.

1.3. Pembuatan Pasta TiO₂

Sebanyak 0,2 gr TiO₂ dan 0,08 gr PEG-1000 dicampurkan dalam gelas kimia. Selanjutnya ditambahkan 0,05 mL tween-80 dan 0,4 mL HNO₃ dan dilakukan homogenisasi menggunakan magnetic stirrer dengan kecepatan 100 rpm selama 30 menit.

1.4. Pembuatan Membran PVDF

Sebanyak 2 gr PVDF, 6 gr DMAC, dan 4 gr aseton ditambahkan secara bertahap dan dilakukan pengadukan menggunakan hotplate magnetic stirrer dengan kecepatan 270 rpm dan suhu 65°C selama 12 jam. Selanjutnya dicetak menggunakan metode casting knife [20].

1.5. Pembuatan Larutan Elektrolit

Sebanyak 0,4 gr EC; 0,4 gr PC; 0,6 gr KI; dan 9,2 mg I₂ dicampurkan dalam gelas kimia tertutup dan dihomogenisasikan menggunakan magnetic stirrer dengan kecepatan 100 rpm selama 30 menit [21].

1.6. Pembuatan Rangkaian DSSC

Rangkaian DSSC dibuat dari dua buah kaca FTO ukuran 2x2,5 cm yang disusun berlapis atas dan bawah. Kaca FTO lapis bawah dilapisi pasta TiO₂ dengan luas 2x1,5 cm menggunakan metode doctor blade. Selanjutnya dilakukan sinterring kaca terlapis pasta TiO₂ menggunakan hotplate selama 1 jam dengan suhu 450°C. Kaca hasil sinterring kemudian direndam dalam komponen kombinasi pewarna alami kayu secang dan bunga telang dengan komposisi (3:1) yang telah dikondisikan pada pH 2; 7; dan 12 selama 24 jam. Kaca FTO lapis atas dilapisi menggunakan carbon dari residu jelaga nyala api lilin. Dan menggunakan membran PVDF yang telah dipotong dengan ukuran 2x1,5 cm yang telah direndam dalam larutan elektrolit selama 1 jam. DSSC dirangkai dengan urutan kaca FTO berlapis TiO₂/double photosensitizer alami/elektrolit polymer/elektroda carbon-kaca FTO, selanjutnya kedua sisi dijepit menggunakan penjepit besi.

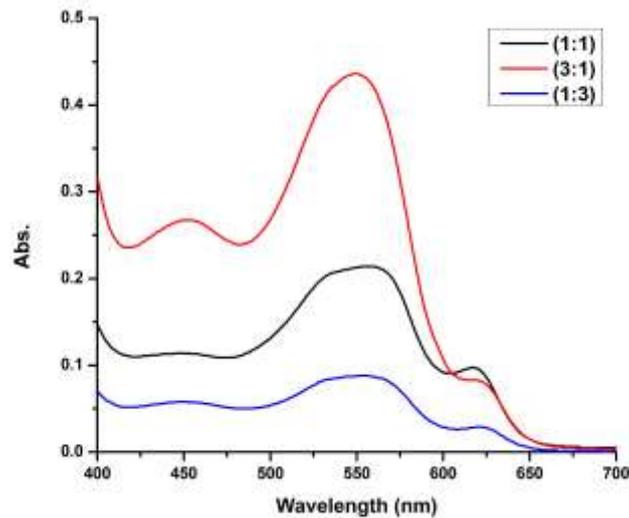
1.7. Karakterisasi

Analisis spektrum UV komponen pewarna menggunakan instrument spektrofotometri UV-Vis Shimadzu 1800. Analisis voltametri komponen pewarna dilakukan menggunakan voltametri siklik 797 VA Computrace dengan rentang potensial -1,6-1,6 V. Selanjutnya analisis fotovoltaiik rangkaian DSSC dianalisis menggunakan multimeter Krisbow KW08-26 [22].

3. Hasil Penelitian dan Pembahasan

3.1 Analisis Spektrum UV-Vis

Analisis spektrum UV-Vis dilakukan untuk mengetahui serapan panjang gelombang pewarna yang digunakan sebagai fotosensitizer dalam sistem DSSC. Fotosensitizer yang digunakan dalam sistem DSSC memiliki syarat daerah serapan panjang gelombang cahaya tampak pada 400-800 nm [23]. Pewarna pigmen brazilin dari kayu secang merupakan golongan flavonoid yang larut dalam air serta mengandung gugus fungsional hidroksil yang dapat mengikat logam [24-25]. Selain itu, pewarna yang mengandung pigmen antosianin bersifat polar dan larut dalam air. Antosianin memiliki gugus karbonil dan hidroksil yang memungkinkan zat warna dapat berikatan dengan lapisan TiO₂, yang dapat meningkatkan transfer elektron dan efisiensi konversi energi DSSC [26]. Sehingga pewarna brazilin dan antosianin berpotensi dijadikan fotosensitizer alami untuk DSSC. Dalam penelitian ini digunakan campuran pewarna dari kombinasi pigmen brazilin (C₁₆H₁₄O₅) dari kayu secang dan antosianin (C₁₅H₁₁O) dari bunga telang. Hasil spektrum UV-Vis yang diperoleh dari kombinasi kedua pewarna setelah diekstraksi menggunakan akuades ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Spektrum UV-Vis kombinasi pewarna brazilin dan antosianin dengan variasi komposisi.

Pada Gambar 1. ditunjukkan daerah serapan panjang gelombang pigmen pewarna dari kombinasi kayu secang dan bunga telang yang memiliki dua daerah serapan pada panjang gelombang 425-480 nm dan 520-580 nm. Hasil ini sejalan dengan penelitian sebelumnya dimana daerah serapan kedua puncak ini berada dalam daerah serapan pigmen brazilin pada rentang panjang gelombang 450-520 nm dan antosianin pada rentang 520-550 nm [27-29]. Serapan panjang gelombang dengan absorbansi tertinggi ditunjukkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Hasil Analisis UV Brazilin kayu secang dan Antosianin bunga telang

Komposisi	λ (nm) Brazilin	Absorbansi	λ (nm) Antosianin	Absorbansi
(1:1)	445	0,114	553	0,214
(3:1)	452	0,268	548	0,436
(1:3)	455	0,058	550	0,088

Berdasarkan Tabel 1. serapan panjang gelombang dengan absorbansi tertinggi ditunjukkan oleh masing-masing variasi komposisi. Nilai absorbansi yang semakin tinggi menunjukkan bahwa intensitas cahaya yang terserap semakin besar. Dimana, nilai absorbansi sebanding dengan penyerapan energi foton sinar matahari, semakin tinggi nilai absorbansi maka semakin besar energi foton yang terserap [30]. Pada variasi komposisi (3:1) serapan panjang gelombang yang dihasilkan pada variasi ini memiliki absorbansi tertinggi dibandingkan pada variasi komposisi (1:1) dan (1:3). Sehingga memungkinkan variasi komposisi ini menyerap lebih banyak foton dibandingkan variasi komposisi yang lain karena memiliki nilai absorbansi tertinggi. Semakin banyak foton yang terserap, maka elektron yang tereksitasi semakin banyak [31]. Berdasarkan hasil spektrum UV diatas, puncak serapan zat warna tersebar dalam rentang panjang gelombang 400-700 nm. Hal ini menunjukkan bahwa semua spektrum penyerapan pewarna yang diekstraksi berada dalam rentang cahaya tampak dan memiliki puncak ganda, yang secara efisien dapat menyerap foton dari sinar matahari [32]. Berdasarkan serapan panjang gelombang maksimum yang dihasilkan dengan nilai absorbansi tertinggi yang diperoleh dari variasi komposisi dengan perbandingan (3:1) terpilih menjadi pewarna yang potensial sebagai pewarna dalam sistem DSSC.

3.2 Analisis Voltametri

Analisis voltametri dilakukan menggunakan voltametri siklik 797 VA Computrace. Analisis voltametri dilakukan untuk mengetahui sifat elektrokimia dari kombinasi pewarna yang telah diekstraksi. Pada analisis ini didapatkan nilai *Highest Occupied Molecular Orbital* (HOMO), *Lowest Occupied Molecular Orbital* (LUMO), dan energi celah pita dari kombinasi pewarna yang telah diekstraksi. Sebanyak 20 mL larutan pewarna dicampurkan dengan 5 mL KCl 0,3% kemudian dianalisis pada rentang potensial -1,6-1,6 V; laju pindai 0,5 V/det; dan waktu deposisi 20 s [33]. Hasil analisis yang diperoleh ditunjukkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Energi bandgap kombinasi pigmen brazilin dan antosianin

Variasi Komposisi	HOMO	LUMO	Energi bandgap (eV)
(1:1)	-4,29738	-3,94834	0,34904
(3:1)	-4,24316	-4,06713	0,17603
(1:3)	-4,29747	-4,05321	0,24419

Semikonduktor TiO₂ digunakan dalam pembuatan fotoanoda, dimana TiO₂ merupakan fotoelektroda yang stabil dalam sel fotoelektrokimia meskipun dalam kondisi ekstrim [34]. Celah pita semikonduktor TiO₂ dilaporkan sebesar 3,2 eV [35]. Celah pita (bandgap) diperoleh dari selisih energi HOMO dan LUMO [36]. Energi bandgap yang rendah akan memudahkan perpindahan elektron dari pita valensi ke pita konduksi, sementara energi bandgap yang tinggi akan mengakibatkan nilai efisiensi rendah karena memiliki celah pita yang lebar sehingga membutuhkan energi yang besar untuk melakukan transfer elektron [37]. Dari Tabel 1. di atas, menunjukkan bahwa kombinasi pewarna alami pigmen brazilin dari kayu secang dan antosianin dari bunga telang memiliki energi bandgap lebih rendah dari semikonduktor TiO₂. Pada kombinasi pewarna diatas ditunjukkan nilai bandgap terendah yang dihasilkan dari variasi komposisi kombinasi pewarna brazilin kayu secang dan antosianin bunga telang pada perbandingan (3:1). Kombinasi pewarna variasi komposisi (3:1) menjadi pewarna paling potensial dalam mengabsorpsi cahaya, karena memiliki energi bandgap yang rendah yang mengakibatkan proses transfer elektron menjadi lebih cepat.

3.3 Analisis Kinerja DSSC

Parameter fotovoltaiik digunakan untuk mengetahui kinerja DSSC dengan fotosensitizer terbaik dan diukur menggunakan multimeter untuk didapatkan arus dan tegangan yang dihasilkan. Parameter pengukuran yang dihitung meliputi JSC (*Short-circuit current density*), VOC (*Open circuit voltage*), FF (*Fill factor*), dan η (*Efficiency*) [38]. Pengukuran dilakukan menggunakan multimeter Krisbow KW08-26. Hasil yang didapatkan ditunjukkan pada Tabel 2. dan dihitung menggunakan rumus persamaan berikut:

$$FF\% = \frac{P_{max}}{J_{sc} \times V_{oc}} = \frac{J_{max} \times V_{max}}{J_{sc} \times V_{oc}} \dots\dots (1)$$

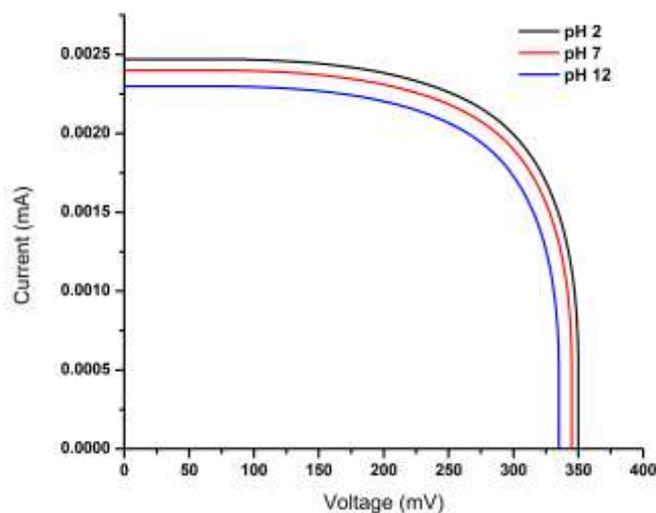
$$\eta = \frac{P_{max}}{P_{in}} = \frac{J_{sc} \times V_{oc} \times FF}{P_{in}} \dots\dots (2)$$

Tabel 2. Analisis Fotovoltaiik Rangkaian DSSC

pH	Jsc (mA/cm ²)	Voc (mV)	FF (%)	Efisiensi (η) (%)
2	2,47 x 10 ⁻³	350	3,41	2,94
7	2,40 x 10 ⁻³	345	3,40	2,81
12	2,30 x 10 ⁻³	335	3,09	2,38

Dari Tabel 2. dan Gambar 2. Ditunjukkan hasil analisis dan grafik yang menggambarkan nilai J_{sc} , V_{oc} , FF, dan efisiensi yang diperoleh dari rangkaian DSSC dengan fotosensitizer alami kombinasi pewarna brazilin kayu secang dan antosianin bunga telang pada komposisi (3:1) dengan variasi pH asam (pH 2); netral (pH 7); dan basa (pH 12). Pada pH asam dihasilkan J_{sc} $2,47 \times 10^{-3}$; V_{oc} 350 mV; FF 3,41%, dan efisiensi sebesar 2,94%, urutan kedua pada variasi pH netral dengan J_{sc} $2,40 \times 10^{-3}$; V_{oc} 345 mV; FF 3,40%; dan efisiensi sebesar 2,81%, sementara pada variasi pH basa menempati urutan terakhir dengan J_{sc} $2,30 \times 10^{-3}$; V_{oc} 335 mV; FF 3,09%; dan efisiensi sebesar 2,38%. Berdasarkan data pada Tabel 2. tersebut, semakin tinggi pH maka semakin kecil nilai efisiensi yang dihasilkan. Perubahan pH mempengaruhi kestabilan zat warna, dimana perubahan pH yang semakin tinggi pada komposisi pewarna mengakibatkan pigmen pewarna mengalami hidrolisis basa yang mengakibatkan terjadinya degradasi pewarna sehingga mengalami perubahan gugus kromofor [39]. Perubahan gugus kromofor menyebabkan struktur pewarna menjadi tidak stabil sehingga pewarna mudah untuk terdegradasi. Pewarna brazilin dan antosianin yang digunakan dalam penelitian ini merupakan pewarna yang stabil dalam kondisi pH asam dibandingkan pH basa, sehingga mampu mempertahankan kestabilan struktur zat warna dalam kondisi asam.

Berdasarkan penelitian sebelumnya dimana efisiensi DSSC dari pewarna tunggal kayu secang memiliki efisiensi 1,1%, sementara pada pewarna antosianin didapatkan 1,47%. Hasil dalam penelitian ini didapatkan efisiensi terbaik sebesar 2,94% yang merupakan hasil kombinasi pewarna dari pigmen brazilin kayu secang dan antosianin bunga telang pada variasi komposisi (3:1) dengan variasi pH 2. Dapat disimpulkan bahwa penggabungan dua komponen pewarna brazilin dari kayu secang dan antosianin dari bunga telang memiliki nilai efisiensi lebih tinggi dibandingkan dengan pewarna tunggal kayu secang dan bunga telang, sehingga kombinasi kedua pigmen brazilin dan antosianin berpotensi baik sebagai fotosensitizer alami DSSC.



Gambar 2. Grafik I-V DSSC Kombinasi pewarna brazilin dan antosianin variasi pH 2; 7; dan 12.

4. Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisis data dapat disimpulkan campuran brazilin dan antosianin pada variasi komposisi terbaik yaitu (3:1) didapatkan serapan panjang gelombang maksimum pada rentang 425-480 nm dan 520-580 nm. Sifat elektrokimia dari pewarna dikarakterisasi menggunakan voltametri siklik, didapatkan hasil kombinasi pewarna terbaik pada variasi komposisi (3:1) dengan nilai HOMO -4,24316 eV dan LUMO -4,06713 eV. Sementara itu celah pita energi (bandgap)

dihasilkan 0.17603 eV. Pada pengukuran efisiensi dari rangkaian dilakukan pengukuran tegangan dan arus menggunakan multimeter sehingga dihasilkan nilai $J_{sc} 2,47 \times 10^{-3}$; $V_{oc} 350$ mV; FF 3,41%, dan efisiensi sebesar 2,94% dari variasi komposisi dan pH terbaik.

Ucapan Terima Kasih

Ucapan terima kasih ditujukan kepada Tim Riset Merah Putih Kimia, FMIPA, Unesa. Sebagaimana telah membantu menyelesaikan penelitian ini dalam berbagai bentuk dukungan selama penelitian ini berlangsung.

Daftar Pustaka

- [1] Enerdata, "Indonesia energy information," Enerdata Intelligence and Consulting, 2021. [Online]. Available: <https://www.enerdata.net/estore/energy-market/indonesia/>. [Accessed 05 November 2022].
- [2] T. E. Bimanatya, "Fossil fuels consumption, carbon emissions, and economic growth in Indonesia," *International Journal of Energy Economics and Policy (IJEPP)*, vol. 8, no. 4, pp. 90-97, 2018.
- [3] D. A. Putra, "Pengaruh komposisi campuran kurkumin-klorofil sebagai fotosensitizer terhadap efisiensi Dye Sensitized Solar Cell (DSSC)," in *Skripsi*, Malang, Fakultas Teknik Universitas Brawijaya, 2018.
- [4] H. EBTKE, "Menteri Arifin: Transisi energi mutlak diperlukan," Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral, 22 Oktober 2020. [Online]. Available: <https://ebtke.esdm.go.id/post/2020/10/22/2667/menteri.arifin.transisi.energi.mutlak.diperlukan?lang=en#:~:text=Arifin>. [Accessed 05 November 2022].
- [5] T. Oderinwale and C. R. McInnes, "Enhancing solar energy generation and usage: Orbiting solar reflectors as alternative to energy storage," *Applied Energy*, vol. 317, pp. 119154, 2022.
- [6] Q. S. Musaffa, "Uji performansi DSSC dengan variasi dye dan katalis," *Jurnal STATOR*, vol. 1, no. 1, pp. 124-127, 2018.
- [7] L. K. Singh and B. P. Koiry, "Natural dyes and their effect on efficiency of TiO_2 based DSSC: a comparative study," in *Second International Conference on Materials Science (ICMS2017)*, 2017.
- [8] M. Sufyan, U. Mehmood, Y. Q. Gill, R. N. Anwar and U. H. Khan, "Hydrothermally synthesize zinc oxide (ZnO) nanorods as an effective photoanode material for third-generation Dye-sensitized Solar Cells (DSSCs)," *Materials Letters*, vol. 297, pp. 130017, 2021.
- [9] Hardani, Cari and A. Supriyanto, "Characteristics ruthenium (N719) as a photosensitizer in Dye-Sensitized Solar Cells (DSSC)," in *Prosiding SNFA (Seminar Nasional Fisika dan Aplikasinya) 2020*, 2020.
- [10] K. E. d. S. D. Mineral, "Matahari untuk PLTS di Indonesia," Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia, 19 Juni 2012. [Online]. Available: <https://www.esdm.go.id/id/media-center/arsip-berita/matahari-untuk-plts-di-indonesia>. [Accessed 05 11 2022].
- [11] D. Dahlan, T. S. Leng and H. Aziz, "Dye Sensitized Solar Cells (DSSC) dengan sensitiser dye alami daun pandan, akar kunyit dan biji beras merah (black rice)," *Jurnal Ilmu Fisika (JIF)*, vol. 8, no. 1, pp. 1-8, 2016.
- [12] M. Mayliansarisyah and N. Kusumawati, "Pengaruh variasi lama pengadukan terhadap efisiensi kinerja Dye Sensitized Solar Cell (DSSC) berbasis elektrolit polimer pvdf nanofiber dan fotosensitizer alami daun pandan suji," *Prosiding Seminar Nasional Kimia (SNK) 2021*, pp. 109-117, 23 Oktober 2021.
- [13] S. Agustini, D. D. Risanti and D. Sawitri, "Fabrikasi Dye Sensitized Solar Cell (DSSC) berdasarkan fraksi volume TiO_2 anatase-rutile dengan *Garcinia mangostana* dan *Rhoeo Spathacea* sebagai dye fotosensitizer," *Jurnal Teknik Pomits*, vol. 2, no. 2, pp. 131-136, 2013.
- [14] A. Sulaiman, I. H. Silalahi, A. Shofiyani, A. Widiyantoro and H. Harlia, "Energi celah-pita material TiO_2 /kompleks logam-klorofil ($M=Zn^{2+}$, Co^{2+}) dari daun singkong (*Manihot esculenta crant*)," *Indonesian Journal of Pure and Applied Chemistry*, vol. 5, no. 1, pp. 1-19, 2022.
- [15] K. Surana, B. Bhattacharya and S. Majumder, "Extraction of yellow fluorescent *Caesalpinia sappan L.* dye for photovoltaic application," *Optical Materials*, vol. 119, pp. 111347, 2021.
- [16] Netravati, S. Gomez, B. Pathrose, M. R. N, M. J. P and B. Kuruvila, "Comparative evaluation of anthocyanin pigment yield and its attributes from Butterfly pea (*Clitoria ternatea L.*) flowers as prospective food colourant using different extraction methods," *Future Foods*, vol. 6, pp. 100199, 2022.
- [17] M. Rifqi, "Ekstraksi antosianin pada bunga telang (*Clitoria Ternatea L.*): review," *Pasundan Food Technology Journal (PFTJ)*, vol. 8, no. 2, pp. 45-50, 2021.

- [18] S. Ananth, P. Vivek, G. Kumar and P. Murugakoothan, "Performance of *Caesalpinia sappan* heartwood extract as photosensitizer for dye sensitized solar cells," *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, vol. 137, pp. 345-350, 2015.
- [19] N. Prabavathy, S. Shalini, R. Balasundaraprabhu, D. Velauthapillai, S. Prasanna, G. Balaji and N. Muthukumarasamy, "Algal buffer layers for enhancing the efficiency of anthocyanins extracted from rose petals for natural dye-sensitized solar cell (DSSC)," *International Journal of Energy Research*, vol. 42, no. 2, pp. 790-801, 2017.
- [20] A. Omar, M. S. Ali and N. A. Rahim, "Electron transport properties analysis of titanium dioxide dye-sensitized solar cells (TiO₂-DSSCs) based natural dyes using electrochemical impedance spectroscopy concept: A review," *Solar Energy*, vol. 207, pp. 1088-1121, 2020.
- [21] V. Pramananda, T. A. H. Fityay and E. Misran, "Anthocyanin as natural dye in DSSC fabrication: A review," *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 1122, pp. 012104, 2021.
- [22] M. Yasuda, K. Oda, T. Ueda and M. Tabata, "Physico-chemical chlorophyll-a species in aqueous alcohol solutions determine the rate of its discoloration under UV light," *Food Chemistry*, vol. 277, pp. 463-470, 2019.
- [23] M. Choi, Y. Noh, K. Kim and O. Song., "Properties of dye-sensitized solar cells with porous TiO₂ layers using polymethyl-methacrylate nano beads," *Korean Journal of Materials Research*, vol. 26, no. 4, pp. 194-199, 2016.
- [24] Y. L. Meutia, I. Susanti and N. C. Siregar, "Uji stabilitas warna hasil kopigmentasi asam tanat dan asam sinapat pada pigmen brazilin asal kayu secang (*Caesalpinia sappan* L.)," *Warta IHP*, vol. 36, no. 1, pp. 30-39, 2019.
- [25] Neswati and S. D. Ismanto, "Ekstraksi komponen bioaktif serbuk kayu secang (*Caesalpinia sappan* L.) dengan metode ultrasonikasi," *Jurnal Teknologi Pertanian Andalas*, vol. 22, no. 2, pp. 187-194, 2018.
- [26] T. Jalali, P. Arkian, M. Golshan, M. Jalali and S. Osfouri, "Evaluasi kinerja zat warna alami sebagai fotosensitizer dalam sel surya tersensitisasi zat warna," *Optical Materials*, vol. 110, pp. 110441, 2020.
- [27] D. N. Manurung, Nurhidayah and F. Deswardani, "Pengaruh penggunaan dye tunggal dan dye campuran antosianin-klorofil terhadap efisiensi kerja Dye Sensitized Solar Cell (DSSC)," *Jurnal Pendidikan Fisika Tadulako Online*, vol. 9, no. 1, pp. 83-88, 2021.
- [28] U. S. Putri, A. H. Mukharomah and A. R. Sulistyningtyas, "Pengaruh konsentrasi pelarut etanol terhadap absorbansi brazilin pada simplisia kayu secang (*Caesalpinia sappan* L.)," *Prosiding Sminar Nasional Mahasiswa Unimus*, vol. 1, pp. 283-288, 2018.
- [29] L. Anggriani, "Potensi ekstraksi bunga telang (*clitorea ternatea*) sebagai pewarna alami okal pada berbagai industri pangan," *CANREA JOURNAL*, vol. 2, no.1, pp. 32-37, 2019.
- [30] S. Landuma, D. A. Haryanto and A. Purwanto, "Application of sappan wood (*Caesalpinia sappan* L.) as sensitizer for dye-sensitized solar cell (DSSC)," *AIP Conference Proceedings*, vol. 1586, no. 1, pp. 109, 2014.
- [31] M. D. Fistiani, F. Nurosyid and d. R. Suryana, "Pengaruh komposisi campuran antosianin-klorofil sebagai fotosensitizer terhadap efisiensi dye sensitized solar cell," *Jurnal Fisika dan Aplikasinya*, vol. 13, no. 1, pp. 19-22, 2017.
- [32] T. Jalali, P. Arkian, M. Golshan, M. Jalali and S. Osfuri, "Performance evaluation of natural native dyes as photosensitizer in dye-sensitized solar cell," *Optical Materials*, vol. 110, pp. 110441, 2020.
- [33] Q. A'yun and N. Kusumawati, "Pengaruh variasi komposisi polimer PVDF nanofiber sebagai aplikasi penjebak elektrolit pada efisiensi listrik dari Dye Sensitized Solar Cell (DSSC)," in *Prosiding Seminar Nasional Kimia (SNK) 2021*, Surabaya, 2021.
- [34] D. K. Kumar, J. Krizz, N. Bennet, B. Chen, H. Upadhayaya and K. R. Reddy, and V. Sadhu, "Functionalized metal oxide nanoparticles for efficient dye-sensitized solar cells (DSSCs): A review," *Materials Science for Energy Technologies*, vol. 3, pp. 472-481, 2020.
- [35] D. Ganta, J. Jara and R. Villanueva, "Pewarna-sensitized solar cells using aloe vera and cladode of cactus extracts as natural sensitizers," *Chemical Physics Letter*, vol. 679, pp. 97-101, 2017.
- [36] E. A. Lestari and P. Setiarso, "Studi elektrokimia ekstrak betalain umbi bit sebagai pewarna alami DSC (Dye Sensitized Solar Cell)," *UNESA Journal of Chemistry*, vol. 10, no. 3, pp. 322, 2021.
- [37] W. M. Amirullah, H. Setiawan, A. Huda, H. Samaulah, S. Haryati and M. D. Bustan, "Pengaruh komposisi material semikonduktor dalam menurunkan energi bandgap dan terhadap konversi gelombang mikro," *Jurnal EECCIS*, vol. 65, pp. 13, 2017.
- [38] A. Sacco, "Electrochemical impedance spectroscopy: Fundamentals and application in dye-sensitized solar cells," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 79, pp. 814-829, 2017.

- [39] R. V. Harsono and P. Setiarso, "Optimasi potensi ekstrak rimpang temulawak (*curcuma xanthorrhiza*) pada pH basa sebagai sensitizer DSSC," *Indonesian Chemistry and Application Journal*, vol. 4, no. 2, pp. 1-7, 2021.