p-ISSN : 2302-4216
e-ISSN : 2830-1765
Inovasi Fisika Indonesia
https://ejournal.unesa.ac.id/index.php/inovasi-fisika-indonesia
Published by:
Program Studi Fisika
Jurusan Fisika FMIPA
Universitas Negeri Surabaya
Kampus Unesa Ketintang Jl. Ketintang Gd. C3 Lt. 1
Surabaya - Indonesia
jifi@unesa.ac.id

Jurnal Inovasi Fisika Indonesia (IFI) Volume 13 Nomor 2 Tahun 2024, hal 37- 44

MODIFIKASI TIGA BAHAN ALAM DENGAN PENAMBAHAN TEMBAGA SEBAGAI FOTOSENSITIZER PADA DSSC

[1)]Sandy Prayoga Ferdianto, [2)] Lydia Rohmawati

[1)] Program Studi Fisika, FMIPA, Universitas Negeri Surabaya, email: sandy.20026@mhs.unesa.ac.id
[2)] Program Studi Fisika, FMIPA, Universitas Negeri Surabaya, email: lydiarohmawati@unesa.ac.id

Abstrak

Ketersediaan energi fosil berbanding terbalik dengan peningkatan konsumsi listrik di Indonesia. Kondisi tersebut mendorong sebuah inovasi agar energi listrik tetap tersedia. Sinar matahari dapat menjadi salah satu alternatif pilihan yang dikonversi menjadi listrik yang dikenal dengan sel surya. Dye-Sensitized Solar Cells (DSSC) merupakan generasi ke-3 dari sel surya organik yang ditemukan oleh Michael Graetzel pada tahun 1991. Prinsip kerja DSSC adalah zat warna dari bahan alam untuk dapat meningkatkan luas celah pita semikonduktor. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui potensi pemanfaatan ekstrak wortel (*Dauzus carrot L),* beras ketan hitam (*Oryza sativa. Var. Glutinosa),* dan daun kelor (*Moringa olifera)* dengan penambahan tembaga dengan variasi 1-4 g untuk meningkatkan efisiensi DSSC. Spektrofotometer UV-Vis dan voltametri siklik digunakan untuk menganalisis sifat tembaga yang ditambahkan ke dalam larutan *dye* untuk mengukur potensi molekul pewarna sebagai *sensitizer* pada DSSC. Berdasarkan hasil karakterisasi UV-Vis dan voltametri siklik pada sampel 5 yakni pada larutan *dye* dengan penambahan 4 g tembaga maka didapatkan nilai absorbansi tertinggi sebesar 0.875 a.u. pada panjang gelombang 432 nm dan nilai energi gap sebesar 0.77063 eV. Fabrikasi DSSC dibuat menggunakan sistem *sandwich* yang terdiri dari elektroda kerja berupa kaca yang dilapisi TiO_2 dan direndam pada larutan *dye*, larutan elektrolit, serta elektroda referensi berupa karbon. Sistem kerja pendeposisian pasta TiO_2 diatas kaca ITO dengan menggunakan metode *doctor blade* sehingga didapatkan efisiensi DSSC sebesar 0.63 %. Dengan demikian, penggunaan bahan alami dengan penambahan tembaga sebagai *dye-sensitizer* dapat digunakan sebagai pengganti pewarna sintetis

Kata Kunci: Wortel (*Dauzus carrot L),* Beras ketan hitam (*Oryza sativa. Var. Glutinosa),* Daun kelor (*Moringa olifera)*, Tembaga, DSSC.

Abstract

The availability of fossil energy is inversely proportional to the increase in electricity consumption in Indonesia. These conditions encourage innovation so that electrical energy remains available. Sunlight can be an alternative option converted into electricity, known as solar cells. Dye-Sensitized Solar Cells (DSSC) are the 3rd generation of organic solar cells discovered by Michael Graetzel in 1991. The working principle of DSSC is to use dyes from natural materials to increase the area of the semiconductor band gap. This research aims to determine the potential for utilizing carrot extract *(Dauzus carrot L)*, black sticky rice *(Oryza sativa. Var. Glutinosa)*, and moringa leaves *(Moringa olifera)* with the addition of copper with variations of 1-4 g to increase DSSC efficiency. UV-Vis spectrophotometer and cyclic voltammetry were used to analyze the properties of copper added to the dye solution to measure the dye molecule's potential as a DSSC sensitizer. Based on the results of UV-Vis characterization and cyclic voltammetry on sample 5, namely the dye solution with the addition of 4 g of copper, the highest absorbance value was obtained at 0.875 au at a wavelength of 432 nm and a gap energy value of 0.77063 eV. DSSC fabrication uses a sandwich system consisting of a working electrode in the form of glass coated with TiO2 and immersed in a dye solution, electrolyte solution, and a reference electrode in the form of carbon. The working system for the deposition of TiO2 paste on ITO glass uses the doctor blade method to obtain a DSSC efficiency of 0.63%. Thus, the use of natural ingredients.

Keywords: Carrots *(Dauzus carrot L)*, Black sticky rice *(Oryza sativa. Var. Glutinosa)*, Moringa leaves *(Moringa olifera)*, Copper, DSSC.

I. PENDAHULUAN

Meningkatnya kebutuhan energi listrik saat ini berdampak pada menipisnya ketersediaan sumber daya energi fosil dikarenakan sekitar 87% sumber energi dunia berasal dari fosil. Sumber energi terbarukan seperti sel surya berbahan semikonduktor berbasis silikon monokristalin yang memiliki efisiensi sebesar 20% juga telah dikembangkan peneliti, akan tetapi biaya yang mahal serta menggunakan bahan kimia yang berbahaya menjadi kendala dalam pengembangan dan fabrikasinya (Das *et al*., 2020). *Dye Sensitized Solar Cell* (DSSC) merupakan panel surya generasi ketiga yang menarik perhatian dikalangan industri karena menawarkan solusi energi terbarukan dengan tingkat polusi rendah dan ramah lingkungan. Namun, DSSC memiliki kelemahan yang terletak pada jenis larutan *dye* yang digunakan yaitu ruthenium. Meskipun ruthenium memiliki nilai konversi energi yang tinggi mencapai 13%, jumlah yang terbatas di alam dan mahal menjadi pertimbangan untuk diaplikasikan pada DSSC dalam skala besar (Khan *et al*., 2020). Dengan demikian, perlu alternatif terkait larutan *dye* tersebut. Pigmen (klorofil, karotenoid, antosianin, lutein, rutin, dan betalain) yang diekstraksi dari berbagai bagian tumbuhan, seperti bunga, buah, dan daun dapat digunakan sebagai sensitizer dalam DSSC (Gode & Balpinar, 2023).

Seiring berkembangnya zaman, ekstrak bahan alam dapat digunakan sebagai *dye sensitizer* pada DSSC. Bahan alam yang digunakan yakni wortel (*Dauzus carrot L),* beras ketan hitam (*Oryza sativa. Var. Glutinosa),* dan daun kelor (*Moringa olifera).* Diketahui kandungan beta karoten pada tanaman wortel sebesar 19.6 mg/100 g, antosianin pada ketan hitam sebesar109.52-256.61 mg/100 g, dan kandungan klorofil pada daun kelor sebesar 8.087 mg/100 g (Sharma *et al*., 2022; Zhuang *et al*., 2021; Brown *et al*., 2022). Berdasarkan data tersebut, maka penelitian ini dilakukan dengan menambahkan logam tembaga pada larutan *dye* untuk menggantikan pewarna sintetis pada DSSC. Menurut penelitian yang dilakukan Das *et al*, (2020) doping tembaga pada larutan *dye* dapat meningkatkan nilai efisiensi pada DSSC hingga 0.25%. Hal ini dikarenakan sifat alami tembaga yang dapat meningkatkan efisiensi penangkapan cahaya dari larutan *dye* serta mengurangi celah pita energi dari 3.37 eV-3.129 eV (Esgin *et al*., 2023). Berdasarkan hal tersebut dilakukanlah penelitian dengan mencampurkan ekstrak wortel (*Dauzus carrot L),* beras ketan hitam (*Oryza sativa. Var. Glutinosa),* dan daun kelor (*Moringa olifera)* dengan tembaga sebagai *dye sensitizer* alami yang diharapkan dapat meningkatkan efisiensi pada DSSC dengan baik dan memiliki karakteristik yang sama dengan *dye* sintetis.

II. METODE

A. Rancangan Penelitian

Alat dan Bahan

Alat-alat utama yang digunakan dalam penelitian ini, yaitu: gelas kimia, gelas ukur, gelas beaker, labu erlenmeyer, pipet, spatula, corong pisah, selotip, penjepit, *magnetic bar* 1 cm, *magnetic stirrer,* dan multimeter. Selain itu, bahan-bahan yang diperlukan dalam penelitian ini antara lain wortel (*Dauzus carrot L),* beras ketan hitam (*Oryza sativa. Var. Glutinosa),* dan daun kelor (*Moringa olifera)*, etanol (CIMS 96%.), $CuSO_4.5H_2O$ (CIMS 249.68 g/mol), air distilasi, TiO_2 (CIMS, 100 g.), asam asetat (FULLTIME 12.5%), KI (CIMS 0.5M), KCl (CIMS 3M), asetonitril (EMSURE, 50 ml), iodine (EMSURE 0,05M), pensil 6B, PVA (HIMEDIA) dan kaca ITO (ALDRICH 8-12 Cv-Sq).

Maserasi 3 Bahan Alam

Ekstraksi *Daucus carrot L, Oryza sativa Var. Glutinosa,* dan *Moringa oleifera* dilakukan dengan menimbang masing-masing bahan dengan berat 100 g kemudian melarutkan 200 ml etanol ke dalam gelas kimia. Setelah itu sampel ditutup rapat menggunakan alumunium foil dan didiamkan pada ruangan gelap selama 7 hari. Maserat kemudian dipisahkan antra ekstrak dan endapan menggunakan kertas saring sehingga didapatkan hasil ekstrak zat warna dari ketiga bahan tersebut (Wahyuni & Setiarso, 2022).

Pembuatan Pasta TiO2 daan Pelapisan pada Kaca ITO

Langkah pertama sebelum pembuatan DSSC adalah persiapan pasta TiO_2, yakni dengan mencampurkan 3 g PVA kedalam 30 mL air suling hingga homogen dan menambahkan 3 g serbuk TiO_2 hingga terbentuk pasta atau koloid. Selanjutnya siapkan kaca ITO dan lapisi dengan pasta TiO_2 kemudian didiamkan selama 24 jam. Setelah itu kaca ITO dipanaskan diatas *hotplate* dengan suhu 450℃ selama 10 menit untuk meningkatkan daya rekat TiO_2 pada kaca ITO (Bera *et al.,* 2021).

Persiapan dan Perendaman Kaca ITO dalam Larutan Pewarna

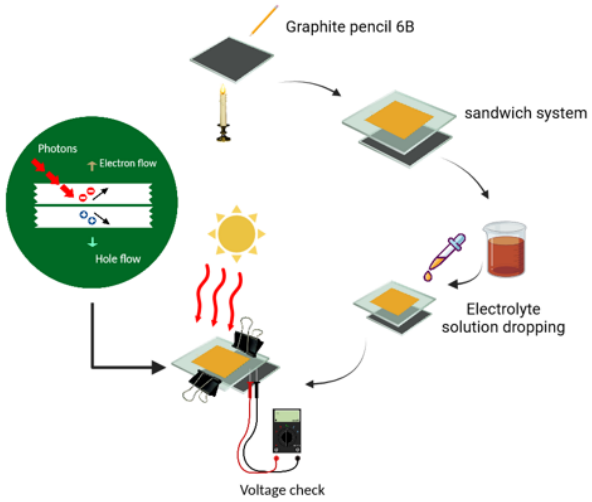
Setelah membuat pasta TiO_2, proses kedua adalah mencampurkan ekstrak *dye Daucus carrot L, Oryza sativa Var. Glutinosa,* dan *Moringa oleifera* dengan perbandingan 1:1:1 dan diaduk hingga larutan menjadi homogen. Setelah itu larutan tersebut dicampurkan dengan tembaga dengan perbandingan 1:1. Setelah larutan *dye* telah selesai maka proses selanjutnya adalah perendaman kaca ITO yang telah dilapisi TiO_2 selama 12 jam (Andari, 2020).

Pembuatan Larutan Elektrolit

Pembuatan larutan elektrolit I^-/I^{3-} dimulai dengan mencampurkan 0.8 g potassium iodida (KI 0.5 M) yang dilarutkan ke dalam 10 mL asetonitril hingga homogen. Setelah itu, ditambahkan 0.127 g iodine (I2 0.05M) ke dalam larutan dan diaduk hingga tercampur merata (Dhamodharan *et al*., 2021).

Konstruksi DSSC

Setelah semua persiapan selesai, langkah selanjutnya adalah proses kontruksi DSSC. Langkah pertama yaitu membuat elektroda pembanding dari grafit pensil 6B yang diarsir pada bagian konduktif kaca ITO secara merata dan dibakar di atas nyala api lilin. Kontruksi DSSC menggunakan sistem sandwich pada kedua bagian kaca ITO yang telah dilapisi kaca pasta TiO_2 dan grafit dari pensil 6B. Setelah itu, larutan elektrolit diteteskan diantara kedua kaca ITO yang telah dijepit menggunakan penjepit kertas (Andari, 2020). Setelah proses kontruksi telah selesai, maka dilakukanlah proses pengujian arus-tegangan (I-V) menggunakan multimeter pada rangkaian DSSC yang ditunjukan pada **Gambar 1**.



Gambar 1. Konstruksi DSSC

B. Variabel Operasional Penelitian

Jenis wortel, beras ketan hitam, dan daun kelor, pelarut ekstraksi, metode ekstraksi, kombinasi ekstrak wortel, beras ketan hitam, dan daun kelor 1:1:1, jenis tembaga, pelarut tembaga sebagai variabel kontrol. Konsentrasi larutan tembaga 0M; 0,05M; 0,1M; 0,15M; dan 0,2M sebagai variabel manipulasi. Panjang gelombang, HOMO-LUMO, *bandgap*, dan arus-tegangan pada DSSC sebagai variabel respon.

C. Teknik Pengumpulan Data

Pengujian spektrofotometer UV-Vis dilakukan pada larutan dengan range 400-700 nm pada satu sampel *dye* murni dan empat sampel *dye* dengan penambahan tembaga pada masing-masing sampel secara berurutan 1 g; 2 g; 3 g; dan 4 g. Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui puncak absorbansi dan puncak gelombang beta karoten, antosianin, dan klorfil pada larutan *dye* dengan penambahan tembaga. Kemudian, dilakukan uji Cyclic Voltammetry (CV) VersaStat II Princeton Applied Research yang dilakukan menggunakan elektroda kerja Au, elektroda pembanding Ag/AgCl, dan Pt sebagai elektroda bantu. Analisis ini dilakukan dengan *scan rate* 50 mV s^{-1}, mencakup rentang tegangan dari -0.6 V hingga +1.2 V. Preparasi sampel dalam uji Cyclic Voltammetry (CV) yang digunakan adalah 10 ml KCl 3M dan 10 ml ekstrak *dye*. Efisiensi DSSC dapat diukur dengan mengamati karakteristik arus-tegangan (I-V). Berdasarkan data karakteristik dapat diketahui parameter dari DSSC, antara lain tegangan rangkaian terbuka (V_{oc}), arus hubung singkat (I_{sc}), tegangan maksimum (V_{max}), arus maksimum (I_{max}), daya maksimum (P_{max}), fill factor (FF), dan efisiensi konversi (η).

D. Teknik Pengolahan Data

Nilai puncak serapan larutan *dye* hasil pengujian spektrofotometer UV-Vis diolah menggunakan *software Origin Lab 2023* dan *UV-Probe*. Nilai *bandgap* terendah pada kelima sampel yang diketahui dari nilai HOMO-LUMO larutan. HOMO-LUMO dari pengujian *Cyclic Voltammetry* dapat dihitung dengan menggunakan persamaan (1) dan (2), sedangkan untuk energi gap dapat dihitung menggunakan persamaan (3) (Sova & Setiarso, 2021).

$$E_{HOMO} = -e + (E_{Ox} + 4.40)\ eV \quad (1)$$

$$E_{LUMO} = -e + (E_{Red} + 4.40)\ eV \quad (2)$$

$$E_{GAP} = E_{LUMO} - E_{HOMO} \quad (3)$$

Selanjutnya nilai efisiensi DSSC dihitung dengan menggunakan persamaan (4) (Das et al., 2020).

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_{in}} \times 100\% \quad (4)$$

P_{max} adalah daya maksimum yang dihasilkan DSSC dan P_{in} adalah sumber cahaya yang digunakan. Daya maksimum dapat diperoleh dengan menggunakan persamaan (5).

$$P_{max} = V_{max}.I_{max} = V_{OC}.I_{SC}.FF \quad (5)$$

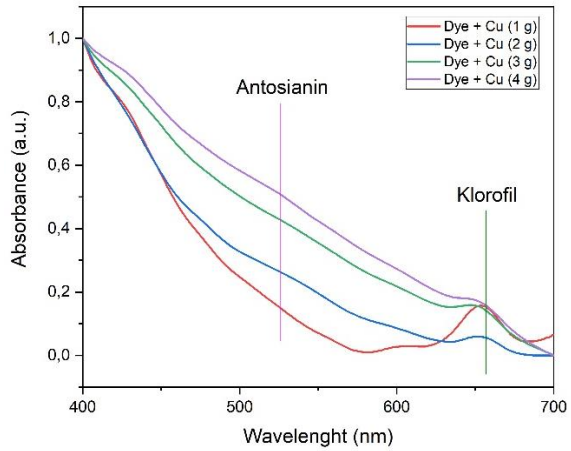
Dengan fill factor (FF) berdasarkan persamaan (6).

$$FF = \frac{V_{max}.I_{max}}{V_{OC}.I_{SC}} \quad (6)$$

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Spectrofotometer UV-Vis Larutan *Dye-Sensitizer*

Ekstrak *Daucus carrot L, Oryza sativa Var. Glutinosa,* dan *Moringa oleifera* digunakan sebagai pewarna DSSC setelah diketahui dan diukur kemampuannya dalam menyerap cahaya. Ekstrak *Moringa oleifera* memberikan larutan berwarna hijau yang mengindikasikan adanya senyawa klorofil. Ekstrak *Oryza sativa Var. Glutinosa* mengandung antosianin, sedangkan ekstrak wortel berwarna kuning kemerahan yang menandakan adanya beta karoten. Untuk mengetahui absorbansi dan panjang gelombang maksimum klorofil, beta karoten, dan antosianin pada larutan *dye.*

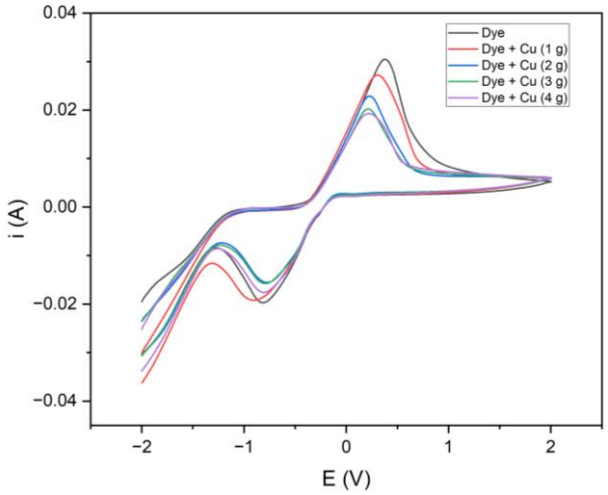


Gambar 2. Spektrum absorbansi spektrofotometri UV-VIS larutan pewarna dengan penambahan tembaga

Gambar 2 menunjukan data spektrum absorbansi larutan pewarna yang di analisis menggunakan spektrofotometri UV-Vis pada range 400-700 nm. Berdasarkan grafik dapat diketahui bahwa puncak gelombang berada pada kisaran 400-700 nm, yang mengindikasikan bahwa larutan *dye* memiliki kemampuan untuk menyerap cahaya tampak. Hasil tersebut sesuai dengan temuan sebelumnya yang menyatakan bahwa antosianin memiliki puncak serapan gelombang sekitar 450-580 nm, beta karoten sekitar 400-500 nm, dan pigmen klorofil berada pada panjang gelombang 400-700 nm (Nandiyanto *et al.*, 2023). Hasil uji pada gambar 2 merupakan data panjang gelombang maksimum larutan *dye* setelah penambahan dengan variabel manipulasi tembaga 1 g; 2 g; 3 g; 4 g yang menghasilkan tiga puncak panjang gelombang maksimum yang disebabkan oleh senyawa antosianin, beta karoten, dan klorofil. Puncak panjang gelombang antosianin berada pada 529 nm. Beta karoten berada pada puncak panjang gelombang 442 nm dan klorofil berada pada puncak panjang gelombang 663 nm. Nilai absorbansi tertinggi terdapat pada sampel larutan *dye* dengan penambahan 4 g tembaga. Puncak serapan berada pada 432 nm dengan nilai absorbansi 0.875 a.u. Hal ini dipengaruhi oleh kandungan antosianin, beta karoten, dan klorofil yang memperluas daerah penyerapan cahaya secara signifikan. Absorbansi molekul *dye* pada permukaan DSSC dapat menyebabkan elektron terstimulasi dari pita valensi ke pita konduksi pada TiO_2 sehingga dapat menghasilkan arus listrik (Nirmalasari *et al.*, 2022; Nugraha & Susanti, 2015).

B. *Cyclic Voltammetry* Larutan *Dye-Sensitizer*

Pada Dye Sensitized Solar Cell (DSSC) nilai HOMO dari molekul *dye* harus lebih rendah dari potensial redoks elektrolit dan pita konduksinya, sedangkan nilai LUMO harus lebih tinggi dari pita konduksi semikonduktor (Hariningtias & Setiarso, 2021). Tingkat energi LUMO sangat penting karena energi LUMO diperlukan dalam proses penginjeksian elektron ke dalam pita konduksi ZnO (dalam hal ini sebagai fotoelektroda). Tingkat energi LUMO yang relatif rendah pada pewarna (*dye*) berbanding lurus dengan celah pita konduksi ZnO, mengakibatkan peningkatan nilai efektifitas pewarna (*dye*) dalam proses penginjeksian elektron ke dalam semikonduktor ZnO (Sova & Setiarso, 2021). Oleh karena itu dilakukanlah pengujian elektrokimia *Cyclic Voltammetry* pada pada larutan *dye-sensitizer* dengan rentang potensial -2 V hingga +2 V, *scan rate* 100 mV/s, dan KCL sebagai larutan elektrolit yang ditunjukan pada **Gambar 3**.



Gambar 3. Hasil uji voltametri siklik larutan pewarna dengan variasi penambahan tembaga

Pada **Gambar 3** nilai HOMO dan LUMO dari molekul zat warna ditunjukan dalam proses karakterisasi elektrokimia. HOMO dan LUMO dari molekul zat warna merupakan hal yang penting. HOMO terlibat dalam proses oksidasi, sedangkan LUMO terlibat dalam proses reduksi larutan. Dalam konteks DSSC, nilai HOMO dari molekul *dye* harus lebih rendah dari potensial redoks elektrolit dan pita konduksi. Namun, nilai LUMO harus lebih tinggi dari pita konduksi semikonduktor. Tingkat energi LUMO sangat penting karena energi LUMO diperlukan untuk menginjeksikan elektron ke dalam pita konduksi TiO_2, semakin dekat energi LUMO pewarna maka akan semakin efektif untuk menginjeksikan elektron ke dalam semikonduktor TiO_2. Dari data tentang HOMO dan LUMO ini energi gap dapat diketahui dari selisih antara nilai HOMO dan LUMO ditunjukan pada **Tabel 1**.

Tabel 1. Nilai HOMO LUMO dan energi gap larutan pewarna dengan penambahan variasi berat tembaga

Ekstrak *Dye* (ml)	Cu (g)	LUMO (eV)	HOMO (eV)	Eg (eV)
10	-	-3.58035	-4.79557	1.21522
10	1	-3.50397	-4.71235	1.20265
10	2	-3.62937	-4.63597	1.00660
10	3	-3.61569	-4.62229	1.00660
10	4	-3.62937	-4.59379	0.77063

Berdasarkan **Tabel 1** data nilai HOMO, LUMO, dan celah pita energi larutan *dye* dengan beberapa variasi penambahan berat tembaga. Diketahui sampel larutan *dye* dengan penambahan 4 g tembaga memiliki celah energi paling rendah, yaitu 0.77063 eV sehingga memiliki peforma terbaik sebagai sensitizer. Hal ini disebabkan oleh tembaga ketika didoping pada larutan *dye* dapat menurunkan celah pita energi 3.37 eV-3.129 eV. Karena proses transfer elektron ketika energi foton pada proses fotovoltaik tidak membutuhkan energi yang besar, molekul dye dengan celah energi yang lebih kecil memiliki peluang yang lebih dalam proses difusi elektron dari pita valensi ke pita konduksi. Semakin mudah elektron tereksitasi berbanding lurus dengan banyaknya elektron yang mengalir dapat meningkatkan sifat listrik yang dihasilkan dan semakin kecil celah pita dalam campuran larutan *dye* dengan tembaga maka semakin mudah proses eksitasi elektron pewarna dari pita valensi ke pita konduksi, sehingga kualitas *dye-sensitizer* akan semakin baik (Liu *et al*, 2018).

C. Arus-Tegangan (J-V) pada DSSC

Pembuatan DSSC menggunakan metode *sandwich,* dimulai dengan menyusun kaca ITO (Indium Tin Oxide) yang telah dilapisi pasta TiO_2 dan direndam dalam larutan *dye* yang telah di campur dengan larutan hasil filtrasi 4 g tembaga dengan sumber karbon yang diarsis pada bagian konduktif kaca ITO (Indium Tin Oxide) menggunakan grafit 6B hingga merata yang telah dibakar diatas lilin hingga jelaga menutupi

permukaan konduktif kaca ITO (Indium Tin Oxide). Hasil yang didapatkan pada multimeter menunjukan bahwa V_{oc} = 8.2 mV dan V_{max} = 25.1 mV. Nilai tegangan tersebut mempengaruhi nilai efisiensi DSSC. Berdasarkan hasil pengukuran nilai arus dan tegangan (I-V) maka diperoleh parameter DSSC seperti pada Tabel 2 berikut ini.

Tabel 2. Hasil pengujian arus-tegangan larutan *dye* dengan penambahan 4 g tembaga

Dye	V_{oc} (mV)	I_{sc} (mA)	V_{max} (mV)	I_{max} (mA)	P_{max} (mW)	FF	Ƞ (%)
Dye + Cu 4 gram	8.2	0.98×10^{-3}	25.1	2.5×10^{-3}	6.3×10^{-2}	0.214	0.63

Berdasarkan data **Tabel 2** diketahui bahwa penambahan 4 g tembaga pada larutan *dye* akan meningkatkan efisiensi DSSC. Efisiensi yang didapatkan yaitu sebesar 0.63%. Hasil nilai efisiensi juga dibandingkan dengan temuan sebelumnya dengan beta karoten sebagai *dye-sensitizer* dengan nilai efisiensi yang didapatkan sebesar 0.091%, nilai efisiensi antosianin sebagai *dye-sensitizer* sebesar 0.028%, dan nilai efisiensi klorofil sebagai *dye-sensitizer* pada 4000 lux sebesar 0.0001697% (sova). Berdasarkan hasil data tersebut, sampel 5 merupakan hasil terbaik sebagai *dye-sensitizer* pada DSSC karena dapat meningkatkan efisiensi hingga 0.63%. Hal ini juga diperkuat dengan hasil uji karakterisasi UV-Vis dan voltametri siklik yaitu nilai absorbansi sebesar 0.8 a.u. dan celah energi 0.77063 eV pada larutan *dye* dengan penambahan 4 g tembaga.

IV. PENUTUP

A. Simpulan

Berdasarkan riset yang telah dilakukan, maka dapat dipastikan riset telah berhasil dilakukan. Hasil terbaik terdapat pada sampel 5 yaitu ekstrak *dye* dengan penambahan tembaga 4 g dengan nilai absorbansi sebesar 0.875 a.u. pada panjang gelombang 432 nm. Hal tersebut juga berkaitan dengan nilai *bandgap* sebesar 0.77063 eV, sehingga memiliki peforma terbaik sebagai sensitizer karena pada proses fotovoltaik energi foton akan mudah terdifusi dari pita valensi ke pita konduksi, sehingga didapatkan efisiensi DSSC sebesar 0.63 %. Dengan demikian, penggunaan bahan alami dengan penambahan tembaga sebagai *dye-sensitizer* dapat digunakan sebagai pengganti pewarna sintetis

B. Saran

Sebaiknya pada penelitian selanjutnya diharapkan dalam proses metode pendeplesian menggunakan metode *doctor blade* untuk mengontrol ketebalan dan ketinggian semikonduktor pada fotoanoda DSSC.

DAFTAR PUSTAKA

Andari, R. 2020. Pengaruh Variasi Jarak Sumber Cahaya terhadap Kinerja Dye Sensitized Solar Cell (DSSC) Menggunakan Ekstrak Antosianin Bunga Rosella. *Jurnal Ahli Muda Indonesia*, *1*(3), 23–30.

Bera, S., Sengupta, D., Roy, S. & Mukherjee, K. 2021. Research into dye-sensitized solar cells: a review highlighting progress in India. *Journal of Physics: Energy*, *3*(3), p.032013.

Brown, L.A., Williams, O. & Dash, J. 2022. Calibration and characterisation of four chlorophyll meters and transmittance spectroscopy for non-destructive estimation of forest leaf chlorophyll concentration. *Agricultural and Forest Meteorology*, *323*, p.109059.

Das, A., Wary, R.R. & Nair, R.G. 2020. Cu modified ZnO nanoflakes: An efficient visible light-driven photocatalyst and a promising photoanode for dye sensitized solar cell (DSSC). *Solid State Sciences*, *104*, p.106290.

Dhamodharan, P., Chen, J. & Manoharan, C. 2021. Fabrication of in doped ZnO thin films by spray pyrolysis as photoanode in DSSCs. *Surfaces and Interfaces*, *23*, p.100965.

Esakki, E.S., Deepa, G., Vivek, P., Devi, L.R., Sheeba, N.L. & Sundar, S.M. 2023. Investigation on electrochemical analysis of ZnO nanoparticles and its performance for dye-sensitized solar cells using various natural dyes. *Journal of the Indian Chemical Society*, *100*(2), p.100889.

Esgin, H., Caglar, Y. & Caglar, M. 2022. Photovoltaic performance and physical characterization of Cu doped ZnO nanopowders as photoanode for DSSC. *Journal of Alloys and Compounds*, *890*, p.161848.

Ge, Z., Wang, C., Chen, T., Chen, Z., Wang, T., Guo, L., Qi, G. & Liu, J. 2021. Preparation of Cu-doped ZnO nanoparticles via layered double hydroxide and application for dye-sensitized solar cells. *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, *150*, p.109833.

Göde, F. & Balpınar, N. 2023. Dye-sensitized solar cells fabricated using ZnO: Cu thin films and dye extracted from Hypericum perforatum L. flowers. *Digest Journal of Nanomaterials and Biostructures*, *18*(1), pp.389-402.

Hariningtias, E.R. & Setiarso, P. 2021. Potensi ekstrak daun salam (syzygium polyanthum) pada ph asam sebagai sensitizer pada dye sensitized solar cell (DSSC). *Jurnal Kimia Riset*, *6*(2), p.109.

Kandasamy, M., Husain, A., Suresh, S., Giri, J., Jasim, D.J., Rameshkumar, P., Al-Lohedan, H.A., Thambidurai, S., Kumar, N., Ansari, M.N.M. & Murugesan, S. 2024. Enhanced dye-sensitized solar cell performance and electrochemical capacitive behavior of bi-functional ZnO/NiO/Co3O4 ternary nanocomposite prepared by chemical co-precipitation method. *Journal of Science: Advanced Materials and Devices*, *9*(2), p.100726.

Khan, M.M., Harunsani, M.H., Tan, A.L., Hojamberdiev, M., Poi, Y.A., Ahmad, N. 2020. Antibacterial studies of ZnO and Cu-doped ZnO nanoparticles synthesized using aqueous leaf extract of Stachytarpheta jamaicensis. *BioNanoScience*, *10*, pp.1037-1048.

Liu, Q., Gao, N., Liu, D., Liu, J. & Li, Y. 2018. Structure and photoelectrical properties of natural photoactive dyes for solar cells. *Applied Sciences*, *8*(9), p.1697.

Nandiyanto, A.B.D., Ragadhita, R. & Aziz, M. 2023. How to calculate and measure solution concentration using UV-vis spectrum analysis: Supporting measurement in the chemical decomposition, photocatalysis, phytoremediation, and adsorption process. *Indonesian Journal of Science and Technology*, *8*(2), pp.345-362.

Nirmalasari, I., Nugrahani, R.A. & Budiyanto, B. 2022. Peningkatan Efisiensi Dye Sentisized Solar Cell (DSSC) dari Antosianin Kulit Manggis (Garcinia mangostana L) Menggunakan Papain. *Chimica et Natura Acta*, *10*(2), pp.88-93.

Nugraha, W.T. & Susanti, D. 2015. Analisis Pengaruh Susunan Komposit Laminat Graphene-TiO2 sebagai Lapisan Semikonduktor terhadap Unjuk Kerja Dye Sensitized Solar Cell (DSSC). *Jurnal Teknik ITS (SINTA: 4, IF: 1.1815)*, *4*(1), pp. F66-F71.

Sharma, S., Fiave, P.A. & Nelissen, K. 2018. Functional MRI responses to passive, active, and observed touch in somatosensory and insular cortices of the macaque monkey. *Journal of Neuroscience*, *38*(15), pp.3689-3707.

Sova, R.R. & Setiarso, P. 2021. Studi Elektrokimia Klorofil dan Antosianin Sebagai Fotosensitizer DSSC (Dye-Sensitized Solar Cell). *Unesa Journal of Chemistry*, *10*(2), pp.191-199.

Wahyuni, I.T. & Setiarso, P. 2022. Karakterisasi Elektrokimia Ekstrak Klorofil dari Daun Salam (Syzgium polyanthum) pada pH Basa sebagai Sensitizer pada Dye Sensitized Solar Cell (DSSC). *ALCHEMY: Journal of Chemistry*, 10(2), pp.41-47.

Zhuang, J., Zhou, L., Wang, Y. & Chi, Y. 2021. Nitrogen allocation regulates the relationship between maximum carboxylation rate and chlorophyll content along the vertical gradient of subtropical forest canopy. *Agricultural and Forest Meteorology*, *307*, p.108512.