

PREPARASI SEL SURYA TERSENSITISASI DYE (DSSC) DARI EKSTRAK KULIT UBI JALAR UNGU (*Ipomoea batatas* L.)

Aisyah^{1*}, Jusnia¹, Arfiani Nur¹, A. Nurfitriani Abubakar², Iswadi Ibrahim Patunrengi^{3,4}

¹Program Studi Kimia

Fakultas Sains dan Teknologi Universitas Islam Negeri Alauddin Makassar
Jl. H.M.Yasin Limpo No. 36, Gowa, Sulawesi Selatan, Indonesia. 92118.

*E-mail: aisyah@uin-alauddin.ac.id

²Program Studi Kimia

Fakultas MIPA dan Sains Universitas Muhammadiyah Bulukumba
Jl. Ir. Sukarno No. 9 Bulukumba, Sulawesi Selatan, Indonesia. 92561.

³Program Studi Fisika

Fakultas Sains dan Teknologi Universitas Islam Negeri Alauddin Makassar
Jl. H.M.Yasin Limpo No. 36, Gowa, Sulawesi Selatan, Indonesia. 92118.

⁴Physics Department

Faculty of Science and Technology King Abdulaziz University
Abdulla Alsulaiman Rd, Jeddah, Saudi Arabia. 80200

Abstrak: Berbagai zat warna alami telah dieksplorasi untuk aplikasi *Dye-Sensitized Solar Cell*, salah satunya ekstrak etanol kulit ubi jalar ungu. Ekstrak etanol kulit ubi jalar ungu (*Ipomoea batatas* L.) umumnya digunakan sebagai dye pada semikonduktor TiO₂. Penelitian ini bertujuan untuk membandingkan nilai efisiensi DSSC sehingga diperoleh nilai konversi energi sinar matahari menjadi listrik yang tertinggi. Metode penelitian yaitu zat warna diekstraksi bertahap dengan tiga pelarut dengan kepolaran bertingkat yaitu n-heksana, etil asetat dan metanol. Masing masing ekstrak dan campurannya digunakan sebagai *sensitizer* pada DSSC. Kinerja DSSC dikaji berdasarkan data analisis fitokimia, spektrum UV-Vis, FTIR dan morfologi semikonduktor dengan analisis SEM. Hasil yang diperoleh menunjukkan bahwa DSSC yang tersensitasi ekstrak campuran menghasilkan nilai efisiensi tertinggi sebesar 0,10 dengan nilai V_{max} dan I_{max} sebesar 276mV dan 25,7mA.

Kata Kunci: *dye-sensitized solar cell*; efisiensi DSSC; *Ipomoea batatas* L.; semikonduktor; TiO₂

Abstract: Various dyes have been investigated for Dye-Sensitized Solar Cell application, one of them is the ethanol extract of purple sweet potato peels. Ethanol extract from peels of purple sweet potato *Ipomoea batatas* L. is commonly used as a dye in TiO₂ semiconductors. This study aims to compare the efficiency value to obtain the highest solar energy conversion into electricity. The research method used is extracted stepwise by three solvents with graded polarity; n-hexane, ethyl acetate, and methanol. Each extract and the mixture are used as the sensitizers for DSSC. DSSC performance was studied based on the phytochemical analysis, UV-Vis and FTIR spectrum, and the semiconductor morphology by SEM analysis. The results obtained show that the mixed extract produced the highest cell efficiency of 0,10 with V_{max} and I_{max} values of 276 mV and 25,7 mA, respectively.

Keywords: DSSC efficiency; dye-sensitized solar cell; *Ipomoea batatas* L.; semiconductor; TiO₂

PENDAHULUAN

Sel surya saat ini berkembang menjadi salah satu energi terbarukan yang potensial, hal tersebut dikarenakan sel surya bersumber dari sinar matahari menjadikan kelimpahan sumber energinya sangat menjanjikan hingga dapat menjadi energi alternatif di daerah yang kekurangan pasokan energi listrik seperti daerah terpencil dan terluar Indonesia. Perkembangan fabrikasi sel surya telah melalui beberapa generasi. Generasi awal menggunakan kristal dan polikristal silikon (Dang et al., 2018; Schindler et al., 2018; Bhattacharya & John, 2019). Efisiensi tertinggi diperoleh dari generasi kedua yaitu *multijunction sel* (Yamaguchi et al., 2021; Baiju & Yarema, 2022). Kelemahan keduanya adalah pada bahan baku yang toksik dan biaya preparasi yang mahal. Generasi terbaru adalah *Dye-Sensitized Solar Cell* (DSSC). Dengan bahan baku sel dan pewarna yang berbasis bahan alam, DSSC diyakini lebih layak karena mudah difabrikasi dengan biaya yang relatif lebih murah serta lebih ramah lingkungan (Kavan, 2017; Bai et al., 2021).

Eksplorasi berbagai bahan alam telah dilakukan untuk mendapatkan performa DSSC terbaik. Ekstrak daun pacar kuku (henna) dan bit (Sathyajothi et al., 2017), campuran ekstrak buah maqui dan blackberry (Leyrer et al., 2018); bayam, bawang merah dan kol merah (Ammar et al., 2019); kulit terong ungu, kulit buah plum dan bunga kembang sepatu (Tractz et al., 2019), serta kulit batang tanaman secang, daun tarum dan pacar kuku (Patunrengi & Aisyah, 2020).

Ekstraksi zat warna dari simplisia tunggal atau campuran umumnya menggunakan satu pelarut yang bersifat polar seperti etanol atau metanol. Namun, pelarut lain pun dapat digunakan untuk menarik komponen kimia lainnya. Dua belas pelarut dengan kepolaran berbeda telah digunakan untuk mengekstrak kulit *Punica granatum* dan *Citrus reticulata* serta daun *Parquetina nigrescens*. Efisiensi sel terbaik diperoleh dari ekstrak air, aseton dan diklorometana (Adedokun et al., 2018). Ekstrak daun *Costus woodsonii* dipreparasi dari tiga macam pelarut yaitu metanol, etanol dan aseton dengan performa terbaik dihasilkan dari ekstrak aseton. (Najihah et al., 2022). Ini menunjukkan bahwa kepolaran pelarut pengeksrak memengaruhi nilai efisiensi DSSC.

Salah satu usaha yang dapat dilakukan untuk meningkatkan performa DSSC adalah dengan memaksimalkan penarikan komponen zat warna dari dalam simplisia. Senyawa-senyawa dengan struktur berbeda dalam suatu ekstrak berpotensi mengoptimalkan efek fotovoltaiik (Bhuiyan et al., 2021; Błaszczuk et al., 2021) melalui perbaikan pengikatan komponen zat warna pada TiO₂. Selain itu, dengan beragamnya komponen zat warna, maka penyerapan energi foton pada rentang UV dan sinar tampak dapat dimaksimalkan (Li et al., 2019). Metode ekstraksi yang digunakan adalah ekstraksi bertingkat menggunakan beberapa pelarut dengan kepolaran yang berbeda.

Berdasarkan hal tersebut, maka dilakukan penelitian yang bertujuan untuk mengetahui efisiensi sel dari ekstrak metanol, etil asetat, *n*-heksana dan campuran yang dikaji bersama dengan data hasil skrining fitokimia, spektrum FTIR, Uv-Vis dan SEM. Hasil yang diperoleh dapat digunakan untuk mendapatkan performa DSSC terbaik yang dapat dimanfaatkan sebagai energi alternatif.

METODE PENELITIAN

Ekstrak kulit ubi jalar ungu dan sel DSSC dipreparasi di Laboratorium Kimia Organik UIN Alauddin Makassar. Analisis FTIR dan UV-Vis dilakukan di Laboratorium Penelitian UIN Alauddin Makassar menggunakan spektrofotometer FTIR Nicolet iS10 dan spektrofotometer UV-Vis Varian Cary 50 Conc. Uji SEM di Laboratorium Mikrostruktur Universitas Negeri Makassar SEM Tescan Vega3SB. Alat lain yang digunakan dalam penelitian ini antara lain *rotary evaporator*, multimeter DT-680B, luxmeter, potensiometer, kaca TCO serta alat listrik dan alat gelas lainnya.

Simplisia dari kulit ubi jalar ungu diekstrak menggunakan pelarut metanol (C_2H_5OH) *p.a.*, etil asetat ($C_4H_8O_2$) *p.a.*, dan *n*-heksana (C_6H_{14}) *p.a.* Uji fitokimia dilakukan menggunakan pereaksi Dragendorff, Mayer, Lieberment-Burchard, Wagner, NaOH 10% dan $FeCl_3$ 5%. Semikonduktor DSSC dibuat dari pasta TiO_2 sedangkan elektrolitnya dari campuran KI/I_2 .

Prosedur penelitian dilakukan dengan tahapan sebagai berikut:

1. Ekstraksi kulit ubi jalar ungu

Serbuk kulit ubi jalar ungu diekstrak menggunakan metode maserasi bertingkat dengan tiga pelarut. Simplisia direndam terlebih dahulu dengan *n*-heksana selama 24 jam, 3 kali pergantian pelarut pada suhu ruang. Setelah filtrat diperoleh, ekstraksi terhadap residu dilanjutkan dengan pelarut etil asetat dan metanol dengan cara yang sama. Filtrat dari masing-masing pelarut dipekatkan dengan *rotary evaporator* pada suhu 40-50°C dan kecepatan putar 50 rpm hingga diperoleh ekstrak kental. Sebanyak 0,02 g dari setiap ekstrak diambil untuk digabungkan menjadi ekstrak campuran.

2. Karakterisasi komponen ekstrak

a. Uji fitokimia

Sebanyak 0,05 g ekstrak metanol diencerkan dengan 5 mL pelarut. Larutan sampel kemudian ditempatkan pada plat tetes lalu direaksikan dengan pereaksi NaOH 10%, $FeCl_3$ 5%, Dragendorff, Wagner, Mayer dan Lieberment-Burchard. Perubahan warna pada sampel diamati. Hal yang sama dilakukan terhadap ekstrak etil asetat dan *n*-heksana.

b. Analisis spektrofotometer UV-Vis

Sebanyak 0,0009 g ekstrak metanol dilarutkan dalam 5 mL pelarutnya lalu dimasukkan ke dalam kuvet. Selanjutnya kuvet dimasukkan ke dalam instrumen spektrofotometer UV-Vis. Hal yang sama dilakukan pada ekstrak etil asetat dan *n*-heksana. Data spektrum masing-masing sampel dianalisis.

c. Analisis spektrofotometer FTIR

Masing-masing sampel ekstrak dipreparasi sebanyak 0,002 g dengan cara digerus bersama KBr lalu dibentuk menjadi plat. Plat KBr lalu dimasukkan ke dalam kolom pelet dan disinari gelombang IR. Data spektrum masing-masing ekstrak dianalisis.

3. Preparasi Perangkat DSSC

Sebanyak kurang lebih 1 g TiO_2 *p.a* katalog 7508 dicampurkan dengan 5 mL etanol hingga membentuk pasta kental. Larutan elektrolit dibuat dengan melarutkan KI sebanyak 0,83 g, 0,217 g I_2 dan 10 mL aquadest. Elektroda pembanding dibuat dengan memanaskan kaca TCO yang sudah bersih di atas nyala lilin hingga membentuk lapisan karbon tipis berwarna hitam di permukaan kaca. Preparasi rangkaian DSSC diawali dengan melapiskan pasta TiO_2 pada permukaan kaca TCO sebagai elektroda kerja. Pasta disintering selama kurang lebih 30 menit di atas *hot plate* hingga permukaan TiO_2 memadat dan melekat baik pada permukaan kaca serta berubah warna dari putih mejadi

kecoklatan dan putih kembali. Lapisan pasta padat kemudian ditetesi dengan ekstrak sampel.

Elektroda kerja dan elektroda pembanding disatukan dengan penjepit kertas kemudian ditetesi larutan KI/I₂. Kedua elektroda dihubungkan dengan multimeter dan luxmeter lalu diradiasi di bawah sinar matahari. Nilai arus dan tegangan diamati selama beberapa saat hingga diperoleh nilai efisiensi sel maksimal. Nilai efisiensi sel diperoleh dari persamaan 1.

$$\eta = \frac{P_{\max}}{P_{in}} \times 100\% \quad (1)$$

P_{\max} adalah daya maksimum yang dihasilkan oleh DSSC. Daya maksimum diperoleh dari hubungan $P_{\max} = V_{\max} \times I_{\max}$. P_{in} adalah daya sumber cahaya (matahari), diperoleh dari luxmeter yang diambil saat proses pengambilan data.

4. Uji morfologi DSSC

DSSC dipreparasi dengan ukuran kaca TCO 0,5 cm x 0,5 cm. Prosedur preparasi yang sama dilakukan hingga tahap sintering dan penetasan ekstrak sampel dengan nilai efisiensi tertinggi.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Ekstrak kulit ubi jalar ungu diperoleh dengan metode ekstraksi bertingkat menggunakan pelarut dengan kepolaran berbeda, yaitu: *n*-heksan, etil asetat dan metanol. Hal ini dilakukan untuk memperoleh komponen zat warna sebanyak-banyaknya dari simplisia. Bobot dan nilai rendemen ekstrak dapat dilihat pada Tabel 1. Dari data ini terlihat bahwa ekstrak *n*-heksana diperoleh dengan rendemen paling tinggi.

Tabel 1. Nilai rendemen ekstrak ubi jalar ungu dengan pelarut yang berbeda

| Bobot Sampel (g) | Pelarut | Bobot Ekstrak (g) | Rendemen (%) |
|------------------|-------------------|-------------------|--------------|
| 300 | metanol | 7 | 2,3 |
| | etil asetat | 6 | 2 |
| | <i>n</i> -heksana | 20,9 | 6,9 |

Ketiga ekstrak selanjutnya dianalisis komponen senyawanya menggunakan uji fitokimia. Dari data hasil skrining fitokimia pada Tabel 2 terlihat bahwa semua ekstrak mengandung terpenoid dan sebaliknya tidak memiliki kandungan alkaloid. Sementara itu, flavonoid hanya ditemukan pada ekstrak metanol dan etil asetat. Kandungan zat warna pada ekstrak akan berpengaruh pada efisiensi ikatan dengan semikonduktor TiO₂ (Anselmi et al., 2012; Chen et al., 2020).

Tabel 2. Hasil skrining fitokimia ekstrak ubi jalar ungu.

| Jenis Ekstrak | Uji Terpenoid | Uji Flavonoid | Uji Alkaloid |
|--------------------|---------------|---------------|--------------|
| CH ₃ OH | + | + | - |
| EtOAc | + | + | - |
| <i>n</i> -heksana | + | - | - |

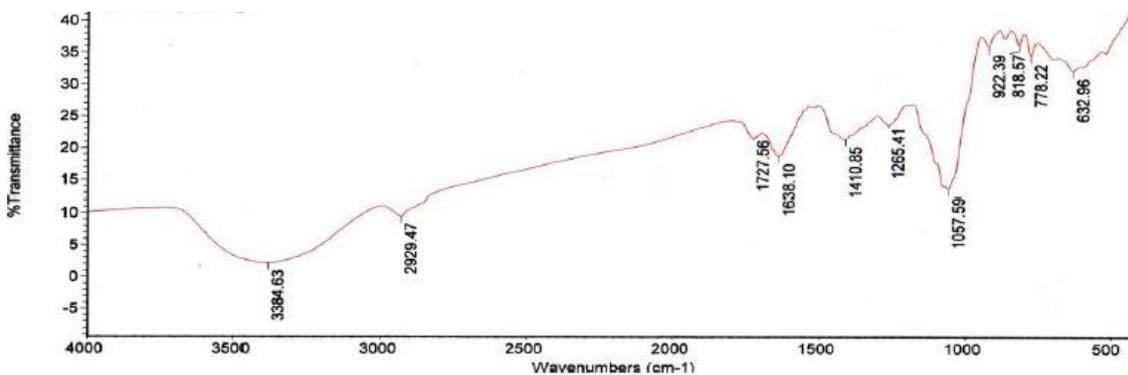
Nilai serapan dan panjang gelombang maksimal dari komponen zat warna dalam ekstrak ubi jalar ungu dapat dilihat pada Tabel 3. Ekstrak campuran diperoleh dari gabungan ekstrak metanol, etil asetat dan *n*-heksana dengan komposisi yang sama. Ekstrak campuran menyatukan semua komponen-komponen zat warna sehingga dihasilkan nilai absorbansi yang lebih maksimal. Tabel 3 menunjukkan bahwa nilai absorbansi dari ekstrak campuran menghasilkan serapan tertinggi sebesar 0,933 dengan

nilai λ_{maks} sebesar 269 nm. Dari ekstrak gabungan ini akan diperoleh serapan energi foton maksimal. yang dapat meningkatkan nilai efisiensi sel DSSC.

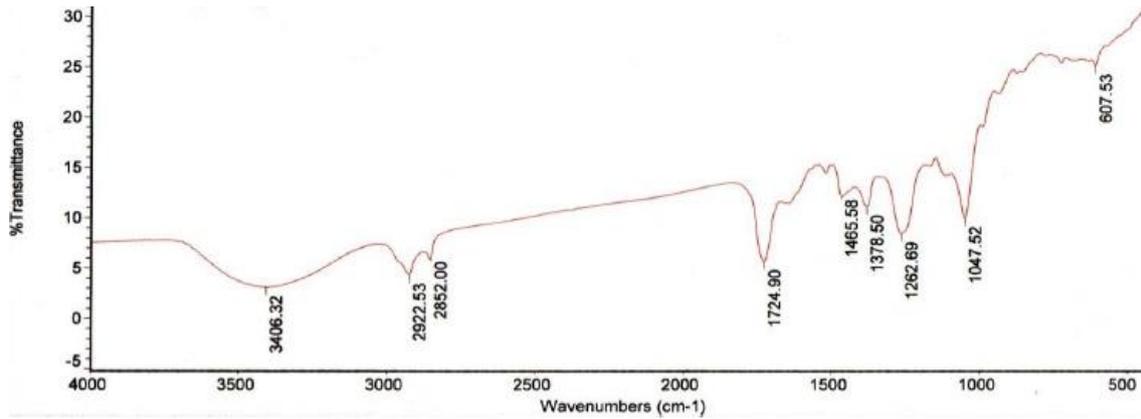
Tabel 3. Nilai absorbansi dan panjang gelombang maksimal ekstrak ubi jalar ungu dari spektrofotometer UV-Vis

| Jenis Ekstrak | λ_{maks} (nm) | Absorbansi |
|---------------|-----------------------|------------|
| Metanol | 327,0 | 0,722 |
| Etil asetat | 554,0 | 0,070 |
| n-heksan | 268,1 | 0,595 |
| campuran | 269,0 | 0,933 |

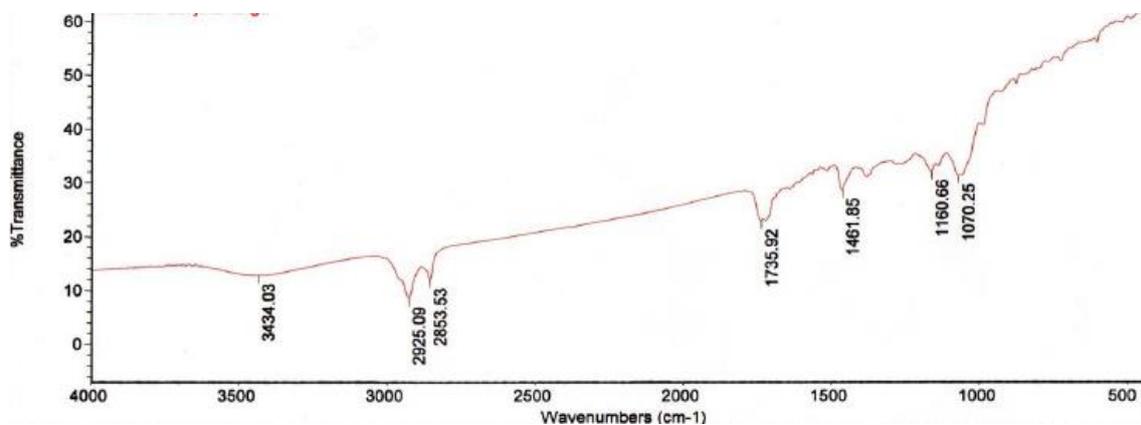
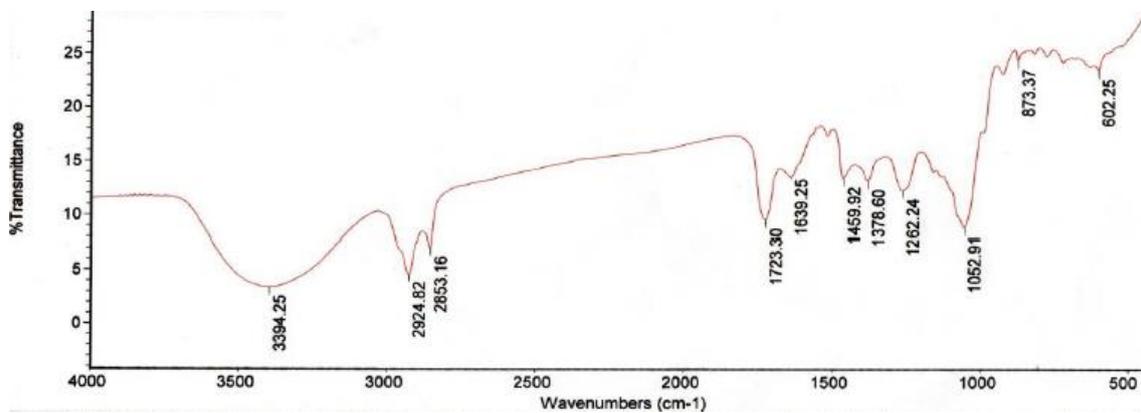
Gugus fungsi pada komponen zat warna sangat menentukan pengikatan maksimal antara zat warna dengan TiO_2 sebagai semikonduktor pada DSSC. Pengikatan yang baik akan menghasilkan serapan energi foton yang maksimal (Li et al., 2019). Secara umum, spektrum FTIR dari keempat ekstrak memperlihatkan pola yang sama, yaitu adanya pita melebar pada rentang $3000-3500\text{ cm}^{-1}$ yang menunjukkan adanya regang ikatan O-H. Vibrasi regang C-H sp_3 terlihat di bilangan gelombang $2850-2930\text{ cm}^{-1}$. Serapan untuk vibrasi regang C-O sp_2 terdeteksi pada bilangan gelombang $1720-1740\text{ cm}^{-1}$ mengidentifikasi adanya gugus karbonil. Namun, serapan untuk gugus karbonil terkonjugasi dengan bilangan gelombang $1629-1638\text{ cm}^{-1}$ hanya terlihat pada ekstrak metanol dan campuran dengan intensitas sedang. Pita ini tidak tampak pada spektrum ekstrak n-heksana. Serapan dari vibrasi tekukan keluar bidang C-H yang merupakan pita khas senyawa aromatik pada rentang $600-900\text{ cm}^{-1}$ juga terlihat pada semua ekstrak kecuali ekstrak n-heksana. Tidak adanya kedua pita khas ini bersesuaian dengan data uji fitokimia bahwa ekstrak n-heksana tidak mengandung senyawa golongan flavonoid yang kerangka dasarnya memiliki gugus karbonil terkonjugasi dan cincin aromatik. Spektrum FTIR keempat ekstrak dapat dilihat pada Gambar 1, 2, 3 dan 4.



Gambar 1. Spektrum FTIR dari ekstrak metanol kulit ubi jalar ungu.

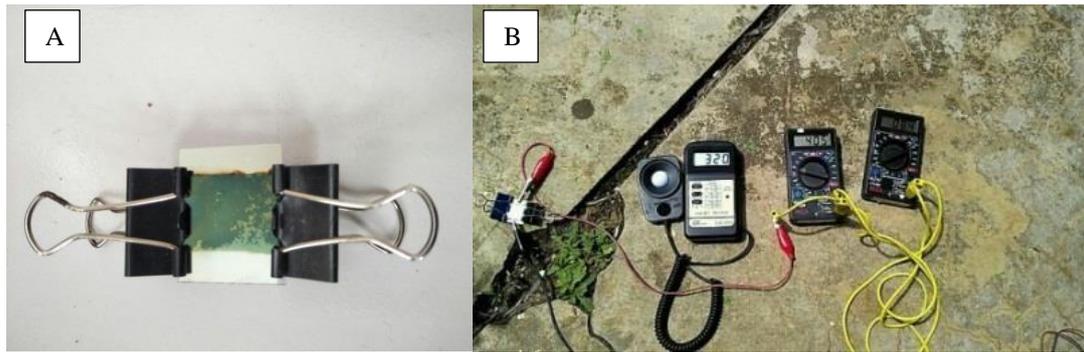


Gambar 2. Spektrum FTIR dari ekstrak etil asetat kulit ubi jalar ungu

Gambar 3. Spektrum FTIR dari ekstrak *n*-heksana kulit ubi jalar ungu

Gambar 4. Spektrum FTIR dari ekstrak campuran kulit ubi jalar ungu

DSSC dipreparasi dengan melapiskan pasta semikonduktor TiO_2 pada kaca elektroda TCO. Pasta TiO_2 yang bertindak sebagai elektroda kerja ditetesi dengan ekstrak kulit ubi jalar ungu lalu direkatkan dengan *counter* elektroda yang telah dilapisi karbon tipis. Sistem ini kemudian ditetesi larutan iodida sebagai elektrolit lalu diukur nilai arus (I) dan tegangannya (V) di bawah radiasi sinar matahari menggunakan multimeter. Nilai efisiensi DSSC dihitung dengan membandingkan besarnya daya sumber cahaya dan daya yang dihasilkan oleh DSSC. Nilai arus (I), tegangan (V), daya masuk (P_{in}), daya DSSC (P) dan nilai efisiensi dapat dilihat pada Tabel 4.



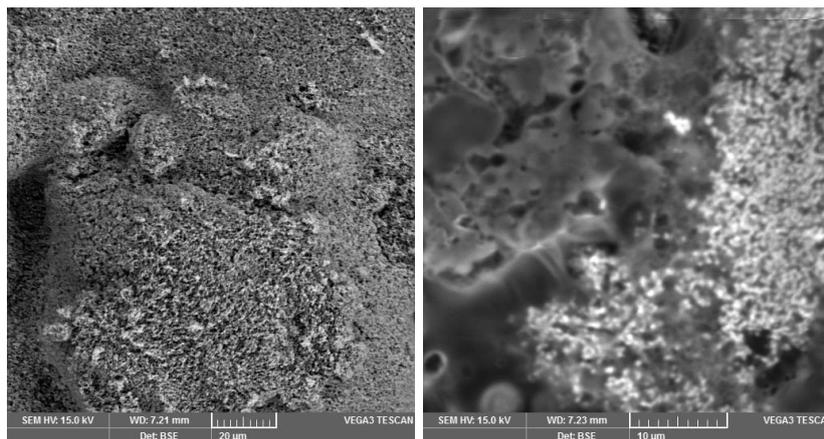
Gambar 5. Sistem DSSC (A) dan rangkaian DSSC untuk menghasilkan arus dan tegangan (B)

Tabel 4. Nilai efisiensi sel DSSC menggunakan ekstrak kulit ubi jalar ungu

| Ekstrak | P_i (mWatt/cm ²) | V_{max} (mV) | I_{max} (mA) | P_{max} (mWatt/cm ²) | η (%) |
|--------------------|-----------------------------------|-------------------|-------------------|---------------------------------------|---------------|
| CH ₃ OH | 7.01667 | 222 | 23,4 | 0.00519488 | 0.074 |
| EtOAc | 7.01667 | 180 | 37,7 | 0.006786 | 0.097 |
| <i>n</i> -heksana | 7.01667 | 33 | 5,4 | 0.0001782 | 0.003 |
| Campuran | 7.01667 | 276 | 25,7 | 0.0070932 | 0.10 |

Berdasarkan nilai efisiensi yang diperoleh, terlihat adanya efek yang signifikan dengan semakin lengkapnya komponen zat warna dalam ekstrak. DSSC dengan ekstrak campuran menghasilkan nilai efisiensi sel terbesar disusul metanol dan etil asetat. DSSC dengan ekstrak *n*-heksana memperlihatkan nilai efisiensi terendah. Berdasarkan hasil skrining fitokimia, komponen zat warna dari ekstrak campuran, metanol dan etil asetat berasal dari golongan flavonoid dan terpenoid, sementara pada ekstrak *n*-heksana hanya berasal dari golongan terpenoid. Hal ini diperkuat dari data FTIR yang memperlihatkan serapan vibrasi khas pada senyawa-senyawa tersebut. Dari data spektrum UV-Vis terlihat bahwa semua ekstrak memberikan serapan pada wilayah sinar UV 268 nm, 327 nm dan 269,1 nm. Ekstrak etil asetat sekaligus juga memberi serapan pada wilayah sinar tampak 554 nm. Nilai serapan terbesar dihasilkan dari ekstrak campuran yang membuktikan bahwa semakin banyak komponen zat warna yang menyerap radiasi sinar matahari, maka semakin luas pula wilayah serapan energi foton yang diterima untuk diubah menjadi daya output (Pratiwi et al., 2017).

Nilai efisiensi DSSC dari kulit ubi jalar ungu ini termasuk masih rendah bila dibandingkan dengan efisiensi sel hibrid atau sel anorganik. Namun demikian, sejumlah kelebihan DSSC menjadikan kajian mengenai kondisi-kondisi preparasi terus dilakukan. Salah satunya adalah peningkatan kemampuan pasta TiO₂ mengikat zat warna. Tersebaranya zat warna secara merata pada lapisan tipis TiO₂ berperan sangat penting dalam proses penyerapan energi foton dari matahari yang kemudian diubah menjadi energi listrik. Gambar SEM dari lapis tipis TiO₂ sesudah pewarnaan pada ukuran 20, 10 dan 5 μm dapat dilihat pada Gambar 6. Berdasarkan Gambar 6, terlihat bahwa pasta TiO₂ tidak tersebar merata pada permukaan begitu pula ekstrak zat warnanya tidak tersebar merata pada struktur pori antar partikel TiO₂. Penyebaran TiO₂ yang tidak merata bisa disebabkan karena TiO₂ yang digunakan tidak dalam fasa anatase dan metode pelapisan *Doctor Blade* yang kurang halus. Penyebaran zat warna yang tidak merata bisa disebabkan oleh adanya aglomerasi partikel TiO₂ sehingga zat warna tidak terserap baik ke dalam ruang antar porinya.



Gambar 6. Morfologi semikonduktor TiO₂ tersensitisasi ekstrak kulit ubi ungu pada ukuran 10 dan 20 μm

KESIMPULAN

Nilai efisiensi DSSC terbaik diperoleh dari ekstrak campuran, disusul oleh metanol, etil asetat dan n-heksana berturut-turut sebesar 0,10%; 0,097%; 0,074% dan 0,003%. Hal ini menunjukkan bahwa semakin banyak zat warna yang menyerap energi radiasi matahari, maka semakin besar nilai efisiensi sel. Stabilitas sel berpengaruh pula pada nilai efisiensi sel sehingga upaya mempertahankan kestabilan dengan pengaturan keasaman ekstrak dan penggunaan elektrolit berbasis polimer dapat dikaji pada penelitian selanjutnya.

DAFTAR PUSTAKA

- Adedokun, O., Sanusi, Y. K., & Awodugba, A. O. (2018). Solvent dependent natural dye extraction and its sensitization effect for dye sensitized solar cells. *Optik*, 174, 497–507. <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2018.06.064>.
- Ammar, A. M., Mohamed, H. S. H., Yousef, M. M. K., Abdel-Hafez, G. M., Hassanien, A. S., & Khalil, A. S. G. (2019). Dye-Sensitized Solar Cells (DSSCs) based on extracted natural dyes. *Journal of Nanomaterials*, 2019, 1-10. <https://doi.org/10.1155/2019/1867271>.
- Anselmi, C., Mosconi, E., Pastore, M., Ronca, E., & De Angelis, F. (2012). Adsorption of organic dyes on TiO₂ surfaces in dye-sensitized solar cells: Interplay of theory and experiment. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 14(46), 15963–15974. <https://doi.org/10.1039/C2CP43006A>.
- Bai, S., Amirruddin, A. K., Pandey, A. K., Samyano, M., Ahmad, M. S., Sharma, K., & Tyagi, V. V. (2021). Advancements in the development of various types of dye-sensitized solar cells: A comparative review. *Energy Engineering: Journal of the Association of Energy Engineering*, 118(4), 737–759. <https://doi.org/10.32604/EE.2021.016157>.
- Baiju, A., & Yarema, M. (2022). Status and challenges of multi-junction solar cell technology. *Frontiers in Energy Research*, 1-17. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2022.971918>.
- Bhattacharya, S., & John, S. (2019). Beyond 30% Conversion Efficiency in Silicon Solar Cells: A Numerical Demonstration. *Scientific Reports*, 9, 12482–12497. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-48981-w>.
- Bhuiyan, M. M. H., Kabir, F., Manir, M. S., Rahaman, M. S., Hossain, M. R., Barua, P., ... Khan, M. A. (2021). Effect of Combination of Natural Dyes and the Blocking Layer on the Performance of DSSC, in *Solar Cells - Theory, Materials and Recents Advance*. London: IntechOpen Limited. <https://doi.org/10.5772/INTECHOPEN.94760>.
- Błaszczak, A., Joachimiak-Lechman, K., Sady, S., Tański, T., Szindler, M., & Drygała, A. (2021). Environmental performance of dye-sensitized solar cells based on natural dyes. *Solar Energy*, 215, 346–355. <https://doi.org/10.1016/J.SOLENER.2020.12.040>.
- Chen, H., Gong, Y., Vázquez-Mayagoitia, Á., Zhang, J., & Cole, J. M. (2020). Dye Aggregation, Photostructural Reorganization and Multiple Concurrent Dye TiO₂ Binding Modes in Dye-Sensitized Solar Cell Working Electrodes Containing Benzothiadiazole-Based Dye RK-1. *ACS Applied Energy Materials*, 3(1), 423–430. <https://doi.org/10.1021/ACSAEM.9B01666>.

- Dang, C., Labie, R., Simoen, E., & Poortmans, J. (2018). Detailed structural and electrical characterization of plated crystalline silicon solar cells. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 184, 57–66. <https://doi.org/10.1016/J.SOLMAT.2018.04.016>.
- Kavan, L. (2017). Electrochemistry and dye-sensitized solar cells. *Current Opinion in Electrochemistry*, 2(1), 88–96. <https://doi.org/10.1016/J.COELEC.2017.03.008>.
- Leyrer, J., Rubilar, M., Morales, E., Pavez, B., Leal, E., & Hunter, R. (2018). Factor Optimization in the Manufacturing Process of Dye-Sensitized Solar Cells Based on Naturally Extracted Dye from a Maqui and Blackberry Mixture (*Aristotelia Chilensis* and *Rubus Glaucus*). *Journal of Electronic Materials*, 47(10), 6136–6143. <https://doi.org/10.1007/S11664-018-6514-0>.
- Li, G., Sheng, L., Li, T., Hu, J., Li, P., & Wang, K. (2019). Engineering flexible dye-sensitized solar cells for portable electronics. *Solar Energy*, 177, 80–98. <https://doi.org/10.1016/J.SOLENER.2018.11.017>.
- Najihah, M. Z., Noor, I. M., & Winie, T. (2022). Long-run performance of dye-sensitized solar cell using natural dye extracted from *Costus woodsonii* leaves. *Optical Materials*, 123, 111915. <https://doi.org/10.1016/J.OPTMAT.2021.111915>.
- Patunrengi, I., & Aisyah, A. (2020). Perbandingan efisiensi sel fotovoltaik berbasis DSSC dari ekstrak zat wara segar dan kering tumbuhan secang, tarum dan paar kuku. *Teknosains: Media Informasi Sains dan Teknologi*, 14(1), 26–35. <https://doi.org/10.24252/TEKNOSAINS.V14I1.12938>.
- Pratiwi, D. D., Nurosyid, F., Supriyanto, A., & Suryana, R. (2017). Efficiency enhancement of dye-sensitized solar cells (DSSC) by addition of synthetic dye into natural dye (anthocyanin). *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 176(1), 1-6. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/176/1/012012>.
- Sathyajothi, S., Jayavel, R., & Dhanemozhi, A. C. (2017). The Fabrication of Natural Dye Sensitized Solar Cell (DSSC) based on TiO₂ Using Henna And Beetroot Dye Extracts. *Materials Today: Proceedings*, 4(2), 668–676. <https://doi.org/10.1016/J.MATPR.2017.01.071>.
- Schindler, F., Fell, A., Müller, R., Benick, J., Richter, A., Feldmann, F., ... Glunz, S. W. (2018). Towards the efficiency limits of multicrystalline silicon solar cells. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 185, 198–204. <https://doi.org/10.1016/J.SOLMAT.2018.05.006>.
- Tractz, G. T., Viomar, A., Dias, B. V., De Lima, C. A., Banczek, E. P., Da Cunha, M. T., ... Rodrigues, P. R. P. (2019). Recombination Study of Dye Sensitized Solar Cells with Natural Extracts. *Journal of the Brazilian Chemical Society*, 30(2), 371–378. <https://doi.org/10.21577/0103-5053.20180186>.
- Yamaguchi, M., Dimroth, F., & Geisz, J. F. (2021). Multi-junction solar cells paving the way for super high-efficiency. *J. Appl. Phys*, 129, 240901-240915. <https://doi.org/10.1063/5.0048653>.