

KARAKTERISASI ZAT WARNA DAUN JATI (*Tectona grandis*) FRAKSI METANOL:*n*-HEKSANA SEBAGAI PHOTSENSITIZER PADA DYE SENSITIZED SOLAR CELL

Aminuddin Baharuddin*, Aisyah, Jawiana Saokani & Indah Ayu Risnah

Jurusan Kimia UIN Alauddin Makassar

*Alamat Korespondensi : aminuddinbaharuddin@yahoo.com

Abstrak: Penyedia energi saat ini masih didominasi oleh sumber energi yang tidak dapat diperbaharui seperti batubara, minyak bumi dan gas alam. Semakin lama sumber energi ini akan semakin menipis jumlahnya di alam sehingga dibutuhkan sumber energi terbarukan. Salah satu sumber energi yang potensial dikembangkan di Indonesia adalah DSSC (*Dye Sensitized Solar Cell*). Dalam penelitian ini digunakan zat warna daun tumbuhan *Tectona grandis* sebagai *photosensitizer*. Zat warna diperoleh dari proses ekstraksi menggunakan alat ultrasonik dengan pelarut metanol. Pengujian DSSC dilakukan pada zat warna dalam keadaan asam (pH 6) dan keadaan basa (pH 11) serta pada hasil pemisahan KKCVC menggunakan eluen *n*-hexana-metanol (8:2, 5:5, dan 2:8). Nilai efisiensi paling tinggi diperoleh pada hasil KKCVC *n*-hexana:metanol 5:5 yakni sebesar 0,05127%. Karakterisasi dilakukan pada zat warna yang memiliki efisiensi paling tinggi dengan menggunakan UV-Vis, FTIR dan GC-MS. Hasil analisis UV-Vis menunjukkan adanya serapan pada panjang gelombang 522 nm yang merupakan daerah serapan khas antosianin. Pada pengujian FTIR didapatkan beberapa gugus fungsi yang teridentifikasi sebagai -OH, C-H, dan C=C. Hasil analisis dengan GC-MS menunjukkan fragmen puncak pada m/z 287. Secara umum hasil karakterisasi tersebut besesuaian dengan salah satu pigmen antosianin yaitu sianidin.

Kata Kunci: DSSC, efisiensi, *photosensitizer*, *Tectona grandis*

Abstract: Energy supplier nowadays is still dominated by the energy source that cannot be renewed, such as coal, oil and natural-gas. Depletion of oil reserve is the only option in the future so the renewable energy source is needed. One of the most potential energy sources that have been developed in Indonesia is DSSC (*Dye Sensitized Solar Cell*). Research about DSSC using teak leaf dye as the *photosensitizer* was done. The dye was obtained through extracting process using ultrasonic device with methanol as resolving. DSSC tasted to pigment in acid (pH 6) and alkali (pH 11) and result of KKCVC isolation using eluent *n*-hexane:methanol (8:2, 5:5 and 2:8). The highest efficiency value was from KKCVC *n*-hexane:methanol 5:5 with 0,05127%. Characterization was tasted to the pigment with the highest efficiency by using UV-Vis, FTIR and GC-MS. The result from UV-Vis indicated absorption in wave length 522 nm which absorption area specific to anthocyanin. In FTIR tes, was obtained some cluster functions which identified as -OH, C-H and C=C. Result from using GC-MS analysis showed the top fragment was at $m/z=287$. Generally the result of the characterization is appropriate with one of the anthocyanin pigment which is cyanidin.

Keywords: DSSC, efficiency, *photosensitizer* and *Tectona grandis*.

PENDAHULUAN

Sel Surya merupakan suatu perangkat yang dapat mengkonversi energi matahari menjadi energi listrik. Sel surya telah banyak dikembangkan oleh para peneliti mulai dari sel surya berbahan silikon tunggal, silikon polikristal sampai pada sel surya jenis terbaru yakni *Dye Sensitized Solar Cell* (DSSC). DSSC pertama kali ditemukan pada tahun 1991 oleh O'Regan dan Gratzel yang menggunakan ekstrak zat warna yang terdapat pada tumbuhan sebagai penangkap cahaya matahari dan mengubahnya menjadi energi listrik.

DSSC terdiri dari beberapa komponen penting yakni kaca TCO (*Transparent Conducting Oxide*), TiO_2 (*Titanium Oxide*), zat warna dan elektrolit (O'Regan & Gratzel, 1991). Kaca TCO (*Transparent Conducting Oxide*) mengapit sistem secara keseluruhan. Kaca bagian atas berfungsi sebagai elektroda sedangkan kaca pada bagian bawah berfungsi sebagai elektroda pembanding (counter-

elektroda). Kaca TCO yang paling banyak digunakan dalam pembuatan DSSC adalah *fluorine-doped tin oxide* (FTO atau $SnO_2:F$) dan *indium tin oxide* (ITO atau $In_2O_3:Sn$).

TiO_2 digunakan sebagai semikonduktor dalam pembuatan DSSC. Nanokristal TiO_2 memiliki tiga bentuk yang berbeda yakni *rutile*, *anatase*, dan *brookit* (Sastrawan, 2006). Dari ketiga bentuk tersebut yang paling sering digunakan adalah hanya kristal TiO_2 *anatase* (Sastrawan, 2006). Hal ini disebabkan karena TiO_2 *anatase* bersifat fotoaktif dibanding TiO_2 *rutile* dan *brookit*.

Elektrolit pada DSSC bisa berupa padatan maupun cairan. Elektrolit yang paling sering digunakan dalam pembuatan DSSC adalah pasangan redoks I/I_3^- (iodin/triiodida). Selain pasangan elektron I/I_3^- , elektrolit yang dapat digunakan adalah Br_2/Br^- , $(SCN)_2/SCN^-$ dan $(SeCN)_2/SeCN^-$. Akan tetapi, pasangan redoks alternatif ini masih memiliki korosi yang tinggi dan bersifat toksik sehingga

sampai saat ini Γ/I_3^- masih merupakan elektrolit terbaik untuk DSSC (Zhang, 2008).

Komponen yang tidak kalah penting adalah zat warna. Zat warna yang digunakan dapat berupa zat warna sintesis maupun zat warna alami. DSSC dengan zat warna sintesis yang digunakan oleh Mathew dkk. (2014) telah mencapai efisiensi sebesar 13% sedangkan DSSC dengan zat warna alami yang digunakan oleh Chien dan Hsu (2013) masih rendah yakni 1,4%. Walaupun zat warna sintesis memiliki efisiensi yang tinggi tetapi biaya produksi zat warna alami jauh lebih mudah dan juga zat warna alami sangat mudah diperoleh disekitar kita.

Bagian-bagian tumbuhan yang dapat diekstrak untuk dijadikan zat warna alami yakni daun, buah, dan bunga. Telah banyak zat warna alami yang digunakan dalam pembuatan sel surya ini seperti kubis merah (Chien dan Hsu, 2013), buah naga (Nadeak, 2012), kol merah (Maddu, 2007), dan strawberry (Misbachudin dkk., 2013). Zat warna dalam tanaman yang biasanya digunakan dalam DSSC adalah klorofil, karotenoid, antosianin, flavonoid, dan tanin (Ludin, dkk, 2014).

Salah satu zat warna yang dapat dijadikan sel surya organik adalah zat warna dari daun jati. Jati (*Tectona grandis*) merupakan tanaman kayu berkualitas tinggi. Kayu jati sebagai bahan baku furniture telah banyak digunakan oleh berbagai negara di dunia sehingga banyak di budidayakan. Dengan banyaknya budidaya jati meyebabkan jumlah daun jati menjadi sangat melimpah. Daun jati selama ini masih belum banyak dimanfaatkan dalam kehidupan sehari-hari sehingga hanya akan terbuang secara sia-sia, padahal daun jati memiliki beberapa zat warna seperti antosianin dan karotenoid yang dapat dijadikan sebagai bahan dasar dalam pembuatan DSSC.

BAHAN DAN METODE

Penelitian ini telah dilakukan pada bulan November 2015 sampai Februari 2016. Preparasi sampel dilakukan di Laboratorium Kimia Organik Universitas Islam Negeri Alauddin Makassar, analisis UV-Vis dan FTIR dilakukan di Laboratorium Kimia Terpadu Universitas Hasanuddin Makassar, analisis GC-MS dilakukan di Laboratorium Kimia Balai Besar Laboratorium Kesehatan Makassar dan uji *Scanning Electron Microscopy* (SEM) dilakukan di Laboratorium Mikrostruktur Universitas Negeri Makassar.

Bahan

Bahan-bahan yang digunakan dalam penelitian ini yaitu, aquades (H_2O), daun jati (*Tectona grandis*) metanol (CH_3OH) teknis, iodida (I_2) teknis, kalium iodida (KI) teknis, *n*-heksan (C_6H_{14}) teknis, titanium oksida (TiO_2) teknis, kertas saring, lilin, natrium hidroksida (NaOH) 10 % dan silika G₆₀ nomor katalog 7730 dan 7733.

Metode

1. Ekstraksi dan Karakterisasi Zat Warna pada Daun Jati

a. Ekstraksi Daun Jati

Sampel daun jati yang diambil adalah daun jati yang masih muda. Kemudian dikeringkan pada suhu kamar. Setelah itu, sampel dihaluskan dengan menggunakan blender. Kemudian diekstraksi menggunakan alat ultrasonik dengan pelarut metanol selama 15 menit. Ekstrak kemudian disaring dengan kertas saring lalu dipisahkan dengan menggunakan *rotary evaporator*.

b. Variasi pH

Ekstrak yang didapatkan diencerkan dengan metanol kemudian ditambahkan dengan NaOH 10% hingga berubah dari pH 6 (warna merah) ke pH 11 (warna ungu).

c. KKC

Silika 7730 ditimbang ± 20 gram lalu dimasukkan ke dalam kolom KKC, lalu dialiri dengan *n*-heksan hingga tidak terdapat gelembung udara pada silika 7730. Setelah itu, ekstrak kental daun jati diencerkan lalu diimpregnasi dengan silika 7733 sebanyak ± 3 gram. Hasil impregnasi sampel lalu dimasukkan ke dalam kolom KKC yang selanjutnya dialiri dengan eluen yang ditingkatkan kepolarannya. Eluen yang digunakan yaitu perbandingan antara *n*:heksan dan metanol (8:2; 5:5 dan 2:8).

2. Pembuatan Dan Pengujian DSSC

a. Pembuatan Pasta TiO_2

TiO_2 dilarutkan dengan aquades panas kemudian diendapkan lalu disaring. Endapan TiO_2 kemudian dilarutkan dengan etanol hingga berbentuk pasta.

b. Preparasi Larutan Elektrolit

Kalium iodida ditimbang 0,83 gram lalu ditambahkan iod sebanyak 0,127 gram. Kemudian dilarutkan dalam 10 mL aquades

c. Pembuatan elektroda pembanding

Kaca TCO terlebih dahulu dibersihkan dengan aquades dalam ultrasonik lalu dikeringkan. Setelah itu, kaca TCO dipanaskan diatas api hingga terbentuk lapisan warna hitam.

d. Rangkaian Dan Pengujian Sel Surya Organik

Kaca TCO diberi selotip kemudian dilapiskan dengan pasta TiO_2 . Setelah itu dilakukan pemanasan pada kaca selama 30 menit dan biarkan sampai kaca TCO dingin. Kaca kemudian ditetesi dengan zat warna dan didiamkan sampai zat warna meresap ke dalam TiO_2 . Setelah meresap, ditambahkan dua tetes larutan elektrolit dan ditempelkan pada elektroda pembanding secara berhadapan. Perangkat sel surya kemudian diuji dengan menggunakan multimeter di bawah sinar matahari. Arus dan tegangan yang didapat dicatat.

3. Karakterisasi

Karakterisasi zat warna dilakukan dengan mengambil zat warna yang memiliki efisiensi yang paling tinggi dan dianalisis dengan menggunakan Spektrofotometer UV-Vis, Spektroskopi FTIR dan GC-MS sedangkan karakteristik morfologi TiO₂ dilakukan dengan menggunakan SEM.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil pengujian DSSC pada pH 6 dan dan pH 11 serta hasil KKCVC dapat dilihat pada Tabel 1 dan 2.

Tabel 1. Pengukuran DSSC pada Ekstrak pH 6 dan pH 11

Variasi pH	I_{max} (μA)	V_{max} (mV)	P_{in} (mW/cm ²)	P_{max} (mW)	η (%)
pH 6	12,4	178	7,61384	0,0022072	0,02898
pH 11	20,1	56	9,473374	0,0011256	0,01188

Ket: I_{max} (arus maksimum), V_{max} (Tegangan maksimum), P_{in} (Daya yang diterima), P_{max} (Daya maksimum), η (Efisiensi)

Tabel 2. Pengukuran DSSC Hasil KKCVC menggunakan pelarut *n*-Heksana:Metanol

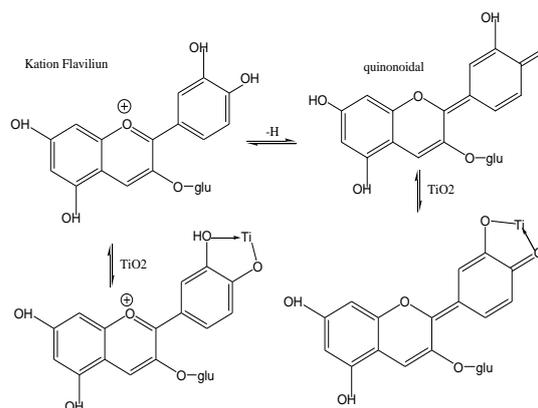
KKCVC	I_{max} (μA)	V_{max} (mV)	P_{in} (mW/cm ²)	P_{max} (mW)	η (%)
8:2	24	49	9,531942	0,001176	0,01234
5:5	61	64	7,61384	0,003904	0,05127
2:8	12,9	40	9,531942	0,000516	0,00541

Ket: I_{max} (arus maksimum), V_{max} (Tegangan maksimum), P_{in} (Daya yang diterima), P_{max} (Daya maksimum), η (Efisiensi)

Efisiensi DSSC pada Keadaan Asam dan Basa

Pengujian DSSC yang dilakukan pada keadaan asam (pH 6) memiliki efisiensi yang lebih besar yakni 0,02898 % dibanding pada keadaan basa (pH 11). Hal ini disebabkan pada pH 6 zat warna telah terdeprotonasi (kehilangan H⁺) dari bentuk kation flavilium. Menurut Cherepy dkk. (1997) bahwa dalam bentuk quinonoidal, antosianin akan terikat dengan kuat pada TiO₂ dibanding dalam bentuk flavilium (pH 1-2) dapat dilihat pada Gambar 1. Pada pH yang sangat rendah elektron lebih sulit untuk terdeprotonasi sehingga antosianin menjadi sangat stabil dan sulit berikatan dengan molekul lain. Hal ini menyebabkan ikatan antosianin dengan TiO₂ menjadi lemah. Selain itu, muatan yang ada pada kation flavilium dapat menghambat terjadinya perpindahan elektron pada permukaan TiO₂ (Chien & Shu, 2013: 205). Pada pH 11, kandungan antosianin yang dimiliki oleh daun jati semakin menurun (Fatinatullabibah dkk., 2014) sehingga antosianin yang terserap didalam TiO₂ juga berkurang. Hal ini menyebabkan berkurangnya efisiensi dibanding pada pH 6. Hal ini sesuai dengan hasil pengujian DSSC yang dilakukan oleh Chien & Shu (2013) bahwa

efisiensi tertinggi dihasilkan pada pH 6-8. Terjadi penurunan pada keadaan yang lebih asam (pH 2 dan pH 4) maupun lebih basa (pH 10 dan pH 12).



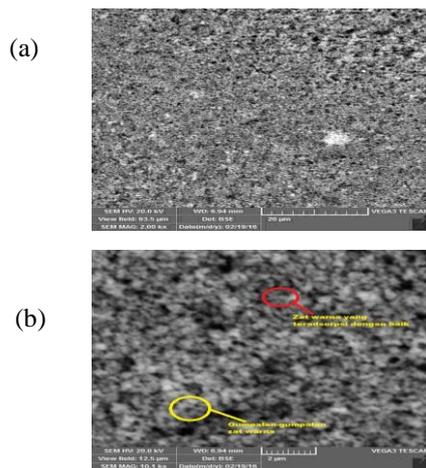
Gambar 1. Pengikatan TiO₂ pada antosianin

Efisiensi Hasil KKCVC Ekstrak Daun Jati

Hasil efisiensi DSSC ketiga fraksi adalah 0,01234 % untuk fraksi 8:2, untuk fraksi 5:5 diperoleh efisiensi sebesar 0,05127 % dan fraksi 2:8 diperoleh efisiensi sebesar 0,00541 %. Efisiensi paling besar dihasilkan oleh fraksi 5:5 dan paling kecil adalah efisiensi dari fraksi 8:2. Efisiensi yang didapatkan ini masih tergolong rendah dibandingkan dengan hasil Chien & Hsu (2013) yang menggunakan kubis merah sebagai *sensitizer* dan berhasil mendapatkan efisiensi sebesar 1,4 %. Besarnya efisiensi pada fraksi 5:5 bisa jadi disebabkan karena zat warna yang dimiliki oleh fraksi 5:5 lebih banyak yang teradsorpsi pada TiO₂ dibanding kedua fraksi lainnya. Semakin banyak zat warna yang teradsorpsi pada TiO₂ menyebabkan semakin banyak foton (cahaya) yang terserap sehingga daya yang dihasilkan akan semakin besar pula. Perbedaan adsorpsi ketiga fraksi kemungkinan besar disebabkan oleh jenis senyawa dari ketiga sampel yang berbeda-beda. Sehingga untuk mengetahui senyawa dari zat warna yang memiliki efisiensi paling besar maka dilakukanlah karakterisasi.

Morfologi TiO₂

Karakteristik morfologi dari TiO₂ yang terikat zat warna dapat dilihat pada Gambar 2. Pada hasil SEM terlihat bahwa penyebaran zat warna pada permukaan TiO₂ yang kurang merata. Terdapat zat warna yang teradsorpsi dengan baik dan ada pula zat warna yang tidak teradsorpsi dan membentuk gumpalan-gumpalan. Adanya gugus hidroksil (-OH) dan karbonil (C=O) pada suatu zat warna memungkinkan terbentuknya ikatan yang kuat dengan permukaan TiO₂. Selain itu hasil SEM juga menunjukkan bahwa ukuran partikel dari TiO₂ tergolong besar (mikrometer) sehingga hanya dapat menampung sedikit zat warna. Hal inilah yang menyebabkan zat warna yang teradsorpsi dalam TiO₂ sedikit sehingga efisiensi yang dihasilkan juga tidak maksimal.

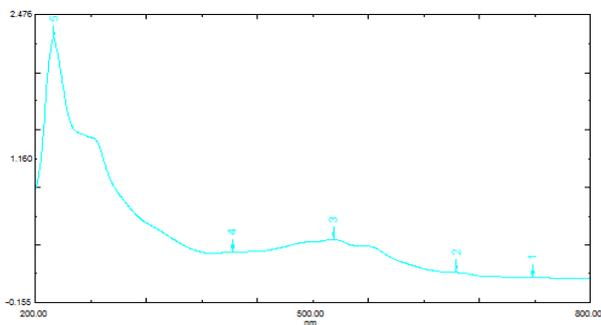


Gambar 2. Hasil SEM permukaan TiO₂ yang mengikat zat warna. (a) 20 µm dan (b) 2 µm.

Karakterisasi Zat Warna

Karakterisasi dilakukan pada fraksi yang memiliki efisiensi paling besar. Tujuan karakterisasi ini untuk mengetahui jenis senyawa yang terdapat dalam sampel tersebut. Adapun parameter yang digunakan dalam karakterisasi adalah UV-Vis, FTIR dan GC-MS.

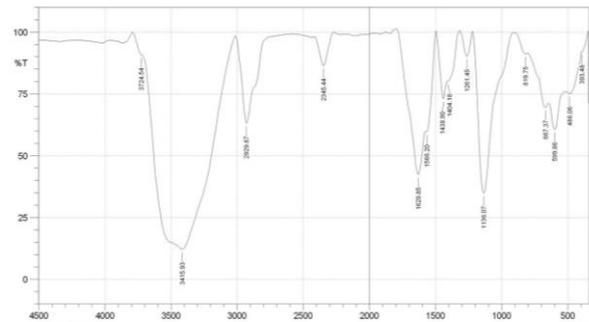
Pengujian ekstrak daun jati hasil KKCVC pada UV-Vis dimaksudkan untuk mengetahui panjang gelombang pada fraksi yang memiliki efisiensi paling tinggi. Hasil UV-Vis dapat dilihat pada Gambar 3.



Gambar 3. Hasil Karakterisasi dengan UV-Vis

Berdasarkan hasil UV-Vis, terdapat serapan pada daerah UV (200- 400 nm) dan pada daerah tampak (400-800 nm). Penyerapan yang terjadi pada daerah UV dengan panjang gelombang 220 nm merupakan panjang gelombang dari pelarut yang digunakan. Pada daerah tampak, penyerapan paling tinggi terjadi pada panjang gelombang 522 nm dengan absorbansi sebesar 0,452. Daerah ini merupakan daerah panjang gelombang khas yang dimiliki oleh antosianin (475-550 nm) (Harborne, 1987).

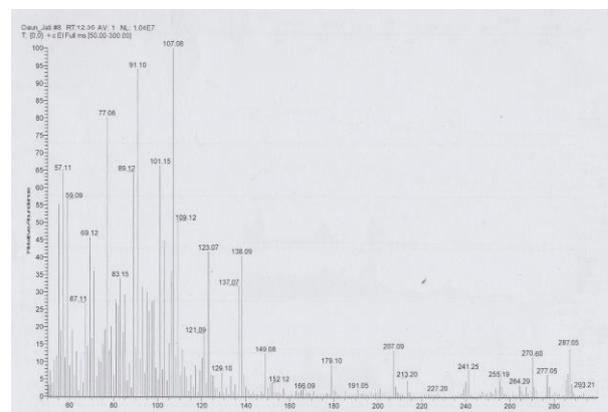
FTIR merupakan salah satu instrumen penting dalam mengidentifikasi gugus-gugus fungsi dalam suatu senyawa. Spektrum FTIR menunjukkan vibrasi ikatan-ikatan yang terdapat dalam senyawa. Analisis FTIR dilakukan pada bilangan gelombang 4500-500 cm⁻¹.



Gambar 4. Hasil Karakterisasi zat warna dengan FTIR

Hasil FTIR pada Gambar 4 menunjukkan adanya serapan pada bilangan gelombang yang berbeda-beda. Terdapat serapan yang lebar dengan intensitas yang kuat yang menunjukkan adanya gugus OH pada bilangan gelombang 3425 cm⁻¹. Hasil spektrum juga menunjukkan adanya serapan yang tajam dengan intensitas sedang pada bilangan gelombang 2929 cm⁻¹ yang diduga merupakan ikatan C-H. Pada bilangan gelombang 1629 cm⁻¹ terdapat serapan yang tajam yang diduga merupakan serapan ikatan rangkap C=C. Secara keseluruhan, gugus-gugus fungsi tersebut bersesuaian dengan gugus fungsi yang terdapat pada kerangka dasar antosianin.

Analisis GC-MS memungkinkan untuk mengetahui berat molekul dari senyawa yang berada dalam sampel. Hasil analisis yang dilakukan terhadap hasil KKCVC zat warna daun jati menghasilkan spektrum massa dengan waktu retensi 12,35 dan puncak utama pada *m/z* 287 (Gambar IV.8). Berat molekul ini mirip dengan salah satu berat molekul senyawa antosianin yaitu sianidin. Menurut Ferrars (2014) bahwa fragmen dasar dari sianidin adalah 287, 241, 213, dan 137. Fragmen *m/z* 241 dihasilkan oleh lepasnya gugus karbonil (C=O) dan H₂O dari gugus utama (*m/z* 287). Molekul sisa (*m/z* 241) selanjutnya pecah kembali dengan melepaskan gugus karbonil (C=O) menghasilkan fragmen dengan puncak *m/z* 213. Data beberapa fragmen dapat dilihat pada Gambar 5.



Gambar 5. Hasil Karakterisasi Zat Warna dengan GC-MS

KESIMPULAN

Efisiensi DSSC yang dihasilkan dalam keadaan asam (pH 6) dan keadaan basa (pH 11) yakni 0,02898 % dan 0,01188 %. Efisiensi yang dihasilkan pada KKCVC menggunakan pelarut n-heksana : metanol adalah 0,01234 % untuk fraksi 8:2, untuk fraksi 5:5 diperoleh efisiensi sebesar 0,05127 % dan fraksi 2:8 diperoleh efisiensi sebesar 0,00541 %. Karakterisasi zat warna menggunakan UV-Vis, GC-MS, dan FTIR secara keseluruhan menunjukkan bahwa salah satu zat warna golongan antosianin yang terdapat dalam ekstrak daun jati adalah sianidin.

DAFTAR PUSTAKA

- Cherepy, N.J., Smestad, M., Graetzel, M., & Zhang, J.Z. (1997). Ultrafast electron injection: implications for a photoelectrochemical cell utilizing an anthocyanin dye-sensitized2 nanocrystalline electrode, *Journal of Physical Chemistry*, 101, 9342-9351.
- Chien, C. & Hsu, B. (2013). Optimization of the dye-sensitized solar cell with anthocyanin as photosensitizer, *Solar Energy*, 203-211
- Fatinatullabibah, K. & Khasanah, L.U. (2014). Stabilitas antosianin ekstrak daun jati (*Tectona grandis*) terhadap perlakuan pH dan suhu, *Jurnal Aplikasi Teknologi Pangan*, 2, 60-63.
- Ferrars, R.M., Czank, C., Zhang, Q., Botting, N.P., Kroon, P.A. & Cassidy, A. (2014). The pharmacokinetics of anthocyanins and their metabolites in humans, *Journal of Pharmacology*, 171(13), 3268-3282.
- Harbone, J.B. (1987). *Metode fitokimia: penuntun cara modern menganalisis tumbuhan (Phytochemical methods, terjemahan Kosasih Padmawinata dan Iwang Soediro)*, ITB, Bandung.
- Ludin, N.A., Mahmoud, A.M.A., Muhammad, A.B., Kadhun, A.A.H., Sopian, K., & Karim, N.S.A. (2014). Review on development of natural dye phoyosentisizer for dye-sensitized solar cells, *Renewable and Sustainable Energy Review*, 31, 386-396.
- Maddu, A., Zuhri, M., & Irmansyah. (2007). Penggunaan ekstrak antosianin kol merah sebagai photosensitizer pada sel surya TiO₂ nanokristal tersensitisasi dye, *Makara Teknologi*, 11(2), 78-84.
- Mathew, S., Yella, A., Gao, P., Humphry-Baker, R., Curchod, B.F.E., Ashari-Astani, N., Tavernelly, I., Rothlisberger, U., Nazeerudin, M.K., & Gratzel, M., (2014). Dye-sensitized solar cells with 13% efficiency achieved through the molecular engineering of porphyrin sensitizers, *Nature Chemistry*, 6, 242-247
- Misbachuddin, M.C., Trihandaru, S. & Sutresno, A. (2013). Studi awal ekstrak antosianin strawberry sebagai sensitizer solar cell (DSSC), *Proceeding of 2nd Lontar Physics Forum*, pp. 1-5.
- Nadeak, S.M. & Susanti, D. (2012). Variasi temperatur dan waktu tahan kalsinasi terhadap unjuk kerja semikonduktor TiO₂, sebagai dye sensitized solar cell (DSSC) dengan dyes ekstrak buah naga merah, *Jurnal Teknik ITS*, 1, 81-86.
- Sastrawan, R. (2006). *Photovoltaic modules of dye solar cell*. Ph.D. Thesis, Fakultat Fur Mathematik und Physik Universitat Freiburg, Breisgau.
- O'Regan, B. & Gratzel. (1991). A low-cost, high-efficiency solar cell based on dye-sensitized collonidal TiO₂ film, *Nature*, 353, 737-740.
- Zhang, Z. (2008). *Enhancing the open-circuit voltage of dye-sensitized solar cells: coadsorbents and alternative redox couples*, Thesis, Faculte Science De Base, Suisse.