



GREEN-SINTESIS NANOPARTIKEL PERAK DARI BUAH NAGA MERAH (*Hylocereus polyrhizus*) DAN KARAKTERISASI SIFAT FISIKA DAN KIMIANYA SEBAGAI PENYERAP CAHAYA DALAM SEL SURYA DSSC

Waode Sukmawati Arsyad^{1*}, M. Gemmy Lisar², La Ode Ahmad Nur Ramadhan³, Ida Usman⁴

^{1,2,4}Jurusan Fisika FMIPA, Universitas Halu Oleo, Indonesia

³Jurusan Kimia FMIPA, Universitas Halu Oleo, Indonesia

*email: wdsukmawati@uho.ac.id

Abstrak. Sebagai salah satu cara untuk mengurangi biaya produksi sel surya DSSC, maka dilakukan ekstraksi dan karakterisasi zat pewarna dari buah naga merah (*Hylocereus polyrhizus*) sebagai penyerap cahaya dalam sel surya DSSC. Ekstraksi zat pewarna dari buah naga dilakukan dengan metode maserasi dengan variasi pelarut (ethanol, methanol dan akuades), yang selanjutnya ekstrak tersebut digunakan sebagai agen pereduksi pada sintesis nanopartikel perak (AgNP) yang dikenal dengan metode green-sintesis. Lalu dilakukan karakterisasi FTIR, XRD, EDS, dan UV-Vis untuk mengetahui ikatan kimia, struktur kristal, daerah penyerapan, komposisi kimia zat pewarna ekstrak buah naga (EBN) dan nanopartikel perak (AgNP). Untuk mengetahui kemampuan elektrokatalisis elektroda kerja DSSC maka dilakukan karakterisasi LSV. EBN menunjukkan daerah serapan pada daerah cahaya tampak yaitu dari 300-550 nm dengan puncak penyerapan yang berada pada sekitar 350 nm dan 530 nm. Pada AgNP, puncak serapan pada sekitar 530 nm hilang dan muncul serapan pada sekitar 430 nm yang mengindikasikan terbentuknya nanopartikel perak yang dikonfirmasi lebih lanjut dari spektrum XRD nya. Nilai celah energi terkecil diperoleh untuk EBN dalam pelarut akuades dan AgNP dalam pelarut methanol, yaitu 2,89 eV dan 3,60 eV secara berurutan. Hasil pengukuran LSV untuk EBN dengan pelarut akuades dan etanol menunjukkan adanya proses faradaik yang ditandai munculnya arus pada kondisi disinari maupun gelap, sedangkan untuk pelarut metanol tidak menunjukkan adanya arus reduksi pada kondisi disinari maupun kondisi gelap. AgNP menunjukkan adanya arus reduksi untuk semua pelarut baik dalam kondisi gelap maupun kondisi disinari, akan tetapi posisi puncak reduksinya bergeser kearah tegangan positif yaitu sekitar 0,2 V untuk semua sampel.

Kata kunci: *antosianin, green syntesis, ekstrak buah naga, nanopartikel perak*

GREEN SYNTHESIS OF SILVER NANOPARTICLES FROM THE RED DRAGON FRUITS (*HYLOCEREUS POLYRHIZUS*) AND ITS PHYSICAL AND CHEMICAL PROPERTIES AS LIGHT ABSORBER IN DSSC

Abstract. To reduce the DSSCs production costs, we extracted and characterized a dye from dragon fruits (*Hylocereus polyrhizus*) as a light absorber in DSSC. The dye extraction was conducted with the maceration method with solvent variation (ethanol, methanol, aquadest), and the extract was then used as a reduction agent in the synthesis of silver nanoparticles (AgNP). This method is known as the green synthesis process. The FTIR, XRD, EDS, and UV-Vis characterization were done to analyze the chemical bond, crystal structure, chemical composition, and absorption area of dragon fruit extract (DFE) and AgNP. LSV measurement was done to analyze the photo-electrocatalytic properties of the TiO₂ electrode that was immersed in the DFE and AgNP solution. DFE shows absorption in the visible region of 300-550 nm with absorption peaks at 350 nm and 530 nm. The absorption peak at 530 nm disappeared in AgNP, and was observed new peak at 430 nm which was a peak for AgNP which is in good agreement with the XRD spectrum. The smallest energy gap was 2.89 eV and 3.6 eV for DFE in aquadest and AgNP in methanol, respectively. The Faradaic process was observed in the LSV measurement for DFE in aquadest and ethanol and was not shown for DFE in methanol. The Faradaic process was observed for all solvents in the AgNP (dark and light condition), in which its reduction voltage was right-shifted to a positive voltage at 0.2V for all samples.

Keywords: *anthocyanins, green-synthesis, dragon fruits extract, silver nanoparticles*

PENDAHULUAN

Perkembangan teknologi, perilaku masyarakat, dan jumlah penduduk telah menyebabkan energi menjadi kebutuhan vital (Ngafifi, 2014). Cadangan energi fosil di Indonesia terus berkurang (BPPT, 2018), sementara kebutuhan energi terus meningkat. Pemanfaatan sumber energi terbarukan perlu diupayakan agar ketergantungan terhadap energi fosil dapat dikurangi. Energi cahaya matahari merupakan energi alternatif yang paling menarik untuk dikembangkan di Indonesia, hal ini dikarenakan Indonesia adalah wilayah khatulistiwa yang mendapatkan pasokan cahaya matahari yang besar. Salah satu pemanfaatan energi matahari adalah dengan mengubahnya menjadi energi listrik melalui sel surya.

Sel surya yang berhasil dikembangkan pada generasi pertama yaitu sel surya yang menggunakan bahan silikon kristal tunggal dan sel surya yang menggunakan wafer silikon polikristalin (Chapin dkk., 1954, Wallace dkk., 1997). Sel surya ini memiliki efisiensi yang sangat tinggi namun biaya fabrikasinya sangat tinggi serta proses fabrikasinya yang membutuhkan teknologi yang rumit dan temperatur yang sangat tinggi sehingga membatasi pengembangannya dalam jangka panjang. Generasi kedua yaitu sel surya yang dibuat dengan lapisan tipis salah satunya adalah sel surya yang dibuat menggunakan *Cadmium Telluride* (Romeo & Artegiani, 2021). Efisiensi dari sel surya jenis ini juga cukup baik, akan tetapi penggunaan logam berat Cadmium dapat menimbulkan polusi yang sangat membahayakan bagi lingkungan. Sel surya generasi ketiga yaitu sel surya dari bahan polimer atau biasa disebut sel surya organik, sel surya fotoelektrokimia dan sel surya tersensitisasi *dye* (*dye-sensitized solar cells*/DSSC). Sel surya generasi ketiga ini dapat dibuat dengan metode yang sederhana, tidak membutuhkan ruang vakum dan proses deposisi logam, material pembuatnya yang tergolong murah serta telah dapat mencapai efisiensi yang cukup tinggi ~7,1% sejak pertama kali ditemukan. Efisiensi yang diperoleh tercatat 10,4% (Nazeeruddin, 1993), 11,1% (Gratzel, 2003) dan terbaru DSSC berbasis elektrolit cair telah mencapai efisiensi sebesar 13% (Mathew dkk., 2014), hampir mendekati nilai efisiensi realistik secara komersial. Keuntungan dari DSSC adalah bahwa hal itu dapat direkayasa menjadi lembaran fleksibel, biaya produksi yang rendah bahan sensitisasi, kemudahan fabrikasi dan suhu proses yang rendah.

Pewarna organik alternatif seperti pewarna alami disarankan dengan karakteristik yang sama dengan koefisien penyerapan yang tinggi (Hara, 2004). Sisi baik dari pewarna alami meliputi ketersediaan yang mudah, ramah lingkungan dan rendah biaya. Kemampuan sensitizer dalam pewarna alami Link ke sifat Anthocyanin (Wongcharee, 2007). Dalam laporan sebelumnya, berbagai sumber alami antosianin memberikan berbagai kinerja peka. Dalam tulisan ini, DSSC disusun sesuai dengan pewarna buah alami yang diekstrak dari buah naga merah (*Hylocereus polyrhizus*), yang digunakan sebagai sensitizer. Naga *dye* berbasis buah telah dipilih karena yang banyak tersedia di daerah dan rendah biaya pemeliharaannya. Pada penelitian ini akan dilakukan ekstrak zat pewarna dari buah naga merah dengan variasi pelarut Aquades, Methanol, dan Etanol menghasilkan ekstrak biasa. Selanjutnya ekstrak biasa disintesis menggunakan AgNO_3 untuk menghasilkan zat pewarna nanopartikel. Kedua zat pewarna ini akan di karakterisasi sifat optiknya melalui pengukuran absorbans, lalu fungsionalisasi zat pewarna ini didalam sel surya DSSC. Penelitian ini dengan judul: Ekstraksi dan Karakterisasi Zat Pewarna dari Buah Naga Merah (*Hylocereus polyrhizus*) Sebagai Penyerap Cahaya dalam Sel Surya DSSC diharapkan dapat meningkatkan nilai efisiensi dari penelitian sebelumnya.

METODE

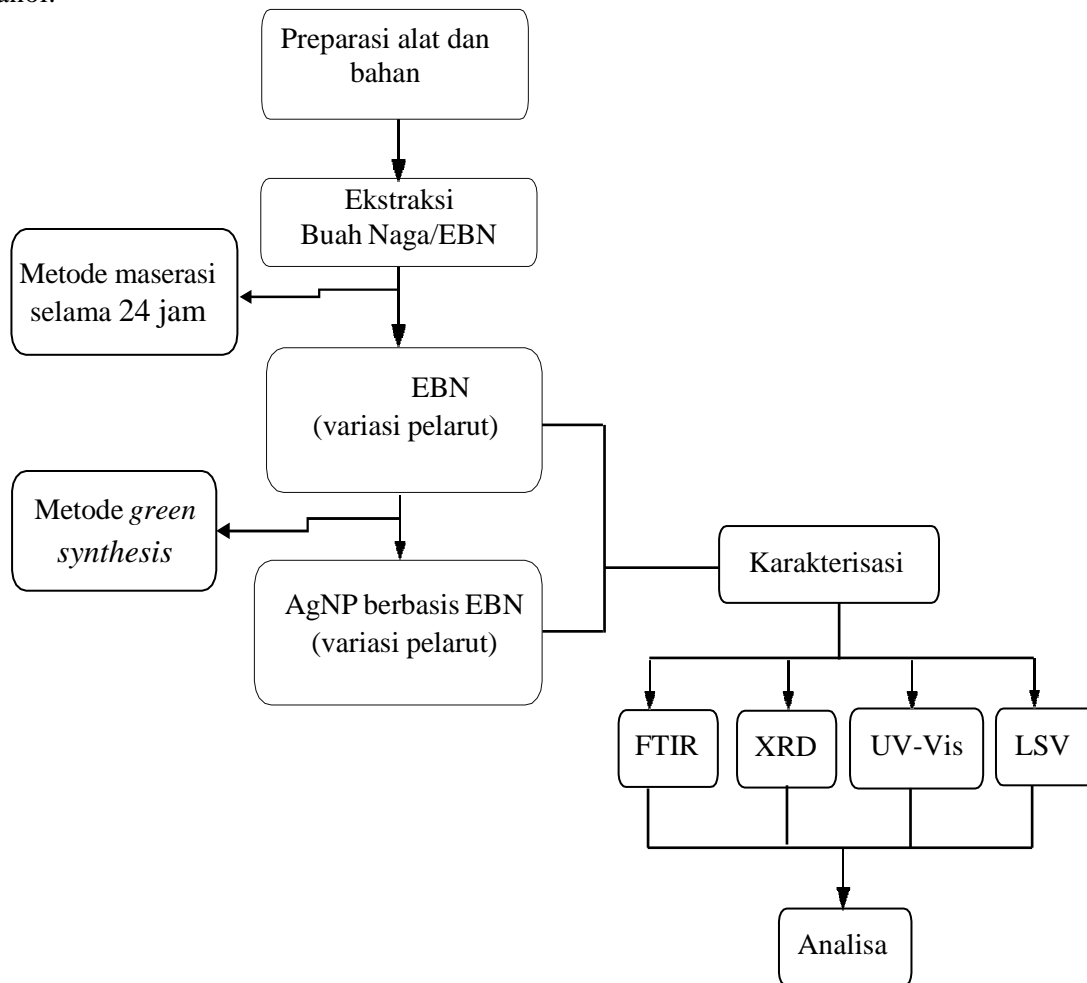
Penelitian ini merupakan penelitian eksperimental dalam bidang fisika material. Diagram alur penelitian ditunjukkan pada gambar 1. Proses pembuatan zat pewarna buah naga dengan metode maserasi lalu dilanjutkan dengan pembuatan nanopartikel perak dari Ekstrak Buah Naga (EBN) dan AgNO_3 dengan metode *Green Synthesis*. Ekstrak buah naga dan nanopartikel perak akan dikarakterisasi dengan FTIR, XRD, UV-Vis dan LSV. Untuk melihat lebih jelas proses pembuatan zat pewarna buah naga dan nanopartikel perak dapat dilihat pada langkah-langkah berikut :

1. Pembuatan Larutan Dye Organik

Ekstraksi Buah Naga. Ekstraksi zat pewarna dilakukan dengan memotong kecil-kecil buah naga dan dihaluskan dengan blender selama kurang lebih 1 menit. Setelah itu disaring dan ditimbang sebanyak 20 gram. Kemudian ditambahkan 20 ml pelarut aquades. Larutan diaduk di atas *magnetik stirrer* selama 10 menit, lalu dimaserasi selama 24 jam dan disaring. Langkah ini diulangi untuk variasi pelarut etanol dan methanol.

Sintesis Nanopartikel Perak (AgNP). Pembuatan larutan nanopartikel dilakukan dengan mengikuti metode penelitian Tamileswari dkk. (2015). Larutan AgNO_3 1 mM dibuat dengan perhitungan stoikiometri

dan menghasilkan massa $AgNO_3$ seberat 0.0169 gram. Selanjutnya $AgNO_3$ dilarutkan ke dalam 100 ml pelarut aquades. Ekstrak biasa aquades 10 ml dilarutkan ke dalam 90 ml $AgNO_3$. Larutan diinkubasi selama 15 menit di ruangan tertutup lalu disaring menggunakan kertas saring *whattman*, kemudian disimpan ke dalam botol gelap yang dilapisi *aluminium foil*. Langkah-langkah ini diulangi untuk variasi pelarut etanol dan metanol.



Gambar 1. Diagram Alur Penelitian

2. Preparasi Lapisan Elektroda TiO_2 Untuk Pengukuran Linear Sweep Voltametry (LSV)

Deposisi pasta TiO_2 dilakukan dengan metode *Screen Printing*. Pasta TiO_2 yang digunakan terdiri atas dua jenis yaitu untuk lapisan TiO_2 transparan menggunakan Ti-Nanoxide T/SP dan untuk lapisan TiO_2 reflektor (sebagai lapisan penghambur) digunakan Ti-Nanoxide MC/SP. Adapun langkah-langkah untuk deposisi pasta TiO_2 yaitu: (1) Jenis grid yang akan digunakan dipilih dan dibersihkan dengan etanol teknis; (2) Pasta TiO_2 diisi disalah satu sisi dari grid yang telah dipilih tersebut kemudian ditekan dan disapukan sebanyak 1 kali. Lapisan TiO_2 transparan yang dibuat dalam penelitian ini adalah sebanyak 3 kali pelapisan; (3) Setelah lapisan pertama pasta TiO_2 disapukan di atas permukaan substrat FTO, dilanjutkan dengan proses pemanasan di atas *hot plate* dengan suhu $80^\circ C$ selama 5 menit. Ulangi langkah ini sebanyak jumlah lapisan TiO_2 transparan yang diinginkan; dan (4) Pada lapisan terakhir poin ke-(2) diulangi dengan menggunakan pasta Ti-nanoxide MC/SP sebagai lapisan penghambur (lapisan yang dibuat adalah satu lapis). Setelah proses *Screen Printing* selesai, dilanjutkan proses kalsinasi di atas *hot plate* dan dipanaskan secara gradual hingga suhunya mencapai $500^\circ C$.

a. Perendaman Elektroda TiO_2 pada Dye Organik

Dye organik dimasukkan ke dalam wadah sebanyak 4 mL. Elektroda TiO_2 diletakkan dalam posisi vertikal ke dalam wadah yang telah berisi larutan *dye*, kemudian tutup wadah tersebut dan simpan di tempat yang terlindung dari cahaya selama ± 24 jam. Setelah elektroda TiO_2 dikeluarkan dari larutan dye, segera dibilas dengan etanol teknis, kemudiandikeringkan.

3. Karakterisasi

Struktur molekul dan struktur kristal EBN dan AgNP diidentifikasi menggunakan spektroskopi *Fourier Transform Infrared Spektroskopi (FTIR)* dan *X-Ray Diffraction (XRD)*. Daerah serapan EBN dan AgNP

kemudian dikarakterisasi menggunakan *Spektrofotometer UV-Vis* untuk memperoleh spektrum absorbansnya sehingga dapat diestimasi nilai celah energi (E_g), dan untuk mengetahui kemampuan fotoelektrokatalisis elektroda kerja DSSC yang telah dibuat, dilakukan pengukuran menggunakan metode *Linear Sweep Voltametry (LSV)*.

HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

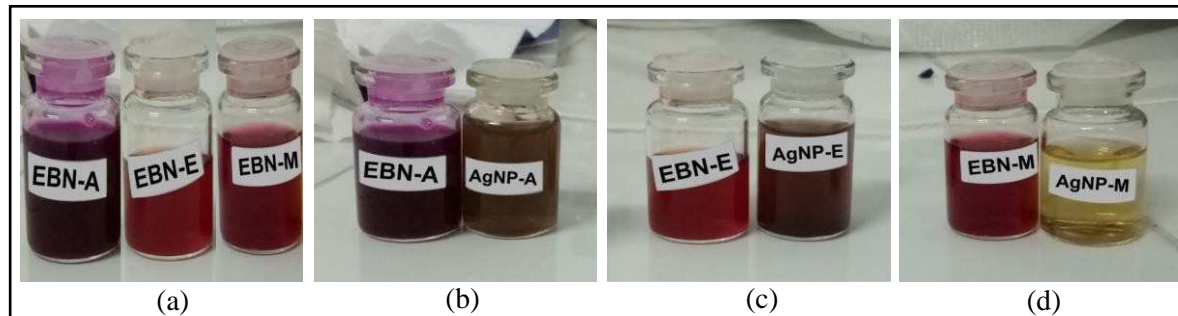
1. Proses Ekstraksi Zat Pewarna dari Buah Naga dengan Variasi Pelarut

Proses ekstraksi zat pewarna buah naga dilakukan dengan menggunakan variasi pelarut yaitu pelarut akuades, etanol dan metanol. Untuk memudahkan penamaan sampel, maka nama sampel dan singkatannya dirangkum pada Tabel 1.

Tabel 1. Penamaan Sampel dan Singkatannya.

Nama Sampel	Singkatan
Ekstrak buah naga pelarut akuades	EBN-A
Ekstrak buah naga pelarut etanol	EBN-E
Ekstrak buah naga pelarut metanol	EBN-M
AgNP dalam pelarut akuades	AgNP-A
AgNP dalam pelarut etanol	AgNP-E
AgNP dalam pelarut metanol	AgNP-M

Tampilan ekstrak zat pewarna buah naga dan AgNP untuk variasi pelarut ditunjukkan pada Gambar 2. Berdasarkan Gambar 2(a), terlihat sampel ekstrak buah naga (EBN) menunjukkan warna yang relatif berbeda, untuk pelarut akuades menunjukkan warna ungu gelap dan lebih pekat, hal ini kemungkinan besar dipengaruhi oleh adanya gugus hidroksi yang dominan. Sedangkan pelarut etanol dan metanol hampir sama, yaitu *reddish purple* (ungu kemerahan). Untuk sampel EBN-A, EBN-E dan EBN-M perbedaan warna tersebut terkonfirmasi melalui perbedaan pHnya, yaitu 3,76, 5,07, dan 5,02 secara berurutan. Penyebab dari perbedaan warna tersebut disebabkan oleh adanya gugus metoksi yang dominan sehingga berimplikasi pada tingkat keasamaan dari sampel (Deman, 1997).



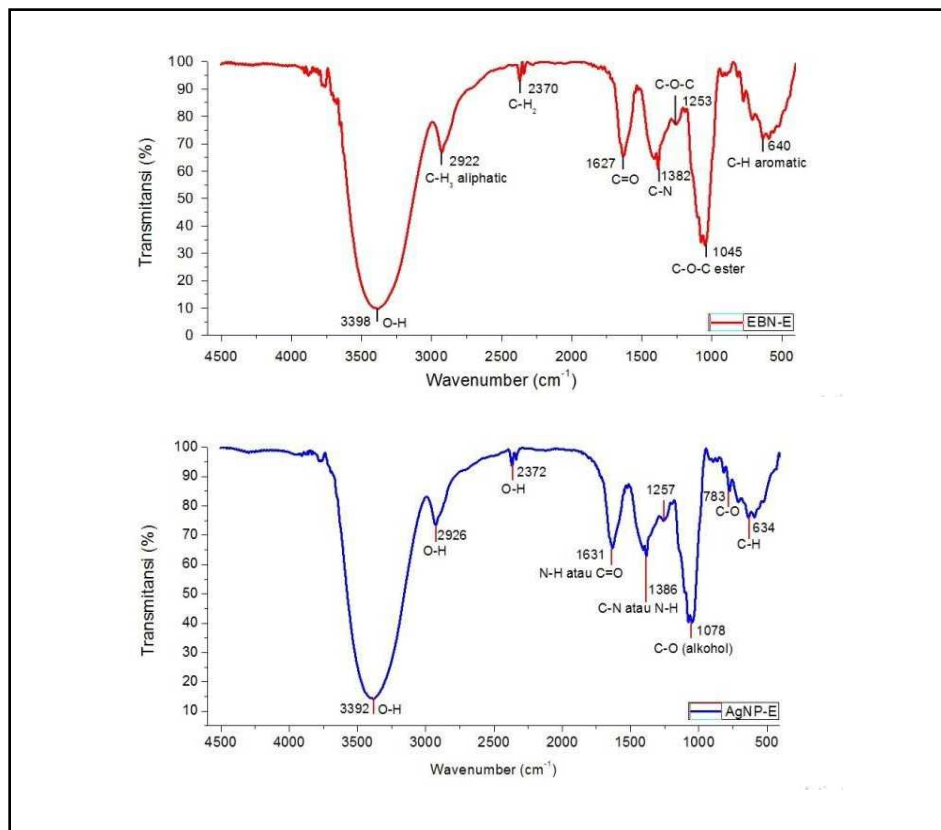
Gambar 2. Ekstrak zat pewarna buah naga untuk variasi pelarut akuades, etanol dan metanol (a), ekstrak zat pewarna buah naga dan AgNP dalam akuades (b), ekstrak zat pewarna buah naga dan AgNP dalam etanol (c), dan ekstrak zat pewarna buah naga dan AgNP dalam metanol (d)

Gambar 2(b-d) menunjukkan sampel nanopartikel perak (AgNP) yang disintesis menggunakan EBN dengan variasi pelarut. Terlihat jelas warna sampel EBN dan AgNP menunjukkan perbedaan yang sangat signifikan, dimana warnanya berubah dari ungu pekat menjadi hijau kecoklatan (*greenish brown*) (untuk pelarut akuades/AgNP-A), coklat muda untuk AgNP dengan pelarut etanol (AgNP-E) dan kuning bening untuk pelarut metanol (AgNP-M). Perubahan warna ini juga diikuti oleh perubahan nilai pH, yaitu 3,76 untuk EBN-A menjadi 3,65 untuk AgNP-A, 5,07 menjadi 5,52 dan 5,02 menjadi 6,26 untuk EBN-E menjadi AgNP-E dan EBN-M menjadi AgNP-M secara berurutan. Perbedaan nilai pH yang signifikan antara AgNP-E dan AgNP-M juga mengkonfirmasi perbedaan warna yang dihasilkan oleh keduanya.

2. Karakterisasi Struktur Molekul Zat Pewarna Dari Buah Naga Dengan FTIR

Ekstrak buah naga dapat digunakan sebagai *dye* untuk menyerap energi cahaya sebab didalamnya mengandung antosianin. Antosianin merupakan pigmen warna dari golongan flavonoid yang memiliki dua

cincin benzen yang saling terhubung dengan tiga atom karbon, ketiga atom karbon tersebut dirapatkan oleh sebuah atom oksigen dan akan terbentuk dua cincin benzen (Sutrisno, 2009).



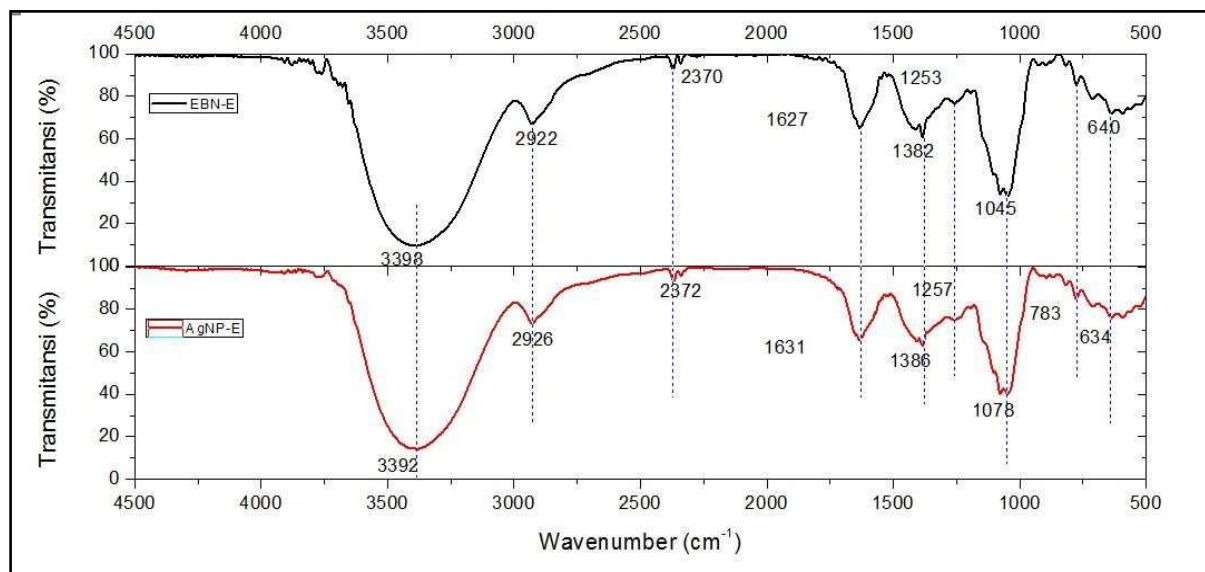
Gambar 3. Spektrum FTIR EBN-E dan Spektrum FTIR AgNP-E

Karakterisasi dengan menggunakan spektroskopi FTIR dilakukan untuk mengamati perubahan struktur molekul zat pewarna dari EBN yang berupa *crude extract anthocyanin* pada pelarut etanol (EBN-E) menjadi nanopartikel perak (AgNP) yang disintesis menggunakan EBN dengan pelarut yang sama, dan untuk mengidentifikasi gugus fungsional tertentu yang nantinya akan berikatan dengan TiO₂ sehingga *dye* alami dapat terserap secara efektif pada permukaan TiO₂ ketika diaplikasikan dalam sel surya DSSC. Spektrum FTIR sampel EBN-E ditampilkan pada Gambar 3.

Tabel 2. Pita serapan gugus fungsi EBN-E dan AgNP-E hasil analisis FTIR

EBN-E	Gugus Fungsi	AgNP-E	Gugus Fungsi
3398	Ikatan O-H	3392	Ikatan O-H (H mengikat alkohol dan fenol)
2922	Ikatan C-H ₃ (gugus methyl)	2926	Vibrasi ulur C-H dari Alkana atau vibrasi ulur O-H dari asam karbosilat
1627	Uluran C=O yang berasal dari aldehida dan keton	1631	Vibrasi tekuk N-H yang berasal dari gugus amina, flavanones dan pita serapan amida I
1382	Vibrasi C-N dari gugus amina	1386	Vibrasi C-N dari gugus amina atau berasal Vibrasi N-H dari amida tipe I dan II, Vibrasi ulur C=C dari gugus amina Vibrasi tekuk N=O dari gugus nitro vibrasi ulur gugus karbonil (C=O)
1253		1257	Ikatan C-O dalam ester Vibrasi ulur C-N dari asam karboksilat yang berhubungan dengan pita serapan protein dalam bentuk amida II
1045	Vibrasi tekuk C-O-C	1078	Vibrasi tekuk C-O-C
-		783	Pita serapan yang berasal dari ikatan C-O dan C-H dalam alkena

Dari hasil pencocokan spektrum FTIR EBN-E dengan beberapa referensi diperoleh daerah serapan antosianin dari buah naga dengan pelarut etanol terdiri dari ikatan O-H pada rentang daerah $3000\text{--}3500\text{ cm}^{-1}$ dengan intensitas yang tajam pada 3381 cm^{-1} , ikatan C-H₃ (gugus methyl) pada 2926 cm^{-1} , vibrasi ulur (*stretching vibration*) dari C=O pada 1629 cm^{-1} . Daerah serapan pada 1629 cm^{-1} , ini juga dapat berasal dari vibrasi ulur simetris atau asimetris dari ion *carboxyl* (COO⁻) yang mengindikasikan adanya gugus asam karboksilat, ester atau gugus karbonil (Muchuweti, *et al.*, 2008). Vibrasi tekuk (*bending vibration*) C-O-C dengan intensitas yang tinggi pada 1076 cm^{-1} , dan intensitas rendah pada 1261 cm^{-1} , yang mengindikasikan kehadiran gugus karbohidrat (Vasincu, *et al.*, 2014). Pita serapan pada 1408 cm^{-1} , dapat berhubungan dengan vibrasi C-N dari grup amina (Syafinar, *et al.*, 2015) dan (Adib, *et al.*, 2014). Beberapa pita serapan juga teridentifikasi pada rentang $800\text{--}500\text{ cm}^{-1}$, dimana pita serapan pada 667 cm^{-1} , berhubungan dengan vibrasi ikatan C-H aromatic (Wahyuningsih, *et al.*, 2017). Daerah serapan AgNP dalam pelarut etanol menunjukkan vibrasi pada daerah 3392 cm^{-1} , 2926 cm^{-1} , 2372 cm^{-1} , 1631 cm^{-1} , 1386 cm^{-1} , 1257 cm^{-1} , 1078 cm^{-1} , 783 cm^{-1} , dan 634 cm^{-1} . Adapun perbandingan antara Spektrum FTIR ekstrak buah naga dan AgNP dalam pelarut etanol ditampilkan pada Gambar 4.



Gambar 4. Perbandingan Spektrum FTIR EBN-E dan AgNP-E

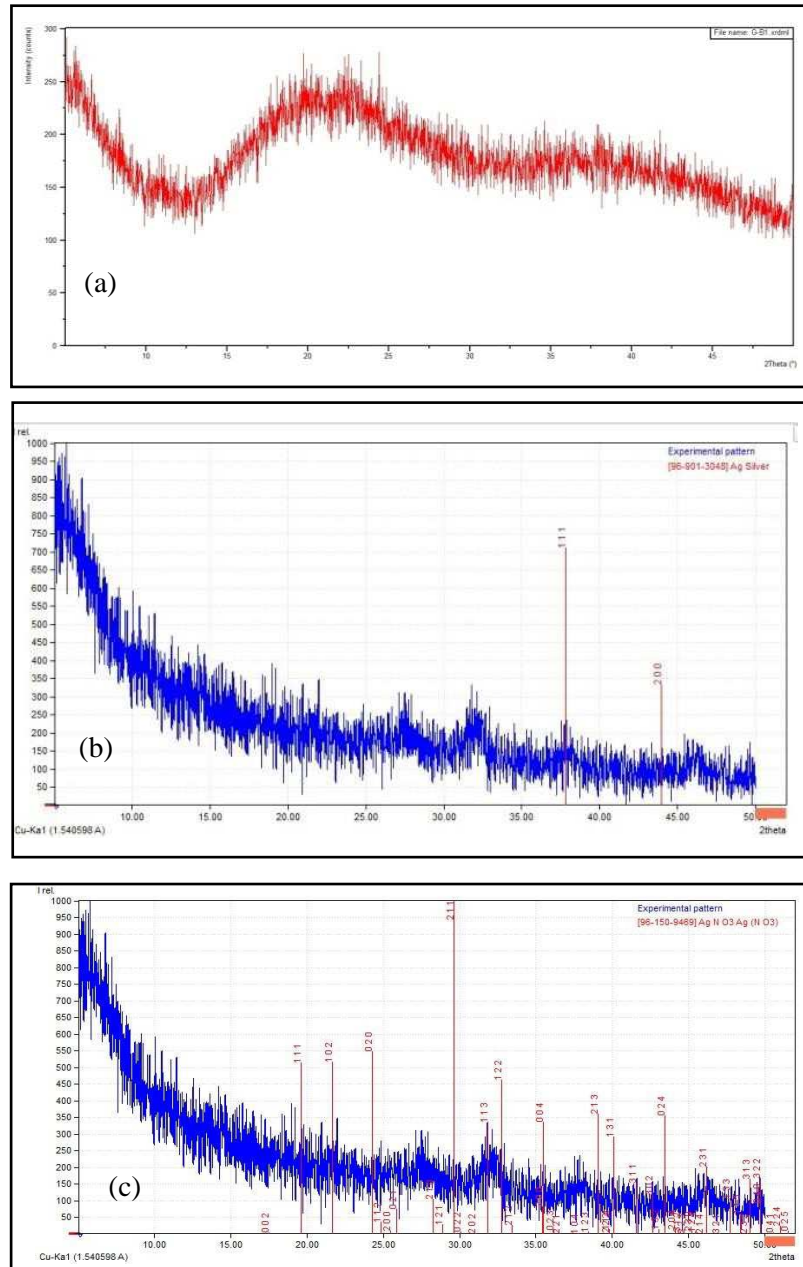
Terlihat ada beberapa puncak serapan yang ada tetap, dan ada pula yang mengalami pergeseran. Pergeseran puncak serapan dalam FTIR dapat dihubungkan dengan perubahan pada karakteristik ikatan, akan tetapi apakah kemudian membentuk ikatan baru atau tidak akan diamati dari perubahan intensitasnya. Berdasarkan perbandingan spektrum FTIR EBN-E dan AgNP-E terlihat bahwa serapan pada daerah 3398 cm^{-1} , yang bergeser menjadi 3392 cm^{-1} mengindikasikan ikatan O-H dimana H mengikat alkohol dan fenol, kemudian daerah serapan 2922 cm^{-1} , bergeser menjadi 2926 cm^{-1} , dimana pita serapan ini berhubungan dengan ikatan CH₃ pada EBN-E dan vibrasi ulur C-H dari alkana (Arulkumar, 2010 dan Kurdekar, dkk., 2017), atau vibrasi ulur O-H dari asam karboksilat (Mallikarjuna, dkk., 2011) pada AgNP-E. Pita serapan pada 1627 cm^{-1} , yang berhubungan dengan vibrasi ulur C=O (Kurdekar, dkk., 2017 dan Paulkumar, 2017) kemudian bergeser pada daerah 1631 cm^{-1} , yang pada beberapa referensi dihubungkan dengan vibrasi tekuk (*bend*) N-H (Roni, dkk., 2013), (Mallikarjuna, dkk., 2011) dan (Baskaran, dkk., 2013) yang berasal dari grup amina, *flavanones* dan pita serapan amida I.

Pita serapan pada 1382 cm^{-1} yang berhubungan dengan ikatan C-N pada EBN-E yang kemudian bergeser pada 1386 cm^{-1} yang kemungkinan berasal dari ikatan C-N dari gugus amina (Roni, dkk., 2013), (Mallikarjuna, dkk., 2011) dan (Kurdekar, dkk., 2017), atau berasal dari ikatan N-H dari amida tipe I dan II (Rama Koyyati, dkk., 2014), vibrasi ulur C=C dari gugus amina (Arulkumar, 2010), atau vibrasi tekuk N=O dari gugus nitro (Paulkumar, 2017) serta bisa juga berasal dari vibrasi ulur gugus karbonil (C=O) (Baskaran, dkk., 2013). Daerah serapan pada 1253 cm^{-1} yang tidak teramati pada EBN-E karena *overlapping* dengan pita serapan pada 1257 cm^{-1} , kemudian muncul pada AgNP-E yang diasosiasikan dengan ikatan C-O dalam ester (Paulkumar, 2017) atau vibrasi ulur C-N dari asam karboksilat (Mallikarjuna, dkk., 2011) yang berhubungan dengan pita serapan protein dalam bentuk amida II. Pita serapan yang berasal dari ikatan C-O dan C-H dalam alkena muncul pada 640 cm^{-1} dan 634 cm^{-1} dalam AgNP-E.

Tabulasi ikatan-ikatan kimia yang mungkin terbentuk di dalam EBN dan AgNP dalam pelarut etanol ditampilkan pada Tabel 2. Dari uraian di atas dan tabulasi pada Tabel 2 dapat dilihat bahwa adanya kemungkinan antara atom karbon (C) atau atom oksigen (O) dengan atom nitrogen (N) dalam bentuk C-N atau N=O, yang mengindikasikan bahwa atom nitrogen kemungkinan berperan dalam proses stabilisasi AgNP, karena donasi elektron dari nitrogen ke atom perak (Ag) akan menghalangi resonansi dari gugus amida.

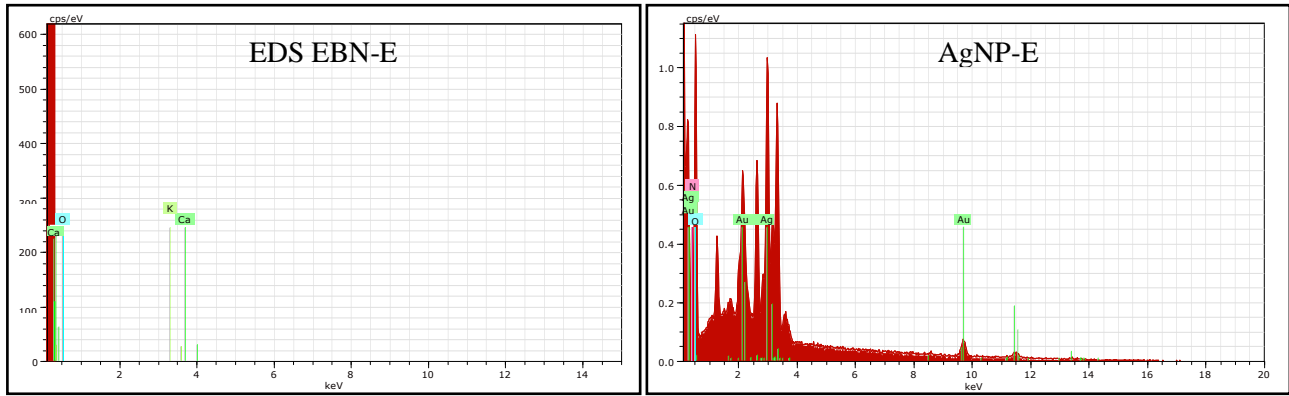
3. Analisis spektrum XRD Ekstrak Buah naga dan AgNP

Analisis dengan metode difraksi sinar-X dilakukan untuk mengidentifikasi terbentuknya nanopartikel perak (AgNP) dan dari spektrum XRD nya kemudian dapat diestimasi nilai ukuran kristalitnya melalui persamaan Scherer.



Gambar 5. Hasil analisis XRD (a) EBN-E, (b) AgNP-E untuk puncak Ag (c) AgNP-E untuk puncak AgNO₃

Berdasarkan Gambar 5(a), spektrum XRD EBN-E menunjukkan bentuk amorf dengan puncak *non-Bragg* yang lebar pada sudut 2θ dalam rentang (15 – 25)⁰. Penambahan AgNO₃ kedalam larutan ekstrak yang menghasilkan AgNP kemudian nampak pada spektrum XRD pada Gambar 5 (b dan c) dengan kristanilitas yang lebih baik dengan menghilangnya puncak amorf dan teramatinya puncak-puncak yang cukup tajam pada posisi 2θ yakni 28,06; 29,54; 44,19; 45,99; dan 37,92.



Gambar 6. Spektrum EDS EBN-E dan AgNP-E

Dari hasil pencocokan dengan database, dikonfirmasi bahwa puncak yang teramati adalah puncak untuk $AgNO_3$ dan Ag, yang kemudian dikonfirmasi lebih lanjut melalui pengukuran *Energi Dispersive Spectroscopy* (EDS) pada Gambar 6, dimana atom Ag terdeteksi sebanyak 6,62% seperti yang ditunjukkan oleh Tabel 3 berikut.

Tabel 3. Hasil analisis spektrum EDS EBN-E dan AgNP-E

Nama Unsur	Nomor Atom	Atom C (at%)	
		EBN-E	AgNP-E
O	8	93,48	73,50
Ag	47	-	6,22
Ca	20	2,55	-
N	7	-	17,35
Au	79	-	2,93
K	19	3,97	-

Berdasarkan nilai FWHM (*Full Width at Half Maximum*) dapat ditentukan ukuran kristal AgNP-E dengan menggunakan persamaan *Debye Scherrer*.

$$D = \frac{\kappa \lambda}{\beta \cos \theta} \quad (1)$$

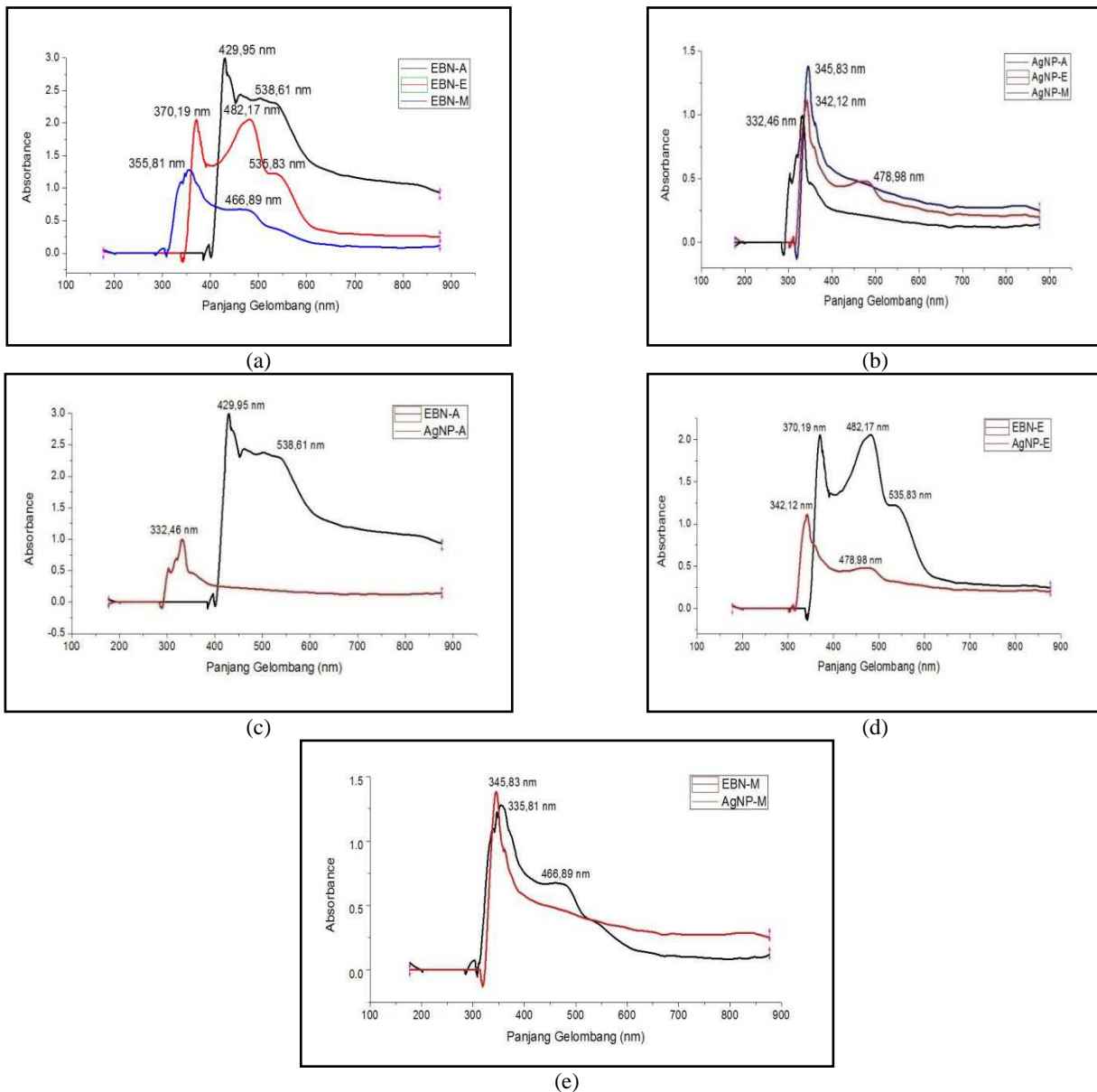
Dengan κ adalah konstanta material, λ adalah panjang gelombang sinar X, β adalah FWHM dan θ adalah posisi puncak kristalit berada. Hasil perhitungan untuk semua puncak yang teramati pada Gambar 5, ditabulasi pada Tabel 4, dimana ukuran kristalit untuk puncak utama pada sudut $2\theta = 37,96^\circ$ adalah 10,48 nm.

Tabel 4. Tabulasi estimasi ukuran kristalit AgNP dalam pelarut etanol

Puncak Ke-	Sudut (2θ)	FWHM ($^\circ$)	β (rad)	hkl	D (nm)
P1	27,29	0.8029	0.014006	111	10,19
P2	32,12	0.8029	0.014006	311	10,31
P3	37,96	0.8029	0.014006	111	10,48
P4	46,20	0.9368	0.016342	231	9,23

4. Karakterisasi Daerah Penyerapan Zat Pewarna Buah naga dengan UV-Vis

Spektrum absorbans zat pewarna ekstrak buah naga dalam pelarut akuades, etanol dan metanol dikarakterisasi dengan menggunakan spektrofotometer UV-Vis. Hasilnya ditampilkan pada Gambar 7 berikut.

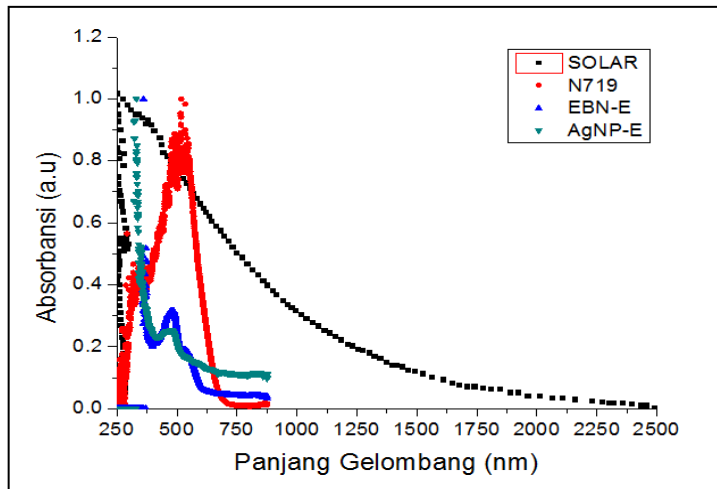


Gambar 7. Spektrum absorbans EBN dan AgNP dengan variasi pelarut

Gambar 7 (a) menunjukkan spektrum absorbans EBN dengan variasi pelarut dimana ketiga kurva tersebut menunjukkan pola serapan yang hampir sama dengan adanya dua puncak penyerapan yaitu puncak penyerapan yang sempit pada panjang gelombang 429,95 nm, 370,19 nm dan 355,81 nm untuk EBN -A, EBN -E dan EBN-M secara berurutan, dan daerah serapan dengan puncak yang lebar pada rentang panjang gelombang 300-350 nm untuk ketiga jenis pelarut. Hasil ini sesuai dengan daerah serapan untuk antosianin yang diperoleh dari referensi lain (Chigurupati, et al., 2002) dan (Chang, et al.,2013). Puncak penyerapan EBN-A, EBN-E dan EBN-M mengalami *blue-shift* ke arah panjang gelombang yang lebih pendek.

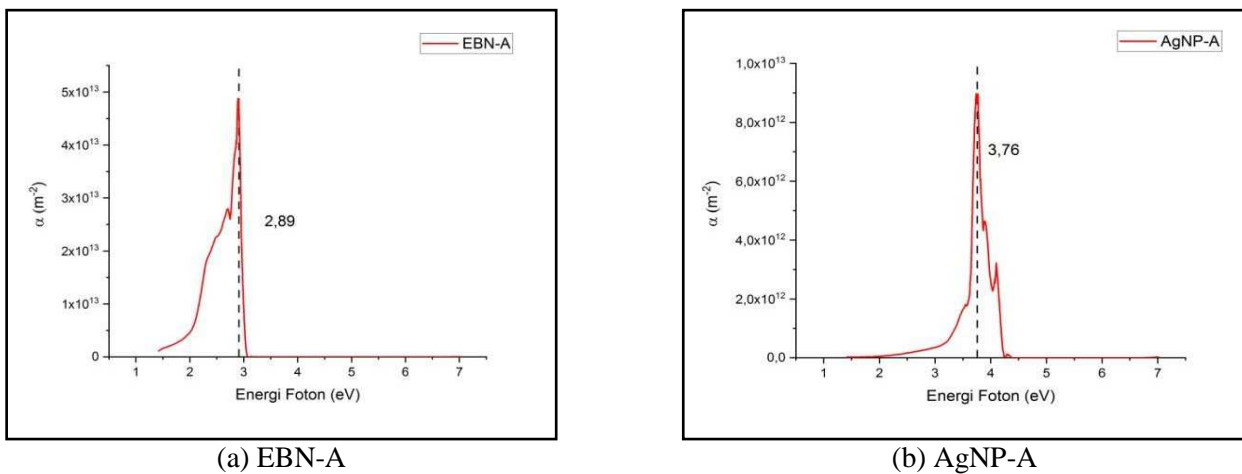
Gambar 7 (b) menunjukkan spektrum absorbans AgNP dengan variasi pelarut. Terlihat bahwa puncak penyerapan yang berhubungan dengan daerah serapan antosianin pada panjang gelombang sekitar 550 nm menjadi hilang, dan hanya menyisakan puncak penyerapan yang sempit pada panjang gelombang 332,46 nm, 342,12 nm dan 345,83 nm untuk AgNP-A, AgNP-E dan AgNP-M. Hilangnya puncak penyerapan antosianin pada panjang gelombang 550 nm kemungkinan terjadi karena adanya penambahan $AgNO_3$ yang mengakibatkan Ag^+ terikat pada salah satu gugus hidroksi (OH^-) atau karboksilat (COO^-) pada larutan ekstrak. Perbandingan spektrum absorbans antara larutan ekstrak dan AgNP ditampilkan pada Gambar 7 (c, d dan e). Untuk pelarut akuades, etanol dan methanol, penambahan $AgNO_3$ menyebabkan daerah serapannya sedikit mengalami *blue shifted* ke arah panjang gelombang yang lebih pendek. Adanya partikel Ag juga terkonfirmasi melalui spektrum absorbans yang nampak pada *absorbance tail* (ekor penyerapan) dimana teramati efek hamburan (*scattering*) yang lebih besar. Untuk semua sampel, EBN dan AgNP dengan pelarut metanol menunjukkan nilai absorbans terbesar.

Perbandingan spektrum absorbansi antara cahaya matahari, *dye* standar N719 dengan ekstrak buah naga dan AgNP dalam pelarut etanol ditampilkan pada Gambar 8. Nampak bahwa, berbeda dengan spektrum penyerapan cahaya matahari dari *dye* standar N719 yang mulai dari daerah UV hingga daerah NIR (200 – 800)nm, spektrum penyerapan buah naga dan AgNP hanya berada pada daerah cahaya tampak yaitu pada rentang (390 – 650) nm.



Gambar 8. Perbandingan spektrum absorbansi antara cahaya matahari, *dye* standar N719 dengan ekstrak buah naga dan AgNP dalam pelarut etanol

Dari data hasil UV-Vis maka dapat diestimasi nilai celah energi (E_g) melalui grafik antara nilai energi foton dan kuadrat dari koefisien absorbansi, dimana nilai celah energi ditentukan dari nilai energi foton yang tertinggi (Oviri *et al.*, 2013). Hasilnya ditunjukkan pada Gambar 9 berikut.



Gambar 9. Grafik penentuan E_g

Untuk sampel EBN-A dan AgNP-A, adapun hasil untuk keseluruhan sampel ditabulasi dalam Tabel 5. Dari Tabel 5 dapat dilihat bahwa untuk semua sampel, diperoleh nilai E_g terbesar untuk sampel EBN pelarut metanol dan etanol yaitu 3,51 dan 3,36 dan nilai E_g terkecil adalah untuk pelarut aquades sebesar 2,89. Dengan penambahan Ag pada ekstrak meningkatkan energi gap masing-masing untuk aquades, etanol dan metanol yaitu 3,76, 3,63 dan 3,60 Nilai ini masih jauh lebih besar dari pada nilai E_g untuk *dye* standar berbasis ruthenium yang digunakan dalam sel surya DSSC yaitu 1,99 eV untuk N719 *dye*.

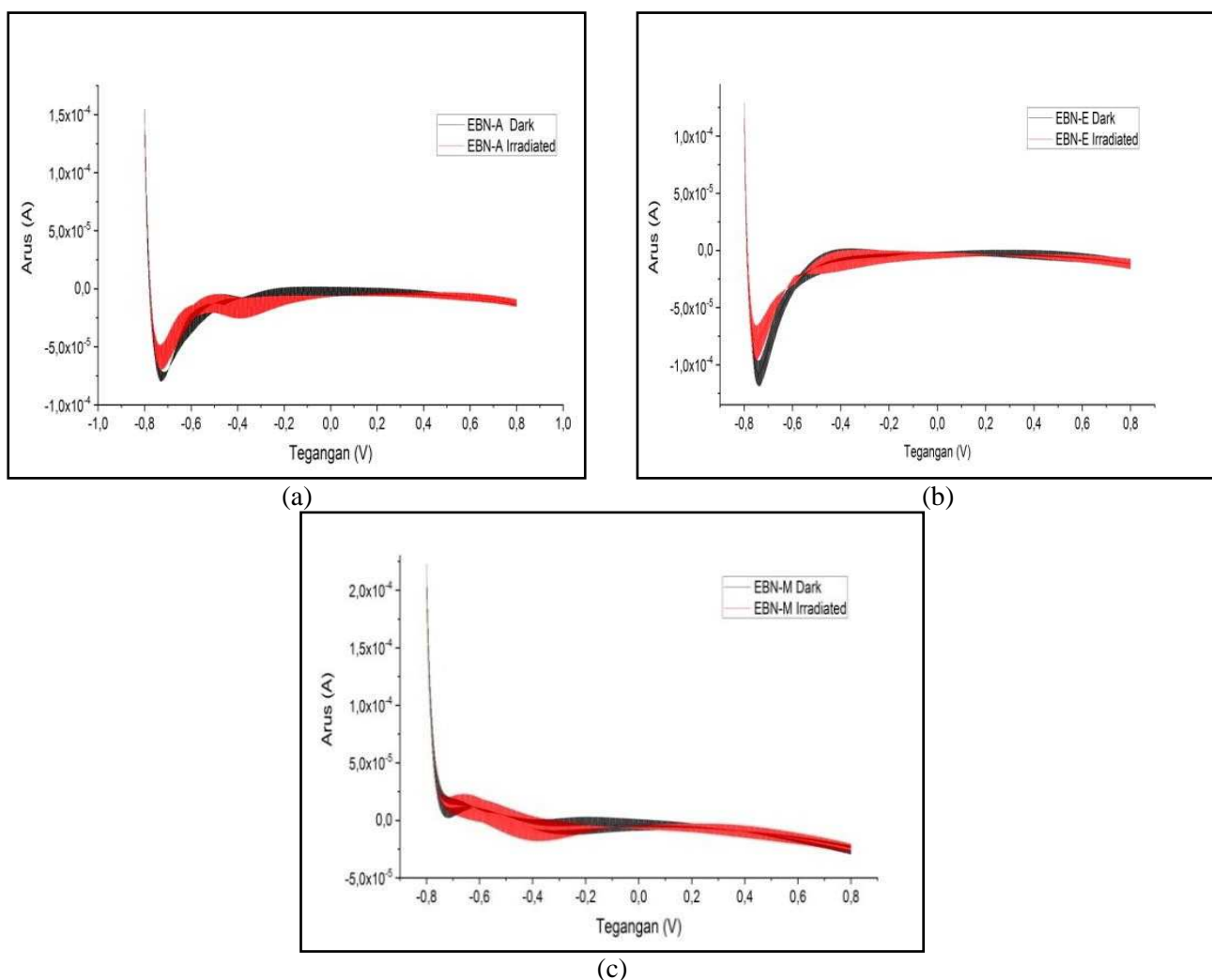
Dari hasil ini estimasi nilai E_g ini, maka larutan ekstrak buah naga yang terbaik digunakan adalah yang menggunakan pelarut aquades karena mempunyai nilai E_g yang terkecil. Berbeda dengan material semikonduktor untuk foto-anoda yang membutuhkan material dengan celah energi yang besar, maka sebaliknya suatu material dapat berperan sebagai penyerap cahaya yang baik jika celah energinya cukup sempit, agar foton yang datang tidak membutuhkan energi yang terlalu besar untuk dapat mengeksitasi elektron dari pita valensi (HOMO) menuju pita konduksi (LUMO).

Tabel 5. Estimasi nilai celah energi (E_g) ekstrak buah naga dan AgNP dengan variasi pelarut

Sampel	Celah Energi (eV)
EBN-A	2,89
EBN-E	3,36
EBN-M	3,51
AgNP-A	3,76
AgNP-E	3,63
AgNP-M	3,60

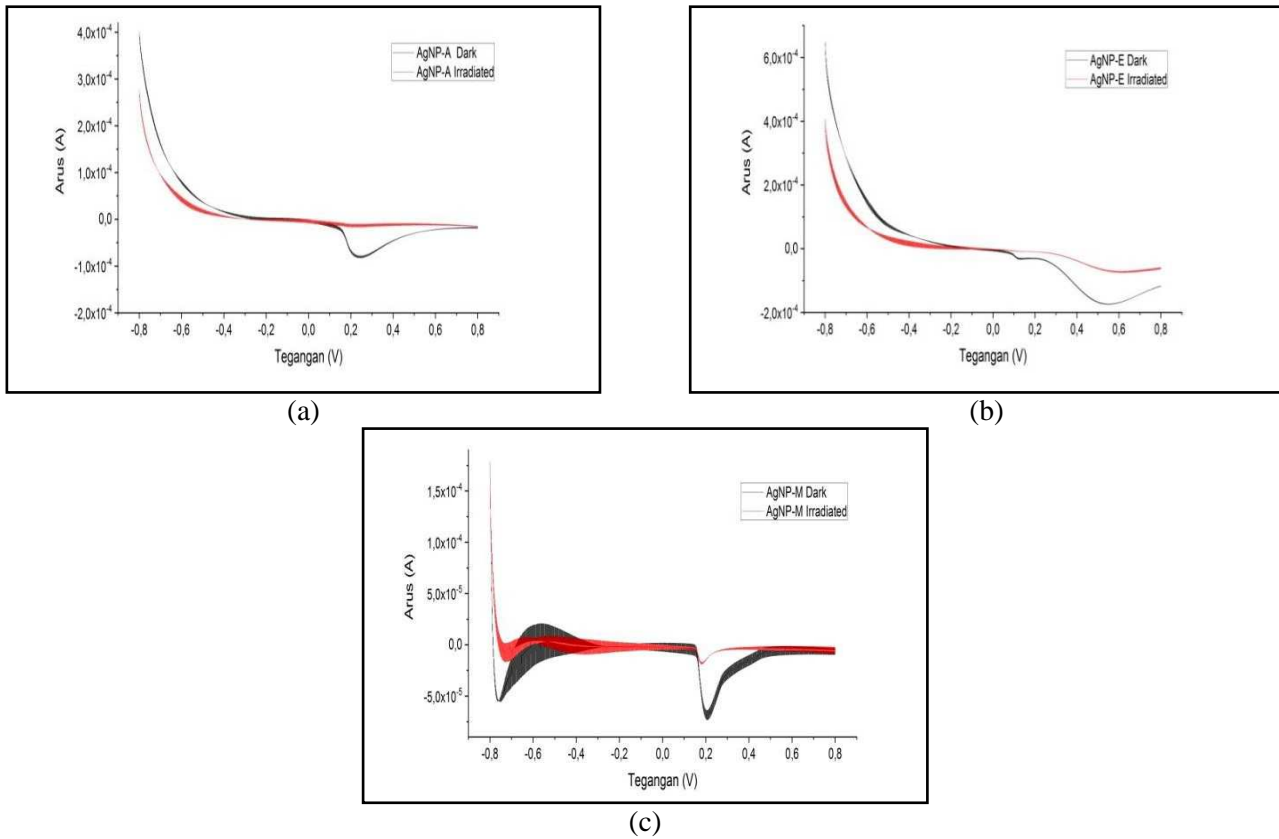
5. Uji Aktivitas Fotoelektrokatalisis Elektroda Kerja dengan Metode *Linear Sweep Voltametry* (LSV)

Metode *Linear Sweep Voltametry* (LSV) merupakan salah satu metode elektrokatalisis skala mikro yang mengkaji informasi tentang analit berdasarkan pengukuran arus (I) sebagai fungsi potensial (V) (Bessegato et al., 2014). Alat yang digunakan dalam metode LSV ini adalah *potensiostat portable*. *Potensiostat* ini akan mengontrol beda potensial antara elektroda kerja dan elektroda pembanding, serta memonitor arus yang dihasilkan (Puranto, 2010). Elektroda TiO_2 -dye AgNP sebagai elektroda kerja, kaca elektroda *counter* dan kawat Pt sebagai elektroda *refrence* (pembanding). Larutan elektrolit yang digunakan adalah $NaNO_3$ 0,1 M yang berperan sebagai medium penghantar (Nurdin, 2014). Uji aktivitas elektroda kerja dengan metode LSV dilakukan untuk mengetahui respon arus cahaya pada saat elektroda kerja hasil preparasi dalam kondisi disinari (terang) dan tidak disinari (gelap). Voltamogram LSV dipengaruhi oleh intensitas reaksi reduksi- oksidasi (redoks) yang terjadi pada elektroda kerja. Reaksi redoks dapat berlangsung jika terbentuk spesi oksidator dan reduktor pada permukaan elektroda akibat induksi foton dengan energi yang sesuai. Reaksi- reaksi tersebut melibatkan transfer elektron sehingga mengakibatkan perbedaan potensial listrik. Beda potensial inilah yang dikonversi menjadi arus cahaya dan ditampilkan pada voltagram.



Gambar 10. Aktivitas fotoelektrokimia elektroda kerja EBN pada kondisi terang gelap dengan variasi pelarut

Untuk perbandingan antara voltamogram EBN dan AgNP dalam kondisi disinari ditunjukkan pada gambar 12. Terlihat perbedaannya dari nilai *starting current* untuk AgNP yang lebih besar dibandingkan dengan nilai *starting current* EBN terkhusus pada sampel dengan pelarut akuades dan etanol, sedangkan dengan pelarut metanol nilai *starting current* EBN-M lebih besar dibandingkan AgNP-M. Selain itu terlihat adanya perbedaan posisi puncak arus reduksi kearah tegangan yang lebih besar.

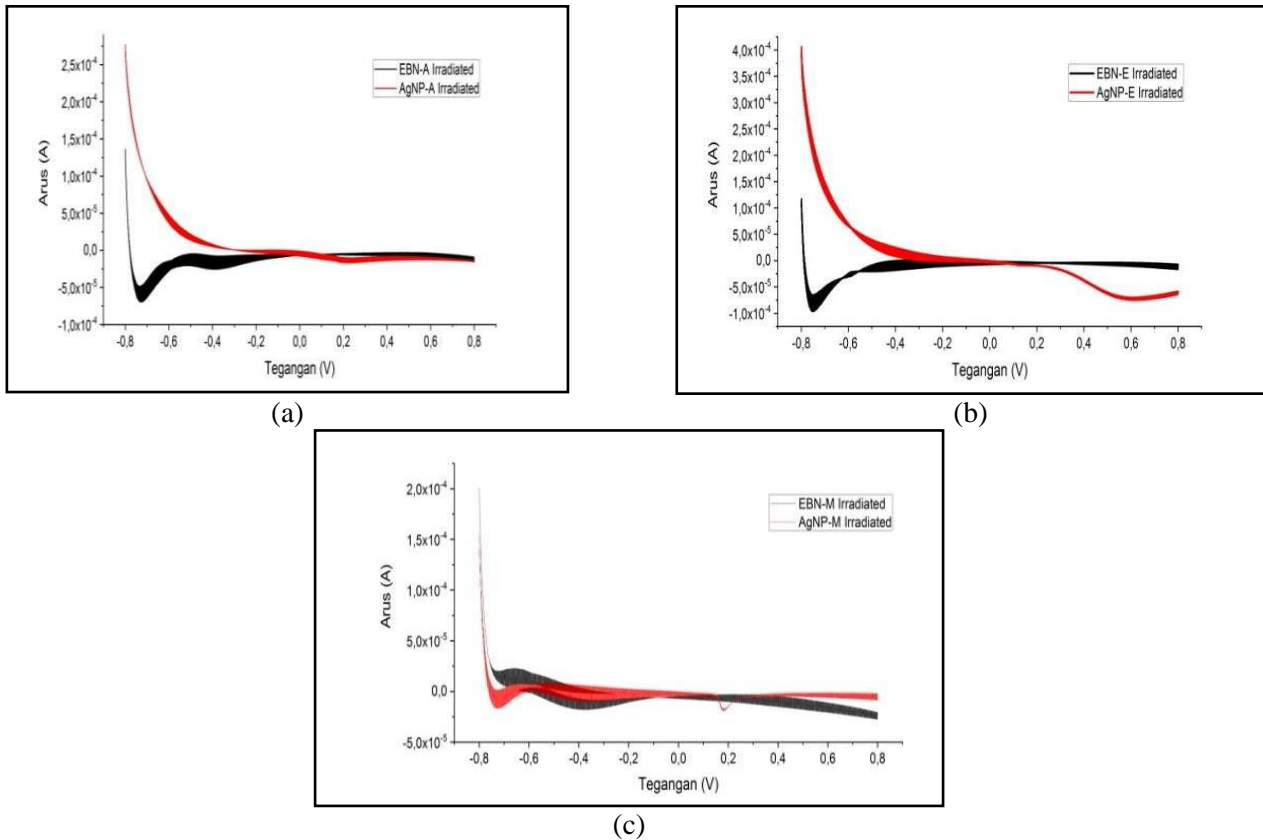


Gambar 11. Aktivitas fotoelektrokimia elektroda kerja AgNP pada kondisi terang dan gelap dengan variasi pelarut

Hasil pengukuran LSV untuk Ekstrak Buah naga (EBN) pada kondisi gelap dan disinari ditampilkan pada Gambar 10. Dilihat adanya perbedaan pada voltagramnya, dimana EBN dengan pelarut akuades dan etanol menunjukkan adanya arus reduksi baik dalam kondisi gelap maupun disinari, dimana arus reduksi tersebut tidak nampak pada voltagram untuk EBN dengan pelarut metanol yang mengindikasikan adanya reaksi yang berbeda di dalam sel. Adapun bentuk voltamogram dalam keadaan gelap dan disinari untuk ketiga sampel adalah sama dimana perbedaannya hanya terletak pada posisi arus pertama dan nilai arus reduksi serta posisinya. EBN-A menunjukkan adanya arus reduksi sebesar $-0,79 \times 10^{-4} \text{A}$ pada tegangan $-0,728 \text{ V}$ dan $-0,69 \times 10^{-4} \text{A}$ pada tegangan $-0,725 \text{ V}$ untuk kondisi gelap dan terang secara berurutan. Adapun EBN-E menunjukkan adanya arus reduksi sebesar $-1,19 \times 10^{-4} \text{A}$ pada tegangan $-0,736 \text{ V}$ dan $-0,95 \times 10^{-4} \text{A}$ pada tegangan $-0,75 \text{ V}$ untuk kondisi gelap dan terang secara berurutan. Sedangkan EBN-M tidak menunjukkan adanya arus reduksi baik pada kondisi gelap maupun kondisi disinari. Adanya arus reduksi dikaitkan dengan proses transfer elektron didalam sistem. Adapun perbedaan kurva LSV untuk keadaan gelap dan disinari untuk semua sampel ekstrak buah naga terletak pada nilai *starting current*nya, dimana nilai *starting current*nya menurun ketika sistem disinari yaitu dari $1,43 \times 10^{-4} \text{A}$ menjadi $1,37 \times 10^{-4} \text{A}$ dan $1,29 \times 10^{-4} \text{A}$ menjadi $1,02 \times 10^{-4} \text{A}$ serta $2,23 \times 10^{-4} \text{A}$ menjadi $2,01 \times 10^{-4} \text{A}$ untuk EBN-A, EBN-E dan EBN-M secara berurutan. Dari kurva LSV tersebut dilihat bahwa EBN dengan pelarut metanol mempunyai nilai *starting current* yang paling besar baik dalam kondisi gelap maupun dalam kondisi disinari.

Hasil pengukuran LSV AgNP untuk semua variasi pelarut dalam kondisi gelap dan disinari ditampilkan pada Gambar 10. Berdasarkan hasil voltamogram sampel AgNP-A hanya menunjukkan arus reduksi pada kondisi gelap. Sementara untuk AgNP-E dan AgNP-M menunjukkan adanya arus reduksi baik pada kondisi gelap maupun disinari akan tetapi posisi puncak reduksinya bergeser kearah tegangan positif yaitu sekitar 0,2 V. Pada

sampel AgNP-M terdapat dua peak arus reduksi pada tegangan -0,75 V dan 0,21 V untuk kondisi gelap. Sementara pada kondisi disinari arus reduksinya sebesar -0,72 V dan 0,18 V. Dari Gambar tersebut juga dapat dilihat bahwa nilai *starting current* untuk semua sampel AgNP juga mengalami peningkatan dari kondisi gelap ke kondisi disinari yaitu dari $4,0 \times 10^{-4}$ A menjadi $2,77 \times 10^{-4}$ A, $6,37 \times 10^{-4}$ A menjadi $3,86 \times 10^{-4}$ A dan $1,78 \times 10^{-4}$ A menjadi $1,54 \times 10^{-4}$ A masing-masing untuk AgNP-A, AgNP-E dan AgNP-M. Nilai *starting current* terbesar untuk AgNP diperoleh pada pelarut akuades. Perbandingan kurva LSV antara EBN dan AgNP dalam masing-masing pelarut dalam kondisi disinari dapat ditampilkan pada Gambar 11.



Gambar 12. Aktivitas foto elektrokimia elektroda kerja EBN dan AgNP pada kondisi terang dengan variasi pelarut

KESIMPULAN DAN SARAN

Adapun kesimpulan pada penelitian ini adalah sebagai berikut: (1) Telah berhasil dilakukan ekstraksi zat pewarna antosianin dari buah naga (*Hylocereus Polyrhizus*) dengan variasi pelarut (akuades, etanol dan metanol) dan sintesis nanopartikel perak (AgNP) yang dikonfirmasi melalui pengukuran FTIR, XRD dan EDS; (2) Ekstrak antosianin yang dihasilkan dari buah naga menunjukkan daerah serapan pada daerah cahaya tampak yaitu dari 300 nm–550 nm, dengan puncak serapan berada pada panjang gelombang sekitar 350 nm dan 555 nm; (3) Sintesis nanopartikel perak (AgNP) dari buah naga kemudian menyebabkan hilang puncak penyerapan pada panjang gelombang 535 nm yang merupakan puncak penyerapan untuk antosianin; (4) Nilai celah energi terkecil diperoleh untuk ekstrak buah naga dengan pelarut akuades yaitu 2,89 eV dan AgNP dengan pelarut metanol sebesar 3,60; (5) Pada ekstrak buah naga dengan pelarut akuades dan etanol menunjukkan adanya proses Faradaik yang ditandai dengan munculnya puncak reduksi pada tegangan sekitar -0,7 V baik kondisi gelap maupun kondisi disinari. Sedangkan pada ekstrak buah naga dengan pelarut metanol, puncak reduksi tersebut tidak muncul yang mengindikasikan bahwa pada EBN dengan pelarut metanol yang dominan adalah proses non-Faradaik; (6) Puncak reduksi pada AgNP dengan pelarut metanol pada kondisi gelap dan disinari terjadi dua tegangan yang berbeda yaitu pada tegangan -0,75 V dan 0,21 V pada keadaan gelap, sedangkan pada kondisi disinari yaitu tegangan -0,72 V dan 0,18 V; dan (7) Puncak arus reduksi pada AgNP pada pelarut akuades dan etanol bergeser ketegangan positif. Dimana untuk AgNP dalam pelarut akuades arus reduksi hilang pada kondisi disinari. Sedangkan pada AgNP pada etanol puncak arus reduksi yang tadinya teramati pada tegangan yaitu 0,11 V dan 0,54 V pada kondisi gelap, Ketika disinari puncak reduksi hanya pada tegangan 0,54 V kemudian hilang. Untuk penelitian selanjutnya sebaiknya perlu dilakukan variasi konsentrasi buah naga dan variasi konsentrasi AgNO₃ agar hasil yang diperoleh lebih baik.

DAFTAR PUSTAKA

- Ali, Riyaz Ahmad Moh., dan Nafarizal Nayan, 2010, *Fabrikasi dan Analisis Sel Surya Dye-Sensitized Menggunakan Pewarna Alami yang Diekstrak dari Buah Naga*, Internasional Journal of engineering Terpadu (Isu Teknik electron dan Elektronik).
- Andrienko, D. 2008. *Cyclic Voltammetry*, http://mpip-mainz.mpg.de/~andrienk/journal_club/cyclic_voltammetry.pdf, diakses tanggal 18 November 2018.
- Arie, H., Ahmad, M., dan Omay, S., 2010, *Sintesis dan Karakterisasi Kristal Cair Ionik Berbasis Garam Fatty Imidazolinium Sebagai Elektrolit Redoks Pada Sel Surya Tersensitisasi Zat Warna*, Jurnal Sains dan Teknologi Kimia, Vol. 1 No. 1, ISSN 2087-7412.
- Ayu, S., R., 2011, *Pembuatan dan Karakterisasi Sel Surya Titanium Dioksida Sensitisasi Dye Antosianin dari Ekstrak Buah Strawberry* [Skripsi], Institut Pertanian Bogor, Bogor. BPPT. (2018). Indonesia darurat Energi. <https://www.bppt.go.id/berita-bppt/bppt-indonesia-darurat-energi>.
- Chapin D. M., Fuller C. S. and Pearson G. O. (1954). A new silicon p-n junction photocell for converting solar radiation into electrical power, *J. Appl. Phys.* Pp. 676–677
- Dahlan, D., dan Fahyuan, H., D., 2014, *Pengaruh Beberapa Jenis Dye Organik Terhadap Efisiensi Sel Surya Dye Sensitized Solar Cell*, Jurnal Sains Materi Indonesia, Vol. 15, No. 2. Januari 2014, 74-79, ISSN 1411-1098.
- Deb, S. K., Ellingson, R., Ferrere, S., Frank, A.J., Gregg, B.A., Nozik, A.J., Taman, N., Schlichthoerl, G., 1998, *Photochemical Solar Cells Based on Dye-Sensitization of Nanocrystalline TiO₂*, National Energy Laboratory, Presented at the 2nd World Conference and Exhibition on Photovoltaic Solar Energy Conversion; 6-10 July 1998, Austria, NREL/CP-590-250-25056.
- Grätzel, M., 2001. *Photoelectrochemical cells*. *Nature*, 414, 338-344, doi:10.1038/35104607.
- Grätzel, M. 2003. *Dye-sensitized Solar Cells*. *Photochem. J. Photobiol. C: Photochem. Rev.*, 145-153, doi: 10.1016/S1389-5567(03)00026-1. of Freiburg.
- Gerald, E., T., 2009, *Sintesis Nanopartikel TiO₂ Dengan Metode Sonokimia Untuk Aplikasi Sel Surya Tersensitisasi Dye (Dye Sensitized Solar Cell – DSSC) Menggunakan Ekstrak Kulit Buah Manggis dan Plum sebagai Photosensitizer* [Tesis], Institut Pertanian Bogor, Bogor.
- Green, M., A., Third generation photovoltaics: *Ultra-high conversion efficiency at low cost*. *Prog. Photovoltaics* 9 (2001): 123.
- Gunlazuardy, J., 2011, *Fotokatalisis Pada Permukaan TiO₂: Aspek Fundamental Dan Aplikasinya*. Di dalam: Seminar Nasional Kimia Fisika II; Jakarta: Jurusan Kimia, FMIPA, Universitas Indonesia.
- Hore, S., C., Vetter, R., Kern, H., Smit, A. Hirsch, Sol. (2006). *Influence Of Scattering Layers On Efficiency Of Dye-Sensitized Solar Cells*. *Solar Energy Material and Solar Cells*, 90, 1176-1188.
- Jung, H. S., Lee, J. K., Nastasi, M., Lee, S. W., Kim, J. Y., Park, J. S., Hong, K. S., Shin, H., 2005, *Preparation Of Nanoporous MgO-coated TiO₂ Nanoparticles and Their Application to The Electrode Of Dye Sensitized Solar Cells*, *Langmuir*, 21, 23, 10332-10335.
- Kim, Y. J., Lee, Y. H., Lee, M. H., Kim, H. J., 2008, *Formation Of Efficient Dye-Sensitized Solar Cells by Introducing An Interfacial Layer Of Long-Range Ordered Mesoporous TiO₂ Thin Film*, *Langmuir*, 24, 22, 13225-13230.
- Kumara, M., S., W., dan Gontjang, P., 2012, *Studi Awal Fabrikasi Dye Sensitized Solar Cell (DSSC) dengan Menggunakan Ekstraksi Daun Bayam (Amarathus Hybridus L.) sebagai Dye Sensitizer dengan Variasi Jarak Sumber Cahaya pada DSSC*, Jurusan Fisika, FMIPA, Institut Teknologi Sepuluh November, Surabaya.
- Lesmana, T., J., 2009, *Pembuatan dan karakterisasi sel surya hibrid ITO/CdS/Klorofil/PANI/ ITO* [tesis]. Bogor: Program Pascasarjana, Institut Pertanian Bogor.
- Mourad F., 2005, *Prototipe Sel Surya Tersensitisasi Dye Menggunakan Elektroda TiO₂/Zno dan Cuscn sebagai Konduktor Hole* [skripsi]. Bogor: Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Institut Pertanian Bogor.
- Nasbey, H., 2011, *Karakteristik Sel Surya dengan Menggunakan Sun Simulator Sederhana*, Prosiding Seminar Semirata, Jakarta.
- Nazeeruddin M.K., Penchy, P., Renouard, T., Zakeeruddin, S.M., Humphry-Baker, R., Comte, P., Liska, P., Liska, P., Cevey, L., Costa, e., Shklover, V., Spiccia, L., Deacon, G.B., Bignozzi Gratzel, M., 2001, *Engineering of efficient panchromatic sensitizer for nanocrystalline TiO₂ based solar cell*. *J. Am.Chem.Soc.* **123**, 1613-1624.
- Ngafifi, M. (2014). *Kemajuan Teknologi dan Pola Hidup Manusia dalam Perspektif Sosial Budaya*. *Jurnal Pembangunan Pendidikan: Fondasi dan Aplikasi*. Vol 2 (1)
- Nuryadi, R., 2011, *Efek Adsorpsi Dye Ke Dalam Lapisan TiO₂ dengan Metode Elektroforesis: DSSC Berbasis Lapisan Ti₂ Terbuat Dengan Metode Slip Casting dan Metode Elektroforesis*, *Jurnal Rekayasa Kimia dan Lingkungan* Vol. 8 No. 1, hal 35-40, 2011 ISSN 1412-5064.
- O'Regan, B., Gratzel, M., 1991, *A Low-Cost, High-Efficiency Solar Cell Based On Dye-Sensitized Colloidal TiO₂*

- Films*, Nature, 335, 737-740.
- Pandey, A., Samaddar, AB., 2006, *Dye Sensitized Photo Voltaic Devices: An Answer To The Daunting Challenge Of Future Energy Crisis*. Advances in Energy Research: 497-502.
- Qitbiyah, Al., Mulliani, L., Suhandi, A., dan Hidayat, J., 2013, *Karakteristik Pasta TiO₂ Suhu Rendah dan Aplikasi Light Scattering Layer pada Dye Sensitized Solar Cell (DSSC)* [Jurnal], Jurusan Pendidikan Fisika FMIPA, UPI, Fibusi (JoF) Vol.1 No. 3.
- Romeo, A. dan Artegiani, E. (2021). CdTe-Based Thin Film Solar Cells: Past, Present and Future. *Energies*. <https://doi.org/10.3390/en14061684>
- S. Hao, J. Wu, Y. Huang and J. Lin. *Natural dyes as photosensitizers for dyesensitized solar cell*. *Journal Solar Energy*. 80 (2006) pp. 209 – 214.
- Smestad, GP., 1998, *Education and Solar Conversion: Demonstrating Electron Transfer*. *Solar Energy Materials and Solar Cells*; 55: 157-178.
- Soleh, A., 2002, *Pembuatan Sel Surya Fotoelektrokimia Titanium Dioksida (TiO₂) Dengan Ekstraksi Klorofil Daun Bunga Sepatu (Hibiscus Rosasinensis L) Sebagai Dye Sensitizer* [Skripsi], Institut Pertanian Bogor, Bogor.
- Stadtlander, C., T., K., -H., 2007, *Scanning Electron Microscopy and Transmission Electron Microscopy of Mollicutes: Challenges and Opportunities*, Modern Research and Educational Topics in Microscopy, USA.
- Subrodo, R., dan Ramelan, A., H., 2012, *Sintesa Titanium Doixide (TiO₂) untuk Dye-Sensitized Solar Cell (DSSC)*, *Jurnal Politeknosains*, Universitas Negeri Semarang.
- Summaryanti, 2011, *Karakterisasi Optik dan Listrik Larutan Klorofil Spirulina SP sebagai Dye-Sensitized Solar Cell (DSSC)* [Skripsi], Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Sebelas Maret, Surakarta.
- Sukmawati, W., 2015, *Kajian Karakterisasi Fungsi Kerja dan Transpor Muatan dalam Sel Surya Tersensitisasi Pewarna Berstruktur Semi-Padat* [Disertasi], Institut Teknologi Bandung, Bandung.
- Sutrisno, H., 2010, *Sel Fotovoltaik Generasi Ketiga: Pengembangan Sel Fotovoltaik Berbasis Titanium Dioksida*, Jurusan Pendidikan Kimia, FMIPA, Universitas Negeri Yogyakarta.
- Ulpiani, 2017, *Sintesis Material Semikonduktor ZnO dengan Metode Sol-Gel dan Karakterisasi Sifat Optiknya*. [Skripsi], Jurusan Fisika, FMIPA, Universitas Halu Oleo, Kendari.
- Wallace R. L., Hanoka J. I., Narasimha S., Kamra S. and Rohatgi A. (1997), 'Thin silicon string ribbon for high efficiency polycrystalline solar cells', Conf. Record 26th. IEEE Photovoltaic Specialists Conf., Anaheim, Piscataway, 99–102.
- Yu, dkk. (2009), *An Efficient and Low Cost TiO₂ Compact Layer For Performance Improvement Of Dye-Sensitized Solar Cells*, *Electrochim, Acta*, 54, 4, 1319-1324.
- Yurugi, T., Ito, S., Numata, Y., Sykes, K., 2001, "SEM/EDX-Integrated Analysis System, SEM-EDX Series", *Readout No. 22*.