

Pengaruh Variasi Lama Pengadukan terhadap Efisiensi Kinerja Dye Sensitized Solar Cell (DSSC) Berbasis Elektrolit Polimer PVDF Nanofiber dan Photosensitizer Alami Daun Pandan Suji

Effect of Variation of Stirring Time on Performance Efficiency of Dye Sensitized Solar Cell (DSSC) Based on Electrolyte Polymer PVDF Nanofiber and Natural Photosensitizer Pandan Suji Leaf

Marinda Mayliansarisyah*, Nita Kusumawati

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

*corresponding author: nitakusumawati0407@gmail.com

Abstrak. Pemanfaatan elektrolit polimer diharapkan menjadi terobosan dalam pengembangan rangkaian DSSC dengan tingkat penguapan dan kebocoran elektrolit minimum. Kestabilan elektrolit polimer tidak hanya berkaitan dengan nilai efisiensi yang baik, namun juga masa guna panjang. Elektrolit polimer PVDF NF pada penelitian ini dipreparasi dengan konsentrasi 18% b/b dalam pelarut DMAc/Aseton (3:2) dan variasi waktu pengadukan 8, 10, 12 dan 14 jam, menggunakan metode *casting electrospinning*. Untuk menentukan efektivitas *photosensitizer* alami, klorofil daun pandan suji diidentifikasi menggunakan spektrofotometri UV-Visible. Hasilnya menunjukkan serapan pada λ_{maks} 464,5 nm (klorofil-a) dan 664,5 nm (klorofil-b) pada pH 2. Hasil karakterisasi secara elektrokimia menggunakan voltametri siklik menghasilkan HOMO sebesar -4,3159 dan LUMO sebesar -3,1201 pada pH 2. Nilai celah pita energi (*bandgap*) dari perhitungan metode Touch Plot menunjukkan 1,813 eV. Hasil uji kinerja menunjukkan tegangan 432 mV dan arus 10×10^{-3} mA dengan nilai efisiensi sebesar 1,34% pada rangkaian DSSC berbasis *photosensitizer klorofil daun pandan suji* pH-2 dengan waktu pengadukan polimer selama 10 jam. Hasil penelitian ini menunjukkan potensi pemanfaatan PVDF NF sebagai elektrolit polimer alternatif pada rangkaian DSSC.

Kata-kata kunci: DSSC, elektrolit, polimer, photosensitizer, klorofil

Abstract. The use of polymer electrolytes is expected to be a breakthrough in the development of DSSC circuits with minimum evaporation and electrolyte leakage rates. The stability of polymer electrolytes is not only related to good efficiency values, but also long service life. The PVDF NF polymer electrolyte in this study was prepared with a concentration of 18% w/w in DMAc/acetone (3:2) and various stirring times of 8, 10, 12 and 14 hours, using the casting electrospinning method. To determine the effectiveness of a natural photosensitizer, the chlorophyll of pandan suji leaves was identified using UV-Visible spectrophotometry. The results showed absorption at max of 464.5 nm (chlorophyll-a) and 664.5 nm (chlorophyll-b) at pH 2. The results of electrochemical characterization using cyclic voltammetry produced HOMO of -4.3159 and LUMO of -3.1201 at pH 2. The energy bandgap value from the calculation of the Touch Plot method shows 1.813 eV. The results of the performance test showed a voltage of 432 mV and a current of 10×10^{-3} mA with an efficiency value of 1.34% in a DSSC circuit based on chlorophyll photosensitizer pandan suji leaf pH-2 with polymer stirring time of 10 hours. The results of this study indicate the potential use of PVDF NF as an alternative polymer electrolyte in the DSSC circuit.

Keywords: PVDF nanofiber membrane, solid polymer electrolyte, DSSC, chlorophyll

1. Pendahuluan

Saat ini, dunia sedang menghadapi krisis kekurangan energi yang berkelanjutan, aman, dan ramah lingkungan. Pertumbuhan penduduk yang tidak terkendali menyebabkan tingginya kebutuhan energi listrik suatu negara. Selama ini, upaya pemenuhan kebutuhan energi hanya bergantung pada penggunaan bahan bakar fosil yang tidak hanya akan segera habis persediaannya, namun juga

memicu sejumlah permasalahan terkait pencemaran udara serius. Upaya perlindungan lingkungan secara bertahap telah memotivasi banyak peneliti untuk terus mengeksplorasi sumber energi terbarukan [1]. Selama satu dekade terakhir, minat terhadap energi terbarukan, khususnya yang bersumber dari energi matahari, telah meningkat tajam. Konversi sinar matahari menjadi tenaga listrik oleh sel fotovoltaik (DSSC) sangat menarik perhatian karena memiliki sejumlah kelebihan dibandingkan pembangkit tenaga listrik [2]. Efisiensi konversi energi tinggi dan biaya produksi listrik dari sinar matahari yang rendah, membuat *Pewarna Sensitized Solar Cell* (DSSC) menjadi sangat efektif diantara semua sumber energi terbarukan. Sel fotovoltaik juga memiliki keunggulan pada sifatnya yang tidak ada habisnya, dan tidak mengarah ke pencemaran lingkungan.

Pewarna-Sensitized Solar Cell (DSSC) memiliki efisiensi penyerapan cahaya yang tinggi. Strukturnya dibentuk sedemikian rupa seperti sandwich yang terdiri dari empat bagian, yaitu kaca FTO (*Fluorine Thin Oxide*), molekul pewarna sebagai donor elektron atau penangkap foton cahaya, semikonduktor TiO₂ untuk menyerap dan meneruskan foton menjadi elektron, dan cairan elektrolit sebagai medium transport elektron. Lapisan pewarna tersensitasi dalam DSSC merupakan salah satu komponen utama yang harus diperhatikan. Pada penelitian ini, daun pandan suji dipilih karena mengandung klorofil yang memiliki gugus karboksilat dan dapat berikatan dengan TiO₂ sehingga mampu meningkatkan efisiensi energi [3]. Namun demikian, mahalnya harga dan sifat toksik pewarna sintesis menjadikan pewarna alami sebagai alternatif pengganti potensial.

Parameter selanjutnya yang harus diperhatikan adalah peran elektrolit. Elektrolit memainkan salah satu peran paling penting dalam regenerasi elektron dari keadaan teroksidasi dengan menerima elektron keadaan dasar dari mediator redoks dalam DSSC. Elektrolit harus memenuhi sejumlah persyaratan dalam rangka untuk pemenuhan stabilitas jangka panjang, elektrokimia, termal dan antarmuka, tidak menyebabkan desorpsi dan degradasi pewarna dari permukaan oksida. Ketergantungan DSSC pada elektrolit cair memberikan sejumlah batasan, khususnya penguapan dan kebocoran elektrolit yang menyebabkan singkatnya masa guna DSSC [4]. Permasalahan ini menghambat komersialisasi DSSC [5]. Minimnya keberadaan elektrolit pada rangkaian DSSC akan mempengaruhi distribusi muatan pada semikonduktor, sementara kontak langsung dengan elektrolit dalam jangka waktu panjang akan memicu korosi pada fotoelektroda [2].

Pembuatan dan pemanfaatan elektrolit polimer dari PVDF nanofiber (NF) menjadi salah satu solusi paling potensial terhadap permasalahan stabilitas ini. Upaya yang sama juga telah dilakukan pada penelitian terdahulu dalam mengatasi permasalahan kebocoran dan penguapan elektrolit cair dengan menggantinya menggunakan elektrolit polimer padat [6]. Penelitian sebelumnya berkaitan dengan penyusunan DSSC berbasis *conventional gel electrolyte* yaitu gel yang tersusun dari komponen elektrolit dengan penambahan material polimer dimana dengan adanya perangkat elektrolit tersebut berpengaruh pada *lifetime* dari rangkaian DSSC menjadi lebih lama akan tetapi berdampak juga pada penurunan kinerja DSSC berupa tegangan dan arus. Pada penelitian ini, dilakukan pembuatan perangkat elektrolit dengan memerangkap elektrolit pada polimer PVDF. Elektrolit polimer memiliki jaringan matriks untuk memerangkap elektrolit cair, sehingga mampu mempertahankan kestabilan kinerja DSSC. Secara spesifik, struktur NF mampu meningkatkan mobilitas ionik karena penurunan kristanilitas yang memungkinkan penurunan hambatan bagi transportasi elektron dalam rangkaian DSSC. Elektrolit polimer juga diyakini memiliki keunggulan pada bentuknya yang fleksibel, serta stabilitas dan konduktivitasnya yang tinggi [7]. Meski demikian, sejauh pengetahuan peneliti, belum pernah dilakukan standarisasi rekayasa membran PVDF NF sebagai elektrolit polimer, khususnya lama waktu pengadukan, terhadap efektivitas kinerja rangkaian DSSC.

Preparasi elektrolit polimer dilakukan dengan mempersiapkan membran PVDF NF 18(%b/b) dalam pelarut DMAc/aseton dengan perbandingan sebesar 6:4. Larutan polimer diaduk menggunakan magnetik stirrer dengan variasi waktu pengadukan 8, 10, 12, dan 14 jam. Larutan polimer selanjutnya dicasting menggunakan metode *electrospinning*. *Electrospinning* menjadi salah satu teknologi yang lebih sederhana, relatif cepat, dan murah dalam menghasilkan polimer serat nano

[8]. Dalam penelitian ini, membran PVDF NF dengan variasi lama waktu pengadukan, diuji kinerjanya menggunakan multimeter (I/V) untuk mendapatkan nilai efisiensi.

2. Bahan dan Metode

2.4. Bahan dan Peralatan

Penelitian ini menggunakan bahan *Polyvinylidene fluoride* (PVDF; BM ~534,000, GPC), *N,N-Dimethylacetamide* (DMAc; 99%), aseton (p.a; Emsure), kaca *Fluorine Tin Oxide* (FTO), *ethylene carbonate* (EC; anhidrat 99%), propilen karbonat (PC; anhidrat 99,7%, Indofa), yodium for analysis Emsure, kalium iodida (KI; Emsure), titanium dioksida (TiO₂) for analysis Emsure, asam nitrat (HNO₃ 0,1 M) 65% for analysis Emsure, polietilena glikol (PEG 1000) for synthesis Merck, surfaktan (tween 80; PT. Brataco Chemika), etanol p.a. for analysis Emsure, daun pandan suji.

Preparasi membran PVDF NF menggunakan *Nachriebe 601 electrospinning*.

2.5. Pembuatan Larutan Membran PVDF

Larutan polimer PVDF 18(%b/b) dipreparasi dalam pelarut DMAc/aseton 3:2. Larutan diaduk menggunakan magnetik stirrer pada suhu 65 °C dan kecepatan 270 rpm dengan variasi waktu pengadukan 8, 10, 12, dan 14 jam.

2.6. Preparasi Membran untuk Electrospinning

Lima mililiter larutan polimer PVDF dimasukkan ke dalam *syringe* plastic, dan kemudian dipasang pada alat *electrospinning*. Proses *electrospinning* dilakukan dengan tegangan 15 kV dan jarak drum kolektor 15 cm. Sebelum proses dimulai, drum kolektor dilapisi aluminium foil dan kaca preparat. Setelahnya, laju alir diatur 1 mL/jam selama 5 jam.

2.7. Pembuatan Photosensitizer Daun Pandan Suji

Ekstraksi klorofil dari daun pandan suji menggunakan metode maserasi. Daun pandan suji dicuci bersih, ditiriskan, dan dipotong kecil-kecil. Daun pandan suji selanjutnya dimasukkan ke gelas kimia dan ke dalamnya ditambahkan pelarut etanol dengan perbandingan 1:6. Gelas kimia ditutup rapat dan maserasi dilakukan selama 24 jam dengan variasi pH 2, 7, dan 12. Maserasi dilakukan di tempat gelap. Hasil maserasi disaring menggunakan kertas saring, kemudian dievaporasi selama waktu tertentu. Larutan klorofil hasil evaporasi disimpan dalam botol gelap dan tertutup rapat pada rentang suhu 20-25 °C.

2.8. Pembuatan Larutan Elektrolit

Larutan elektrolit dipreparasi menggunakan material EC, PC, KI, I₂, berturut-turut sebanyak 0,4 g; 0,4 g; 0,06 g; 9,2 mg. Semua bahan dimasukkan ke dalam gelas kimia dan diaduk menggunakan magnetik stirrer pada kecepatan 100 rpm selama 30 menit.

2.9. Pembuatan Pasta TiO₂

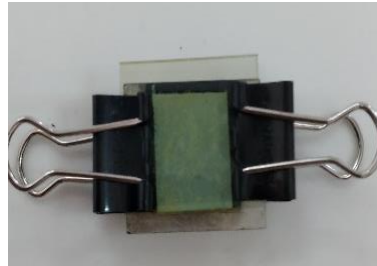
Pasta TiO₂ dipreparasi menggunakan campuran 0,2 gram TiO₂ dan 0,08 gram PEG-1000, yang ditambah 0,4 mL HNO₃ 0,1 M dan 0,05 mL tween-80. Larutan diaduk menggunakan magnetik stirrer pada kecepatan 100 rpm selama 30 menit hingga membentuk pasta berwarna putih.

2.10. Perakitan Rangkaian DSSC

Rangkaian DSSC pada penelitian ini membutuhkan 2 lembar kaca FTO. Satu lembar kaca FTO dibatasi menggunakan selotip dengan ukuran tepi kiri, atas, kanan 0,5 cm sehingga terbentuk luas area kaca aktif 3 cm². Pasta TiO₂ dideposisikan pada sisi atas area kaca aktif dengan metode *doctor blade*. Kaca selanjutnya disintering di atas *hot plate* dengan suhu 450 °C selama 1 jam. Kaca berlapis TiO₂ selanjutnya dikeringkan pada suhu ruang selama 10 menit lalu direndam dalam 10 mL larutan *photosensitizer* selama 24 jam.

Membran PVDF NF dipotong 2 x 1,5 cm dan direndam dalam 1 mL larutan elektrolit selama 1 jam. Pada langkah berikutnya, preparasi counter elektroda karbon dilakukan menggunakan 1 buah kaca transparan FTO. Bagian konduktif kaca selanjutnya dilapisi karbon menggunakan nyala api lilin hingga menghasilkan warna hitam pekat merata. Rangkaian

DSSC disusun mengikuti urutan kaca berlapis TiO_2 dan *photosensitizer* –elektrolit polimer – counter elektroda karbon, yang kemudian dijepit pada kedua sisinya.



Gambar 1. Rangkaian DSSC

2.11. Karakterisasi

Penentuan efektivitas *photosensitizer* alami dilakukan menggunakan Shimadzu 1800 spektrofotometri UV-Visible. Karakterisasi elektrokimia dilakukan menggunakan voltametri siklik 797 VA Computrace pada rentang potensial -1,6-1,6. Sementara itu, kinerja DSSC dianalisa menggunakan multimeter Krisbow KW08-267 yang terhubung dengan penjepit buaya ke kutub anoda dan katodanya.

3. Hasil Penelitian dan Pembahasan

1.1 Pembuatan Membran PVDF Nanofiber

Dalam beberapa tahun belakangan, PVDF menjadi material polimer yang banyak digunakan karena kelebihanannya pada ketahanan termal ($\geq 300\text{ }^\circ\text{C}$), kimiawi (hampir di seluruh range pH dan medium oksidatif) dan mekanik sangat baik ($\pm 1.500\text{-}5.900\text{ N/m}^2$), serta kemampuannya dalam membentuk membran asimetri [9]. Sifat sebagai isolator listrik, disertai dengan ketahanan termal dan kimiawi yang baik, membuat membran PVDF NF cocok untuk diaplikasikan sebagai elektrolit polimer pada system DSSC.

Sebagaimana dilaporkan peneliti terdahulu, preparasi larutan cetak membran PVDF NF pada penelitian ini dilakukan dalam pelarut DMAc [10]. Berdasarkan parameter kelarutan hansen, PVDF memiliki nilai δ_t sebesar $32,1\text{ (Mpa}^{1/2})$ sedangkan δ_t DMAc sebesar $22,7\text{ (Mpa}^{1/2})$ [11][12]. Selain DMAc, dalam pelarutan juga ditambahkan aseton untuk mempercepat penguapan pelarut dan menghambat konglutinasi. Pada penelitian sebelumnya, pembuatan membran PVDF NF 18(%b/b) memberikan serat berongga halus, tanpa manik-manik dan cacat serat pada morfologi permukaannya [8].

1.2 Analisis UV-Vis

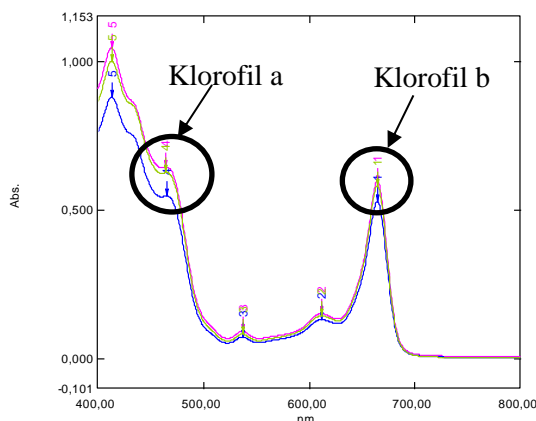
Analisis menggunakan spektrofotometri UV-Vis dilakukan untuk mendapatkan panjang gelombang khas pigmen klorofil dalam daun pandan suji. Pigmen klorofil merupakan pigmen utama yang efektif berperan sebagai fotosensitizer pada proses fotosintesis tumbuhan hijau [13]. Lebih lanjut, keberadaan gugus karboksilat memungkinkan klorofil berikatan dengan TiO_2 sehingga meningkatkan efisiensi konversi energi DSSC [3].

Untuk mendapatkan pH yang mampu menghasilkan absorbansi optimum pigmen klorofil, daun pandan suji dimaserasi dengan variasi pH yakni 2, 7, dan 12. Larutan pewarna alami yang diperoleh, selanjutnya dikarakterisasi menggunakan spektrofotometer UV-Vis pada rentang panjang gelombang cahaya tampak [14]. Pada Tabel 1 tampak nilai absorbansi larutan klorofil pada masing-masing nilai pH.

Tabel 1. Hasil Analisis UV-Vis Klorofil Daun Pandan Suji

pH	λ (nm) Klorofil a	Abs	λ (nm) Klorofil b	Abs
2	464,5	0,645	664,5	0,594
7	465,0	0,548	664,5	0,527
12	464,5	0,627	664,5	0,579

Berdasarkan Tabel 1. dapat diketahui bahwa pH optimum untuk penyerapan pigmen klorofil daun pandan suji adalah pH 2. Secara lebih spesifik, nilai absorbansi menunjukkan signifikannya pengaruh variasi pH. Hal ini dapat diamati melalui keberadaan gugus porfirin pada struktur senyawa pigmen klorofil, dimana penurunan pH dilaporkan telah meningkatkan kuantitas gugus porfirin yang terbentuk. Peningkatan gugus porfirin cenderung meningkatkan ketersediaan elektron dalam pewarna klorofil, sehingga transfer elektron pada DSSC juga semakin meningkat [13]. Lebih lanjut, pada pH asam, koefisien difusi elektron menjadi lebih besar dibandingkan kondisi netral, sehingga laju rekombinasi elektron menjadi lebih besar [13]. Meningkatnya laju rekombinasi elektron berpengaruh pada meningkatnya arus listrik, sehingga meningkatkan efektivitas kinerja DSSC. Hasil spektrum UV-Vis dari klorofil daun pandan suji dapat dilihat pada Gambar 2.



Gambar 2. Spektrum Penyerapan Panjang Gelombang Klorofil Daun Pandan Suji dengan Variasi pH 2, 7, 12

1.3 Bandgap Pewarna Klorofil

Energi celah pita atau yang biasa disebut sebagai *bandgap* merupakan energi minimum yang dibutuhkan untuk mengeksitasi elektron dari pita valensi/HOMO ke pita konduksi/LUMO. Energi celah pita (*bandgap*) menjadi parameter penting dalam DSSC karena menentukan potensi pemanfaatan suatu pewarna sebagai fotosensitizer. Penurunan *bandgap* menjadi salah satu faktor penentu efisiensi eksitasi [15]. Untuk mengetahui nilai *bandgap* pigmen klorofil dalam daun pandan suji, dilakukan perhitungan menggunakan metode *Touch Plot* dan analisa data menggunakan aplikasi ORIGIN. Metode touch plot diaplikasikan dengan menarik ekstrapolasi pada daerah linier dari kurva $h\nu$ vs $\alpha h\nu$. Perhitungan lebih lanjut untuk penentuan *bandgap* dilakukan menggunakan persamaan sebagai berikut:

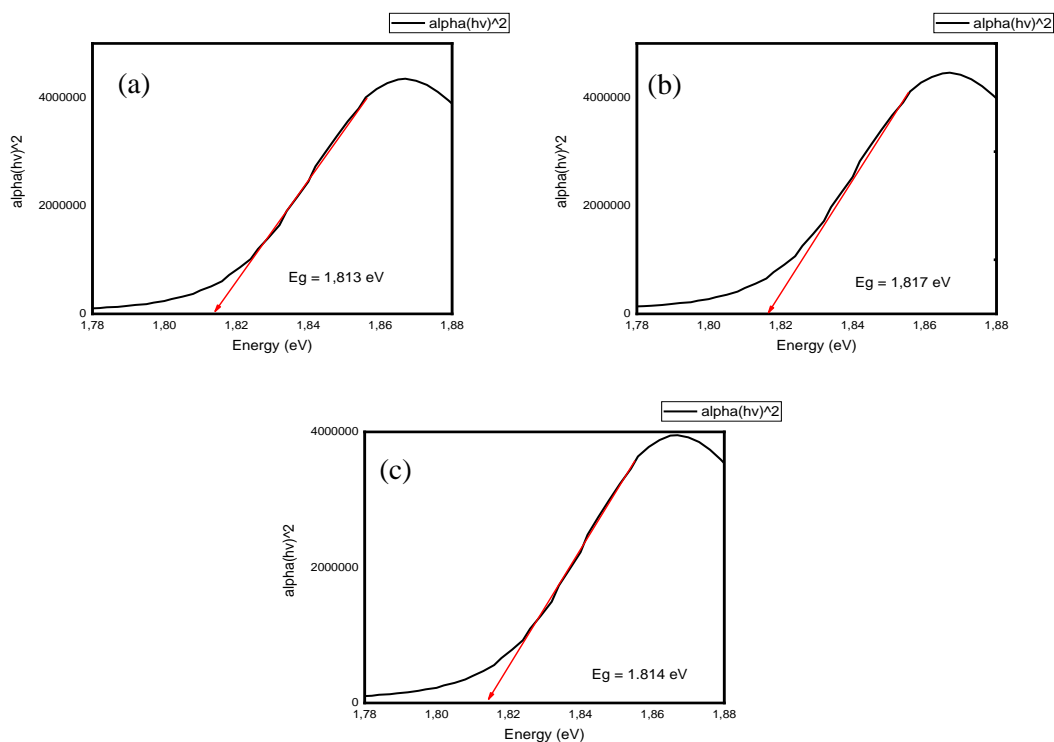
$$(\alpha h\nu)^{1/n} = A (h\nu - E_g),$$

dimana: α merupakan koefisien absorpsi, h konstanta planc, E_g energi gap, A konstanta, eksponen n dipengaruhi sifat transisi [16].

Tabel 2. Bandgap Klorofil Daun Pandan Suji

pH	Bandgap
2	1,813 eV
5	1,817 eV
7	1,814 eV

Data *bandgap* pada Tabel 2 menunjukkan bahwa pigmen klorofil daun pandan suji dapat dipreparasi sebagai *sensitizer* DSSC karena memiliki *bandgap* lebih kecil dibandingkan semikonduktor (TiO_2 ; 3,2 eV) [17]. Studi variasi pH menunjukkan bahwa *bandgap* terendah didapatkan pada pH 2. Penurunan substansial *bandgap* menjadi penyebab utama peningkatan aktivitas fotokatalitik [15]. Hasil penelitian lain melaporkan bahwa pewarna dengan *bandgap* terkecil, akan menjadi pewarna paling potensial untuk mengabsorpsi cahaya [18]. Semakin kecil nilai *bandgap*, semakin mudah elektron berpindah dari orbital dengan tingkat energi rendah ke tingkat energi lebih tinggi. Kondisi ini akan mempercepat transfer elektron.



Gambar 3. Grafik Touch Plot Klorofil Daun Pandan Suji pada (a) pH 2, (b) pH 7, (c) pH 12

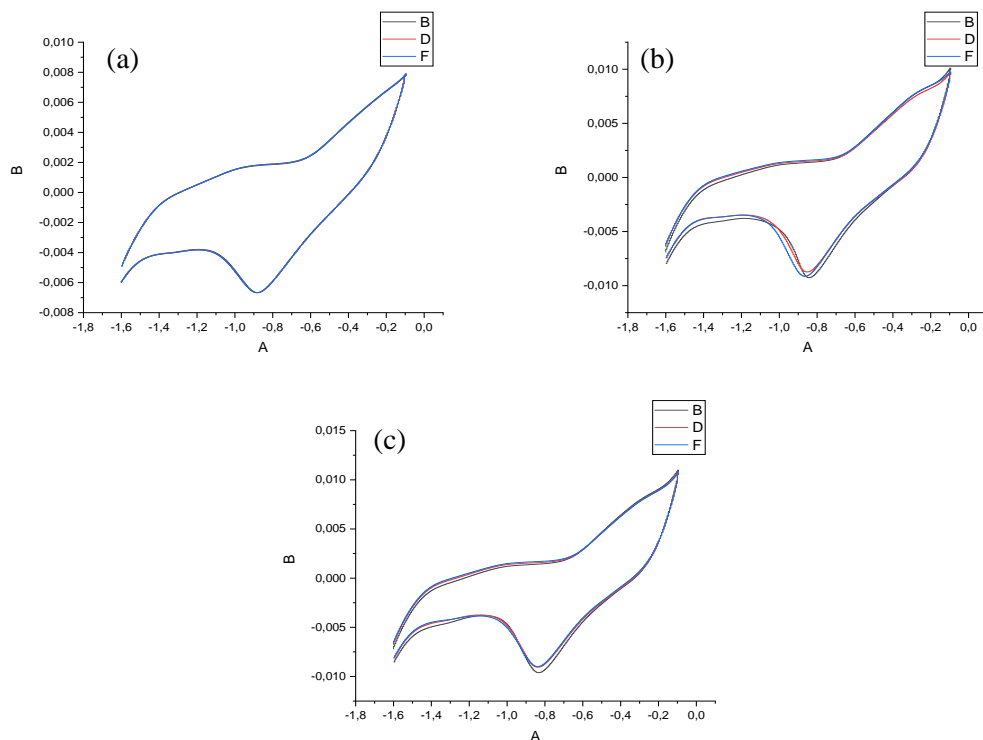
1.4 Studi Elektrokimia Pewarna Klorofil

Studi elektrokimia pada penelitian ini dilakukan menggunakan voltametri siklik. Studi elektrokimia ini akan memberikan nilai energi HOMO dan LUMO. HOMO (*Highest Occupied Molecular Orbital*) merupakan orbital molekuler tertinggi sedangkan LUMO (*Lowest Unoccupied Molecular Orbital*) merupakan orbital molekuler rendah. Menurut peneliti sebelumnya, pewarna yang digunakan sebagai fotosensitizer DSSC harus memiliki nilai LUMO cukup tinggi dari konduksi semikonduktor pita TiO_2 yaitu -3,2 eV [19].

Tabel 3. Homo LUMO Klorofil Daun Pandan Suji

pH	Voltametri	
	Homo (eV)	Lumo (eV)
2	-4,3159	-3,1201
7	-4,2967	-3,1715
12	-4,3052	-3,1459

Data nilai LUMO dari semua variasi pH, sebagaimana yang ditunjukkan pada Gambar 3, lebih tinggi dibandingkan nilai konduksi semikonduktor TiO₂ (-3,2 eV). Dengan demikian, posisi energi LUMO pigmen klorofil menjamin kecukupan gaya dorong saat injeksi elektron ke permukaan semikonduktor TiO₂ sehingga proses regenerasi elektron berlangsung dengan baik pada DSSC [20].



Gambar 4. Grafik Homo LUMO Klorofil Daun Pandan Suji pada (a) pH 2, (b) pH 7, (c) pH 12

1.5 Kinerja DSSC

Kestabilan elektrolit dalam jangka panjang dapat dievaluasi berdasarkan efisiensi kinerja rangkaian DSSC. Pada penelitian ini, kinerja DSSC dengan fotosensitizer terbaik, diukur menggunakan multimeter untuk mengetahui besar arus dan tegangan yang dihasilkan. Hasil pengukuran tersebut selanjutnya dianalisis menggunakan parameter pengukuran berupa tegangan rangkaian terbuka (V_{oc}), rapat arus hubung singkat (J_{sc}), faktor pengisian (FF), dan efisiensi (η). Harga faktor pengisian (FF) dan efisiensi (η) dapat dihitung menggunakan persamaan sebagai berikut [21][22]:

$$\eta = \frac{J_{sc}V_{oc}FF}{P_{in}}$$

$$FF = \frac{P_{max}}{J_{sc}V_{oc}}$$

Tabel 4 menunjukkan nilai efisiensi DSSC dengan kinerja fotosensitizer terbaik dan elektrolit polimer PVDF NF yang dihasilkan dari variasi waktu pengadukan. Hasilnya menunjukkan peningkatan efisiensi seiring peningkatan waktu pengadukan. Peningkatan waktu pengadukan dalam pembuatan elektrolit polimer PVDF NF mempengaruhi homogenitas partikel pembentuk membran [23]. Peningkatan waktu pengadukan menginduksi homogenitas larutan, sehingga agregasi partikel membran yang dihasilkan minimum [24]. Selain untuk mencapai kondisi homogen, faktor waktu pengadukan pada pembuatan membran PVDF NF juga berpengaruh pada pengaplikasiannya sebagai elektrolit polimer pada DSSC. Waktu pengadukan yang lebih lama pada pembuatan membran PVDF NF, akan meningkatkan porositas sekaligus kerapatan pori membran.

Tabel 4. Efisiensi DSSC

Waktu pengadukan	Jsc/mA cm ⁻²	V _{oc} /mV	FF/%	η/%
8 jam	13,3 x 10 ⁻³	482	25.5 x 10 ⁻²	1,63
10 jam	10.0 x 10 ⁻³	432	31.1 x 10 ⁻²	1,34
12 jam	8.9 x 10 ⁻³	405	24.0 x 10 ⁻²	0.86
14 jam	8.1 x 10 ⁻³	360	24,9 x 10 ⁻²	0,72

Porositas menjadi salah satu parameter penting yang mempengaruhi kinerja membran [25]. Terkait DSSC, kerapatan pori sangat mempengaruhi penyerapan atau penjebaran elektrolit di dalamnya. Peningkatan kerapatan pori akan menghasilkan penurunan kemampuan elektrolit untuk menembus membran. Dengan demikian, laju alir elektron menembus membran menjadi lebih rendah dan transfer elektron dari elektrolit menuju fotosensitizer menjadi lebih lambat. Kondisi ini akan menghasilkan nilai efisiensi DSSC yang lebih rendah. Data efisiensi DSSC pada Tabel 4 menunjukkan bahwa waktu pengadukan 10 jam menjadi waktu paling optimum untuk menghasilkan membran dengan pori ideal, yang cukup rapat untuk mencegah kebocoran elektrolit maupun evaporasi pelarut dalam sistem elektrolit, namun juga cukup renggang untuk memastikan siklus rekombinasi elektron pada rangkaian DSSC tidak terganggu. Nilai efisiensi yang dihasilkan pada kondisi ini menjadi sangat baik.

4. Kesimpulan

Pada penelitian ini membran PVDF NF berhasil dibuat menggunakan metode *electrospinning* dengan variasi waktu pengadukan 8, 10, 12, dan 14 jam sebagai elektrolit polimer pada rangkaian DSSC. Serapan pigmen klorofil dari daun pandan suji mencapai optimum pada pH 2 dengan nilai λ_{maks} 464,5 nm (klorofil a) dan 664,5 nm (klorofil b). Pada pH yang sama, dihasilkan *bandgap* terkecil (1,813 eV) dari pigmen klorofil daun pandan suji. Analisa kinerja menggunakan multimeter menunjukkan nilai efisiensi sebesar 1,34% pada DSSC dengan elektrolit polimer PVDF NF yang dihasilkan dari waktu pengadukan 10 jam.

Ucapan Terima Kasih

Ucapan terima kasih ditujukan kepada Dosen Pembimbing atas segala arahannya, kedua orangtua atas segala nasihat dan doa-doanya, keluarga besar Tim Riset Merah Putih Analitik atas segala tekad dan perjuangannya, teman-teman seperjuangan dan pihak-pihak lain yang terlibat dari awal hingga berakhirnya penelitian ini.

Daftar Pustaka

- [1] J. Twidell, T. Weir, "Renewable Energy Resources," second ed. Taylor & Francis, New York, USA, 2012.
- [2] M. S. Su'ait, M. Y. A. Rahman, A. Ahmad, "Review on polymer electrolyte in pewarna-sensitized solar cells (DSSCs)," *Solar Energy*, vol. 115, pp. 452–470, 2015.
- [3] D. R. Adawiyah and T. Muhandri, "The Effect of Iron Fortification using Fe-Sulfat, Fe-Fumarata and Na Fe EDTA on Sensory Quality of Wheat Products," vol. 6, no.2, pp. 54–62, 2019.
- [4] T. Onen, M. O. Karaku., R. Coskun, H. Cetin, "Reaching stability at DSSCs with new type gel electrolytes," *Journal of Photochemistry & Photobiology A: Chemistry*, vol. 385, pp. 112082, 2019.
- [5] S. Illa and P. Basak, "Polymer electrolyte integrated pewarna-sensitized solar cells endow enhanced stability: photoanode thickness and light intensity on cell performance," *Sol. Energy*, vol. 169, pp. 159-166, 2018.
- [6] J. H. Kim, H. S. Jung, C. H. Park, T. J. Kang, "Porous PVDF/Fe-HFP/P123 Electrolyte Membrane Containing Flexible Quasi-Solid-State Pewarna-Sensitized Solar Cells Produced by The Compression Method," *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, vol. 75, pp. 31-37, 2014.
- [7] R. O. Asriza, Nurhadini, W. Trisn and Anggraeni, "Karakterisasi Degradasi Biopolimer Elektrolit Pada Dssc (Pewarna Sensitized Solar Cell)," *Prosiding Seminar Nasional Penelitian & Pengabdian Kepada Masyarakat*, 234-237, 2019.
- [8] G. Prasad, J. W. Liang, W. Zhao, Y. Yao, T. Tao, B. Lian, S. G. Lu, "Enhancement of solvent uptake in porous PVDF nanofibers derived by a water-mediated electrospinning technique," *Journal of Materiomics*, vol. 7, pp. 244-253, 2021.
- [9] N. Kusumawati, T. Koestiari and M. Monica, "The Influence of Casting Solution Composition and Stirring Conditions Against Mechanical Strenght and Performance of Polyvinylidene fluoride (PVDF)-Polysulfone (PSf) Composite Membrane on Textile Industrial Wastewater Treatment.," *Research Journal of Pharmaceutical, Biological and Chemical Sciences*, vol. 6, no. 1, pp. 271, 2015.
- [10] M. Moshfeghian, H. Azimi, M. Mahkam, M. R. Kalae, S. Mazinani, H. Mosafer, "Effect of Solution Properties on Electrospinning of Polymer Nanofibers: A Study on Fabrication of PVDF Nanofibers by Electrospinning in DMAC and (DMAC/Acetone) Solvents," *J. Adv. Appl. NanoBio Tech*, vol. 2, no. 2, pp. 53-58, 2021.
- [11] R. D. C. Ningrum, N. Kusumawati, "Development and Characterization of Polysulfone/Polyvinylidene Flouride Blend Membrane Induced by Delayed Liquid-Liquid Demixing," *IJASEIT*, vol. 6, no. 5, pp. 716-722, 2016.
- [12] N. Kusumawati, T. Koestiari, S. Muslim, "The Development of a New Polymer Membrane : PSf/PVDF blended Membrane," *Research Journal of Pharmaceutical, Biological and Chemical Sciences*, vol. 7, no. 4, pp. 69-77, 2016.
- [13] H. Ahliha, F. Nurosyid dan A. Supriyanto, "Kajian pH Klorofil Terhadap Ikatan Kimia Pewarna pada TiO₂ sebagai Aplikasi Pewarna-Sensitized Solar Cell (DSSC)," *Jurnal Fisika dan Aplikasinya*, vol. 14, no. 1, pp. 16-19, 2018.
- [14] M. Choi, Y. Noh, K. Kim and O. Song, "Properties of Pewarna Sensitized Solar Cells with Porous TiO₂ Layers Using Polymethyl-Methacrylate Nano Beads" *Korean J. Mater. Res*, vol. 26, no. 4, 2016.
- [15] D. S. Vasanthi, K. Ravichandran, P. Kavitha, S. Sriram, P. K. Praseetha, "Combined effect of Cu and N on bandgap modification of ZnO film towards effective visible light responsive photocatalytic pewarna degradation" *Superlattices and Microstructures*, 2020.
- [16] A. Suprasetyo and P. Setiarso, "Pembuatan Elektroda Pasta Karbon Termodifikasi Zeolit Untuk Analisis Fenol Secara Cyclic Stripping Voltammetry" *UNESA J. Chem*, vol. 5, no. 3, pp. 86–93, 2016.
- [17] D. Ganta, J. Jara and R. Villanueva, "Pewarna-sensitized solar cells using Aloe Vera and Cladode of Cactus extracts as natural sensitizers," *Chem. Phys. Lett*, vol. 679, pp. 97–101, 2017.
- [18] Imelda, R. A. Putri, "Optimalisasi Struktur Π -Konjugasi Pada Zat Warna Organik Tipe D- π -A" *Journal of Research and Education Chemistry (JREC)*, vol. 2, no. 2, pp. 61-72, 2020.
- [19] K. Sharma, V. Sharma, S. S. Sharma, "Pewarna-Sensitized Solar Cells: Fundamentals and Current Status" *Nanoscale Res. Lett*, vol. 13: pp. 381, 2018.
- [20] Kathiravan, T. Khamrang, M. Velusamy, M. Jaccob, "Synthesis, Density Functional Theory and Sensitization of Indole pewarnas," *Materials Letters*, 2020.
- [21] A. Hagfeldt, G. Boschloo, L. Sun, L. Kloo, H. Pettersson, "Pewarna-sensitized solar cells", *Chem. Rev.*, vol. 110, no. 11, pp. 6595–6663, 2010.
- [22] S. Sarker, H.W. Seo, D.M. Kim, "Calculating current density-voltage curves of pewarna-sensitized solar cells: A straight-forward approach", *Journal of Power Sources*, vol. 248, pp.739-744, 2014.

- [23] P. Setiarso, N. Kusumawati, N. M. Sianita., R. D. C. Ningrum, "The Effect of Stirring Time and Cast Thickness on Morphology, Permeability, and Thermal Stability of Polysulfone/Polyvinylidene Fluoride Blended Membranes," *Atlantis Highlights in Engineering (AHE)*, vol. 1, pp. 173-178, 2018.
- [24] N. Kusumawati, P. Setiarso, A. B. Santoso, S. C. Wibawa and S. Muslim, "The Development Of PVDF/PEI Blended Membrane: Effect Of Stirring Time On Membrane Characteristics And Performance," *Rasayan J. Chem*, vol. 12, no. 2, pp. 975-986, 2019.
- [25] N. Kusumawati, P. Setiarso, S. Muslim, "Polysulfone/Polyvinylidene Fluoride Composite Membrane: Effect of Coating Dope Composition on Membrane Characteristics and Performance," *Rasayan J. Chem*, vol. 11, no. 3, pp. 1034-1041, 2018.