

## Pengaruh Waktu Pengadukan Terhadap Efektifitas Kinerja Membran Cetak *Polyvinylidene Fluoride* (PVDF) Sebagai Aplikasi Polimer elektrolit Pada Stabilitas Jangka Panjang dan Efisiensi Listrik *Dye Sensitized Solar Cell* (DSSC)

### The Effect of Stirring Time on the Effectiveness of Polyvinylidene Fluoride (PVDF) Printed Membrane as a Polymer Electrolyte Application on Long-Term Stability and Electrical Efficiency of Dye Sensitized Solar Cell (DSSC)

Ianatul Khafidlah, Nita Kusumawati\*

Jurusan Kimia, Universitas Negeri Surabaya, Jl. Ketintang Wiyata No. 62, Kota Surabaya, Indonesia

\*corresponding author: nitakusumawati@unesa.ac.id

**Abstrak.** DSSC menarik perhatian karena kemampuannya mengkonversi energi foton menjadi energi listrik. Prinsip kerja DSSC adalah elektrokimia, dimana *dye* bertindak sebagai donor elektron, semikonduktor sebagai kolektor elektron dari *dye* teroksidasi, elektrolit (mediator redoks) untuk menghasilkan siklus dalam sel. Meskipun potensial, stabilitas jangka panjang menjadi persoalan utama komersialisasi DSSC. Stabilitas DSSC ditentukan dua komponen utama yaitu *dye* dan elektrolit, dimana keduanya rentan terhadap kebocoran dan volatilitas pada elektrolit cair serta desorpsi pewarna. Sebagai solusi, penelitian ini menganalisis efektifitas polimer elektrolit membran cetak PVDF 18% dengan variasi waktu pengadukan 8, 10, 12 dan 14 jam untuk mengetahui waktu optimum pengadukan. Ekstrak klorofil daun pandan suji (*Pleomele Angustifolia*) dengan pH optimum 2 digunakan sebagai *sensitizer*. Karakterisasi klorofil untuk mengetahui serapan panjang gelombang dilakukan dengan spektrofotometri UV-Visible dan dihasilkan nilai sebesar 464,5 nm (klorofil A) dan 664,50 nm (klorofil B). Untuk karakterisasi elektrokimia dan celah pita energi klorofil dilakukan dengan voltametri siklik dan dihasilkan energi HOMO -4,3159 eV, LUMO -3,1201 eV dan bandgap 1,813 eV. Efisiensi rangkaian DSSC juga dapat diketahui dengan pengukuran tegangan dan arus menggunakan multimeter dan dihasilkan nilai  $V_{oc}$  326 mV dan  $I_{sc}$   $6,8 \times 10^{-3}$  mA. Hasil penelitian menunjukkan perolehan efisiensi tertinggi adalah waktu optimum pengadukan 10 jam sebesar 0,72 %.

Kata-kata kunci: DSSC, polimer elektrolit, efisiensi, klorofil, stabilitas

**Abstract.** DSSC attracted attention because of its ability to convert photon energy into electrical energy. The working principle of DSSC is electrochemistry, where the dye acts as an electron donor, the semiconductor acts as an electron collector from the oxidized dye, and the electrolyte (redox mediator) produces cycles in the cell. Despite its potential, long-term stability is a major issue for the commercialization of DSSC. The stability of the DSSC is determined by two main components, namely the coloring pigment and the electrolyte, both of which are susceptible to leakage, the volatility of the liquid electrolyte, and the desorption process of the dye. As a solution, this study analyzed the effectiveness of 18% PVDF printed membrane polymer electrolyte with various stirring times of 8, 10, 12, and 14 hours to determine the optimum stirring time. The chlorophyll extract of suji leaf (*Pleomele Angustifolia*) with an optimum pH of 2 was determined as a *sensitizer*. The chlorophyll characterization to determine the wavelength absorption was carried out by UV-Visible spectrophotometry and the resulting values were 464.5 nm (chlorophyll A) and 664.50 nm (chlorophyll B). Electrochemical characterization and bandgap of chlorophyll energy were carried out by cyclic voltammetry and the resulting energy was HOMO -4.3159 eV, LUMO -3.1201 eV, and bandgap 1.813 eV. The efficiency of the DSSC circuit can also be determined by measuring the voltage and current using a multimeter and producing a value of  $V_{oc}$  326 mV and  $I_{sc}$   $6.8 \times 10^{-3}$  mA. The results showed that the highest efficiency gain was the optimum stirring time of 10 hours at 0.7224%.  
Keyword: DSSC, polymer electrolyte, efficiency, chlorophyll, stability

## 1. Pendahuluan

Energi listrik merupakan energi primer yang menjadi kebutuhan utama dalam kehidupan sehari-hari masyarakat dan pertumbuhan ekonomi suatu negara [1]. Oleh karena itu, intensitas penggunaan energi listrik di seluruh negara meningkat, yang mana konsumsi daya listrik saat ini telah mencapai 13 terawatt (TW) dan diperkirakan akan terus meningkat sekitar 23 TW pada tahun 2050 [2]. Energi listrik, sekitar 80% dipasok dari hasil minyak bumi, gas alam, dan berbagai sumber bahan bakar fosil [2-3]. Intensifnya penggunaan energi listrik menyebabkan ketersediaan sumber bahan bakar fosil semakin menipis, terutama mengingat bahan bakar fosil dikategorikan sebagai bahan yang tidak dapat diperbarui karena diperlukan waktu jutaan tahun untuk memproduksinya kembali [3]. Hal tersebut semakin mendesak untuk segera ditemukan suatu energi terbarukan sebagai alternatif, yang salah satunya adalah pembangkit listrik tenaga surya.

Melimpahnya energi surya dapat mendorong terbentuknya teknologi yang potensial dan ekonomis. Perkembangan teknologi pembangkit listrik tenaga surya (*solar cell*) sudah sangat signifikan, di mana pada generasi pertama telah dilakukan eksplorasi dan pemanfaatan *solar cell* berbasis material anorganik yaitu silikon. Namun demikian, dalam perkembangannya ditemukan bahwa biaya produksi *solar cell* berbasis silikon tidak cukup ekonomis atau relatif lebih mahal, selain itu *solar cell* berbasis silikon bersifat kurang ramah lingkungan [4]. Oleh karena itu, beberapa penelitian mengembangkan kembali *solar cell* dengan tipe terbaru, yang mana saat ini telah mencapai generasi ketiga yang disebut dengan *dye sensitized solar cell* (DSSC) atau *solar cell* yang tersensitasi pewarna [5].

DSSC memiliki beberapa keunggulan dibandingkan dengan *solar cell* berbasis silikon, yaitu biokompatibel, proses fabrikasi yang sederhana dan biaya produksi rendah [1;6]. Namun demikian, masih terdapat kelemahan pada DSSC, hal tersebut disebabkan karena selama ini pewarna yang digunakan sebagai *fotosensitizer* DSSC adalah pewarna sintesis yang bersifat toksik dan tentunya kurang ramah lingkungan, sehingga pada penelitian ini dilakukan aplikasi pewarna alami sebagai pengganti pewarna sintesis yang digunakan sebelumnya. Pewarna alami yang digunakan adalah pewarna alam yang mengandung pigmen klorofil, yang salah satunya adalah daun pandan suji (*Pleomele Angustifolia*). Klorofil pada daun pandan suji dapat menyerap cahaya dengan panjang gelombang 400-700 nm terutama pada warna biru dan merah [7]. Selain berpotensi sebagai *fotosensitizer* DSSC, ketersediaan daun pandan suji sangat melimpah tetapi pemanfaatannya masih sangat terbatas [8-9].

Lebih lanjut, di dalam DSSC terdapat dua komponen utama yang sangat berpengaruh, di antaranya adalah pewarna (*dye*) yang berperan sebagai *fotosensitizer* dan elektrolit yang berperan sebagai mediator redoks [10-11]. Namun demikian, selama ini elektrolit yang digunakan pada DSSC adalah elektrolit cair, yang mana elektrolit cair memiliki kelemahan diantaranya adalah tingkat kebocoran dan tingkat evaporasi tinggi [12-13]. Kelemahan yang dimiliki oleh elektrolit cair dapat menyebabkan rendahnya stabilitas jangka panjang penggunaan dan efisiensi rangkaian DSSC. Oleh karena itu, pada penelitian ini dikembangkan suatu jenis elektrolit baru dengan memanfaatkan membran *Polyvinylidene fluoride* (PVDF) sebagai polimer elektrolit (*solid elektrolite*) pengganti elektrolit cair yang dibuat dengan metode inversi fasa. PVDF diketahui dapat menunjukkan nilai stabilitas elektrokimia yang sangat baik terhadap larutan elektrolit dan memberikan sifat mekanik yang lebih tinggi dibandingkan dengan polimer lain [14]. PVDF dapat memberikan sifat mekanik yang tinggi karena tingkat kristanilitas yang lebih tinggi [15]. Sedangkan fase amorf pada PVDF dapat memfasilitasi penjebaran sejumlah larutan elektrolit, sehingga dapat membantu dalam meningkatkan konduktivitas ionik [16].

Lebih lanjut, penelitian ini difokuskan pada permasalahan yang terkait dengan pengaruh waktu pengadukan membran PVDF terhadap peningkatan stabilitas jangka panjang penggunaan dan efisiensi rangkaian DSSC, yang mana variabel bebas yang diterapkan adalah variasi waktu pengadukan yaitu 8, 10, 12, dan 14 jam. Untuk mencapai target tersebut maka dilakukan metode pembuatan *fotosensitizer* alami, larutan elektrolit, membran PVDF, pasta TiO<sub>2</sub>, dan rangkaian DSSC.

Metode analisis yang dilakukan adalah analisis spektrofotometri UV-Visible untuk mengetahui serapan panjang gelombang dan absorbansi *dye*, voltametri siklik untuk studi elektrokimia dan menentukan energi celah pita (bandgap), dan pengukuran multimeter untuk studi fotovoltaiik rangkaian DSSC.

## **2. Bahan, Metode, dan Karakterisasi DSSC**

### *3.1. Bahan Pembuatan DSSC*

Beberapa bahan digunakan dalam penelitian ini diantaranya adalah etilen karbonat (EC) (Anhydrous 99%; Sigma Aldrich, USA); propilen karbonat (PC) (99,7% anhidrat; Sigma Aldrich, AS); iodin (I<sub>2</sub>) (≥99,8%; Sigma Aldrich, Singapura); kalium iodida (KI) (≥99%; Merck, Belgia); titanium dioksida (TiO<sub>2</sub>) (21 nm; 99,5%; Sigma Aldrich, Cina); asam nitrat (HNO<sub>3</sub>) (≥99,9%; Sigma Aldrich, Singapura); polietilen glikol (PEG) (Mw 1000; Merck, Jerman); Tween-80 (PT. Brataco Chemika; Indonesia); Polivinilidena fluorida (PVDF) (serbuk, Mw~534,000; Sigma Aldrich, Singapura); n,n-dimethylacetamide (DMAc) (≥ 99%; Merck, Belgia); aseton (≥99,5%; Sigma Aldrich, Singapura); dan kaca fluorine doped tin oxide (FTO) (resistivitas 10 Ω).

### *3.2. Metode Pembuatan DSSC*

#### *a. Pembuatan Dye*

Pada DSSC, *dye* dibuat dari daun pandan suji (klorofil) dengan metode maserasi dan evaporasi. Tahap pertama, daun pandan suji yang telah dipotong-potong sebelumnya, direndam ke dalam pelarut etanol dengan perbandingan 1:6 dan dilakukan variasi pH 2; 7; 12, serta didiamkan selama 24 jam. Selanjutnya, dilakukan penyaringan hasil maserasi dan diuapkan menggunakan *rotary evaporator* Buchi R-300. Konsentrat *dye* yang dihasilkan disimpan pada suhu 20-25 °C, dan siap untuk digunakan sebagai *fotosensitizer* alami pada DSSC.

#### *b. Pembuatan Larutan Elektrolit*

Pada DSSC, larutan elektrolit dibuat dengan cara mencampurkan beberapa bahan diantaranya adalah 9,2 mg iodin (I<sub>2</sub>), 0,06 g kalium iodida (KI), 0,4 g etilen karbonat (EC), dan 0,4 g propilen karbonat (PC) menggunakan *magnetic stirrer* NESCO LAB MS-H280-Pro dengan kecepatan 100 rpm selama 30 menit.

#### *c. Pembuatan Membran PVDF*

Membran PVDF yang berperan sebagai polimer elektrolit pada DSSC dibuat dengan metode preparasi inversi fasa. Pertama, dibuat larutan cetak PVDF 18% (b/v) dengan cara melarutkan PVDF ke dalam larutan campuran DMAc dan aseton (6:4). Waktu pengadukan larutan dicetak divariasi selama 8, 10, 12 dan 14 jam dengan kecepatan 270 rpm pada suhu 65 °C. Selanjutnya, larutan PVDF dicetak di atas kaca yang telah dikontrol ketebalan (0,4 mm) dan luasnya (14 x 14 cm) dengan *double tip* dengan menggunakan *casting knife* pada suhu 30 °C dan dilakukan pra-imersi selama 5 menit. Selanjutnya, hasil cetakan diimersi ke dalam bak koagulasi, yang sebelumnya telah diisi dengan 1000 mL aquades pada suhu 30 °C dengan waktu imersi 30 menit. Tahap berikutnya, mencuci membran PVDF menggunakan 500 mL aquades dengan dua kali pengulangan, yang masing-masing selama 1 menit. Kemudian membran PVDF dikeringkan pada suhu ruang selama 24 jam.

#### *d. Pembuatan Pasta TiO<sub>2</sub>*

Pasta TiO<sub>2</sub> dibuat dengan cara mencampurkan beberapa bahan seperti 0,2 g TiO<sub>2</sub>, 0,4 mL HNO<sub>3</sub> 0,1 M, 0,08 g PEG-1000, dan 0,05 mL Tween-80 menggunakan *magnetic stirrer* NESCO LAB MS-H280-Pro dengan kecepatan 100 rpm selama 30 menit.

#### *e. Penyusunan Rangkaian DSSC*

Rangkaian DSSC disusun dari dua kaca fluorine doped tin oxide (FTO) yaitu anoda dan katoda. Tahap pertama, pasta TiO<sub>2</sub> yang telah dibuat sebelumnya dilapiskan pada kaca FTO anoda dengan bantuan spatula dan disintering pada suhu 450 °C selama 1 jam. Selanjutnya FTO anoda-TiO<sub>2</sub> didiamkan selama 1 jam dan kemudian direndam dalam 10 mL *dye* (daun

pandan suji) selama 24 jam. Tahap berikutnya, membran PVDF yang telah direndam sebelumnya dalam 1 mL larutan elektrolit selama 1 jam, dilapiskan pada kaca FTO katoda yang sebelumnya telah dilapisi dengan karbon lilin. Dengan demikian, rangkaian DSSC telah terbentuk.

### 3.3. Karakterisasi DSSC

Karakterisasi DSSC dilakukan melalui beberapa metode diantaranya adalah analisa spektrofotometri UV-Visible (Shimadzu UV-1800) untuk menganalisis serapan panjang gelombang dan absorbansi yang dilakukan pada *range* panjang gelombang cahaya tampak (400-800 nm), voltametri siklik (Computrace Metrohm 797 VA) untuk menganalisis studi elektrokimia dan celah pita energi (*bandgap*), dan pengukuran dengan multimeter (Krisbow KW08-267 pada resistansi 200 k $\Omega$  dan tegangan 200 mV) untuk studi fotovoltaiik rangkaian DSSC sehingga dapat dihasilkan harga tegangan terbuka ( $V_{OC}$ ); arus hubung singkat ( $J_{sc}$ ); *fill factor* (FF); efisiensi ( $\eta$ ).

## 3. Hasil Penelitian dan Pembahasan

### 3.1 Polimer elektrolit

Membran PVDF telah dikenal memiliki berbagai sifat ideal yang berpotensi sebagai aplikasi polimer elektrolit pada DSSC, seperti dapat membentuk struktur pori asimetris yang dapat mengoptimalkan kinerja membran, memiliki kekuatan mekanik tinggi sehingga dapat meningkatkan kompatibilitas membran, potensial *fouling* rendah, konduktivitas ionik tinggi, dan memiliki stabilitas elektrokimia serta stabilitas termal tinggi [17-18].

Pada penelitian ini, metode preparasi inversi fasa dengan teknik induksi imersi-presipitasi telah diterapkan dalam pembuatan membran PVDF. Metode inversi fasa merupakan metode preparasi membran, di mana larutan polimer yang homogen mengalami transformasi dari fasa cair menjadi fasa padat secara terkendali [18]. Pada metode inversi fasa, perlu dilakukan induksi terlebih dahulu dan teknik induksi yang lebih tepat adalah imersi presipitasi. Hal ini disebabkan karena prosesnya sederhana dan waktu produksi yang relatif singkat. Teknik tersebut akan membantu pembentukan membran padat karena terjadi proses pertukaran antara pelarut dalam larutan cetak dengan non pelarut dalam bak koagulasi [19-21].

Membran PVDF dicetak menggunakan *casting knife*, yang bertujuan untuk memperoleh ketebalan yang sama yaitu dengan ketebalan kontrol 0,4 mm. Sebelum memasuki tahapan imersi, maka dilakukan pra-imersi terlebih dahulu dalam waktu 5 menit. Tahap pra-imersi dilakukan untuk menghilangkan gelembung udara yang terbentuk dan terperangkap selama pembuatan larutan cetak membran PVDF [22-23]. Berikutnya masuk ke dalam tahap imersi-presipitasi yang bertujuan untuk melepas membran PVDF dari cetakan, dengan cara memasukkan hasil *casting* ke dalam bak koagulasi yang sebelumnya telah diisi dengan non pelarut (aquades). Setelah membran PVDF terbentuk, tahap selanjutnya adalah pencucian yang bertujuan untuk menghilangkan sisa pelarut.

Ketepatan dalam memilih jenis pelarut dan non pelarut yang digunakan juga dapat menentukan kecepatan pembentukan membran [18-19]. Pemilihan pelarut yang tepat akan menghasilkan interaksi yang optimum baik antara polimer dengan polimer, maupun polimer dengan pelarut. Pelarut dapat dikategorikan baik jika memiliki perbedaan parameter kelarutan ( $\delta$ ) yang berdekatan dengan senyawa yang akan dilarutkan [30]. Namun berbeda dengan non pelarut, di mana non pelarut dikatakan baik jika memiliki perbedaan parameter kelarutan ( $\delta$ ) yang jauh dengan pelarut. Perbedaan kelarutan dapat ditentukan dengan parameter kelarutan Hansen. Berikut adalah tabel parameter kelarutan Hansen dari PVDF, DMAc dan aseton, yaitu sebagai berikut:

**Tabel 1. Parameter Kelarutan Hansen**

No.	Material	$\delta_d$ (MPa <sup>1/2</sup> )	$\delta_p$ (MPa <sup>1/2</sup> )	$\delta_h$ (MPa <sup>1/2</sup> )	$\delta_t$ (MPa <sup>1/2</sup> )
1	PVDF	16	14.3	23.9	32.1

No.	Material	$\delta_d$ (MPa <sup>1/2</sup> )	$\delta_p$ (MPa <sup>1/2</sup> )	$\delta_h$ (MPa <sup>1/2</sup> )	$\delta_t$ (MPa <sup>1/2</sup> )
2	DMAc	16.8	11.5	10.2	22.7
3	Aseton	13.0	9.8	11.0	19.7
4	Aquades	12.2	22.8	40.4	48.0

Berdasarkan Tabel 1, dapat disimpulkan bahwa DMAc memiliki perbedaan kelarutan dekat dengan polimer PVDF sebesar 9,4 Mpa<sup>1/2</sup> yang diperoleh dari selisih antara nilai  $\delta_t$  PVDF (32,1 MPa<sup>1/2</sup>) dengan nilai  $\delta_t$  DMAc (22,7 MPa<sup>1/2</sup>). Lebih lanjut, pelarut DMAc dikombinasikan dengan aseton (perbandingan 3:2), hal ini dilakukan karena aseton dengan titik didih rendah dapat mempercepat terjadinya proses penguapan pelarut [24]. Semakin lama waktu penguapan akan berdampak pada semakin menebalnya membran yang dihasilkan karena adanya proses *delayed liquid-demixing*, yang mana pelarut akan tertahan lama di dalam membran sehingga terjadinya proses difusi antara pelarut dan non pelarut akan berjalan lambat [24]. Semakin menebalnya membran akan menyebabkan kerapatan pori pada membran semakin meningkat, sehingga membatasi ruang gerak elektron dan jalannya siklus elektron akan terhambat serta efisiensi rangkaian DSSC akan semakin menurun [24-25]. Selain menentukan perbedaan parameter kelarutan antara PVDF dengan DMAc, juga ditentukan perbedaan parameter kelarutan non pelarut yaitu aquades yang dibandingkan dengan pelarut DMAc dan aseton. Hasil selisih nilai antara  $\delta_t$  DMAc dengan  $\delta_t$  aquades dan nilai antara  $\delta_t$  aseton dengan  $\delta_t$  aquades yaitu masing-masing sebesar 25,2 MPa<sup>1/2</sup> (DMAc-aquades) dan 28,3 MPa<sup>1/2</sup> (aseton-aquades) menunjukkan perbedaan kelarutan yang tinggi, sehingga menyebabkan kesetimbangan termodinamika pada membran terganggu dan memicu cepat terjadinya pemisahan fasa [26]. Lebih lanjut, membran PVDF dibuat dengan konsentrasi 18% (b/v), yang mana akan menghasilkan membran dengan potensi *fouling* rendah [27-28]. Stabilitas jangka panjang penggunaan dan efisiensi rangkaian DSSC juga dievaluasi dengan mengkaitkan pengaruh waktu pengadukan larutan cetak yaitu 8, 10, 12, dan 14 jam.

### 3.2 Analisis UV-Visible Dye

*Dye* memiliki peranan penting dalam absorpsi foton di wilayah tampak (*visible*) atau inframerah yang berada dekat dengan spektrum matahari dan konversi energi foton menjadi energi listrik sehingga berpengaruh terhadap kinerja DSSC [29]. Kinerja *dye* alami diprediksikan memiliki kinerja yang lebih baik dibandingkan dengan *dye* sintesis, hal ini disebabkan karena adanya senyawa organik dan alkohol yang berbeda, yang mana keduanya dapat mencegah terjadinya rekombinasi elektron dengan elektrolit dan agregasi *dye*, sehingga dapat meningkatkan daya injeksi muatan di dalam sel [31]. *Dye* alami juga memiliki kelebihan lain diantaranya adalah besarnya koefisien absorpsi, tingginya efisiensi panen foton, ketersediaan melimpah, mudah didapatkan, biaya rendah, teknik preparasi sederhana, dan ramah lingkungan [32]. Salah satu pigmen yang efektif sebagai *fotosensitizer* DSSC adalah klorofil [30]. Tanaman yang mengandung klorofil tinggi adalah daun pandan suji (*Pleomele Angustifolia*) [30]. Puncak absorbansi pigmen klorofil terletak pada panjang gelombang 420 nm dan 660 nm [33]. Klorofil juga mengandung dua pigmen yang berbeda, yaitu klorofil a dan klorofil b [34-35].

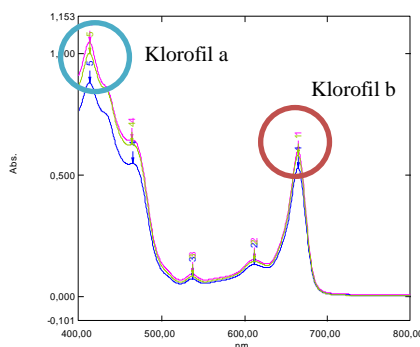
*Dye* yang berperan sebagai *sensitizer* rangkaian DSSC harus memiliki daerah serapan panjang gelombang pada *range* 400-800 nm [36]. Tabel 2 menampilkan data panjang gelombang maksimum ( $\lambda$ ) dan absorbansi yang dihasilkan dari analisis spektrofotometri UV-Visible pada kondisi pH asam, netral, dan basa, serta tanpa penambahan *buffer* dengan tujuan untuk mengetahui pH optimum *dye* klorofil daun pandan suji.

**Tabel 2. Hasil Spektrofotometri UV-Vis Pigmen Klorofil**

Pewarna	pH	Pigmen Klorofil			
		Klorofil a		Klorofil b	
		Panjang Gelombang ( $\lambda$ ) (nm)	Absorbansi	Panjang Gelombang ( $\lambda$ ) (nm)	Absorbansi
Daun Pandan Suji	2	464,50	0,645	664,50	0,594
	7	465,00	0,548	664,50	0,527
	12	464,50	0,627	664,50	0,579

Berdasarkan Tabel 2, dapat disimpulkan bahwa perubahan pH tidak menunjukkan pengaruh yang signifikan terhadap pergeseran panjang gelombang maksimum ( $\lambda$ ) *dye* yang berasal dari daun pandan suji. Namun demikian, berbeda dengan nilai absorbansi di mana perubahan pH menunjukkan pengaruh yang cukup signifikan. Semakin meningkatnya keasaman, maka nilai absorbansi juga mengalami peningkatan. Meningkatnya nilai absorbansi pada pH asam, menunjukkan adanya kecenderungan penambahan jumlah ikatan rangkap dengan PEB. Hal ini dapat menyebabkan jumlah elektron yang dihasilkan akan semakin meningkat, dan peningkatan jumlah elektron akan menyebabkan proses terjadinya eksitasi elektron semakin meningkat pula. Apabila eksitasi elektron meningkat, maka secara langsung akan berpengaruh terhadap peningkatan nilai efisiensi rangkaian DSSC. Oleh karena itu dapat disimpulkan bahwa pH yang optimum dalam menyerap foton adalah pH 2 yang ditunjukkan dengan nilai absorbansi yang lebih tinggi dibandingkan pH lainnya yaitu sebesar 0,594.

Lebih lanjut, hasil analisis spektrofotometri UV-Vis *dye* daun pandan suji menampilkan dua serapan panjang gelombang maksimum ( $\lambda$ ) yaitu masing-masing 464,50 nm dan 664,50 (pH 2); 465,00 nm dan 664,50 (pH 7); dan 464,50 nm dan 664,50 (pH 12). Serapan panjang gelombang maksimum daun pandan suji dapat ditampilkan pada Gambar 1, yaitu sebagai berikut:



**Gambar 1. Serapan Panjang Gelombang Klorofil Daun Pandan Suji dengan Variasi pH.**

Keterangan

- Warna merah muda : Serapan panjang gelombang maksimum ( $\lambda$ ) pada pH 2
- Warna biru : Serapan panjang gelombang maksimum ( $\lambda$ ) pada pH 7
- Warna hijau : Serapan panjang gelombang pada maksimum ( $\lambda$ ) pH 12

Puncak serapan panjang gelombang maksimum ( $\lambda$ ) yang ditampilkan pada Gambar 1, membuktikan bahwa terdapat kandungan klorofil pada daun pandan suji. Hal ini disebabkan karena klorofil memiliki puncak serapan pada panjang gelombang maksimum ( $\lambda$ ) 420 nm (klorofil a) dan 660 nm (klorofil b) [33].

### 3.3 Analisis Voltametri Siklik

*Dye* daun pandan suji selain dianalisis menggunakan spektrofotometri UV-Vis, juga penting untuk dianalisis melalui studi elektrokimia dengan menggunakan voltametri siklik. Analisis voltametri siklik dilakukan untuk menentukan energi HOMO (*Highest Occupied Molecular Orbital*), dan LUMO (*Lowest Occupied Molecular Orbital*) pada *dye*. *Dye* yang berperan

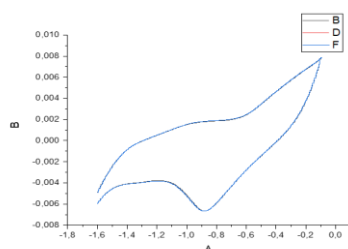
sebagai *sensitizer* DSSC, disyaratkan memiliki harga energi HOMO yang jauh lebih rendah daripada pita konduksi TiO<sub>2</sub> dengan tujuan untuk meregenerasi elektron pada *dye* sehingga siklus DSSC tetap berjalan [37-39]. Namun, berbanding terbalik dengan energi HOMO, harga energi LUMO disyaratkan lebih tinggi (> -3,2 eV) dibandingkan semikonduktor pita TiO<sub>2</sub> untuk memastikan terjadinya injeksi elektron berjalan cepat [37;39].

Proses transfer elektron pada rangkaian DSSC sangat dipengaruhi oleh harga energi HOMO dan LUMO [37]. Mekanisme terjadinya transfer elektor dimulai dengan penyerapan sejumlah foton oleh molekul *dye*, hal ini menyebabkan eksitasi elektron (fotoeksitasi) dari tingkat energi HOMO menuju tingkat energi LUMO. Selanjutnya, elektron yang diperoleh dari proses fotoeksitasi diinjeksi menuju pita konduksi TiO<sub>2</sub> dan akan ditransferkan menuju elektroda lawan. Setelah proses tersebut, maka *dye* akan kehilangan elektron. Oleh karena itu, elektron yang hilang akan mengalami regenerasi melalui reaksi redoks (I/I<sub>3</sub><sup>-</sup>) yang terjadi pada mediator redoks atau elektrolit sehingga siklus dapat terus berjalan [37]. Oleh karena itu, apabila *dye* yang digunakan memiliki harga energi HOMO dan LUMO yang sesuai dengan syarat, maka proses terjadinya transfer dan regenerasi elektron akan semakin mudah sehingga stabilitas jangka panjang penggunaan dan efisiensi rangkaian DSSC dapat tercapai [37]. Tabel 3, menampilkan data tingkat energi HOMO dan LUMO dari analisis voltametri siklik. Analisis voltametri siklik berkaitan dengan proses reduksi-oksidasi, sehingga keadaan HOMO dianggap sebagai proses oksidasi dan keadaan LUMO sebagai proses reduksi [40].

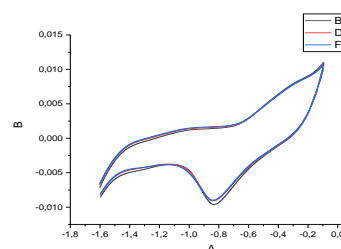
**Tabel 3. Analisis Elektrokimia Dye Daun Pandan Suji**

Pewarna	pH	Analisis Elektrokimia			
		E <sub>oks</sub> (eV)	HOMO (eV)	E <sub>red</sub> (eV)	LUMO (eV)
Daun Pandan Suji	2	-0,0809	-4,31591	-1,2285	-3,1201
	7	-0,1033	-4,2967	-1,2799	-3,1701
	12	-0,0948	-4,3052	-1,2541	-3,1459

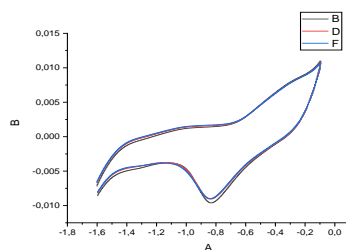
Berdasarkan Tabel 3, maka dapat disimpulkan bawa pH 2 menunjukkan harga energi HOMO yang lebih rendah dari pita konduksi TiO<sub>2</sub> yaitu sebesar -4,31591 eV dan harga energi LUMO yang lebih tinggi dari semikonduktor pita TiO<sub>2</sub> yaitu sebesar -3,1201 eV. Sama halnya dengan analisis spektrofotometri UV-Vis, kesesuaian harga energi HOMO dan LUMO yang diperoleh pada pH asam menunjukkan jumlah ikatan rangkap yang disertai PEB semakin bertambah, sehingga elektron yang dihasilkan akan bertambah pula, dan proses eksitasi elektron akan meningkat. Peningkatan eksitasi elektron akan menyebabkan efisiensi pada DSSC akan meningkat pula. Harga energi HOMO dan LUMO dapat ditunjukkan dengan voltamogram yang dihasilkan oleh voltametri siklik, di mana puncak potensial oksidasi pertama berkaitan dengan tingkat energi HOMO dan puncak potensial reduksi pertama berhubungan dengan tingkat energi LUMO. Voltamogram dapat dilihat pada gambar dibawah ini, yaitu sebagai berikut:



**Gambar 2. Voltamogram Pigmen Klorofil pH 2**



**Gambar 3. Voltamogram Pigmen Klorofil pH 7**



**Gambar 4. Voltamogram Pigmen Klorofil pH 12**

### 3.4 Energi Celah Pita Dye

Energi celah pita atau yang lebih dikenal dengan *bandgap* ( $\Delta E$ ) merupakan energi minimum yang dibutuhkan untuk mengeksitasi elektron yang terperangkap dalam keadaan terikat atau dari pita valensi ( $E_V$ ) menuju keadaan bebas atau dari pita konduksi ( $E_C$ ) agar dapat berpartisipasi dalam terjadinya konduktivitas listrik [41]. Sebelumnya perlu diketahui bahwa pita konduksi (LUMO) adalah pita orbital elektron di mana elektron dapat berpindah dari pita valensi ketika elektron tersebut diberi energi. Elektron yang berada pada orbital ini, akan memiliki cukup energi untuk bergerak bebas dan pergerakan elektron akan menyebabkan arus listrik mengalir. Pita valensi (HOMO) sendiri merupakan orbital elektron terjauh dari partikel yang melibatkan elektron [42]. Hasil pengukuran energi celah pita (*bandgap*) dapat digunakan untuk menentukan struktur *dye* yang lebih potensial dalam menyerap foton dari matahari. Energi celah pita dapat dipengaruhi oleh energi total yang dimiliki *dye*, di mana semakin negatif energi total *dye*, maka semakin kecil energi celah pita yang dihasilkan [43]. *Dye* yang memiliki energi celah pita paling kecil paling berpotensi dalam menyerap foton, hal ini dapat terjadi karena kemungkinan suatu elektron tereksitasi dari pita valensi menuju pita konduksi semakin mudah atau semakin besar, sehingga kepekaannya terhadap cahaya juga semakin meningkat dan konduktivitas listrik juga akan semakin meningkat [43].

Energi celah pita dapat ditentukan dengan metode *tauc plot*, yang mana metode ini ditentukan dengan nilai transisi yang diperoleh dari analisis spektrofotometri UV-Vis dengan cara melihat grafik linier yang menghubungkan energi celah pita atau *bandgap*  $E_g$  (eV) pada sumbu x dengan koefisien serap terhadap foton  $(ah\nu)^{1/n}$  pada sumbu y. Perhitungan lebih lengkap dapat dijelaskan sebagai berikut [44]:

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

Dimana:

$h$  : konstanta planck ( $6,626 \times 10^{-34}$  Js)  
 $E_g$  : *bandgap* (eV)

$n$  : eksponen yang bergantung pada jenis transisi

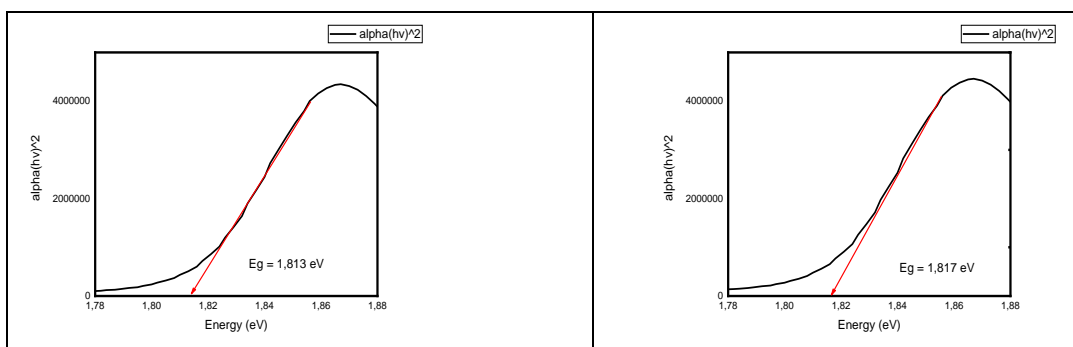
$\nu$  : frekuensi, dengan  $\nu = c/\lambda$      $A$  : konstanta proporsional

Tabel 4, menunjukkan harga energi celah pita (*bandgap*) *dye* daun pandan suji, yaitu sebagai berikut:

**Tabel 4. Energi gap ( $E_g$ ) Pigmen Klorofil dengan Metode Tauc Plot**

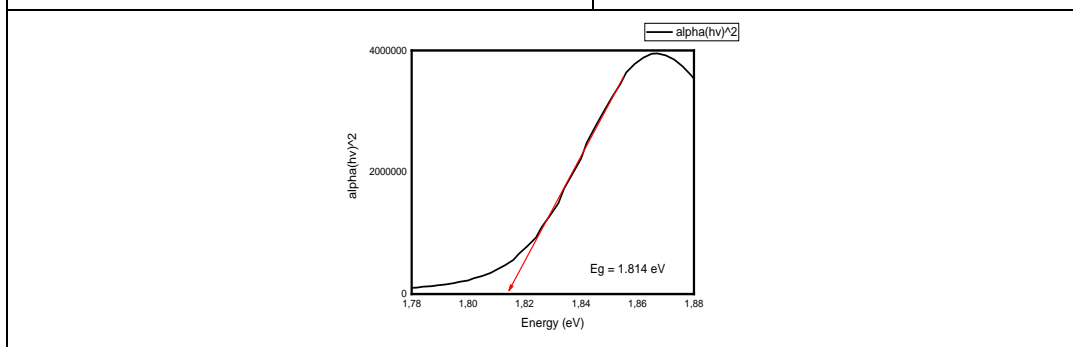
Pewarna	pH	<i>Bandgap</i> ( $E_g$ ) (eV)
Daun Pandan Suji	2	1,813
	7	1,817
	12	1,814





Gambar 6. Grafik Liner Tauc Plot Pigmen Klorofil pH 2

Gambar 7. Grafik Liner Tauc Plot Pigmen Klorofil pH 7



Gambar 8. Grafik Liner Tauc Plot Pigmen Klorofil pH 12

Berdasarkan Tabel 4, dapat disimpulkan bahwa meningkatnya keasaman berpengaruh terhadap lebar dan sempitnya energi celah pita. Hal ini dimungkinkan terjadi karena semakin meningkatnya keasaman, maka jumlah ikatan rangkap bersama pasangan elektron bebas (PEB) akan meningkat, sehingga elektron yang dihasilkan akan semakin meningkat juga dan eksitasi elektron akan semakin mudah terjadi. Eksitasi elektron yang semakin mudah terjadi akan berpengaruh terhadap peningkatan efisiensi pada rangkaian DSSC. Oleh karena itu, ditunjukkan pada Tabel 4 bahwa pH 2 merupakan pH terbaik yang dapat menghasilkan energi celah pita yang lebih kecil, yang mana harga energi celah pita (*bandgap*) paling berpotensi dalam menyerap foton, hal ini dapat terjadi karena kemungkinan suatu elektron tereksitasi dari pita valensi menuju pita konduksi semakin mudah atau semakin besar, sehingga kepekaannya terhadap cahaya juga semakin meningkat dan konduktivitas listrik juga akan semakin meningkat [43].

### 3.5 Studi Fotovoltaik Rangkaian DSSC

Parameter fotovoltaik seperti analisis tegangan rangkaian terbuka ( $V_{oc}$ ), kerapatan arus hubung singkat ( $J_{sc}$ ), *fill factor* (FF), dan efisiensi ( $\eta$ ) pada rangkaian DSSC berbasis polimer elektrolit PVDF dengan menggunakan *dye* daun pandan suji pada pH 2 dan dengan variasi waktu pengadukan yaitu 8, 10, 12 dan 14 jam ditunjukkan pada Tabel 5, yaitu sebagai berikut:

Tabel 45. Parameter Fotovoltaik DSSC Berbasis Polimer elektrolit PVDF dengan *Dye* Daun Pandan Suji pH 2

Konsentrasi Membran PVDF (%)	Waktu Pengadukan (Jam)	Parameter Fotovoltaik DSSC			
		$J_{sc}$ (mA/cm <sup>2</sup> )	$V_{oc}$ (mV)	FF (%)	Efisiensi ( $\eta$ ) (%)
18	8	$2,5 \times 10^{-3}$	350	$3,26 \times 10^{-1}$	0,88
	10	$2,2 \times 10^{-3}$	326	$3,25 \times 10^{-1}$	0,72

Konsentrasi Membran PVDF (%)	Waktu Pengadukan (Jam)	Parameter Fotovoltaik DSSC			
		Jsc (mA/cm <sup>2</sup> )	Voc (mV)	FF (%)	Efisiensi ( $\eta$ ) (%)
	12	$1,8 \times 10^{-3}$	307	$3,21 \times 10^{-1}$	0,53
	14	$1,2 \times 10^{-3}$	254	$2,83 \times 10^{-1}$	0,26

Berdasarkan Tabel 5, dapat disimpulkan bahwa waktu pengadukan dapat berpengaruh terhadap besarnya nilai parameter fotovoltaik, yang mana semakin meningkatnya waktu pengadukan menunjukkan pola penurunan pada nilai rapat arus hubungan singkat (Jsc), tegangan rangkaian terbuka (Voc), dan nilai *fill factor* (FF) serta menunjukkan pola peningkatan pada nilai efisiensi (%). Hal tersebut terjadi karena peningkatan waktu pengadukan dapat mempengaruhi kerapatan pori pada membran PVDF yang terbentuk semakin meningkat [28]. Meningkatnya kerapatan pori, menunjukkan bahwa pori yang terbentuk semakin *rigid*, dan sesuai dengan hukum kebalikan klasik membran, yang mana semakin *rigid* pori yang terbentuk maka stabilitas jangka panjang penggunaan DSSC akan semakin meningkat karena pori yang *rigid* akan sangat membantu untuk memerangkap elektrolit, sehingga permasalahan kebocoran dan penguapan elektrolit dapat teratasi [28; 45]. Namun demikian, pori yang terlalu *rigid* akan menghalangi jalannya transfer elektron. Hal ini dapat terjadi karena pori yang terlalu *rigid* akan menyulitkan elektron untuk dapat berpindah atau bergerak, sehingga besar kemungkinan efisiensi yang dihasilkan pada rangkaian DSSC semakin menurun karena proses transfer elektron menjadi terhambat [28; 45]. Oleh karena itu, dari evaluasi studi parameter fotovoltai rangkaian DSSC dengan menggunakan multimeter, dipilih pori ideal yang memiliki kemampuan cukup baik dalam memerangkap elektrolit tanpa menghalangi jalannya siklus elektron, sehingga stabilitas jangka panjang penggunaan dan efisiensi DSSC dapat tercapai. Oleh karena itu, pada Tabel 5 ditunjukkan bahwa waktu pengadukan 10 jam dimungkinkan dapat membentuk pori ideal, yang ditunjukkan dengan nilai efisiensi ( $\eta$ ) sebesar 0,72 %.

#### 4. Kesimpulan

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan, maka dapat disimpulkan bahwa polimer elektrolit berbasis membran PVDF dengan konsentrasi 18% dan waktu optimum pengadukan 10 jam menunjukkan potensi yang besar untuk menjadi solusi permasalahan stabilitas jangka panjang penggunaan dan efisiensi rangkaian DSSC karena dapat terbentuknya pori ideal, yang dibuktikan dengan meningkatnya nilai rapat arus hubungan singkat (Jsc) sebesar  $2,2 \times 10^{-3}$ , tegangan rangkaian terbuka (Voc) sebesar 326, dan nilai *fill factor* (FF) sebesar  $3,25 \times 10^{-1}$ , serta menunjukkan pola peningkatan nilai efisiensi sebesar 0,72 (%).

#### Ucapan Terima Kasih

Ucapan terimakasih disampaikan sebesar-besarnya khususnya kepada tim riset merah putih laboratorium analitik kimia yang telah memfasilitasi, membantu menuntaskan pelaksanaan dan mempublikasikan penelitian ini dalam Prosiding Seminar Nasional Kimia Tahun 2021, yang kedua ucapan terimakasih disampaikan kepada Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Negeri Surabaya yang juga telah memberikan bantuan dan dukungan dalam pelaksanaan penelitian ini.

#### Daftar Pustaka

- [1] T. M. W. J. Bandara, A. M. J. S. Weerasinghe, M. A. K. L. Dissanayake, G. K. R. Sanadaraa, M. Furlani, I. Albinsson, B. E. Mellander, "Characterization of poly (vybylidene fluoride-co-hexafluoropropylene) (PVdF-HFP) nanofiber membrane based quasi solid electrolytes and their application in a dye sensitized solar cell", *Electrochimica Acta*, pp. 276-283, 2018.

- [2] M. Umer, R. Saleem-ur, H. Khalil, H. Ibnelwaleed A., B. V. S. Reddy, "Recent advances in dye sensitized solar cells", *Advances in Material Science and Engineering*, vol. 1, pp. 1-12, 2014.
- [3] N. Roslan, M. E. Yaacob, M. A. M. Radzi, Y. Hashimoto, D. Jamaludin, G. Chen, "Dye Sensitized Solar Cell (DSSC) greenhouse shading: New insights for solar radiation manipulation", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 92, pp.171-186, 2018.
- [4] D. Rong, C. Nathan L, O. Zi, C. C. Mun, "A techno-economic review of silicon photovoltaic module recycling", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 109. Pp. 532-550, 2019.
- [5] N. Jamalullail, I. S. Mohamad, M. N. Norizan, N. A. Baharun, "Short review: natural pigments photosensitizer for dye-sensitized solar cell (DSSC)", *IEEE 15th Student Conference on Research and Development (SCORED)*, pp. 344-349, 2017.
- [6] F. Kabir, S. N Sakib, N. Matin, "Stability study of natural green dye based DSSC", *Optik*, pp. 1-15, 2018.
- [7] A. H. Ahliha, F. Nurosyid, A. Supriyanto, "The chemical bonds effect of *Amaranthus hybridus L.* and *Dracaena Angustifolia* on TiO<sub>2</sub> as photo-sensitizer for dye-sensitized solar Cells (DSSC) The Chemical Bonds Effect of *Amaranthus Hybridus L.* and *Dracaena Angustifolia* on TiO<sub>2</sub> as Photo-sensitizer", *AIP Conf. Proc.* 1868, 2018. 060001 (2017), pp. 1–6, 2018.
- [8] D. R. Adawiyah, T. Muhandri, "Pengaruh fortifikasi zat besi menggunakan fe-sulfat , fe-fumarat dan na fe edta terhadap kualitas sensori produk-produk olahan tepung terigu", *Indonesian Journal of Food Quality*, vol. 6, no. 2, pp. 54–62, 2019.
- [9] D. Indrasti, N. Andarwulan, E. H. Purnomo, N. U. R. Wulandari, "Stability of chlorophyll as natural colorant: A review for suji (*dracaena angustifolia* (medik.) roxb.) leaves' case.", *Curr. Res. Nutr. Food Sci.*, vol. 6, no. 3, pp. 609–625, 2018.
- [10] H. Sri, G. Gunawan, H. Abdul, "Pengaruh pasta zno dengan penambahan dish detergent dan pva pada kaca konduktif terhadap efisiensi dye sensitized solar cell dari ekstrak bunga rosela (*Hibiscus sabdariffa L.*)", *Journal of Scientific and Applied Chemistry*, vol. 16, no. 3, pp. 90-96, 2013.
- [11] S. Khushboo, S. Vinay, S. S. Sharma, "Dye-sensitized solar cells: fundamentals and current status", *Nanoscale Research Letters*, vol. 13, no. 381, pp. 1-42, 2018.
- [12] S. J. Lukas, D. Marius, A. Sonia, S. Michelle, B. Bennet, G. Timo, "Long-term stability improvement of non-toxic dye-sensitized solar cells via poly(ethylene oxide) gel electrolytes for future textile-based solar cells", *Polymers*, vol. 12, no. 12, pp. 3035, 2020.
- [13] R. Karuppannan, S. Anandan, J. Kadhasamy, "Polymer electrolytes in dye sensitized solar cells", *Material Focus*, vol. 4, no. 4, pp. 262-271, 2015.
- [14] M. Lide, M. Rodriguez, "Emerging nanotechnologies in rechargeable energy storage systems", *Elsevier Inc.*, ISBN 978-0-323-42977-1, 2017.
- [15] G. M. Abreha, Y. Purushotham, K. J. Siva, "Preparation and characterization of lithium ion conducting polymer electrolytes based on a blend of poly(vinylidene fluoride-cohexafluoropropylene) and poly(methyl methacrylate)", *Heliyon*, vol. 2, pp. 1-15, 2016.
- [16] W. Yixin, L. Yu, W. Yang, L. Qian, C. Qingguo, C. Minghua, "Advances and prospects of PVDF based polymer electrolytes", *Journal of Energy Chemistry*, vol. 64, pp. 62-68, 2022.
- [17] S. W. O. Dwi, K. Nita, "Pengaruh aditif kalsium klorida dalam non pelarut terhadap karakteristik dan kinerja membran polyvinylidene fluoride", *Prosiding Seminar Nasional Kimia*, 2019.
- [18] A.L. Ahmad, N. Ideris, B.S. Ooi, S.C. Low, A. Ismail, "Influence of Polymer Concentration on PVDF Membrane Fabrication for Immunoassay Analysis", *Journal of Applied Science*, vol.14, pp.1299-1303, 2014.
- [19] N. R. D. Cahya, K. Nita, "Development and Characterization of Polysulfone/Polyvinylidene Fluoride Blend Membrane Induced by Delayed Liquid-Liquid Demixing", *International Journal on Advanced Science Engineering Information Technology*, vol. 6, no.5, 2016. ISSN: 2088-5334.
- [20] K. Nita, K. Toeti, M. Monica, "The influence of casting solution composition and stirring conditions against mechanical strength 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.
- [21] M. K. D. Ayu, K. Nita, "The Effect of casting solution and non solvent composition on the performance of polysulfone membranes against chromium (VI)", *Research Journal of Pharmaceutical, Biological and Chemical Sciences*, vol. 7, no. 2, pp. 495, 2016.
- [22] A. D. Rara, I. Dwi, M. Y. Maulidah, "Pengaruh variasi waktu penguapan terhadap kinerja membran selulosa asetat pada proses ultrafiltrasi", *J. Berkala Saintek*, vol. 5, no. 1, pp. 7-10, 2017.
- [23] K. Nita, W. Asri, S. A. Budi, "Manufacture of PVDF-kitosan composite membrane and its utilization in batik industrial wastewater treatment.", *Research Journal of Pharmaceutical, Biological and Chemical Sciences*, vol. 6, no. 2, pp. 495, 2015.

- [24] K. Nita, S. Pirim, S. Muslim, N. Purwidiani, "Synergistic ability of psf and pvdf to develop high-performance psf/pvdf coated membrane for water treatment", *Rasayan J. Chem*, vol.11, no.1, pp. 260-279, 2018, ISSN: 0974-1496.
- [25] K. Nita, K. Toeti, M. Supari, "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.
- [26] K. Nita, S. Pirim, 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, ISSN: 0974-1496.
- [27] M. Moshfeghian, H. Azimi, M. Mahkam, M. R. Kalae, S. MazinanI, and 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.
- [28] S. Pirim, K. Nita, S. M. Monica, N. R. D. Cahya, "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.
- [29] A. Mohmoud A. M., M. A. Bakar, K. A. Amir H., L. Norasikin A., N. E. Safie, M. Z. Razali, M. Ismail, S. Kamaruzzaman, "Natural dye extracted from pandanus amaryllifolius leaves as sensitizer in fabrication of dye-sensitized solar cells", *International Journal of Electrochemical Science*, vol. 12, pp. 747-761, 2017.
- [30] K. Nygren, "Solar cells based on synthesized nanocrystalline ZnO thin films sensitized by chlorophyll a and photopigments isolated from spinach", Thesis Master's Thesis. Linköping University, Sweden, 2010.
- [31] A. Ahmed M, M. Hemdan S. H, Y. Moataz M. K, H. G. M. Abdel, H. Ahmed S, K. Ahmed S. G, "Dye-sensitized solar cells (DSSC) based on extracted natural dyes," *J. Nanomater*, 2019, 1867271.
- [32] E. Paula, D. J. David, G. Michael, W. Michael, C. Franco M, C. M. Fernanda, "A Cockspur For The Dss Cells: Erythrina Crista-Galli Sensitizers," *Spectrochimica Acta - Part A: Molecular And Biomolecular Spectroscopy*, no.176, pp.91-98, 2017.
- [33] M. Rossi, "Chlorophylls and xanthophylls of crop plants as dyes for dye-sensitized solar cells (DSSC)", *J. Plant Sci. Phytopathol.*, vol. 1, no. 2, pp. 087-094, 2017.
- [34] A. H. Ahliha, F. Nurosyid, A. Supriyanto, T. Kusumaningsih, "Optical properties of anthocyanindyes on TiO<sub>2</sub> as photosensitizers for application of dye-sensitized solar cell (DSSC)", *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng*, 2018.
- [35] I. Imelda, dan P. R. Aulia, "Optimalisasi struktur  $\pi$ -konjugasi pada zat warna organik tipe D- $\pi$ -A", *Journal of Research and Education Chemistry (JREC)*, vol. 2, no. 2, 2020.
- [36] L. Jung-Kun, Y. Mengjin, "Progress in light harvesting and charge injection of dye-sensitized solar cells", *Material Science and Engineering*, vol. 176, no. 15, pp. 1142-1160, 2011.
- [37] D. R. Adawiyah and T. Muhandri, "Pengaruh Fortifikasi Zat Besi Menggunakan Fe-Sulfat, Fe-Fumarat dan Na Fe EDTA Terhadap Kualitas Sensori Produk-Produk Olahan Tepung Terigu", vol. 6, no. 2, pp. 54-62, 2019.
- [38] D. Ganta, J. Jara, and R. Villanueva, "Dye-sensitized solar cells using Aloe Vera and Cladode of Cactus extracts as natural sensitizers", *Chem. Phys. Lett.*, vol. 679, pp. 97-101, 2017.
- [39] D. Sinha, D. De, and A. Ayaz, "Photo sensitizing and electrochemical performance analysis of mixed natural dye and nanostructured ZnO based DSSC", *Sadhana - Acad. Proc. Eng. Sci.* vol. 45, pp. 175, 2020.
- [40] K. Nita, S. Pirim, S. A. Budi, W. S. Chandra, and M. Supari, "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
- [41] K. Sulaiman, "4 - Optimization of electrical, electronic and optical properties of organic electronic structures", *Polymers in Organic Electronics*, pp. 185-202, 2020.
- [42] E. Serpil, O. Yasemin, A. Gulsin, "Chapter 4 - Metallic Engineered Nanomaterial for Industrial Use", *Handbook of Nanomaterials for Industrial Applications*, pp. 67-63, 2018.
- [43] A. Suprasetyo, dan S. Pirim, "Pembuatan elektroda pasta karbon termodifikasi zeolit untuk analisis fenol secara cyclic stripping voltammetry", *UNESA J. Chem*, vol. 5, no. 3, pp. 86-93, 2016.
- [44] M. Magdalena M. Y, P. Redi K, S. Hadi I, "Penentuan celah energi optik ekstrak daun alpukat (persea americana mill) asal desa oinlasi menggunakan metode tauc plot", *Jurnal Fisika dan Aplikasinya*, vol. 3, no. 2, 2018.
- [45] S. Khushboo, S. Vinay, S. S. Sharma, "Dye-sensitized solar cells: fundamentals and current status", *Nanoscale Research Letters*, vol 13, pp. 381, 2018.