

Pengaruh Variasi Komposisi Polimer PVDF Nanofiber Sebagai Aplikasi Penjebak Elektrolit Pada Efisiensi Listrik dari *Dye Sensitized Solar Cell* (DSSC)

The Effect of Variations in Composition of PVDF Nanofiber Polymers as Electrolyte Trapping Applications on the Electrical Efficiency of Dye Sensitized Solar Cells (DSSC)

Qurrota A'yun, Nita Kusumawati*

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

*corresponding author: nitakusumawati@unesa.ac.id

Abstrak. Stabilitas menjadi tantangan utama dalam pengembangan energi listrik berbahan utama cahaya matahari yaitu dye sensitized solar cell (DSSC). DSSC terusun dari photoelektroda, dye, elektrolit dan counter electrode yang bekerja dengan prinsip fotoelektrokimiadimana dye bekerja sebagai agen penyerap cahaya dan semikonduktor sebagai tempat separasi muatan. Dye dan elektrolit merupakan komponen utama penentu stabilitas DSSC dengan permasalahan berupa penguapan cairan, kebocoran pada elektrolit cair dan desorpsi pewarna. Dalam mengatasi permasalahan tersebut, elektrolit polimer dari PVDF nanofiber menjadi solusi dari permasalahan dengan cara meningkatkan mobilitas ion I/I_3^- . Kepadatan polimer berpengaruh pada konduktivitas ionik yang berdampak pada aliran elektron nantinya. Oleh karena itu, pada penelitian ini dilakukan pembuatan elektrolit polimer nanofiber dengan variasi konsentrasi PVDF yaitu 16%, 18% dan 20%. Dalam mengetahui serapan panjang gelombang pewarna dikarakterisasi menggunakan instrumen UV-Visible didapatkan klorofil-a pada 464 nm dan klorofi-b pada 664,5 nm dari daun suji pH-2. Karakterisasi elektrokimia dari pewarna dikarakterisasi menggunakan voltametri siklik dihasilkan HOMO -4,31591 eV; LUMO -3,1715 eV pada pH-2. Sementara itu, celah pita energi dihasilkan nilai band-gap 1,813 eV dengan metode touch plot. Pada pengukuran efisiensi dari rangkaian dilakukan pengukuran tegangan dan arus menggunakan multimeter sehingga dihasilkan harga Voc 436 mV; Isc 10^{-2} mA; efisiensi 1,33% dari variasi terbaik pada konsentrasi polimer PVDF 18%.

Kata-kata kunci: Stabilitas, DSSC, klorofil, polimerelektrolit, PVDF nanofiber

Abstract. Stability is the main challenge in the development of electrical energy made from sunlight, namely dye sensitized solar cells (DSSC). DSSC is composed of photoelectrodes, dyes, electrolytes and counter electrodes that work on the principle of photoelectrochemistry, where dye acts as a light-absorbing agent and a semiconductor as a charge separation site. Dye and electrolyte are the main components determining the stability of DSSC with problems such as liquid evaporation, leakage of liquid electrolyte and dye desorption. In overcoming these problems, polymer electrolytes from PVDF nanofibers are the solution to the problem by increasing the mobility of I/I_3^- ions. The density of the polymer affects the ionic conductivity which has an impact on the electron flow later. Therefore, in this study, nanofiber polymer electrolytes were made with variations in PVDF concentrations, namely 16%, 18% and 20%. In knowing the wavelength absorption of the dye characterized by using UV-Visible instruments, it was found that chlorophyll-a at 464 nm and chlorophyll-b at 664.5 nm from suji leaf pH-2. The electrochemical characterization of the dye was characterized using cyclic voltammetry to produce HOMO -4.1842 eV; LUMO -3.5591 eV at pH-2. Meanwhile, the band gap of energy resulted in a band-gap value of 1.813 eV using the touch plot method. In measuring the efficiency of the circuit, voltage and current measurements were carried out using a multimeter so that the value of Voc 436 mV was produced; Isc 10^{-2} mA; 1.33% efficiency from the best variation at 18% PVDF polymer concentration..

Keywords: Stability, DSSC, chlorophyll, polymer electrolyte, PVDF nanofiber

1. Pendahuluan

Kebutuhan energi terus mengalami peningkatan dengan banyaknya pertumbuhan penduduk dunia, perubahan era digital di berbagai bidang, dan kemajuan serta perkembangan dalam bidang teknologi dan industri [1]. Peningkatan tersebut diperkuat dengan besarnya rasio elektrifikasi sebesar 99,20% pada tahun 2020 yang berbanding terbalik dengan menipisnya ketersediaan energi fosil [2]. Penipisan sumber utama pembentuk energi berupa minyak bumi tersebut perlu dilakukan pencarian sumber energi yang menjadikan cahaya matahari sebagai sumber utama. Matahari menjadi alternatif utama pengganti energi fosil dengan kemampuannya yang mampu merubah energi yang dipancarkannya menjadi listrik dengan besarnya cahaya yang dipancarkan mencapai 120.000 TW ke bumi [3]. *DyeSensitized Solar Cell* (DSSC) merupakan salah satu alternatif penghasil listrik dengan memanfaatkan cahaya matahari sebagai komponen utama dalam merubahnya menjadi energi listrik melalui sensitisasi semikonduktor celah pita lebar [4]. Komponen utama konversi energi matahari menjadi listrik pada DSSC tersebut menjadikannya perhatian khusus bagi para peneliti dikarenakan banyaknya kelebihan berupa transformasi energi yang baik meskipun dalam keadaan pencahayaan matahari yang kurang dikarenakan adanya sistem penyimpanan energi matahari sehingga terdapat cadangan, biaya produksi rendah dan ramah lingkungan [5-7].

DSSC pertama kali dilaporkan oleh O'Regan dan Gratzel pada tahun 1991 yang menarik banyak perhatian karena langkah fabrikasinya yang mudah, efisien, murah dan konversi energi yang tinggi [8-9]. DSSC tersusun dari dua buah kaca konduktif yang tersusun dari tiga komponen utama yaitu semikonduktor TiO_2 yang peka akan pewarna, elektroda Pt-counter dan elektrolit [10-11]. Pewarna dan elektrolit merupakan dua komponen yang memainkan peranan utama dalam penentu kinerja DSSC.

Pada saat ini, pewarna yang banyak digunakan yaitu pewarna sintesis dengan stabilitasnya yang tinggi dan peningkatan harga arus yang berpengaruh pada kinerja DSSC seperti ruthenium. Akan tetapi ruthenium juga memiliki kelemahan seperti harganya yang mahal dan menyebabkan polusi karena kandungan logam beratnya [12]. Dalam mengatasi permasalahan tersebut pada penelitian ini digunakan pewarna alami yang memiliki biaya relatif murah, ramah lingkungan, biodegradable dan sangat berlimpah serta aman terhadap lingkungan [13]. Pewarna alami yang digunakan dari pigmen klorofil daun pandan suji. Pandan suji (*Dracaena angustifolia (Medix.) Roxb.*) merupakan tanaman yang memiliki kandungan klorofil tinggi [14-17]. Daun suji termasuk dalam suku Liliaceae dengan bentuk daunnya tunggal, memanjang, dan menyempit dengan panjangnya sekitar 17 dan lebar 2,5 cm [16][18]. Pigmen klorofil sangat baik digunakan sebagai pewarna *dye sensitized solar cell* (DSSC) dengan peran utamanya sebagai unit penangkap cahaya matahari pada proses fotosintesis sehingga adanya cahaya dan radiasi panas yang menjadi penyumbang utama pada transfer elektron pada DSSC akan meningkatkan reaktivitas dari klorofil [19-20].

Klorofil mudah mengalami degradasi sehingga menyebabkannya mudah berubah menjadi turunannya dan perubahan atau penghilangan dari warna hijaunya. Degradasi klorofil dapat memicu penurunan kemampuan transfer elektron pigmen klorofil dari cahaya matahari [21]. Terdapat beberapa hal yang mampu mempengaruhi degradasi dari klorofil baik secara reaksi enzimatik dan non-enzimatik diantaranya yaitu kondisi lingkungan, adanya tindakan simultan dari enzim, asam lemah, oksigen, cahaya, panas dan pengaruh pH [22].

Klorofil terbagi menjadi dua yaitu klorofil-a dan klorofil b. Klorofil-a memiliki kemampuan dalam menyerap sinar ultraviolet, sinar tampak dan sinar inframerah dekat. Berdasarkan pengaruh pH, keadaan asam mampu merubah geometri dari klorofil-a dengan meningkatnya ikatan hidrogen sehingga cincin klorofil-a terdeformasi dan menyebabkan pergeseran merah spektral, membentuk tipe agregat dalam larutan etanol terhidrasi asam [23-24]. Sementara itu, klorofil-b bertanggung jawab sebagai katalis degradasi dan menjaga kestabilan fotosistem [25].

Selain itu, pewarna yang digunakan dalam DSSC memiliki beberapa karakteristik khusus diantaranya adanya kandungan gugus karboksil (-CO) atau hidroksil (-OH), termasuk dalam pigmen yang memiliki panjang gelombang range sinar tampak yaitu 400-800 nm, stabilitas baik dalam menyerap foton, memiliki energi HOMO (*Highest Occupied Molecular Orbital*) yang lebih rendah dibandingkan larutan elektrolit dan energi LUMO (*Lowest Occupied Molecular Orbital*) yang cukup tinggi jika dibandingkan dengan pita konduksi semikonduktor [26-28].

Penentu kedua dari kinerja DSSC yaitu elektrolit. Banyak permasalahan DSSC yang merujuk pada kebocoran elektrolit sehingga berpengaruh besar terhadap stabilitasnya. Stabilitas tersebut yang menjadi tantangan utama dalam komersialisasi DSSC dengan adanya permasalahan berupa kebocoran elektrolit, desorpsi pewarna dan penguapan cairan maka permasalahan tersebut harus diatasi. Elektrolit polimer menjadi salah satu solusi dalam mengatasi permasalahan tersebut dengan keuntungannya berupa konduktivitas ionik yang tinggi, bebas pelarut dan fleksibel [29]. Elektrolit polimer tersebut dibuat dengan merangkap elektrolit pada membran serat nano polimer PVDF sehingga mampu mengurangi penguapan dan kebocoran dari elektrolitnya [30]. Pemilihan PVDF sebagai polimer perangkap elektrolit pada penelitian ini dikarenakan PVDF memiliki ketahanan termal tinggi, ketahanan kimia yang baik dan memiliki struktur simetri sehingga memiliki kelebihan transfer massa yang rendah dengan kecenderungan terjadinya *fouling* lebih rendah [31-34]. Selain itu, pemilihan bentuk nanofiber dikarenakan polimer nanofiber memiliki kemampuan sebagai distilasi membran, pertukaran ion dalam baterai lithium dan penukar ion sesuai fungsinya dalam DSSC [35-37].

Berdasarkan latar belakang diatas, pada penelitian ini akan dilakukan pembuatan polimer nanofiber PVDF dengan variasi komposisi PVDF 16%, 18% dan 20% yang dilarutkan dalam variasi pelarut DMAc:aseton sebesar 3:2 dengan lama pengadukan 12 jam pada suhu 65°C dengan kecepatan pengadukan 270 rpm sesuai dengan penelitian yang telah dilakukan sebelumnya oleh Moshfeghian, dkk (2021) [38-39]. Perbedaan terhadap variasi komposisi tersebut akan diukur pengaruhnya terhadap kinerja dari DSSC berupa besarnya nilai Voc, J_{sc} dan efisiensinya.

2. Bahan dan Metode

2.1. Bahan

Bahan yang digunakan antara lain daun pandan suji, etanol p.a. for analysis Emsure, etilen karbonat (EC) anhydrous 99%; propilen karbonat (PC) anhydrous 99,7%; Iodin; KI for analysis Emsure; TiO₂; HNO₃ 0,1 M; polyethylene glycol 1000 for synthesis; Tween 80 from PT. Brataco Chemika; Poly(vinylidene fluoride) powder average Mw 534,000 by GPC; N,N-Dimethylacetamide for synthesis ≥ 99%, aseton for analysis Emsure; kaca FTO.

2.2. Alat

Alat yang dibutuhkan yaitu peralatan gelas (gelas kimia IWAKI Pyrex, Gelas ukur IWAKI Pyrex, kaca arloji, pipet tetes, spatula), neraca analitik OHAUS PAJ1003, magnetic stirrer NESCO LAB MS-H280-Pro, pH meter, instrumen UV-Visible Shimadzu 1800, dan Voltametri 797VA Computrace, Electrospinning *Nachriebe 601*.

2.3. Pembuatan Dyes Sensitized Solar Cell

Pembuatan pewarna alami sebagai aplikasi *dye* pada DSSC dilakukan melalui metode maserasi dan evaporasi. Maserasi dilakukan dengan merendam material pewarna alami dalam pelarut selama 24 jam dengan perbandingan 1:6. Tahapan utama yang dilakukan yaitu daun suji dibersihkan dengan air mengalir kemudian dikeringkan dan dipotong kecil-kecil. Langkah selanjutnya yaitu menimbang daun suji 30 g dan direndam dalam pelarut etanol p.a. sebanyak 150 mL selama 24 jam yang sebelumnya telah ditambahkan HCl 0,1 N dan NaOH 0,1 N sehingga didapatkan pH 2; 7; 12. Hasil maserasi selanjutnya dilakukan proses evaporasi dengan tujuan untuk menguapkan pelarut sehingga mampu meningkatkan konsentrasi dari pigmen yang didapatkan dari pewarna dan interaksi antara TiO₂ dengan pigmen pewarna dapat berjalan lebih maksimal [40]. Evaporasi dilakukan selama 20 menit dengan setengah

perjalanan dari evaporasi sampai dihasilkan ekstrak kental. Hal tersebut dikarenakan, hasil evaporasi dengan tingkat viskositas yang tinggi dapat mengurangi laju transfer yang terjadi antara TiO_2 dengan pigmen pewarna sehingga sulit diterapkan sebagai *dye* DSSC [41].

2.4. *Pembuatan Larutan Elektrolit*

Larutan elektrolit dibuat menggunakan bahan-bahan iodin (I_2), kalium iodida (KI), etilen karbonat (EC) dan propilen karbonat (PC). Langkah pertama yang dilakukan yaitu penimbangan bahan-bahan dengan I_2 9,2 mg; KI 0,06 g; EC 0,4 g dan PC 0,4 g. Tahapan selanjutnya yaitu homogenisasi semua bahan menggunakan hotplate dengan kecepatan 100 rpm selama 30 menit.

2.5. *Pembuatan Pasta TiO_2*

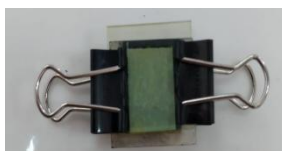
Pasta TiO_2 dibuat dengan bahan-bahan berupa serbuk titanium (V) oksida (TiO_2); larutan HNO_3 0,1 M; polietilen glikol 1000 (PEG-1000); dan tween 80. Tahapan utama yang dilakukan yaitu menimbang TiO_2 0,2 g dan PEG-1000 0,08 g. Tahapan selanjutnya dengan menambahkan 0,4 mL larutan HNO_3 0,1 M pada serbuk TiO_2 dan diaduk menggunakan spatula sampai homogen. Selanjutnya ditambahkan PEG-1000, tween 80 0,05 mL dan dilakukan proses homogenisasi dengan menggunakan *hotplate* kecepatan 100 rpm selama 30 menit.

2.6. *Pembuatan Membran PVDF Nanofiber*

Membran PVDF nanofiber dibuat menggunakan metode elektrospinning. Pada penelitian dilakukan pembuatan larutan membran PVDF dengan variasi komposisi 16%, 18% dan 20% menggunakan pelarut dimetil asetamida (DMAc) dan aseton dengan perbandingan 3:2. Tahapan pertama yang dilakukan yaitu menimbang bahan PVDF sebanyak 1,6 g; 1,8 g; 2,0 g, DMAc 6 g dan aseton 4 g. Selanjutnya dilakukan pembuatan larutan membran dengan menambahkan secara bertahap DMAc dan aseton pada PVDF yang dilakukan pengadukan menggunakan hotplate suhu 65°C kecepatan 270 rpm selama 12 jam [38]. Tahapan yang terakhir yaitu elektrospinning pada larutan membran dengan menambahkan 5 mL larutan membran pada suntikan dan dijalankan dengan alat elektrospinning selama 5 jam dengan voltage sebesar 15 kV; jarak 15 cm dan laju alir 1 mL/h [38].

2.7. *Penyusunan Rangkain DSSC*

DSSC tersusun dari tiga komponen utama yaitu FTO anoda, FTO katoda dan elektrolit. FTO anoda dibuat dengan melapisi kaca menggunakan pasta TiO_2 . Cara yang dilakukan yaitu membatasi kaca FTO kanan, kiri dan atas menggunakan selotip sebesar 0,5 cm sehingga dihasilkan luas permukaan sebesar 3 cm^2 dengan ketebalan 0,2 mm selanjutnyaditambahkan pasta TiO_2 dengan metode Dr. Blade dan disintering pada suhu 450°C selama 60 menit. Kaca FTO tersebut selanjutnya direndam dalam pewarna hasil evaporasi selama 24 jam. FTO katoda dibuat dengan menambahkan lapisan grafit pada kaca dengan cara melapiskan karbon dari hasil pembakaran lilin pada atas kaca yang selanjutnya diratakan sesuai dengan ukuran luas permukaan kaca FTO anoda. Pada penelitian ini digunakan polimer elektrolit dengan merendam membran PVDF nanofiber 3 cm^2 dalam larutan elektrolit 1 mL selama 60 menit [42]. Penyusunannya dengan menambahkan polimer elektrolit pada kaca FTO katoda yang telah dilapisi dengan karbon kemudian ditumpuk dengan kaca FTO anoda dan ditambahkan klip pada bagian atas dan bawah.



Gambar 1. Penyusunan Rangkaian

2.8. *Analisis UV-Visible*

Pengukuran Panjang gelombang dari daun pandan suji dilakukan menggunakan instrumen UV-Vis. Pengukuran panjang gelombang dilakukan menggunakan panjang gelombang 400-800 nm sesuai dengan range cahaya tampak yang dibutuhkan sebagai *dye* DSSC [43].

2.9. *Analisis Voltametri*

Analisis voltametri dilakukan untuk mengetahui elektrokimia dan celah pita energi dari pewarna dimana akan dihasilkan harga homo, lumo dan band-gap. Pengukuran dilakukan dengan menambahkan pewarna dan KCl perbandingan 4:1. Pada pengukuran ini digunakan elektroda kerja Ag/AgCl dan elektrolit pendukung berupa KCl 3M. Pengukuran dilakukan dengan rentang potensial -1,6 V-1,6 V; waktu deposisi 20 sekon dan laju pindai 0,5 V/det [44][45].

2.10. *Pengukuran Rangkaian*

Pengukuran dilakukan menggunakan instrumen multimeter dengan mengukur tegangan (V) dan arus (I) dengan penyinaran dibawah matahari dengan intensitas 100 mW/cm². Dari pengukuran tersebut akan dihasilkan harga tegangan terbuka (V_{oc}), arus hubung singkat (J_{sc}), faktor pengisian (FF) dan efisiensi (η) [46].

3. Hasil Penelitian dan Pembahasan

3.1. *Pembuatan Elektrolit Polimer (Membran Nanofiber PVDF)*

Membran polimer telah banyak dimanfaatkan sebagai aplikasi pemisahan karena efisiensi yang tinggi dan hanya membutuhkan konsumsi energi yang rendah [47]. Selain itu, struktur pori yang merupakan faktor penting dalam proses pembuatan membran menjadikannya dapat dimanfaatkan sebagai penjebak elektrolit dari permasalahan kebocoran elektrolit pada DSSC karena salah satu fungsi membran yaitu penukar ion dalam bahan bakar elektrolit polimer sel [48][49]. Selain itu, komponen penyusun membran harus memiliki stabilitas termal, ketahanan kimia terhadap asam dan basa yang baik, kekuatan mekanik yang baikserta memiliki potensial terjadi *fouling* pada permukaan yang rendah dimana hal tersebut dapat diperoleh dari membran asimetris [50].

PVDF (Polyvinylidene Fluoride) merupakan salah satu komponen penyusun membran asimetris yang banyak dimanfaatkan sebagai mikrofiltrasi (MF), ultrafiltrasi (UF) dan pervaporasi (PV) [51]. Ukuran dan diameter dari membran mempengaruhi kinerja mekanik dan fleksibilitas dalam fungsionalitas permukaan, dimana hal tersebut semakin kecil ukuran dan diameter suatu material maka luas permukaan menjadi semakin besar sehingga kinerja mekanik serta fleksibilitas menjadi semakin baik berupa nanomaterial seperti membran berbasis nanofiber. Membran nanofiber merupakan struktur yang berbentuk serat berongga, cangkang inti dan pipa berpori yang dihasilkan dari polimer melalui beberapa cara yaitu *drawing, self-assembly, template synthesis and electrospinning* [52].

Pembuatan nanofiber PVDF ditinjau dari beberapa aspek yaitu konsentrasi larutan polimer dan pelarut. Pada penelitian ini, membran nanofiber disintesis menggunakan pelarut DMAc dan aseton. Dalam mengetahui pelarut yang sesuai dengan material dapat ditinjau dari perbedaan parameter kelarutan yang kecil antara polimer dan pelarutnya dimana hal tersebut dapat ditinjau dari *hansen solubility parameter*.

Tabel 1. Hansen Solubility Parameter

No.	Material	$\rho\delta_d$ (MPa ^{1/2})	δ_p (MPa ^{1/2})	δ_h (MPa ^{1/2})	δ_t (MPa ^{1/2})
1	PVDF	16,0	14,3	23,9	32,1
2	DMAc	16,8	11,5	10,2	22,7
3	Aseton	13,0	9,8	11,0	19,7
4	Air	12,2	22,8	40,4	48,0

Dari tabel diatas, dapat diketahui bahwa antara PVDF dan DMAc memiliki perbedaan parameter kelarutanyang dekat yaitu sebesar 9,4 Mpa^{1/2}. Penambahan aseton dengan titik didih

rendah dilakukan dengan tujuan untuk mempercepat penguapan pelarut sehingga serat berongga bisa terbentuk lebih sempurna tanpa manik-manik dan cacat serat [53][54]. Selain pelarut, konsentrasi larutan polimer juga menentukan terbentuknya serat nanofiber yang lebih sempurna dimana konsentrasi rendah dapat menyebabkan rantai molekul terpisah dan serat tidak terbentuk dengan sempurna hanya berupa tetesan-tetesan seperti manik-manik. Sementara itu, konsentrasi polimer yang terlalu tinggi beresiko pada terhambatnya aliran larutan polimer karena menggumpal pada ujung kapiler sehingga serat yang terbentuk menurun drastis [38].

Pada penelitian ini, pembuatan membran nanofiber sebagai aplikasi penjejak elektrolit mengacu pada penelitian Moshfegian, dkk (2021) yang menganalisis pengaruh komposisi pelarut dan persen komposisi material polimer pada terbentuknya serat nanofiber yaitu 18% dengan pelarut DMAc; 16% pelarut DMAc:aseton (6:4); 18% pelarut DMAc:aseton (6:4); 20% pelarut DMAc:aseton (6:4). Dari hasil analisis SEM menunjukkan bahwa serat dengan komposisi 18% pelarut DMAc menghasilkan manik-manik dan serat cacat dibandingkan komposisi 18% pelarut DMAc:aseton terbentuk serat nanofiber yang sempurna. Sementara itu, pada komposisi 16% pelarut DMAc:aseton masih terdapat manik-manik dan serat cacat yang langka dan komposisi 20% pelarut DMAc:aseton terbentuk konglutinasi yang terjadi karena larutan polimer yang terlalu kental sehingga aliran elektron terhalang pada ujung kapiler [38]. Dari hasil penelitian tersebut, akan diteliti lebih lanjut terkait pengaruh serat nanofiber yang terbentuk terhadap aliran transfer elektron pada DSSC.

3.2. Analisa Serapan Panjang Gelombang Pewarna

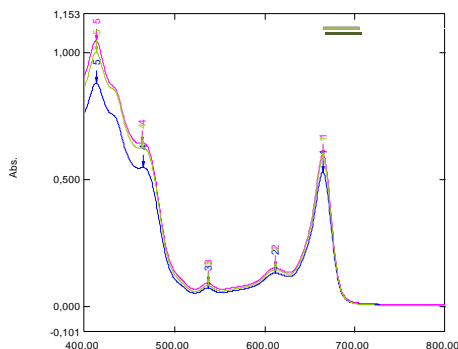
Pewarna (*dye*) yang digunakan sebagai aplikasi pada rangkaian DSSC disyaratkan memiliki daerah serapan panjang gelombang pada *range* cahaya tampak yaitu 400-800 nm [55]. Pada penelitian ini pewarna yang digunakan yaitu daun pandan suji hasil ekstraksi menggunakan pelarut etanol dikarakterisasi menggunakan UV-Visible dengan tujuan untuk mengetahui daerah serapan panjang gelombang dari pigmen pewarna. Daun pandan suji (*Pleomele Angutifolia*) memiliki kandungan pigmen klorofil yang tinggi tersusun dari klorofil-a ($C_{55}H_{72}O_5N_4Mg$) berwarna hijau tua dan klorofil-b ($C_{55}H_{70}O_6N_4Mg$) berwarna hijau muda [56].

Klorofil merupakan salah satu jenis pewarna yang berpotensi sebagai *dye* dari DSSC dengan kemampuannya yang tinggi pada proses fotosintesis tumbuhan melalui penyerapan dan perubahan energi cahaya matahari menjadi kimia. Hal tersebut sejalan dengan prinsip kerja dari DSSC yaitu penyerapan foton dari sinar matahari atau lampu dan mengubahnya menjadi energi listrik [57]. Pigmen klorofil pada daun pandan suji memiliki struktur yang kompleks dimana salah satu struktur utama yang sangat berpengaruh pada proses fotosintesis yaitu porfirin. Struktur porfirin dalam pigmen klorofil terikat kuat ditengah dengan satu atom Mg dan satu rantai hidrokarbon panjang tergabung melalui gugus asam karboksilat. Namun, struktur porfirin tersebut sangat rentan terhadap tingkat keasaman, ditunjukkan dengan pengaruh peningkatan nilai pH terhadap meningkatnya proses deprotonasi sehingga berdampak pada penurunan jumlah elektron yang sangat berpengaruh pada aliran elektron yang nantinya terjadi pada mekanisme kerja dari DSSC [58].

Tabel 2. Parameter UV-Vis Pigmen Klorofil Daun Pandan Suji

Pewarna	Ph	Pigmen Klorofil			
		Klorofil-a		Klorofil-b	
		λ (nm)	Absorbansi	λ (nm)	Absorbansi
Daun Pandan Suji	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

Dari tabel diatas, dapat diketahui bahwa tingkat keasamaan tidak menunjukkan pengaruh yang signifikan terhadap pergeseran serapan panjang gelombang. Ketidaksignifikan pengaruh tingkat keasamaan terhadap pergeseran panjang gelombang terlihat pada hasil penggabungan grafik pengukuran ketiga variasi pH.



Gambar 2. Grafik Pengaruh Variasi pH Serapan Panjang Gelombang Klorofil

Namun, tingkat keasamaan tersebut berpengaruh terhadap harga absorbansi dimana peningkatan nilai absorbansi mengindikasikan bahwa kemampuan penyerapan pigmen klorofil lebih optimum pada tingkat keasamaan tersebut. Hal tersebut menunjukkan bahwa pigmen klorofil dari daun pandan suji optimum terabsorpsi pada pH asam ditunjukkan dengan harga absorbansi klorofil-a dan klorofil-b pada pH-2 lebih besar dibandingkan pH netral (pH-7) dan pH basa (pH-12). Hasil tersebut diperkuat dengan teori yang mengatakan bahwa pada kondisi asam proses deprotonasi menjadi lebih kecil yang berbanding terbalik dengan harga koefisien difusi elektron sehingga proses kinetik transfer muatan yang berlangsung pada sistem DSSC menjadi lebih cepat dan energi listrik yang dihasilkan menjadi lebih besar [58][59].

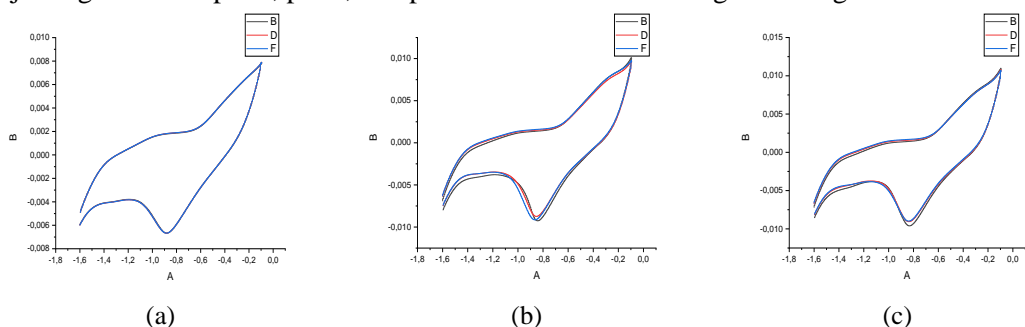
3.3. Analisa Elektrokimia Pewarna

Analisa elektrokimia pewarna sebagai basis *dye* pada sistem kerja DSSC merupakan salah satu hal penting yang harus diperhatikan. Analisa elektrokimia tersebut dapat ditinjau dari harga energi HOMO (*Highest Occupied Molecular Orbital*) dan LUMO (*Lowest Occupied Molecular Orbital*) yang dikarakterisasi menggunakan instrumen voltametri siklik. Dalam sistem kerja DSSC, elektrokimia berperan pada tahapan regenerasi pewarna [60]. Pewarna basis *dye* pada sistem DSSC disyaratkan memiliki harga HOMO yang rendah dari pita konduksi TiO₂. Sementara itu, harga LUMO harus lebih besar dibandingkan konduksi semikonduktor pita TiO₂ sebesar -3,2 eV [61]. Perhitungan HOMO dan LUMO didapatkan dari persamaan:

$$E_{HOMO} = -(E_{ox} + 4,4)$$

$$E_{LUMO} = -(E_{red} + 4,4) \dots \dots \dots (1)[62]$$

Pada penelitian ini, dilakukan karakterisasi elektrokimia pigmen klorofil dari daun pandan suji dengan variasi pH 2; pH 7; dan pH 12 dihasilkan voltamogram sebagai berikut:



Gambar 3. Voltamogram Pigmen Klorofil Variasi pH (a) pH 2 (b) pH 7 (c) pH 12

Dari gambar voltamogram diatas, didapatkan harga E_{oks} dari puncak Ipa dan harga E_{red} dari puncak Ipc. Dari harga tersebut dimasukkan dalam persamaan perhitungan sehingga dihasilkan harga HOMO dan LUMO dari berbagai variasi pH sebagai berikut:

Tabel 3. Parameter UV-Vis Pigmen Klorofil Daun Pandan Suji

Pewarna	pH	Analisa Elektrokimia			
		$E_{oks}(eV)$	HOMO (eV)	$E_{red}(eV)$	LUMO (eV)
Daun Pandan Suji	2	-0,0809	-4,31591	-1,2285	-3,1701
	7	-0,1033	-4,2967	-1,2799	-3,1201
	12	-0,0948	-4,3052	-1,2541	-3,1459

Dari tabel diatas, dapat diketahui bahwa tingkat keasaman berdampak pada harga elektrokimia dimana perbedaan antara pita konduksi TiO_2 sebesar -3,2 eV terhadap harga LUMO yang semakin lebar mengindikasikan bahwa transfer elektron yang terjadi nantinya akan lebih lambat. Hal tersebut terjadi karena pH basa cenderung lebih mudah mengalami deprotonasi klorofil sehingga frekuensi gugus -OH menjadi semakin lebar karena adanya pelepasan proton H^+ dari molekul pewarna [63].

3.4. Analisa Celah Pita Energi Pewarna

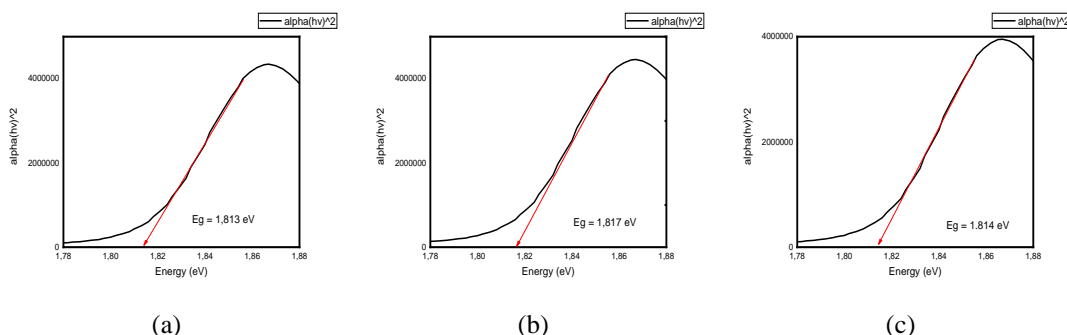
Analisa celah pita energi pada pewarna DSSC merupakan salah satu hal penting yang harus diperhatikan. Celah pita energi (*band-gap*) sangat berperan penting dalam mengetahui kinerja dari DSSC melalui harga eksitasi elektron antara pigmen pewarna terhadap TiO_2 [64]. Perhitungan *band-gap* tersebut didapatkan dari metode *touch plot* dengan menggunakan nilai transmitansi yang dihasilkan dari pengukuran spektrofotometer UV-Vis sehingga dihasilkan grafik linear antara $h\nu$ dan $(h\nu\alpha)^{1/2}$. Persamaan perhitungan yang digunakan yaitu:

$$(h\nu\alpha)^{1/2} = A(h\nu - E_g) \dots\dots\dots (2) [65]$$

Dimana:

- h = konstanta planck
- ν = c/λ
- E_g = celah pita energi (*band-gap*)
- A = konstanta proporsional

Pada penelitian ini, dilakukan perhitungan *band-gap* pigmen klorofil dari daun pandan suji dengan variasi pH 2; pH 7; dan pH 12 dihasilkan grafik linear antara $h\nu$ dan $(h\nu\alpha)^{1/2}$ sebagai berikut:



Gambar 3. Grafik Linear Touch Plot Pigmen Klorofil Variasi pH (a) pH 2 (b) pH 7 (c) pH 12

Dari gambar grafik linear diatas, didapatkan harga *band-gap* dari berbagai variasi pH sebagai berikut:

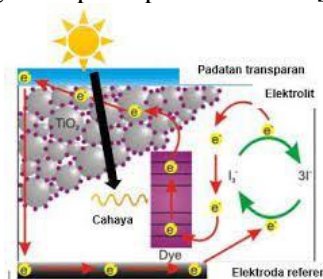
Tabel 4. Band-gap Pigmen Klorofil Daun Pandan Suji

Pewarna	pH	<i>Band-gap</i> (eV)
Daun	2	1,813
Pandan	7	1,817
Suji	12	1,814

Dari tabel diatas, dapat diketahui bahwa tingkat keasaman berpengaruh terhadap lebar dan sempitnya nilai celah pita energi. Celah pita energi yang sempit memungkinkan terjadinya eksitasi potensial menjadi semakin cepat. Kecepatan eksitasi potensial tersebut sebanding dengan proses transisi yang terjadi antara cahaya dan pewarna sehingga kinerja DSSC menjadi lebih baik [66][67]. Dari berbagai variasi pH diatas, menunjukkan bahwa pigmen hasil ekstraksi pelarut yang lebih asam menghasilkan harga *band-gap* yang lebih kecil dibandingkan lainnya. Hal tersebut dikarenakan tingkat keasaman dari *dye* klorofil dapat mempercepat proses kinetik transfer muatan pada sistem DSSC dengan sempitnya celah pita energi yang dihasilkan. Selain itu, koefisien difusi elektron yang dihasilkan juga lebih besar berpengaruh pada meningkatnya laju injeksi elektron dan arus listrik sehingga kinerja DSSC menjadi lebih baik [58][59].

3.5. Analisa Fotovoltaik Rangkaian DSSC

DSSC merupakan energi listrik berbahan baku utama berupa cahaya matahari yang tersusun dari photoelektroda, *dye*, elektrolit dan *counter electrode* yang bekerja dengan prinsip fotoelektrokimia. Prinsip tersebut didasarkan pada *dye* yang bekerja sebagai agen penyerap cahaya dan semikonduktor sebagai tempat separasi muatan [68].



Gambar 4. Mekanisme Kerja DSSC

Dari gambar diatas, sistem rangkaian DSSC tersusun delapan tahapan mekanisme terjadinya transfer elektron diantaranya yaitu: (1) Eksitasi molekul pewarna dengan adanya interaksi antara cahaya matahari dengan pewarna; (2) Penyuntikan elektron pada pita konduksi dalam keadaan pewarna yang teroksidasi; (3) Transfer energi listrik melalui substrat konduktif, sirkuit eksternal dan elektroda counter; (4) Reduksi elektrolit (I_3^- menjadi I^-); (5) Oksidasi pewarna (S^* menjadi S); (6) Rekombinasi pewarna; (7) Rekombinasi elektron pada TiO_2 dengan pewarna yang teroksidasi; dan (8) Rekombinasi elektron yang disuntikkan di TiO_2 dengan akseptor dalam elektrolit [69]. Berdasarkan gambaran mekanisme kerja DSSC diatas, terdapat beberapa komponen penting yang berpengaruh pada proses terjadi transfer elektron yaitu photoelektroda, *dye*, dan elektrolit. Photoelektroda yang digunakan pada penelitian ini yaitu TiO_2 memiliki stabilitas yang tinggi terhadap cahaya, celah pita yang lebar dan tidak berbahaya bagi lingkungan. Sementara dua komponen lainnya yaitu *dye* dan elektrolit diperlukan adanya solusi dari permasalahan kebocoran elektrolit, desorpsi pewarna dan penguapan pelarut yaitu melalui penerapan elektrolit polimer [70].

Pembuatan elektrolit polimer dilakukan dengan merendam polimer nanofiber kedalam elektrolit dalam jangka waktu tertentu sehingga elektrolit yang terperangkap dalam polimer memiliki jangka waktu hidup yang lebih panjang dan mengurangi resiko degradasi pewarna dengan menghindari interaksi secara langsung antara larutan elektrolit dengan pigmen yang sudah terjebak dalam photoelektroda TiO_2 [71]. Namun, dalam pembentukan polimer yang

nantinya dijadikan sebagai aplikasi penjebak elektrolit pada DSSC terdapat pengaruh kepada persen komposisi polimer sehingga berdampak pada kepadatan larutan polimer. Kepadatan polimer berpengaruh pada konduktivitas ionik yang berdampak pada aliran elektron nantinya. Pada penelitian ini dilakukan pembuatan elektrolit polimer dengan variasi pada konsentrasi PVDF yaitu 16%, 18% dan 20% untuk mengetahui pengaruhnya terhadap kinerja DSSC. Kinerja DSSC dikarakterisasi nilai tegangan rangkaian terbuka (V_{oc}); rapat arus hubung singkat (J_{sc}); faktor pengisian (FF) dan efisiensi (η). Pengukuran nilai-nilai tersebut dilakukan menggunakan multimeter dibawah cahaya simulasi 100 mW/cm² [72]. Persamaan perhitungan yang digunakan yaitu:

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

$$FF = \frac{P_{max}}{J_{sc}V_{oc}} \dots\dots\dots (3) [73]$$

Tabel 5. Fotovoltaik Rangkaian DSSC

Pewarna	Polimer Nanofiber Elektrolit (%)	Analisa Fotovoltaik			
		V_{oc} (mV)	J_{sc} (mA/cm ²)	FF (%)	η (%)
Daun Pandan Suji	16	497	4,2 x 10 ⁻³	3,1 x 10 ⁻¹	1,74
	18	436	3,3 x 10 ⁻³	2,9 x 10 ⁻¹	1,33
	20	330	2,9 x 10 ⁻³	2,8 x 10 ⁻¹	0,84

Dari tabel diatas, dapat diketahui bahwa semakin besar komposisi polimer maka kinerja rangkaian DSSC menjadi menurun, terlihat dari harga tegangan, arus hubung singkat, faktor pengisian dan efisiensi yang semakin menurun. Hal tersebut menunjukkan bahwa komposisi polimer yang semakin besar berpengaruh terhadap transportasi muatan yang terjadi pada kesulitan mekanisme rekombinasi antarmuka Pt/elektrolit sehingga berdampak pada arus hubung singkat (J_{sc}) yang menurun dengan bertambahnya komposisi polimer [74].

Kinerja DSSC yang menurun dengan meningkatnya komposisi polimer tersebut sejalan dengan karakteristik utama dalam pembentukan membran polimer PVDF berupa nilai selektivitas dan permeabilitas. Permeabilitas ditinjau dari nilai fluks yang merupakan laju alir dari membran sehingga diketahui tingkat porositas membran. Porositas membran berpengaruh terhadap laju alir dari elektron pada transportasi muatan yang terjadi nantinya akan semakin lambat. Semakin banyak komposisi PVDF maka semakin besar tingkat kerapatan partikel sehingga gaya dorong untuk melewati partikel dalam menembus membran besar dan kecepatan larutan umpan dalam melewati membran semakin rendah. Selain itu, selektivitas ditinjau dari nilai rejeksi dimana semakin banyak komposisi polimer PVDF maka kerapatan elektron menjadi semakin besar [75]. Dari penjelasan diatas, dapat disimpulkan bahwa karakteristik membran yang ditinjau dari segi selektivitas dan permeabilitas saling berbanding terbalik, hal tersebut sejalan dengan sistem kinerja DSSC dimana kecepatan aliran transfer elektron berbanding terbalik dengan stabilitas atau lama waktu hidup dari DSSC, komposisi polimer yang paling optimum diaplikasikan sebagai aplikasi penjebak elektrolit yaitu komposisi polimer 18% dimana dengan kerapatan partikel yang sedang dibandingkan komposisi 20% sehingga aliran transfer elektron yang terjadi tidaksebegitu terhambat dan kinerja DSSC berjalan lebih baik.

4. Kesimpulan

Dalam mengatasi masalah kebocoran elektrolit, desorpsi pewarna dan penguapan pelarut pada stabilitas rangkaian DSSC telah dibuat membran polimer dari PVDF nanofiber dengan sifat penukar ion dalam bahan bakar elektrolit polimer sel yang baik menggunakan teknik elektrospinning. Pembuatan elektrolit polimer dipengaruhi dari tingkat kepadatan polimer berpengaruh pada konduktivitas ionik yang berdampak pada aliran elektron nantinya. Pada penelitian ini dilakukan pembuatan elektrolit polimer dengan variasi pada konsentrasi PVDF yaitu 16%, 18% dan 20% dengan opelarut DMAc:Aseton (6:4) untuk mengetahui pengaruhnya terhadap kinerja DSSC. Dari analisa fotovoltaiik dihasilkan data berupa V_{oc} sebesar 436 mV ; J_{sc} sebesar $3,3 \times 10^{-3}$ mA/cm² ; FF sebesar $2,9 \times 10^{-1}$ % dan η sebesar 1,33 % dari komposisi polimer 18% dimana kecepatan aliran transfer elektron berbanding terbalik dengan stabilitas atau lama waktu hidup dari DSSC sehingga komposisi tersebut lebih optimum dimana dengan kerapatan elektron tergolong sedang dibandingkan yang lainnya dan transfer elektron tidak sebegitu terhambat dibandingkan komposisi polimer 20%. Selain itu, pada penelitian ini juga dilakukan optimasi tingkat keasamann yang tepat pada proses ekstraksi daun pandan suji terutama klorofil struktur porfirin yang berperan penting didalamnya dimana dari hasil karakterisasi UV-Vis, studi elektrokimia dan *band-gap* menunjukkan bahwa tingkat keasaman yang tinggi (pH asam) mempengaruhi terjadinya peningkatan koefisien difusi elektron; peningkatan laju injeksi elektron dan arus listrik; penurunan deprotonasi menyebabkan kinerja DSSC menjadi lebih baik nantinya yaitu optimum pada pH-2.

Ucapan Terima Kasih

Ucapan terima kasih disampaikan kepada Tim Riset Merah Putih Kimia, FMIPA, UNESA yang telah membantu dalam pelaksanaan penelitian ini dan semua pihak yang telah memberikan bantuan dan dukungan dalam pelaksanaan penelitian ini.

Daftar Pustaka

- [1] Vural, Gulfer, "Renewable and non-renewable energy-growth nexus: A panel data application for selected Sub-Saharan African Countries", Resources Policy, vol. 65, pp. 1-7, 2020.
- [2] Astro, Richardo Barry., Ngapa, Yulius., "Data Analisis Potensi Air Terjun Ngamba Mbu'u Kabupaten Ende Sebagai Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro" Jurnal Pendidikan Fisika Tadulako Online (JPFT), vol. 8, no.2, pp:1-8, 2020.
- [3] Al-Alwani, M. A., Mohammad, A. B., Kadhun, A. A., Ludin, N. A., Safie, N. E., Razali, M. Z., Sopian, K., "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, 2020.
- [4] Diantoro, M., Maftuha, D., Suprayogi, T., Iqbal, M. R., Solehudin, Mufti, N. Hidayat, R., "Performance of Pterocarpus Indicus Willd Leaf Extract as Natural Dye TiO₂-Dye/ITO DSSC", Materials Today: Proceedings, vol. 17, pp. 1268-276, 2019.
- [5] M. A. M. Al-Alwani, A. B. S. A. Al-Mashaan, and M. F. Abdullah., "Performance of the dye-sensitized solar cells fabricated using natural dyes from Ixora coccinea flowers and Cymbopogon schoenanthus leaves as sensitizers", Int. J. Energy Res, vol.43 , no. 13, pp: 7229–7239, 2019, doi: 10.1002/er.4747.
- [6] S.R. Alfidharisti, F.Nurosyid, A.Supriyanto, R. Suryana, and Y. Iriani. Influence of electrode spacing on the efficiency of dye-sensitized solar cell. J. Phys. Conf. Ser. 909(1): 36–40. 2017.
- [7] J. Gong, K. Sumanthy, Q. Qiao and Z. Zhou. Review on dye-sensitized solar cells (DSSCs): Advanced techniques and research trends. Renew. Sustain. Energy Rev. 68: 234-246. 2017.
- [8] B. O'Regan, M. Gratzel, A. Low-Cost, High-efficiency solar cell based on dye-sensitized colloidal TiO₂ films. Nature. 353:737-740. 1991.
- [9] C.M. Shih, Y.L. Wu, Y.C. Wang, S.R. Kumar, Y.L. Tung, C.C. Yang, S.J. Lue. Ionic transport and interfacial interaction of iodide/iodine redox mechanism in agarose electrolyte containing colloidal titanium dioxide nanoparticles. J. Photochem. Photobiol. A: Chem. 356: 565-572. 2018.
- [10] Onen, T., Karakus, M. O., Coskun, R., & Cetin, H. Reaching stability at DSSCs with new type gel electrolytes. Journal of Photochemistry & Photobiology A: Chemistry, 385: 1-8. 2019.

- [11] Tan, C. Y., Farhana, N. K., Saidi, N. M., Ramesh, S., & Ramesh, K. Conductivity, dielectric studies and structural properties of P(VA-co-PE) and its application in dye-sensitized solar cell. *Org. Electron.* 56: 116-124. 2018.
- [12] Omar, A., Ali, M. S., & Rahim, N. A. Electron transport properties analysis of titanium dioxide dye-sensitized solar cells (TiO₂-DSSCs) based natural dyes using electrochemical impedance spectroscopy concept: A review. *Solar Energy.* 207: 1088-1121. 2020.
- [13] Roslan, N., Ya'acob, M., Radzi, M. M., Hashimoto, Y., Jamaludin, D., & Chen, G. Dye Sensitized Solar Cell (DSSC) greenhouse shading: New insights for solar radiation manipulation. *Renewable and Sustainable Energy Reviews.* 92: 171-186. 2018.
- [14] Bellonch-Tinoco M., Kaulmann, A., Corte-Real J., Rodrigo D., Martinez-Navarrete N., Bohn, T. Chlorophylls and carotenoids of kiwifruit puree are affected similarly or less by microwave than by conventional heat processing and storage. *Food Chem.* 187:45-262. 2015. doi:10.1016/j.foodchem.2015.04.052.
- [15] Limantara, L. Dettling, M., Imdrawati, R., Indriatmoko, Brotosudarmo, T.H.P. Analysis on the Chlorophyll Content of Commercial Green Leafy Vegetables. *Procedia Chem.* 14: 255-231. 2015. doi: 10.1016/j.proche.2015.03.032.
- [16] Rahayuningsih, E., Pamungkas, M.S., Olvianas, M., Putera, A.D.P. Chlorophyll extraction from suji leaf (*Pleomele angustifolia* Roxb.) with ZnCl₂ stabilizer. *J. Food Sci Technol.* 55 (3): 1028-1036. 2018. doi: 10.1007/s13197-017-3016-7.
- [17] Indrasti, Dias., Andarwulan, Nuri., Purnomo, Eko Hari., Wulandari, Nur. Stability of Chlorophyll as Natural Colorant: A Review for Suji (*Dracaena angustifolia* (Medik.) Roxb.). *Current Research in Nutrition and Food Science.* 6 (3): 609-625. 2018. www.foodandnutritionjournal.org.
- [18] Aryanti, N., Nafiunisa, A., Willis, F.M. Ekstraksi dan Karakterisasi Klorofil dari Daun Suji (*Pleomele Angustifolia*) Sebagai Pewarna Pangan Alami. *Jurnal Aplikasi Teknologi Pangan.* 5(4): 129-135. 2016. <https://doi.org/10.17728/jatp.183129>.
- [19] Shi, J., Gao, L., Zuo, J., Wang, Q.Q., Fan, L. Exogenous sodium nitroprusside treatment of broccoli florest extends shelf life, enhances antioxidant enzyme activity, and inhibits chlorophyll-degradation. *Postharvest Bio Technol.* 116:98-104. 2016. doi:10.1016/j.posthbrvbio.2016.01.00.
- [20] Narender, B., Naveena, N., Pravalika, P., Kaleem, S., Vamshi M., Mandhadi J. R. 2017. Pharmacological evaluation of root and leaf extracts of *Dracaena reflexa* var. *angustifolia*. *Innov Pharm Pharmacother.* 5(3):141- 146.
- [21] Kumara, N.T.R.N., Lim, Andery., Lim, Chee Ming., Petra, Mohamad Iskandar, Ekanayake, Piyasiri. 2017. Recent Progress and Utilization of Natural Pigments in Dye Sensitized Solar Cells: A Review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews.* 78: 301-317.
- [22] Cui, Xing., Zhao, Peiyu., Li, Ye., Xie, Liping., Li, Qi., Yan, Jingli., Chen, Qinqin., Gao, Shidong., Sun, Mengting., Yang, Bo., Rehmani, Muhammad Saad., Jiang, Yuan-Qing. 2021. Rapeseed NAC46 Positively Regulates Hypersensitive Response-Like Cell Death And Chlorophyll Degradation. 189.
- [23] Yasuda, M., Oda, K., Ueda, T., Tabata, M. 2019. Physico-chemical chlorophyll-a species in aqueous alcohol solutions determine the rate of its discoloration under UV light. *Food Chemistry.* 277:463-70.
- [24] Qu, Fang., Gong, Nan., Wang, Shenghan, Wang., Gao, Yue., Sun, Chenglin., Fang, Wenhui., Men, Zhiwei. 2019. Effect of pH on fluorescence and absorption of aggregates of chlorophyll and carotenoids. *Dyes and Pigments.* 173:1-28.
- [25] Teng, Ke., Tan, Penghui., Guan, Jin., Dong, Di., Liu, Lingyun., Guo, Yidi., Guo, Weier., Yuesen, Yue., Fan, Xifeng., Wu, Juying. 2021. Functional characterization of the chlorophyll b reductase gene NYC1 associated with chlorophyll degradation and photosynthesis in *Zoysia japonica*. *Environmental and Experimental Botany.* 191.
- [26] U.Mehmood,S.U.Rahman,K.Harrabi, I. A. Hussein, and B. V. S.Reddy. 2014. Recent advances in dye sensitized solar cells. *Adv. Mater. Sci.Eng.* 2014:1–12.
- [27] M.Rossi.2017.Chlorophyllsandxanthophylls of crop plants as dyes forDye-Sensitized Solar Cells (DSSC). *J.Plant Sci. Phytopathol.* 1(2): 087–094.
- [28] K.Sharma,V.Sharma,andS.Sharma.2018.Dye-Sensitized Solar Cells: Fundamentals and Current Status. *Nanoscale Res. Lett.* 13:381.
- [29] Johan, M. R., Shy, O. H., Ibrahim, S., Yassin, S. M., &Hul, T. Y. 2011. Effect of Al₂O₃ nanofiller and EC plasticizer on the ionic conductivity enhancement of solid PEO-LiCF₃SO₃ solid polymer electrolyte. *Solid State Ion.*196: 41-47.

- [30] Dissanayake, M. K., Divarathne, H. W., Thotawatthage, C. A., Dissanayake, C. B., Senadeera, G. R., & Bandara, B. R. 2014. Dye-sensitized solar cells based on electrospun polyacrylonitrile (PAN) nanofiber membrane gel electrolyte. *Electrochim Acta*. 130: 76-81.
- [31] N.A. Ahmad, P.S. Goh, L.T. Yogarathinam, A.K. Zulhairun, A.F. Ismail. 2021. Current advances in membrane technologies for produced water desalination. *Desalination*. 493.
- [32] N. Kusumawati, A. Wijiastuti, a.b. Santoso. 2015. Biological and Chemical Science. *Research Journal Of Pharmaceutical*. 6(2):495-503.
- [33] N. Kusumawati, A. Wijiastuti, A.B. Santoso. 2015. Manufacture of PVDF-Kitosan Composite Membrane and its Utilization in Batik Industrial Wastewater Treatment. *Research Journal Of Pharmaceutical, Biological, and Chemical Science*. 6(2):495-503.
- [34] N. Kusumawati, P. Setiarso, M.M. Sianita, S. Muslim. 2016. Transport Properties, Mechanical Behavior, Thermal and Chemical Resistance of Asymmetric Flat Sheet Membrane Prepared from PSF/PVDF Blended Membrane on Gauze Supporting Layer Indones. *J. Chem*. 18(2):257-264.
- [35] S. Mousavi, O. Arjmand, S. Hashemi, N. Banaei. 2016. Modification of the epoxy resin mechanical and thermal properties with silicon acrylate and montmorillonite nanoparticles. *Polymers from Renewable Resources*. 7(3):101-13.
- [36] S. Mousavi, S. Hashemi, A. Amani, F. Moujodi, A. Hamedfateh, M. Zarei. 2018. Modification of polypropylene-starch blend by eggshell nano-particle, EVA and maleic anhydride to improve biodegradability and thermal properties. *Int J. Chem Sci*. 15: 225.
- [37] S.M. Mousavi, S. Soroshnia, S.A. Hashemi, A. Babapoor, Y. Ghasem, A. Savardashtaki, et al. 2019. Graphene nano-ribbon based high potential and efficiency for DNA, cancer therapy and drug delivery applications. *Drug metabolism reviews*. 51(1): 91-104.
- [38] M. Moshfeghian, H. Azimi, M. Mahkam, M.R. Kalae, S. Mazinani, H. Mosafer. 2021. Effect of Solution Properties on Electrospinning of Polymer Nanofibers: A Study on Fabrication of PVDF Nanofiber by Electrospinning in DMAc and (DMAc/Acetone) Solvents. *J. Adv. Appl. NanoBio Tech*. 2(2): 53-58.
- [39] Kumara, N.T.R.N., Lim, Andery., Lim, Chee Ming., Petra, Mohamad Iskandar, Ekanayake, Piyasiri. 2017. Recent Progress and Utilization of Natural Pigments in Dye Sensitized Solar Cells: A Review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 78: 301-317.
- [40] Pandian, Balasubramanian., Ramalingam, Sathya., Sreeram, Kalarical Janardhanan., Rao, Jonnalagadda Raghava. 2021. Natural pigment: Preparation of brown pigment from lignin biomass for coloring application. *Dyes and Pigments*. 195.
- [41] Guo, Suna., Yang, Zihang., Wang, Fan., Zhao, Ning., Li, Xiaoting. 2021. Optimal design of wide viscosity range turbine flow sensor based on flow field analysis. *Flow Measurement and Instrumentation*. 79.
- [42] Bandara, T.M.W.J., Weerasinghe, A.M.J.S., Dissanayake, M.A.K.I., Senadeera, G.K.R., Furlani, M., Albinsson, I., Mellander, B.-E.. 2018. Characterization of poly (vinylidene fluoride-co-hexafluoropropylene) (PVdF-HFP) nanofiber membrane based quasi solid electrolytes and their application in a dye sensitized solar cell. *Electrochimica Acta*. 266: 276-283.
- [43] M. Choi, Y. Noh, K. Kim and O. Song. 2016. Properties of Dye Sensitized Solar Cells with Porous TiO₂ Layers Using Polymethyl-Methacrylate Nano Beads. *Korean J. Mater. Res*. vol.26(4), <http://dx.doi.org/10.3740/MRSK.2016.26.4.194>.
- [44] D.R. Adawiyah., T. Muhandri. 2019. Pengaruh Fortifikasi Zat Besi Menggunakan Fe-Sulfat, Fe-Fumarat dan Na-Fe-EDTA Terhadap Kualitas Sensori Produk-Produk Olahan Tepung Terigu. *The Journal Of Nutrition*. 6(2): 54-62.
- [45] D. Indrasti, N. Andarwulan, E.H. Purnomo, N.U.R. Wulandari. 2018. Stability of chlorophyll as natural colorant: A review for suji (*dracaena angustifolia (medik) roxb.*) leaves' case. *Curr. Res. Nutr. Food. Sci*. 6(3):609-625.
- [46] M.R. Kim, S.H. Park, J.U. Kim, J.K. Lee. 2011. Dye-sensitized solar cells based on polymer electrolytes. *In Solar Cells-Sensitized Devices, Intech*.
- [47] Baker, R.W. 2004. *Membrane Technology and Applications*, 2nd ed. John Willy & Sons, Ltd. Chichester. England. 1.
- [48] Mousavi, S.M., Zarei, M., Hashemi, S.A., Ramakrishna, S., Chiang, W-H., Lai, C.W., et al. 2020. Asymmetric Membranes: A Potential Scaffold for Wound Healing Applications. *Symmetry*. 12(7): 1100.
- [49] Ahmadi, S. 2020. Nanoparticles induced oxidative stress and related effects especially under exposure to electromagnetic radiations. *Advances in Applied NanoBio-Technologies*. 1(4):91-8.
- [50] Yan, L., Li, Y.S., Xiang, C.B., dan Xianda, S. 2006. Effect of nano sized Al₂O₃-particle addition on PVDF ultrafiltration membrane performance. *J. Membr. Sci*. 276(1-2): 162-167.

- [51] Kusumawati, Nita., Setiarso, Pirim., Sianita, Maria Monica., Muslim, Supari. 2018. Transport Properties, Mechanical Behavior, Thermal and Chemical Resistance Asymmetric Flat Sheet Membrane Prepared from PSF/PVDF Blended Membrane on Gauze Supporting Layer. *Indones. J. Chem.* 18(2): 257-264.
- [52] Mousavi, S.S., Zarei, M., Hashemi, S.A., Babapoor, A., Amani, A.M. 2019. A conceptual review of rhodanine: current applications of antiviral drugs, anticancer and antimicrobial activities. *Artificial cells, nanomedicine, and biotechnology.* 47(1): 1221-3.
- [53] Ningrum, Ruwanti Dewi Cahya., Kusumawati, Nita. Development and Characterization of Polysulfone/Polyvinylidene Fluoride Blend Membrane Induced by Delayed Liquid-Liquid Demixing. *International Journal on Advances Science Engineering Information Technology* International Journal on Advances Science Engineering Information Technology. 6(5): 716-722. 2016.
- [54] G. R. Guilen, Y. Pan, M. Li, E. M. V. Hoek. Preparation and characterization of membranes formed by non solvent induced phase separation: a review. *Industrial and Engineering Chemistry Research Journal.* 50 (7): 3798-3817. 2011.
- [55] M. Choi, Y. Noh, K. Kim and O. Song. Properties of Dye Sensitized Solar Cells with Porous TiO₂ Layers Using Polymethyl-Methacrylate Nano Beads. *Korean J. Mater. Res.* 26(4). 2016.
- [56] Riansyah, Hendra., Maharani, Dessy Maulidya., Nugroho, Agung. The Intensity and Stability of Dyes From The Leave Pandan, Suji, Katuk, and Moringa as Natural Green Dyes. *Jurnal Riset Teknologi Industri.* 15(1): 103-112. 2021.
- [57] Akhtaruzzaman, Md., Shahiduzzaman, Md., Selvanathan, Vidhya., Sopian, Kamaruzzaman., Hossain, Mohammad Ismail., Amin, Nowshad., Hasan, Mahmud, A.K. Enhancing spectral response towards high-performance dye-sensitized solar cells by multiple dye approach: A comprehensive review. *APPLIED materialstoday.* 25. 2021.
- [58] Ahliha, Aziza Hfii., Nurosyid, Fahrui., Supriyanto, Agus. Kajian pH Klorofil Terhadap Ikatan Kimia Dye pada TiO₂ sebagai Aplikasi Dye-Sensitized Solar Cell (DSSC). *Jurnal Fisika dan Aplikasinya.* 14(1): 16-19. 2018.
- [59] Lee, J.K., Mengjin, Y. 2011. Progress in light harvesting and charge injection of dye-sensitized solar cells. *Material Science and Engineering.* 176: 1142-1160.
- [60] K. Sharma, V. Sharma, and S. S.Sharma. 2018. Dye-Sensitized Solar Cells: Fundamentals and Current Status. *Nanoscale Res. Lett.* 13(2018): 381. doi: 10.1186/s11671-018-2760-6.
- [61] D. R. Adawiyah and T. Muhandri. 2019. PengaruhFortifikasiZatBesiMenggunakan Fe-Sulfat , Fe-Fumarat dan Na Fe EDTA TerhadapKualitasSensoriProduk-ProdukOlahanTepungTerigu The Effect of Iron Fortification using Fe-Sulfat , Fe-Fumarata and Na Fe EDTA on Sensory Quality of Wheat Products. 6(2): 54–62. doi: 10.29244/jmpi.2019.6.54.
- [62] R. A. Voloshin, V. S. Bedbenov, et all. Optimization and characterization of TiO₂-based solar cell design using diverse plant pigments. *International Journal Of Hydrogen Energy.* 30: 1-10. 2016.
- [63] G. Calogero., Y. Jun-Ho., A. Sinopoli., G.D. Marco., M.Graitzel., M.K. Nazeeruddin. 2012. Anthocyanins and betalains as light-harvesting pigments for dye-sensitized solar cells. *Solar Energy.* 86: 1563-1575.
- [64] L. T. Siaw, A. Hermansyah, and D. Dahyuniar. 2016. Dye Sensitized Solar Cell (DSSC) With Natural Dye Sensitizer Pandan Leaves, Turmeric Root and Black Rice Seeds. 8(1): 1–8.
- [65] Daniyati, Rizqa., Zharvan, Vicran., Ichsan, Nur., Pramono, Yono Hadi., Yudoyono, Gatot. 2015. Penentuan Energi Celah Pita Optik Film TiO₂ Menggunakan Metode Touch Plot. *Prosiding Seminar Sains dan Teknologi.* 1-5.
- [66] M. A. Maynez-Rojas, E. Casanova-González, & J. L. Ruvalcaba-Sil. Identification of natural red and purple dyes on textiles by Fiber-optics Reflectance Spectroscopy. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy.* 178: 239–250. 2017.
- [67] Y. P. Journal, H. Y. Aditya, and H. Sutanto. Analysis of optical properties of ZnO/TiO₂ bilayer thin films deposited using the sol-gel spray coating method. 3(3). 2014.
- [68] Vural, Gulfer. Renewable and non-renewable energy-growth nexus: A panel data application for selected Sub-Saharan African Countries. *Resources Policy.* 65: 1-7. 2020.
- [69] A.Sacco. Electrochemical impedance spectroscopy: Fundamentals and application in dye-sensitized solar cells. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 79; 814–829, 2017. 2017. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.159>.
- [70] Al-Alwani, M. A., Mohammad, A. B., Kadhum, A. A., Ludin, N. A., Safie, N. E., Razali, M. Z., Sopian, K. 2017. Natural dye extracted from Pandanus amaryllifolius leaves as sensitizer in fabrication of dye-sensitized solar cells. *International Journal of Electrochemical Science.* 12: 747-761.
- [71] Bandara, T. W., Weerasinghe, A. J., Dissanayake, M. K., Senadeera, G. R., Furlani, M., Albinsson, I., & Mellander, B. E. 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*. 276-283. 2018.
- [72] A. Hagfeldt, G. Boschloo, L. Sun, L. Kloo, H. Pettersson. Dye-sensitized solar cells. *Chem. Rev.* vol. 110(11): 6595–6663. 2010. <https://doi.org/10.1021/cr900356p>.
- [73] S. Sarker, H.W. Seo, D.M. Kim. Calculating current density-voltage curves of dye-sensitized solar cells: A straight-forward approach. *Journal of Power Sources*. 248: 739-744. 2014.
- [74] V. Selvanathan, R. Yahya, H.F. Alharbi, N.H. Alharthi, Y.S. Alharthi, M.H. Ruslan, N. Amin, Md. Akhtaruzzaman. Organosolublestratch derivative as quasi-solid electrolytes in DSSC: Unravelling the synergy between electrolyte rheology and photovoltaic properties. *Solar Energy*. 197: 144-153. 2020.
- [75] Kusumawati, Nita., Koestiari, Toeti., Muslim, Supari. The Development of a New Polymer Membrane: PSF/PVDF blended Membrane. *Research Journal of Pharmaceutical, Biological and Chemical Sciences*. 7(4): 69-77. 2016.