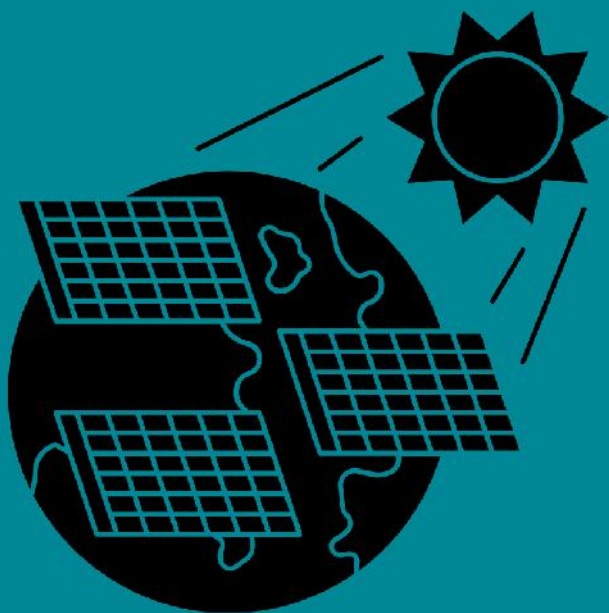




DYE SENSITIZED SOLAR CELL BERBASIS PEWARNA ALAMI

Prof. Ir. Rukmi Sari Hartati, M.T., Ph.D., IPU
Dr. Poppy Diana Sari, S.TP., M.P.

Dye Sensitized Solar Cell
Berbasis Pewarna Alami

Dye Sensitized Solar Cell **Berbasis Pewarna Alami**

Prof. Ir. Rukmi Sari Hartati, M.T., Ph.D., IPU
Dr. Poppy Diana Sari, S.TP., M.P.



Dye Sensitized Solar Cell **Berbasis Pewarna Alami**

Penulis:

Prof. Ir. Rukmi Sari Hartati, M.T., Ph.D., IPU
Dr. Poppy Diana Sari, S.TP., M.P.

Editor:

Eko Sutrisno, S.Si, M.Si, C.EML

Layouter :

Tim Kreatif PRCI

Cover:

Rusli

Cetakan Pertama : Mei 2025

Hak Cipta 2025, pada Penulis. Diterbitkan pertama kali oleh:

Perkumpulan Rumah Cemerlang Indonesia

ANGGOTA IKAPI JAWA BARAT

Pondok Karisma Residence Jalan Raflesia VI D.151

Panglayungan, Cipedes Tasikmalaya – 085223186009

Website : www.rcipress.rcipublisher.org

E-mail : rumahcemerlangindonesia@gmail.com

Copyright © 2024 by Perkumpulan Rumah Cemerlang Indonesia

All Right Reserved

- Cet. I – : Perkumpulan Rumah Cemerlang Indonesia, 2025

; 14,8 x 21 cm

ISBN

Hak cipta dilindungi undang-undang

Dilarang memperbanyak buku ini dalam bentuk dan dengan
cara apapun tanpa izin tertulis dari penulis dan penerbit

Undang-undang No.19 Tahun 2002 Tentang

Hak Cipta Pasal 72

Undang-undang No.19 Tahun 2002 Tentang Hak Cipta
Pasal 72

Barang siapa dengan sengaja melanggar dan tanpa hak melakukan perbuatan sebagaimana dimaksud dalam pasal ayat (1) atau pasal 49 ayat (1) dan ayat (2) dipidana dengan pidana penjara masing-masing paling sedikit 1 (satu) bulan dan/atau denda paling sedikit Rp.1.000.000,00 (satu juta rupiah), atau pidana penjara paling lama 7 (tujuh) tahun dan/atau denda paling banyak Rp.5.000.000.000,00 (lima miliar rupiah).

Barang siapa dengan sengaja menyiarkan, memamerkan, mengedarkan, atau menjual kepada umum suatu ciptaan atau barang hasil pelanggaran hak cipta terkait sebagai dimaksud pada ayat (1) dipidana dengan pidana penjara paling lama 5 (lima) tahun dan/atau denda paling banyak Rp.500.000.000,00 (lima ratus juta rupiah)

KATA PENGANTAR

Alhamdulillah, penulis memanjatkan puji syukur kepada Allah Subhanahu Wa Ta'Ala atas limpahan rahmat dan karunia-Nya sehingga kami dapat menyelesaikan penulisan buku ini yang berjudul “Dye Sensitized Solar Cell Berbasis Pewarna Alami” dengan baik.

Buku “Dye Sensitized Solar Cell Berbasis Pewarna Alami” berisi pemanfaatan pewarna alami pada energi terbarukan Dye Sensitized Solar Cell (DSSC), potensi pewarna alami baik dari limbah pangan maupun dari tumbuh-tumbuhan disekitar kita sebagai bahan baku dye sensitizer pada DSSC, teknologi dasar proses produksi dye sensitizer dan aplikasinya pada prototipe DSSC.

Perubahan iklim akibat pencemaran lingkungan sudah berlangsung dan dampaknya sangat terasa. Pemanasan global mengancam kelangsungan kehidupan umat manusia di muka bumi. Semua negara kini berjuang meredam pemanasan global (global warming) dengan menurunkan emisi karbon. Untuk mengimbangi peningkatan emisi, dibutuhkan percepatan perbaikan efisiensi energi dan pengurangan konsumsi, percepatan kendaraan listrik, penangkapan karbon dan teknologi penyimpanan, dan dekarbonisasi jaringan listrik dengan kapasitas baru yang dapat diperbarui untuk menggantikan bahan bakar fosil. Sebagaimana kita ketahui bahwasanya cadangan bahan bakar fosil di seluruh dunia diperkirakan hanya bisa bertahan 40 tahun untuk minyak, 60 tahun untuk gas alam dan 200 tahun untuk batubara. Energi yang terkait dengan emisi CO₂ perlu dikurangi secara berkelanjutan. Energi terbarukan menjadi hal yang sangat penting dalam menjaga

kelestarian alam dan kualitas lingkungan. Kebijakan untuk mendorong energi terbarukan terbukti mampu meningkatkan pertumbuhan ekonomi karena biayanya yang lebih rendah dibandingkan energi tak terbarukan serta memastikan tujuan pembangunan berkelanjutan.

Sinar matahari merupakan salah satu energi terbarukan yang tidak menimbulkan polusi lingkungan dan kebisingan. Di antara semua teknologi terbarukan, instalasi sel surya atau Photovoltaic (PV) telah mendominasi industri energi terbarukan. DSSC yang ditemukan oleh O'Regan dan Gratzel tahun 1991 menjadi salah satu kandidat potensial sel surya generasi mendatang, karena tidak memerlukan material dengan kemurnian tinggi sehingga biaya proses produksinya yang relatif rendah. Absorpsi cahaya dilakukan oleh molekul pewarna dan separasi muatan oleh anorganik semikonduktor. DSSC memiliki keluaran daya yang efisien di seluruh jalaran kondisi pencahayaan, bahkan dapat bekerja secara efisien dalam kondisi sinar matahari yang tersebar atau redup. Zat pewarna sensitizer memainkan peran penting dalam penyerapan energi surya dan mengubahnya menjadi energi listrik dengan bantuan dari semikonduktor. Oleh karena itu, kinerja sel sangat tergantung pada jenis pewarna yang digunakan sebagai sensitizer karena spektrum penyerapan dari pewarna ke permukaan titanium dioksida (TiO_2) adalah parameter penting dalam menentukan efisiensi sel. Penggunaan pewarna sintesis sebagai sensitizer telah memberikan efisiensi DSSC yang lebih baik dan daya tahan yang tinggi, tetapi mempunyai kekurangan seperti biaya yang lebih tinggi, kecenderungan untuk mengalami degradasi dan penggunaan bahan beracun serta sulit disintesis. Pewarna alami yang memiliki absorbansi dengan kisaran 300 – 600 nm dapat menggantikan pewarna ruthenium (N719).

Buku ini didedikasikan untuk Fakultas Teknik Universitas Udayana dan Fakultas Sains dan Teknologi Universitas Muhammadiyah Sidoarjo. Diharapkan dengan adanya buku ini dapat menjadi salah satu referensi dan sumbangsih bagi ilmu pengetahuan dan sebagai jalan untuk penelitian-penelitian selanjutnya sebagai upaya membantu mengatasi permasalahan energi. Penulis menyadari bahwa buku ini masih jauh dari sempurna. Kritik dan saran yang membangun sangat kami harapkan untuk penyempurnaan di masa mendatang.

Akhir kata, semoga buku ini bermanfaat dan dapat menambah wawasan para pembaca.

Denpasar – Sidoarjo, Mei 2025

Tim Penulis

UCAPAN TERIMA KASIH

Puji syukur kehadirat Allah Subhanahu Wa Ta'Ala atas rahmat dan karunia-Nya, sehingga buku ajar ini dapat terselesaikan dengan baik.

Ucapan terima kasih kami sampaikan kepada Universitas Udayana, khususnya keluarga besar program studi Teknik Elektro serta kepada Universitas Muhammadiyah Sidoarjo, khususnya keluarga besar program studi Teknologi Pangan atas supportnya selama penulisan buku ini.

Ucapan terima kasih yang sebesar-besarnya kami sampaikan kepada keluarga, sahabat serta semua pihak yang telah mendukung proses penyusunan buku ini, baik secara langsung maupun tidak langsung. Semoga amal ibadahnya dibalas Allah Subhanahu Wa Ta'Ala. Buku ini ditulis sebagai salah satu sarana referensi baik bagi masyarakat umum, mahasiswa maupun peneliti dibidang Bioenergy, Teknik, Pertanian maupun Teknologi Pangan.

DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR	I
UCAPAN TERIMA KASIH	IV
DAFTAR ISI	V
ENERGI TERBARUKAN	1
A. Sejarah Pengembangan Energi Terbarukan	1
B. <i>Dye Sensitized Solar Cell</i> Sebagai Energi Terbarukan	1
DYE SENSITIZED SOLAR CELL	7
A. Prinsip Kerja DSSC	7
B. Komponen-Komponen DSSC	10
C. Substrat (Kaca ITO)	10
D. Pewarna	11
E. Elektrolit	17
F. Polietilen glikol dan polietilen oksida	19
G. Material Semikonduktor	21
H. Katalis	21
I. Keuntungan Dan Kekurangan Dye Sensitized Solar Cell (DSSC)	22
J. Pengembangan Masa Depan Pada <i>Dye Sensitized Solar Cell</i> (DSSC)	23
PENGARUH ZAT WARNA TERHADAP PENYERAPAN CAHAYA	28
A. Pewarna Alami	31
B. Klorofil	33
C. Antosianin	38
D. Karotenoid	42
E. Kurkumin	48

EKSTRAKSI PEWARNA	51
A. Ekstraksi Klorofil	61
B. Ekstraksi Antosianin	63
C. Ekstraksi Karotein	69
D. Ekstraksi Kurkumin	73
E. Zat Pelarut	74
F. Aquades	75
G. Aseton	77
H. Etanol	78
I. Metanol	80
 VARIABEL-VARIABEL YANG MEMPENGARUHI PRODUKSI DYE SENSITIZED SOLAR CELL BERBASIS ZAT PEWARNA ALAMI	 82
 PENGUJIAN DAN ANALISIS PERFORMANSI DYE SENSITIZED SOLAR CELL	 85
A. Energy Gap	85
B. Tegangan Rangkaian	87
C. Arus Hubung Singkat	88
D. Kurva I-V	90
E. Fill Factor	91
F. Efisiensi Sel Surya	92
DAFTAR PUSTAKA	94

ENERGI TERBARUKAN

A. Sejarah Pengembangan Energi Terbarukan

Permintaan akan bahan bakar fosil kian meningkat, padahal cadangan bahan bakar fosil semakin menipis. Bahan bakar fosil dibentuk melalui proses jutaan tahun lamanya sehingga tergolong sumber daya alam yang tidak dapat diperbaharui (non-renewable). Salah satu upaya yang dapat dilakukan adalah meneliti, mengembangkan dan memanfaatkan sepenuhnya sumber daya alam yang dapat diperbaharui (renewable) yang berupa biomassa dan residu senyawa kimia organik yang dikonversi menjadi bahan bakar nonfosil yang murah, terdapat di lokasi setempat, dan ramah lingkungan.

Industri pangan dalam system rantai pangan menghasilkan hasil samping (by-products) dan limbah pangan (food wastes). Secara kimia, hasil samping dan limbah industri merupakan senyawa kimia organik. Biomassa dan residu senyawa kimia organik kemudian diproses baik secara kimia, fisika, maupun bioteknologi menjadi bahan bakar metana, biodiesel, bioethanol, aseton, butanol, dan hidrogen. Diharapkan, upaya ini dapat menjadi salah satu solusi ketersediaan bahan bakar secara nasional. Dukungan pemerintah juga sangat diperlukan melalui kebijakan, instruksi, strategi dan pengawasan menuju ketahanan energy, khususnya energy nonfosil.

B. *Dye Sensitized Solar Cell* Sebagai Energi Terbarukan

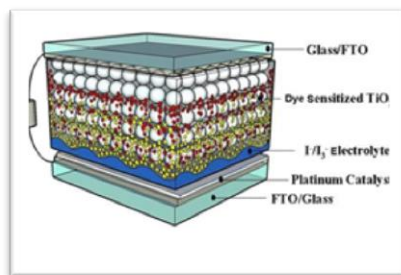
Perubahan iklim akibat pencemaran lingkungan sudah berlangsung dan dampaknya sangat terasa. Pemanasan global mengancam kelangsungan kehidupan umat manusia di

muka bumi. Semua negara kini berjuang meredam pemanasan global dengan menurunkan emisi karbon. Untuk mengimbangi peningkatan emisi, dibutuhkan percepatan perbaikan efisiensi energi dan pengurangan konsumsi, percepatan kendaraan listrik, penangkapan karbon dan teknologi penyimpanan, dan dekarbonisasi jaringan listrik dengan kapasitas baru yang dapat diperbarui untuk menggantikan bahan bakar fosil (Jackson et al., 2019).

Menurut Li B et al. (2006), cadangan bahan bakar fosil di seluruh dunia diperkirakan hanya bisa bertahan 40 tahun untuk minyak, 60 tahun untuk gas alam dan 200 tahun untuk batubara. Energi yang terkait dengan emisi CO₂ perlu dikurangi secara berkelanjutan sekitar 3,5% per tahun dari sekarang hingga 2050 (IRENA, 2019). Energi terbarukan menjadi hal yang sangat penting dalam menjaga kelestarian alam dan kualitas lingkungan. Kebijakan untuk mendorong energi terbarukan dapat mendukung pertumbuhan ekonomi dan memastikan tujuan pembangunan berkelanjutan (Khan et al., 2020). Selain itu, juga terbukti mampu meningkatkan pertumbuhan ekonomi karena biayanya yang lebih rendah dibandingkan energi tak terbarukan (Shahbaz et al., 2020).

Telah banyak dilakukan penelitian oleh para peneliti untuk menemukan sumber bahan bakar yang dapat diperbarukan, ramah lingkungan serta dengan biaya produksi ataupun biaya pembelian yang terjangkau. Beberapa produk hasil penelitiannya adalah tenaga surya, tenaga angin, biomassa dan tenaga air. Kebijakan energi nasional dalam rangka untuk menuju kemandirian dan ketahanan energi nasional yang berdaulat telah ditargetkan pada tahun 2025 peran energi baru dan energi terbarukan paling sedikit 23% dan tahun 2050 paling sedikit 31% (PP No. 79 Tahun 2014).

Sinar matahari merupakan salah satu energi terbarukan yang tidak menimbulkan polusi lingkungan dan kebisingan. Setiap hari matahari memancarkan sejumlah energi dalam bentuk panas dan radiasi yang disebut energi matahari (Sharma et al., 2015). Di antara semua teknologi terbarukan, instalasi sel surya atau biasa dikenal dengan Photovoltaic (PV) telah mendominasi industri energi terbarukan. Pada akhir 2018, kapasitas PV global terpasang dan terhubung ke jaringan daya mencapai 480 GW, mengalami peningkatan 20% dibandingkan dengan tahun 2017. Peningkatan kapasitas terpasang didorong oleh pengurangan biaya yang luar biasa akibat peningkatan teknologi. Penyebaran yang dipercepat, PV surya sendiri dapat menyebabkan pengurangan emisi yang signifikan sebesar 4,9 gigaton karbon dioksida (Gt CO₂) 2050, mewakili 21% dari total potensi mitigasi emisi di sektor energi. Pada tahun 2050, panel surya akan mewakili kekuatan terbesar kedua sumber pembangkit listrik, tepat di belakang tenaga angin dan memimpin jalan untuk transformasi sektor listrik global. Solar PV akan menghasilkan seperempat (25%) dari total kebutuhan listrik secara global, menjadi salah satu sumber pembangkitan terkemuka pada tahun 2050 (IRENA, 2019).



Gambar 01. Skema dye sensitized solar cell (DSSC)
(Istiqomah dkk., 2017)

Dye Sensitized Solar Cell (DSSC) yang ditemukan oleh O'Regan dan Grätzel tahun 1991 menjadi salah satu kandidat potensial sel surya generasi mendatang, karena tidak memerlukan material dengan kemurnian tinggi sehingga biaya proses produksinya yang relatif rendah (Grätzel, 2003). Berbeda dengan sel surya konvensional yaitu semua proses melibatkan material silikon itu sendiri. Absorpsi cahaya dan separasi muatan listrik pada DSSC terjadi pada proses yang terpisah, absorpsi cahaya dilakukan oleh molekul dye dan separasi muatan oleh anorganik semikonduktor nanokristal yang mempunyai band gap (celah energi) lebar (Won-Yeop et al., 2015). DSSC memiliki keluaran daya yang efisien di seluruh jalaran kondisi pencahayaan, termasuk pencahayaan light emitting diode (LED) atau lampu neon dalam ruangan. Bahkan, dapat bekerja secara efisien dalam kondisi sinar matahari yang tersebar atau redup (Iwata et al., 2018). Sel surya dalam ruangan memiliki prospek untuk Internet of Things (IoT), yang mengandung perangkat komunikasi, aktuator, remote dan sensor terdistribusi (Aslam et al., 2020). Keuntungan DSSC membuka jalan yang menarik untuk dilakukan penelitian yang intensif, yang dicerminkan dari peningkatan yang luar biasa dalam jumlah publikasi internasional dalam periode 2005-2014 mencapai 22.168 artikel (Gong et al., 2017). DSSC tersusun dari beberapa komponen antara lain lapisan dye (pewarna), elektrolit, semikonduktor oksida, dan counter elektroda (Grätzel, 2003; Richhariya et al., 2017). Masing-masing komponen dalam DSSC berpengaruh terhadap hasil energi yang diperoleh. Zat pewarna sensitizer memainkan peran penting dalam penyerapan energi surya dan mengubahnya menjadi energi listrik dengan bantuan dari semikonduktor. Oleh karena itu, kinerja sel sangat tergantung pada jenis pewarna yang

digunakan sebagai sensitizer karena spektrum penyerapan dari pewarna ke permukaan TiO_2 adalah parameter penting dalam menentukan efisiensi sel. Penggunaan pewarna sintesis sebagai sensitizer telah memberikan efisiensi DSSC yang lebih baik dan daya tahan yang tinggi, tetapi mempunyai kekurangan seperti biaya yang lebih tinggi, kecenderungan untuk mengalami degradasi dan penggunaan bahan beracun serta sulit disintesis (Hao et al., 2006; Shalini et al., 2015). Penggunaan beberapa hasil ekstrak dye ruthenium (N719), menunjukkan absorbansi kisaran 300 - 600 nm (Hardani dkk., 2016), pewarna alami yang memiliki absorbansi dengan kisaran 300 - 600 nm dapat menggantikan pewarna ruthenium (N719). Kekurangan ini telah menginspirasi untuk sensitizer alternatif yaitu biosensitizer alami. Sensitizer alami didapat dari pigmen tanaman seperti klorofil, antosianin, karotenoid, kurkumin dan lain sebagainya yang bertanggung jawab untuk reaksi kimia seperti penyerapan cahaya serta injeksi muatan ke pita konduksi TiO_2 . Tanaman yang mengandung pigmen ini dapat dengan mudah diekstrak dari produk alami seperti buah-buahan, bunga, daun dan biji yang dapat digunakan sebagai sensitizer.

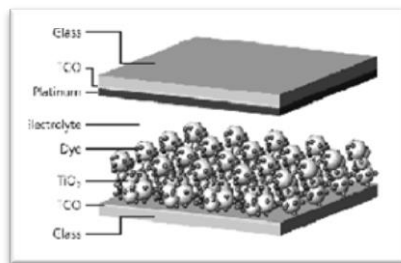
Potensi zat warna alami sebagai komponen sensitizer sangat tergantung pada konsentrasi, jenis zat warna dan daya serap terhadap TiO_2 pada sistem sensitizer. Pewarna alami sangat atraktif untuk aplikasi DSSC karena murah, tersedia dalam jumlah besar, teknik persiapan sederhana, ramah lingkungan dan berkelanjutan (Hao et al., 2006; Lee and Mengjin, 2011; Zhou et al., 2011; Narayan, 2012; Oluwaseun et al., 2016). DSSC sangat potensial dikembangkan di Indonesia, karena kaya dengan tumbuh-tumbuhan sebagai sumber pewarna alami (Setiawan dkk., 2015). Dengan alasan

tersebut, penelitian berkembang ke arah pencarian pewarna alami yang diekstrak dari bunga, daun dan buah-buahan (Zhou et al., 2011). Eksplorasi zat warna alam pun gencar dilakukan untuk mencari alternatif senyawa kromofor alami yang memiliki performa sama atau bahkan lebih baik dari pada zat warna kompleks ruthenium. Klorofil, karotein dan antosianin merupakan contoh zat warna alam yang menjadi pusat kajian karena kemampuannya dalam memanen cahaya pada proses fotosintesis. Dalam hal dye sensitizer yang utama adalah nilai penyerapannya, yaitu kemampuannya menyerap cahaya.

DYE SENSITIZED SOLAR CELL

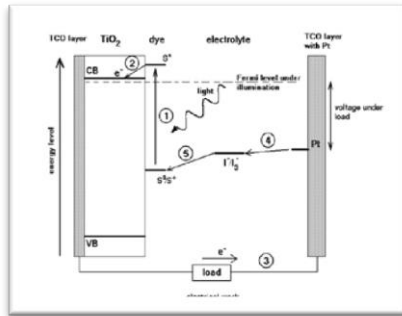
A. Prinsip Kerja DSSC

Sel surya dengan bahan pewarna tersensitisasi ini pertama kali dikembangkan oleh Prof. Michael Gratzel dari Swiss. DSSC merupakan topik penelitian yang dilakukan secara intensif untuk mengembangkan sel surya yang murah dan handal. Berbeda dengan sel surya konvensional, DSSC merupakan sel surya berbasis fotoelektrokimia sehingga menggunakan elektrolit sebagai medium transport muatan. Selain elektrolit, DSSC terbagi menjadi beberapa bagian yang terdiri dari nanopori TiO_2 , molekul *dye* yang teradsorpsi di permukaan TiO_2 dan katalis yang semuanya dideposisi diantara dua kaca konduktif, seperti yang dapat dilihat pada Gambar 02.



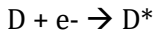
Gambar 02. Struktur *dye-sensitized solar cell* (Gratzel, 2003)

Pada bagian atas dan alas sel surya merupakan kaca yang sudah dilapisi oleh TCO (*Transparent Conducting Oxide*) umumnya SnO_2 , yang berfungsi sebagai elektroda dan *counter*-elektroda. Pada TCO *counter*-elektroda dilapisi katalis untuk mempercepat reaksi redoks dengan elektrolit (Karlsson, 2011). Prinsip kerja dari DSSC ditunjukkan pada Gambar 03 dibawah ini.

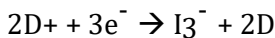


Gambar 03. Prinsip kerja DSSC (Halme, 2002)

Pada dasarnya prinsip kerja dari DSSC merupakan reaksi dari transfer elektron. Proses pertama dimulai dengan terjadinya eksitasi elektron pada molekul *dye* akibat absorpsi foton. Elektron tereksitasi dari *ground state* (D) ke *excited state* (D*). (Halme, 2002)

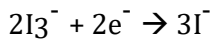


Elektron dari excited state kemudian langsung terinjeksi menuju conduction band (ECB) titania sehingga molekul dye teroksidasi (D⁺). Dengan adanya donor elektron oleh elektrolit (I⁻) maka molekul dye kembali ke keadaan awalnya (ground state) dan mencegah penangkapan kembali elektron oleh dye yang teroksidasi (Halme, 2002).



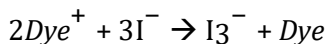
Setelah mencapai elektroda TCO, elektron mengalir menuju counter-elektroda melalui rangkaian eksternal.

Dengan adanya katalis pada counter- elektroda, elektron diterima oleh elektrolit sehingga hole yang terbentuk pada elektrolit (I_3^-), akibat donor elektron pada proses sebelumnya, berekombinasi dengan elektron membentuk iodida (I^-) (Halme, 2002).



Iodida digunakan untuk mendonor elektron kepada *dye* yang teroksidasi, sehingga terbentuk suatu siklus transport elektron. Dengan siklus ini terjadi konversi langsung dari energi cahaya matahari menjadi energi listrik (Halme, 2002).

Pada persambungan elektrolit dengan dan molekul *dye* terjadi pergerakan hole dari molekul *dye* ke elektrolit dan pergerakan elektron dengan arah yang sebaliknya, sehingga dapat mereduksi *dye*, dimana satu ion iodide pada elektrolit mengantarkan elektron yang membawa energi menuju *dye* teroksidasi. Elektrolit menyediakan elektron pengganti untuk molekul *dye* teroksidasi. Sehingga *dye* kembali ke keadaan awal dengan persamaan reaksi (reaksi reduksi).



Tegangan yang dihasilkan oleh sel surya TiO_2 tersensitisasi *dye* berasal dari perbedaan tingkat energi fermi elektroda semikonduktor TiO_2 dengan potensial redoks (I^-/I_3^-) elektrolit. Sedangkan arus yang dihasilkan dari sel surya ini terkait langsung dengan jumlah foton yang terlibat dalam proses konversi dan bergantung pada intensitas penyinaran serta kinerja *dye* yang digunakan (Li B, Wang L, 2006).

B. Komponen-Komponen DSSC

Adapun material-material penyusun DSSC antara lain elektroda kerja yang terdiri dari substrat kaca Indium, pewarna alami dan elektroda pembanding atau disebut juga elektroda karbon yang terdiri dari substrat dan karbon atau grafit dan elektrolit yang diletakkan diantara kedua elektroda (Fahd dkk., 2012).

Adapun material-material penyusun DSSC dibagi menjadi dua bagian, antara lain elektroda kerja dan elektroda pembanding atau elektroda karbon. Elektroda kerja terdiri dari substrat kaca *indium tin oxide* (ITO), material semikonduktor, pewarna alami dan elektrolit. Sedangkan elektroda pembanding atau elektroda karbon terdiri dari substrat dan karbon atau grafit (Maheswari dan Venkatachalam, 2013).

C. Substrat (Kaca ITO)



Gambar 04. Kaca ITO

Substrat yang digunakan pada DSSC yaitu jenis *Transparent Conductive Oxide* (TCO) yang merupakan kaca transparan konduktif. Material substrat itu sendiri berfungsi sebagai badan dari sel surya dan lapisan konduktifnya berfungsi sebagai tempat muatan mengalir. Material yang umumnya digunakan yaitu *flourine-doped tin oxide* ($\text{SnO}_2:\text{F}$ atau FTO) dan *indium tin oxide* ($\text{In}_2\text{O}_3:\text{Sn}$ atau ITO) hal ini dikarenakan dalam proses pelapisan material TiO_2 kepada substrat, diperlukan proses sintering pada temperatur 400 - 500 °C dan kedua material tersebut merupakan pilihan yang cocok karena tidak mengalami defect pada kisaran suhu tersebut.

D. Pewarna

Zat warna yang umumnya digunakan dalam DSSC adalah zat warna sintetik kompleks ruthenium. Ruthenium kompleks dipilih karena memiliki gugus karboksilat sehingga dapat berikatan sempurna dengan semikonduktor TiO_2 . Ikatan tersebut memberikan efek elektron yang mengalir baik tanpa harus melakukan lompatan sehingga hambatan aliran elektron menjadi lebih kecil. Pada awal pengembangannya, Michael Gratzel menghasilkan DSSC dengan efisiensi konversi energi sebesar 7,9% menggunakan zat warna sintetik kompleks ruthenium tipe N_3 . Zat warna sintetik seperti kompleks ruthenium memiliki harga relatif mahal dengan proses fabrikasi yang sulit, karena hal tersebut eksplorasi zat warna alam pun gencar dilakukan untuk mencari alternatif senyawa kromofor alami yang memiliki performa sama atau bahkan lebih baik dari pada zat warna ruthenium kompleks. Klorofil, karotein, xantofil dan antosianin merupakan contoh zat warna alam yang menjadi pusat kajian karena kemampuannya dalam menyerap cahaya

pada proses fotosintesis. Sifat sensitizer yang utama adalah nilai penyerapannya, yaitu kemampuannya menyerap cahaya. Menurut Halme (2002), beberapa sifat pada molekul zat warna sebagai sensitizer meliputi pankromatis, memiliki gugus fungsi yang memungkinkan untuk terikat dengan pita konduksi material celah lebar (TiO_2), mempunyai tingkat energi eksitasi yang bersesuaian dengan pita konduksi material, memiliki potensial redoks tingkat energi dasar dan tingkat energi tereksitasi yang sesuai, mempunyai potensial redoks yang cukup besar (positif), mempunyai stabilitas kimia dan fisika khususnya kestabilan terhadap panas.

Zat warna merupakan suatu zat yang ditambahkan pada beberapa produk industri (Winarti dkk., 2008). Warna merupakan faktor penting yang pertama kali dilihat oleh konsumen yang juga berperan sebagai sarana untuk memperkuat tujuan dan aspek identitas suatu produk. Penggunaan zat warna sudah semakin luas terutama dalam makanan, minuman maupun tekstil, karena warna memberikan daya tarik bagi konsumen (Winarti dkk., 2008). Saat ini penggunaan warna pun merambat ke bidang energi, yang digunakan untuk menyerap sinar dan menyalurkannya pada salah satu alat energi terbarukan.

Pewarna menurut asalnya terdiri dari pewarna alami dan pewarna sintetik. Pewarna alami merupakan zat warna yang berasal dari ekstrak tumbuhan (seperti bagian daun, bunga, biji), hewan dan mineral yang telah digunakan sejak dahulu (Yernisa dkk., 2013). Pewarna alami yang berasal dari tumbuhan mempunyai berbagai macam warna yang dihasilkan, hal ini dipengaruhi oleh beberapa faktor, seperti jenis tumbuhan, umur tanaman, tanah, waktu pemanenan dan faktor-faktor lainnya. Jenis-jenis zat pewarna alami yang banyak digunakan dalam industri antara lain ialah zat

pewarna asal tanaman, seperti klorofil, karotenoid, antosianin, curcumin dan lain sebagainya. Menurut Winarno (2002), zat pewarna alami dibagi berdasarkan sumbernya, antara lain zat pewarna alami yang berasal dari tanaman, dari aktivitas mikrobial dan dari hewan dan serangga. Keuntungan dalam penggunaan pewarna alami adalah tidak adanya efek samping terhadap kesehatan, tidak beracun, serta mudah didapat dari alam. Sedangkan kekurangannya adalah konsentrasi dan stabilitas pigmen rendah, keseragaman warna kurang baik, spektrum warna tidak seluas seperti pada pewarna sintesis serta kurang tahan lama.

Beberapa kelemahan-kelemahan pewarna alami dibuktikan dari penelitian-penelitian yang telah dilakukan, antara lain sifat kepekaan molekul dari pewarna alami yang berbeda-beda jika diaplikasikan pada DSSC (Mozaffari *et al.*, 2015). Diketahui juga bahwa, pewarna alami memiliki respon photovoltaik yang rendah pada DSSC (Arifin *et al.*, 2017; Gang *et al.*, 2014; Suyitno *et al.*, 2014; Suyitno *et al.*, 2015). Salah satu penyebabnya adalah lemahnya ikatan pewarna alami pada lapisan TiO₂. Penyebab berikutnya adalah kemampuan menyerap cahaya dari pewarna alami juga rendah diseluruh bagian (Chang *et al.*, 2010). Selain persoalan respon photovoltaiknya yang rendah, pewarna alami juga memiliki ketahanan atau stabilitas yang juga rendah (Suyitno *et al.*, 2015). Stabilitas kinerja yang rendah pewarna DSSC dipengaruhi oleh tingkat keasaman, tanpa perlakuan pengasaman pewarna untuk DSSC tidak mampu bertahan pada temperatur tinggi. Sehingga walaupun sudah banyak diteliti, penggunaan pewarna alami pada DSSC masih terkendala pada dua isu tersebut, yaitu respon photovoltaik dan stabilitasnya. Pewarna alami adalah pigmen yang secara

alami sudah terdapat dalam bahan atau akan terbentuk saat bahan melalui proses pemanasan, penyimpanan atau proses tertentu. Sejauh ini, zat warna alami yang sering digunakan sebagai *sensitizer* yaitu zat antosianin yang merupakan pigmen penyebab hampir semua warna merah - biru dalam bunga, daun dan buah pada tanaman tingkat tinggi (Harborne, 1996). Pewarna alami yang ditemukan dalam bunga, daun dan buah dapat diekstraksi dengan prosedur yang sederhana, biaya produksinya rendah, non - toksisitas dan biodegradasi lengkap, pewarna alami telah menjadi subjek populer penelitian (Latif *et al.*, 2015). Dari kekurangan - kekurangan yang dimiliki oleh pewarna alami, telah banyak dilakukan penelitian guna menanggulangnya dan kini telah ditemukan cara-cara atau metode agar kekurangan tersebut dapat dihindarkan.

Zat pewarna sintetis (buatan) berasal dari bahan kimia yang terpilih (Winarno, 2002). Umumnya zat kimia yang dipilih yaitu zat yang jika dipanaskan tidak akan rusak dan tidak menyebabkan kesulitan pada proses selanjutnya. Zat pewarna sintetis secara umum dibagi kedalam dua golongan, yaitu zat pewarna asam dan zat pewarna dasar. Karakteristik dari zat pewarna sintetis adalah warnanya lebih cerah, lebih homogen dan memiliki variasi warna yang lebih banyak bila dibandingkan dengan zat pewarna alami.

Pewarna sintetis merupakan sumber utama pewarna komersial untuk hampir seluruh industri utama, karena sifat pewarna sintetis mendasari sifat kelarutannya dalam air. Secara lebih khusus, pewarna sintetis dibagi menjadi dua macam yaitu *Dyes* dan *Lakes*. Perbedaan keduanya berdasarkan bilangan-bilangan rumus kimianya, yaitu kelompok *azo*, *triarilmetana*, *quinolin* dan lain-lain. *Dyes* adalah zat warna yang larut dalam air sehingga larutannya

menjadi berwarna dan dapat digunakan untuk mewarnai bahan. Sedangkan *Lakes* adalah pigmen yang dibuat melalui pengendapan dari penyerapan dye pada bahan dasar. Bila dibandingkan, maka lakes pada umumnya bersifat lebih stabil terhadap cahaya, kimia dan panas. Proses pembuatan zat warna sintesis melalui penambahan asam sulfat atau asam nitrat yang sering kali terkontaminasi oleh arsen atau logam berat lain yang bersifat racun. Zat pewarna sintetik memiliki beberapa kelebihan, antara lain lebih stabil sehingga lebih tahan terhadap berbagai kondisi, daya mewarnainya lebih kuat dan memiliki rentang warna yang lebih luas (Kartina dkk., 2013) serta tidak mudah luntur (Kant, 2012). Namun limbah pewarna sintesis dapat menyebabkan pencemaran lingkungan dan merupakan bahan berbahaya, karena beberapa pewarna dapat terdegradasi menjadi senyawa yang bersifat karsinogenik dan beracun (Widjajanti dkk, 2011; Kant, 2012). Penggunaan pewarna alami tidak memberikan efek merugikan bagi kesehatan dan lingkungan, lain halnya dengan pewarna sintetik, yang dapat menunjukkan sifat karsinogenik dan menimbulkan racun untuk lingkungan (Winarti dkk., 2008).

Efisiensi DSSC salah satunya ditentukan oleh kepekaan pewarna yang digunakan. Pada umumnya jenis pewarna sintesis yang sering digunakan yaitu N719, N₃ dan pewarna hitam. Sedangkan pewarna sintesis yang umum digunakan pada DSSC adalah *ruthenium polypyridyl kompleks*. Pewarna sintesis tersebut mempunyai konversi efisiensi yang cukup baik. Namun pewarna sintesis selalu menggunakan beberapa logam yang harganya mahal, pembuatannya rumit dan bisa menyebabkan pencemaran lingkungan (Chang et al., 2010). Pewarna sintesis sebagai sensitizer DSSC biasanya melibatkan berbagai pelarut, reaksi kimia, dan proses

pemurnian yang kompleks sehingga produksi pewarna sintetis menjadi mahal (Lim et al., 2015).

Tabel 01. Karakteristik kelarutan dan stabilitas pewarna alami (Lemmens dan Soetjipto, 1992).

Pigmen	Warna	Sumber	Kelarutan	Stabilitas
Antosianin	Jingga, merah-biru	Tanaman	Air	Sensitif terhadap pH dan panas
Flavonoid	Tidak berwarna, kuning	Tanaman	Air	Stabil panas
Leucoantosianin	Tidak berwarna	Tanaman	Air	Stabil panas
Tanin	Tidak berwarna, kuning	Tanaman	Air	Stabil panas
Betalain	Kuning, merah	Tanaman	Air	Sensitif panas
Quinones	Kuning s/d hitam	Tanaman, bakteri	Air	Stabil panas
Xanthon	Kuning	Tanaman	Air	Stabil panas
Karotenoid	Tidak berwarna, kuning, merah	Tanaman/hewan	Lemak	Stabil panas, sensitif pada oksidasi
Klorofil	Hijau, coklat	Tanaman	Air dan lemak	Sensitif panas
Heme	Merah, coklat	Hewan	Air	Sensitif panas
Riboflavin	Kuning kehijauan	Tanaman	Air	Stabil panas dan pH
Karamel	coklat	Gula dipanaskan	Air	Stabil

Menurut Winarno (2002), masing – masing pigmen warna mempunyai kestabilan yang berbeda terhadap kondisi

pengolahan seperti terlihat pada Tabel 01. Umumnya zat warna alam terbentuk dari kombinasi tiga unsur, yaitu karbon, hidrogen dan oksigen, tetapi ada beberapa zat warna yang mengandung unsur lain seperti nitrogen pada indigotin dan magnesium pada klorofil. Jaringan tumbuhan seperti bunga, batang, kulit, kayu, biji, buah, akar dan kayu mempunyai warna – warna karakteristik yang disebut pigmen dalam botani (Lemmens dan Soetjpto, 1992).

E. Elektrolit

Elektrolit adalah pelarut organik berbentuk cair yang mengandung sistem redoks, yaitu pasangan I^-/I_3^- . Efisiensi konversi foton menjadi arus listrik untuk sel fotovoltaiik yang menggunakan elektrolit organik cair memberikan efisiensi sebesar 11% pada kondisi penyinaran optimum (1,5 AM). Karakteristik ideal dari pasangan redoks untuk elektrolit DSSC yaitu potensial redoks secara termodinamika berlangsung sesuai dengan potensial redoks dari pewarna untuk tegangan sel yang maksimal, memiliki kestabilan yang tinggi baik dalam bentuk tereduksi dan teroksidasi dan tidak mudah bereaksi terhadap komponen lain pada DSSC.

Larutan elektrolit yang digunakan pada sistem DSSC berfungsi untuk menggantikan kehilangan elektron pada pita HOMO dari pewarna akibat eksitasi elektron dari pita HOMO (High Occupied Molecular Orbital) ke pita LUMO (Low Unoccupied Molecular Orbital) karena penyerapan cahaya tampak oleh pewarna. Elektrolit juga dapat menerima elektron pada sisi elektroda lawan. Pada umumnya pembuatan DSSC menggunakan pasangan elektrolit I^- dan I_3^- sebagai elektrolit, karena sifatnya yang stabil dan mempunyai reversibilitas yang baik (Wang et al., 2005).

Penggunaan elektrolit cair memiliki kelemahan mudah terdegradasi atau bocor, sehingga kini banyak penelitian terkait pemanfaatan elektrolit padat berbasis polimer digunakan untuk mengurangi degradasi sel yang terjadi pada elektrolit cair sehingga dapat meningkatkan stabilitas sel surya. Salah satunya adalah elektrolit padat berbasis gel polimer yang didesain untuk memfasilitasi transport ion pada medium dengan tingkat viscositas tinggi dan memiliki kemampuan penuh untuk digunakan dalam proses penerimaan sinar dalam sel (Sung Kang and Lee, 2006). Gel polimer terdiri dari matriks polimer dan pelarut dimana matriks polimer mengikat cairan dan mencegahnya untuk tidak terlepas atau dengan kata lain memainkan peran seperti sebuah wadah yang dapat menampung sejumlah besar pelarut, oleh sebab itu gel polimer memiliki sifat antara cair dan padat. Sifat-sifat gel polimer tersebut bergantung pada struktur polimer yang membentuk gel serta pada interaksi matriks dan pelarutnya.

Elektrolit polimer yang mengandung kation atau anion yang bebas bergerak dalam medium elektrolit polimer tersebut akan bertindak sebagai bahan konduktor, Kekonduksian ionik suatu polimer bergantung kepada kepekatan dan mobilitas ionnya. Dari segi fisiknya, elektrolit polimer kelihatan sebagai bahan berfasa padat tetapi struktur didalamnya bersifat seperti fasa cair yang memberi pengaruh kepada perubahan nilai konduksinya (Andrew et al., 1995). Menurut Linden (1995), ciri-ciri yang harus dimiliki oleh suatu polimer untuk berfungsi sebagai media dalam elektrolit polimer adalah memiliki atom atau kumpulan atom yang cukup untuk mendonorkan elektron agar terjadi pembentukan ikatan koordinasi dengan kation, tidak terdapat hambatan pada proses pemutaran ikatan

sehingga terjadi pergerakan bagian ikatan polimernya, memiliki jarak yang sesuai antara pusat koordinat, dalam pembentukan multi ikatan ion secara intra polimer, serta memiliki suhu peralihan yang rendah agar pelepasan anion lebih mudah.

Polimer yang mempunyai ciri-ciri tersebut diantaranya polietilen glikol (PEG) atau polietilen oksida (PEO). Polimer tersebut telah menunjukkan nilai kekonduksian yang baik apabila didoping dengan garam iodida. Berdasarkan Gray (1997), material berbasis polimer sebagai material elektrolit polimer memiliki beberapa keunggulan, antara lain memiliki hantaran yang sesuai untuk aplikasi sel elektrokimia, memiliki hantaran listrik yang rendah, memiliki sifat mekanik yang baik, serta memiliki kestabilan kimia, elektrokimia dan fotokimia yang baik.

F. Polietilen glikol dan polietilen oksida

Polietilen glikol (PEG) dan polietilen oksida (PEO) adalah dua nama yang sering digunakan untuk bahan yang sama, yaitu polimer etilen oksida. Perbedaan utama terletak pada istilah yang digunakan. Polietilen glikol lebih umum digunakan di bidang biomedis, sedangkan polietilen oksida lebih umum digunakan di bidang kimia polimer.

Secara kimiawi, PEG merupakan sekelompok polimer sintetik yang larut air dan memiliki kesamaan struktur kimia berupa adanya gugus hidroksil primer pada ujung rantai polieter yang mengandung oksietilen. Beberapa sifat utama dari PEG adalah stabil, tersebar merata, dapat mengikat pigmen, mudah bercampur dengan komponen-komponen lain dan tidak beracun. Berdasarkan De Freitas et al., (2019), penggunaan elektrolit yang mengandung Lil dan *polyethylene oksida-ko-epiklorohidrin* serta menghasilkan *γ-butirolakton*