

TESIS

**PENGARUH VARIASI TEMPERATUR TERHADAP KINERJA
SEMIKONDUKTOR TiO_2 (TITANIUM DIOKSIDA) DENGAN
MENGUNAKAN KULIT MANGGIS (GARCINIA MANGOSTANA L)
SEBAGAI SENSITIZER**

Disusun dan Diajukan oleh:

NUR AULIA

H032222002



**DEPARTEMEN FISIKA
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
UNIVERSITAS HASANUDDIN
MAKASSAR
2024**

**PENGARUH VARIASI TEMPERATUR TERHADAP KINERJA
SEMIKONDUKTOR TIO₂ (TITANIUM DIOKSIDA) DENGAN
MENGUNAKAN KULIT MANGGIS (GARCINIA MANGOSTANA L)
SEBAGAI SENSITIZER**

T E S I S

*Diajukan Sebagai Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Magister Sains
pada Program Studi Magister Fisika Departemen Fisika
Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam
Universitas Hasanuddin*

**NUR AULIA
H032222002**

**PROGRAM STUDI MAGISTER FISIKA
DEPARTEMEN FISIKA
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
UNIVERSITAS HASANUDDIN
MAKASSAR**

2024

LEMBAR PENGESAHAN TESIS

**PENGARUH VARIASI TEMPERATUR TERHADAP KINERJA
SEMIKONDUKTOR TIO₂ (TITANIUM DIOKSIDA) DENGAN
MENGUNAKAN KULIT MANGGIS (GARCINIA MANGOSTANA L)
SEBAGAI SENSITIZER**

Disusun dan diajukan oleh

NUR AULIA

H032222002

Telah Dipertahankan di Hadapan Panitia Ujian yang Dibentuk dalam Rangka
Penyelesaian Studi Program Magister Program Studi Fisika Fakultas Matematika

Dan Ilmu

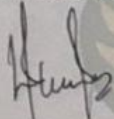
Pengetahuan Alam Universitas Hasanuddin

Pada Tahun 2024

Dan Dinyatakan Telah Memenuhi Syarat Kelulusan

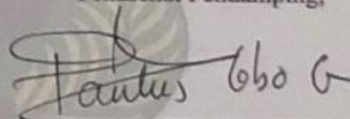
Menyetujui

Penasehat Utama,



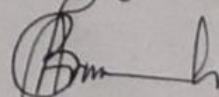
Prof. Dr. Dahlang Tahir, M.Si.
NIP. 19750907 200003 1 006

Penasehat Pendamping,



Prof. Dr. Paulus Lobo Gareso, M.Sc.
NIP. 19650305 199103 1 008

Ketua Program Studi,



Prof. Dr. Ir. Bidayatul Armynah, M.T.
NIP. 19630830 198903 2 001

Dekan Fakultas,



Dr. Eng. Amiruddin, M.Si.
NIP. 19720515 199702 1 002

PERNYATAAN KEASLIAN

Yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Nur Aulia
NIM : H032222002
Program Studi : Fisika
Jenjang : S2

Menyatakan dengan ini bahwa karya tulisan saya berjudul:

**PENGARUH VARIASI TEMPERATUR TERHADAP KINERJA
SEMIKONDUKTOR TiO_2 (TITANIUM DIOKSIDA) DENGAN
MENGUNAKAN KULIT MANGGIS (GARCINIA MANGOSTANA L)
SEBAGAI SENSITIZER**

Adalah karya tulisan saya sendiri, bukan merupakan pengambilan alihan tulisan orang lain dan bahwa tesis yang saya tulis ini benar-benar merupakan hasil karya saya sendiri.

Apabila dikemudian hari terbukti atau dapat dibuktikan bahwa sebagian atau keseluruhan isi tesis ini hasil karya orang lain, maka saya bersedia menerima sanksi atas perbuatan tersebut,

Makassar, 11 Mei 2024

Yang Menyatakan



Nur Aulia

ABSTRAK

Pengembangan energi terbarukan menjadi solusi dari permasalahan krisis energi yang diperkirakan terus meningkat setiap tahunnya, dye-sensitized solar cell merupakan perangkat fotokatalik yang mengkonversi energi matahari menjadi energi listrik menggunakan fotoanoda semikonduktor dan pewarna alami sebagai sensitizer. Penelitian ini bertujuan untuk mengeksplorasi pengaruh variasi temperatur pada TiO_2 , yaitu 300°C , 400°C , dan 500°C , terhadap peningkatan efisiensi menggunakan ekstrak kulit manggis. Metode doctor blade digunakan untuk menyiapkan TiO_2 , kemudian ekstrak kulit manggis ditambahkan sebagai sensitizer. Karakterisasi material dilakukan menggunakan berbagai teknik analisis seperti XRD untuk mengetahui ukuran kristal dan fase yang terbentuk, FT-IR untuk mengetahui gugus fungsi yang terbentuk, UV-Vis spektrofotometer untuk mengetahui serapan absorbansi pada kulit manggis dan arus-tegangan (I-V) untuk mengetahui efisiensi dari DSSC. Hasil pada penelitian menunjukkan bahwa variasi temperatur memengaruhi struktur dan sifat optik TiO_2 . Efisiensi sel surya sensitif terhadap TiO_2 meningkat dengan peningkatan temperatur yang mencapai nilai tertinggi pada 500°C dengan nilai efisiensi 0.3491 dan nilai ukuran Kristal yaitu 27.6095 . Penggunaan ekstrak kulit manggis sebagai sensitizer juga berkontribusi pada peningkatan efisiensi, menunjukkan potensi aplikasi dalam pengembangan sel surya berkinerja tinggi. Penelitian ini memberikan wawasan penting untuk pengembangan sel surya sensitif terhadap TiO_2 dengan memanfaatkan bahan alami seperti ekstrak kulit manggis.

Kata Kunci: Dye-Sensitized Solar Cell, Kulit Manggis, Sintering, Titanium Diksoda.

ABSTRACT

The development of renewable energy is a solution to the problem of the energy crisis which is expected to continue to increase every year, dye-sensitized solar cells are photocatalytic devices that convert solar energy into electrical energy using semiconductor photoanodes and natural dyes as sensitizers. This study aims to explore the effect of temperature variation on TiO₂, namely 300°C, 400°C, and 500°C, on efficiency improvement using mangosteen peel extract. The doctor blade method is used to prepare TiO₂, then mangosteen peel extract is added as a sensitizer. Material characterization is carried out using various analytical techniques such as XRD to determine the crystal size and phase formed, FT-IR to determine the functional groups formed, UV-Vis spectrophotometer to determine the absorbance of mangosteen peel and current-voltage (I-V) to determine the efficiency of DSSC. The results showed that temperature variations affect the structure and optical properties of TiO₂. The efficiency of TiO₂ sensitive solar cells increases with increasing temperature which reaches the highest value at 500°C with an efficiency value of 0.3491 and a crystal size value of 27.6095. The use of mangosteen peel extract as a sensitizer also contributed to the increase in efficiency, indicating potential applications in the development of high-performance solar cells. This study provides important insights for the development of TiO₂-sensitive solar cells by utilizing natural materials such as mangosteen peel extract.

Keyword: Dye-Sensitized Solar Cell, Mangosteen Pell, Sintering, Titanium Diksode.

KATA PENGANTAR

Dengan memanjatkan puji syukur kehadirat Allah SWT yang telah melimpahkan rahmat, taufik dan hidayah-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan tesis ini yang berjudul **“Pengaruh Variasi Temperatur terhadap Kinerja Semikonduktor TiO₂ (Titanium Dioksida) dengan menggunakan Kulit Mnggis (Garcinia Mangostana) sebagai Sensitizer”** yang merupakan salah satu syarat untuk menyelesaikan Program Magister (S2) Departemen Fisika Jurusan Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Hasanuddin. Lantunan sholawat dikirimkan kepada Nabi Muhammad Shalallahu Alaihi Wassalaam, yang membawa umatnya dari alam kegelapan menuju alam yang terang benderang seperti yang dirasakan saat ini.

Penulis menyadari bahwa tesis ini tidak terlepas dari adanya hambatan dan jauh dari kata sempurna. Hal ini terjadi karena pengetahuan dan kemampuan dari penulis yang penuh dengan keterbatasan. Oleh karena itu, tesis ini tidak mungkin terselesaikan tanpa adanya dukungan, bantuan, bimbingan, dan nasehat dari berbagai pihak selama penyusunan tesis ini. Pada kesempatan ini penulis menyampaikan terima kasih setulus-tulusnya kepada:

1. Ucapan terima kasih yang tulus dan teristimewa penulis haturkan kepada Bapak **Sulaeman** dan Ibu **Suharni**, yang selalu mendampingi selama ini yang selalu berpesan untuk terus melanjutkan pendidikan, untuk semaksimal mungkin kata-kata motivasi, semangat dan kasih sayang yang selalu diberikan, terimakasih selalu senantiasa mendo'akan, memberikan restu, motivasi, semangat. Penulis menyadari bahwa berkat kedua orang tua penulis menjadi sosok yang kuat, tegar sampai sekarang ini. Tunggu anak mu membahagiakanmu, insha allah.
2. Terima kasih kepada **Hj.Rajawang** yang selalu mendoakan penulis dan memberikan dukungan dalam hal apapun. Kepada **Yuliani Tri Dwi Mulyasari STr Keb**, tempatku berkeluh kesah, *my 911* dalam segala hal

dan menjadi sumber dana daruratku. Untuk semua **keluarga** terimakasih atas Do'a dan harapannya.

3. Terima kasih kepada Bapak **Prof. Dr. Dahlang Tahir, M.Si.** selaku pembimbing utama dan Bapak **Prof. Dr. Paulus Lobo Gareso, M.Sc.** selaku dosen pembimbing pertama atas segala ilmu, motivasi, nasehat, dan kemudahan yang telah diberikan kepada penulis sehingga dapat menyelesaikan penulisan tesis ini.
4. Kepada Ibu **Prof. Dr. Nurlaela Rauf, M.Sc** dan Ibu **Prof. Dr. Ir. Bidayatul Arminah, M.T** selaku penguji yang selalu meluangkan waktu kepada penulis dalam menyelesaikan setiap langkah demi langkah, mulai dari seminar proposal, seminar hasil dan ujang sidang.
5. Terima kasih juga kepada **Staf Pegawai Departemen Fisika FMIPA UNHAS**, yang telah membantu dalam pengurusan administrasi penulis.
6. Kepada **Muh. Fadhlán Dzíkriánsyah**, penulis ucapkan terima kasih untuk kebaikan hati dan kesabaran yang tak terhingga untuk selalu membantu penulis dalam berbagai hal. Terimakasih selalu memberikan support dan energi optimis ketika penulis sedang down, yang selalu meyakinkan penulis bahwa semuanya bisa di lewati, terimakasih sudah menemani perjalanan tumbuh sejauh ini, semoga kita bisa mekar bersama.
7. Kepada partner pejuang gelar ini, **Rifqah, Kak Fina, Kak Atika, Kak Ira**, dan **Ilham** terima kasih atas segala bantuan yang telah diberikan kepada penulis dan suasana kelas yang selalu dibuat nyaman ditengah tumpukan tugas yang tiada henti.
8. Terima kasih kepada sobat **PGONE** terkhusus kamar 213 **Lisa Wulandari** anak bipolar yang selalu tantrum, kamar 216 **Vida** bocil ambisius yang 24/7 di hadapan laptop dan kamar 215 dan 217 sobat bone yang selalu memberikan support dan hiburan kepada penulis.
9. Terimakasih untuk sobat-sobatku **Rahma, Ika, Uli, Nizam, Jesi** yang selalu support penulis, yang menjadi tempat keluh kesah penulis dan yang paling penting selalu menghibur penulis kala galau.

10. Terimakasih yang teristimewa untuk kakakku **Asryanti Ashary S.Si** yang selalu mendukung penulis dan support matchalatte *number one*, sehat selalu orang baik.
11. Terima kasih kepada **Madalle Team, Akbar, Kak Ayhi, Kak Taskir, Eki dan Kak Mutia** yang menghibur penulis, apalagi green tea buatan kak ayhi bisa membuat mood penulis meingkat.
12. Semua pihak yang tidak disebutkan semuanya, yang telah dengan tulus ikhlas memberikan doa dan motivasi sehingga dapat terselesaikannya tesis ini.
13. Terakhir, terimakasih untuk diri sendiri **Nur Aulia** karena telah mampu berusaha keras dan berjuang sejauh ini. Mampu mengendalikan diri dari berbagai tekanan di luar keadaan dan tak pernah memutuskan menyerah walau sesulit apapun proses penyusunan tesis ini.

Dalam penulisan tesis ini masih banyak kekurangan dan kesalahan, karena itu segala kritik dan saran yang membangun akan menempurnakan penulisan tesis serta bermanfaat bagi penulis dan para pembaca.

Makassar, 11 Mei 2024

Nur Aulia

DAFTAR ISI

HALAMAN SAMPUL	i
DAFTAR ISI	ii
LEMBAR PENGESAHAN TESIS	iii
PERNYATAAN KEASLIAAN	iv
ABSTRAK	v
KATA PENGANTAR	vii
DAFTAR ISI	x
DAFTAR GAMBAR	xii
DAFTAR TABEL	xiii
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah	3
1.3 Tujuan Penelitian.....	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	4
2.1 Sel Surya.....	4
2.2 <i>Dye Sensitized Solar Cell</i>	6
2.3 Titanium Dioksida	9
2.4 Dye Sensitizer.....	12
2.5 Buah Manggis.....	14
2.6 Parameter Solar Cell.....	15
BAB III METODOLOGI PENELITIAN	17
3.1. Waktu dan Tempat Penelitian	17
3.2 Alat dan Bahan	17
3.2.1 Alat Penelitian	17
3.2.2 Bahan Penelitian.....	17
3.3 Prosedur Penelitian.....	18
3.3.1 Ekstraksi Dye Kulit Manggis	18
3.3.2 Pembuatan Pasta TiO ₂	19
3.3.3 Perendaman Lapisan TiO ₂	20
3.3.4 Pembuatan Elektroda Pemandang.....	20

3.3.5 Pembuatan Larutan Elektrolit.....	20
3.3.6 Pembuatan Sandwich DSSC.....	21
3.4 Diagram Alir Penelitian.....	22
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN.....	23
4.1. Pengujian UV-Vis.....	23
4.2. Karakteristik <i>Fourier Transform Infra Red</i> (FTIR).....	25
4.3. Karakterisasi XRD.....	27
4.4. Pengujian Arus-Tegangan (I-V) DSSC.....	31
BAB V PENUTUP.....	39
5.1. Kesimpulan.....	39
5.2. Saran.....	40
DAFTAR PUSTAKA	41
LAMPIRAN.....	51

Daftar Gambar

Gambar 2.1 Panjang gelombang spektrum radiasi	5
Gambar 2.2 Prinsip Kerja Solar Cell.....	6
Gambar 2.3 Posisi Pita dari beberapa Semikonduktor.....	10
Gambar 2.4 Struktur Kimia TiO ₂	11
Gambar 2.5 Buah Manggis.....	14
Gambar 3.1 Ilustrasi Ekstrak Kulit Manggis	19
Gambar 3.2 Pembuatan Pasta TiO ₂ dan Deposisi TiO ₂	20
Gambar 3.3 Sandwich DSSC	21
Gambar 3.4 Bagan Alir.....	22
Gambar 4.1 Grafik Hasil UV-Vis Ekstrak Kulit Manggis	24
Gambar 4.2 Spektrum FTIR kulit manggis.....	26
Gambar 4.3 Hasil XRD TiO ₂ dengan variasi suhu.....	28
Gambar 4.4 Rangkaian Pengujian I-V.....	33
Gambar 4.5 Grafik I-V hasil pengujian menggunakan dye kulit manggis	36

Daftar Tabel

Tabel 4.1 Interpretasi spektra FTIR ekstrak kulit manggis	27
Tabel 4.2 Hasil Perhitungan nilai ukuran kristal.....	30
Tabel 4.3 Hasil pengujian dan perhitungan ekstrak kulit manggis dengan variasi suhu sintering	34

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Dalam 50 tahun mendatang masalah energi dan lingkungan menjadi sebuah tantang utama, seperti yang dikatakan oleh penerima Nobel, Smalley (Shakeel Ahmad et al., 2017). *The United States Energy Information Administration* (EIA) melaporkan bahwa antara tahun 2018 dan 2050, konsumsi energi akan meningkat sebesar 3,1%, 0,6%, 0,4% dan 1,1% per tahun untuk energi terbarukan, minyak bumi, batu bara dan penggunaan gas. Pembakaran bahan bakar ini mengeluarkan karbon dioksida (CO₂) yang berdampak pada pencemaran lingkungan dan gas rumah kaca yang menjadi keprihatinan terbesar dalam kebijakan lingkungan saat ini (Perera, 2018). Masalah-masalah ini yang mendorong peneliti untuk memperkenalkan sumber energi terbarukan untuk melindungi dunia dan spesies yang hidup di dalamnya.

Bahan bakar fosil dapat digantikan dengan pengembangan berbagai sumber energi terbarukan termasuk energi surya, tenaga geothermal, tenaga gelombang pasang/ arus pasang, energi biomassa dan energi angin (Rodríguez-Mas et al., 2023). Energi sel surya merupakan energi yang potensial karena matahari mengeluarkan daya sebesar 165 ribu terawatt (TW) setiap hari ke permukaan bumi (Nagraik et al., 2021) atau 3.8 *million exa joule* (EJ) per tahun dibandingkan dengan sumber energi terbarukan lainnya seperti energi angin, energi biomassa dan lainnya dengan rata-rata *output* sebesar 5 TW (Hayat et al., 2019). Teknologi fotovoltaik (PV) merupakan teknik sederhana dan efektif untuk mengeksploitasi energi matahari. Efek fotovoltaik yaitu konversi energi matahari menjadi energi listrik dan dihasilkan dalam sel fotovoltaik.

Sel surya terdiri atas beberapa generasi yaitu generasi pertama sel berbasis silikon yang menghasilkan nilai efisiensi yang tinggi namun biaya yang tinggi (Setyawati et al., 2017). Pengembangan sel surya generasi kedua muncul dengan sel surya berbasis lapisan tipis seperti CIGS dan CdTe namun nilai

efisiensi yang dihasilkan rendah (Shanmugapriya et al., 2019). Pengembangan generasi ketiga dari *solar cell* memiliki keunggulan biayanya yang rendah dan mudah diproduksi yang dinamakan sel surya berbasis pewarna (DSSC) (Sowmya et al., 2021). Teknologi DSSC terdiri atas 3 komponen penting yaitu elektroda kerja, elektroda pembanding dan larutan elektrolit. Efisiensi yang diperoleh dari DSSC ini masih rendah sehingga teknologi ini masih terus dikembangkan untuk mendapatkan nilai efisiensi yang lebih tinggi.

Nilai efisiensi dapat dipengaruhi oleh beberapa faktor salah satunya dari zat pewarna yang berfungsi untuk meningkatkan sensitifitas pada sel surya seperti yang dilakukan oleh peneliti dengan menggunakan ekstrak aloe vera (Ganta et al., 2017), ekstrak daun bayam (Ammar et al., 2019), ekstrak daun pepaya (Widhiyanuriyawan et al., 2022), ekstrak daun bayam merah (Ramanarayanan et al., 2017), ekstrak daun bungan jantan (Motlan, Lelyana, 2019), ekstrak jamur (Arulraj et al., 2019). Dalam penelitian ini menggunakan pewarna yang berasal dari kulit buah manggis, selama ini pemanfaatan buah manggis hanya sebagai konsumsi dan dijadikan obat dikarenakan kulit manggis mempunyai kandungan antioksidan. Selain itu kulit manggis juga mempunyai kandungan antosianin yang merupakan zat pewarna yang dapat digunakan dalam pewarna dalam DSSC.

Suhu pembakaran elektroda kerja juga mempengaruhi nilai efisiensi, yang berpengaruh pada pelekatan Titanium Dioksida (TiO_2) terhadap kaca dan penyerapan pewarna terhadap TiO_2 , seperti yang dilakukan peneliti dengan menggunakan suhu pembakaran 350°C dan 550°C (AL-Baradi, 2020), menggunakan suhu pembakaran 300°C , 400°C , 500°C dan 600°C (Khalid Hossain et al., 2017), menggunakan suhu pembakaran 353°C , 373°C , 573°C (Dussan et al., 2017), menggunakan suhu pembakaran 300°C , 420°C , 540°C dan 580°C (Nurnaemah et al., 2018).

Berdasarkan uraian diatas, maka telah dilakukan penelitian yang berjudul **“Pengaruh Variasi Temperatur Terhadap Kinerja Semikonduktor TiO_2 dengan Menggunakan Kulit Manggis sebagai *Sensitizer*”**

1.2 Rumusan Masalah

Rumusan masalah yang dikaji pada penelitian ini adalah

1. Bagaimana menganalisis efisiensi yang dihasilkan DSSC dengan menggunakan ekstrak kulit manggis?
2. bagaimana menganalisis pengaruh variasi temperatur terhadap kinerja semikonduktor TiO_2 ?

1.3 Tujuan Masalah

Adapun tujuan pada penelitian ini, yaitu:

1. Menganalisis efisiensi dari DSSC dengan menggunakan ekstrak kulit manggis.
2. Menganalisis pengaruh variasi temperatur terhadap kinerja semikonduktor TiO_2 .

BAB II

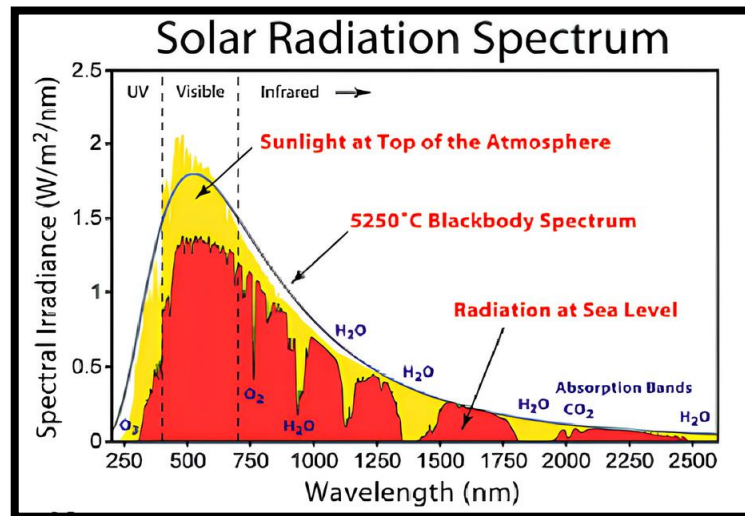
TINJAUAN TEORITIS

2.1 Sel Surya

Indonesia adalah Negara yang terletak diantara titik *equinox* sehingga sepanjang tahun akan selalu disinari cahaya matahari. Letak geografis Indonesia di antara 6°LU - 11°LS dan 95°BT - 141°BT, sehingga potensi sumber energi terbarukan sangat memadai dalam hal ini energi yang berasal dari sinar matahari atau dikenal dengan energi surya. Rata-rata setiap harinya Indonesia menyumbang radiasi matahari mencapai 4,8 kWh/m² dari total radiasi bumi yang diterima setiap harinya yaitu 174 *Petawatts* (PW) (Joseph et al., 2021)

Spektra irradiansi matahari yang ditunjukkan pada gambar 2.1 terlihat bahwa energi matahari berada pada rentang panjang gelombang 400 nm hingga 700 nm, sehingga rentang panjang gelombang tersebut ideal untuk generasi energi matahari (Shilpa et al., 2023). Riset terkini yang sedang dilakukan yaitu memanfaatkan radiasi matahari secara langsung untuk menghasilkan listrik, yaitu sebuah sel fotovoltaik yang mengkonversi radiasi matahari menjadi energi listrik (Alanazi, 2021).

generasi fotovoltaik sebagai salah satu teknologi yang berkontribusi dalam pengembangan energi, ekonomi dan sosial yang berkelanjutan. Hal ini dikarenakan PV memiliki keunggulan sumber daya yang bersih, melimpah, dan emisi karbon yang rendah (Perera, 2018). Ada beberapa generasi fotovoltaik yaitu generasi pertama sel surya silikon yang diklasifikasikan dalam silikon monokristalin dan polikristalin yang umumnya mencapai efisiensi hingga 27,6% (Braña et al., 2018). Sel surya berbasis silikon memiliki jangkauan spektrum yang luas dan memiliki mobilitas yang tinggi, namun silikon memiliki celah pita energi tak langsung dan kemampuan absorpsi cahaya yang lebih rendah serta fabrikasi yang mahal (Kavlak et al., 2018). Penelitian yang lebih lanjut terkait sel surya yang lebih ekonomis dan terjangkau membawa kita pada generasi kedua sel surya.



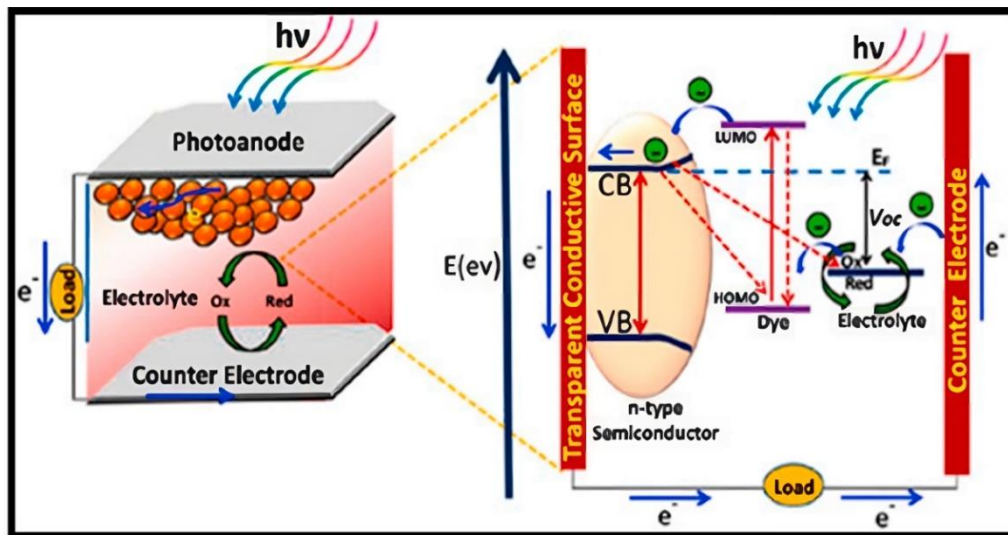
Gambar 2.1 panjang gelombang spektrum irradiasi

sel surya generasi kedua dikenal dengan dengan sel surya lapisan tipis menjadi alternatif yang lebih ekonomis dibandingkan dengan sel surya silikon (Schygulla et al., 2022). Bahan utama dari sel surya film tipis yaitu Cadmium Telluride (CdTe), silikon amor, Copper-Indium-Selenide (CIS), Copper-Indium-Gallium-DiSelenide (CIGS), Gallium Arsenide (GaAs), dan polimer terkonjugasi (Reddy et al., 2018). Sel surya generasi kedua memiliki keunggulan biaya manufaktur yang rendah, dapat diaplikasikan pada area yang besar, karena bahan fotoaktif dengan celah pita energi langsung memiliki koefisien serapan yang tinggi, mereka memerlukan material fotoaktif dengan ketebalan kurang dari satu micron untuk menyerap cahaya matahari yang datang (Kishore Kumar et al., 2020), namun ketersediaan unsur indium atau tellurium dan toksisitas dari kadmium (Shilpa et al., 2023) memerlukan pengembangan lanjut terkait alternatif yang lebih layak dibandingkan dengan sel surya generasi pertama.

Generasi ketiga atau yang disebut fotovoltaik merupakan pengembangan sel surya yang diharapkan mampu mengatasi kelemahan-kelemahan dari generasi sebelumnya . Fotovoltaik dapat dikategorikan menjadi *Dye-Sensitized Solar Cell* (DSSC), *Bulk heteronjunction solar cell* (BHJ), *Quantum dot solar cell* (QDSSC), dan *perovskite solar cell*. Fotovoltaik merupakan sel surya yang bahannya tersedia di alam sehingga lebih ekonomis, proses fabrikasi yang sederhana, non toksisitas. (Feng & Xu, 2021) sehingga dapat menjadi alternatif yang lebih efisien.

2.2 Dye Sensitized Solar Cell (DSSC)

Sel surya berbasis pewarna menghasilkan efisiensi konversi daya tinggi (PCE), mudah diproduksi dan lebih ekonomis dibandingkan dengan sel surya tradisional berbasis silikon (Mahmoudi et al., 2023). DSSC merupakan sumber energi listrik foto-elektrokimia yang menggunakan fotoanoda semikonduktor oksida logam dengan celah pita lebar seperti TiO_2 dan zat pewarna fotosensitif untuk menghasilkan listrik dari energi cahaya. DSSC idealnya tersusun atas substrat konduktif transparan yang peka terhadap zat pewarna, semikonduktor (seperti TiO_2 , ZnO , SnO_2 , Nb_2O_5), elektrolit dan elektroda pembanding.



Gambar 2.2 Prinsip kerja solar cell

Gambar 2.2 menunjukkan prinsip kerja dari solar cell, dimana ketika pewarna terpapar cahaya akan tereksitasi (S^*) seperti pada persamaan (2.1) yang menempel di atas tepi pita konduksi TiO_2 , kemudian sebuah elektron disuntikkan ke dalam pita konduksi TiO_2 .



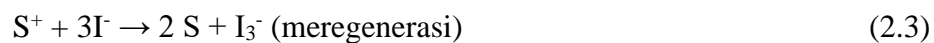
Perbedaan energi antara tingkat HOMO dan LUMO molekul zat pewarna sama dengan energi celah pita titanium dioksida. Setelah zat pewarna mengumpulkan foton, elektron-elektron yang tereksitasi (S^*) berpindah dari HOMO pada keadaan dasar ke LUMO. Jumlah arus fotolistrik yang dihasilkan oleh DSSC ditentukan oleh perbedaan energi antara tingkat HOMO dan LUMO molekul zat pewarna.

Ketika pewarna menyuntikkan elektron yang tereksitasi ke dalam pita konduksi titanium dioksida, terjadi oksidasi fotosensitizer (persamaan 2.2)



Setelah injeksi elektron dari LUMO ke CB TiO₂, energi LUMO dari zat pewarna harus cukup negatif dibandingkan dengan CB TiO₂ agar elektron dapat disuntikkan ke dalam CB TiO₂. Hubungan elektronik yang kuat antara tingkat LUMO dan CB TiO₂ disebabkan oleh penggunaan kelompok perlekatan seperti karboksilat, hidrosamat, atau fosfonat. Morfologi TiO₂ dan konektivitasnya mengontrol waktu transportasi muatan. Generasi arus yang berkelanjutan dimungkinkan dengan mengurangi zat pewarna ke keadaan dasar. Dalam elektrolit, molekul iodida (I⁻) menyumbangkan elektron ke zat pewarna, sehingga dapat dikembalikan ke keadaan aslinya. Selain itu, ini melindungi elektron dari CB dari direbut kembali oleh zat pewarna yang teroksidasi.

Ion I/I₃ berfungsi sebagai penghubung antara fotoanoda dan elektroda lawan, atau katoda. Akibatnya, oksida I memberikan elektron kepada zat pewarna teroksidasi untuk menggantikan elektron yang hilang (persamaan 2.3)



Pada DSSC, struktur nanokristalin dan lubang dalam elektrolit memastikan transportasi elektron. Lapisan TiO₂ (oksida konduktif) terhubung ke beban eksternal, yang kemudian membawa elektron ke elektroda lawan (katoda atau elektroda positif). I₃⁻ mencapai katoda dan mengambil elektron yang hilang dari elektroda lawan, setelah itu direduksi menjadi I⁻ (persamaan 2.4). Pengurangan I₃⁻ dan regenerasi I⁻ pada katoda menunjukkan bahwa sirkuit telah selesai.



Jumlah arus yang dihasilkan ditentukan oleh jarak energi antara tingkat energi HOMO dan LUMO. Selain itu, tegangan yang akan dihasilkan oleh pencahayaan ditentukan oleh perbedaan antara tingkat potensial redoks elektrolit dan tingkat Fermi elektron di TiO₂. Secara umum, DSSC bekerja melalui siklus oksidasi dan reduksi untuk menghasilkan listrik dari cahaya tanpa mengalami perubahan kimia yang permanen.

Komponen-komponen yang terdapat pada solar sel yaitu sebagai berikut:

a. Kaca substrat

Kaca substrat yang paling sering digunakan untuk sel surya berbasis sel pewarna adalah oksida konduktif transparan (TCO), karena efisiensinya yang tinggi dan tingkat transparansi yang tinggi sekitar >80%. Film tipis TCO umumnya terdiri atas timbal yang terdoping oleh fluorin (F:SnO₂) atau oksidasi timbal (In:SnO₂) (Prakash & Janarthanan, 2023)

b. Semikonduktor

Semikonduktor yang cocok untuk meningkatkan efisiensi adalah semikonduktor yang memiliki luas permukaan yang tinggi, berpori-pori tinggi dan karakteristiknya sesuai dengan *sensitizer* (Solaiyammal & Murugakoothan, 2019). Semikonduktor yang memiliki celah pita lebar ($E_g > 3$) digunakan dalam pembuatan fotoanoda karena mampu menyerap sebagian besar sinar matahari yang jatuh dan stabil terhadap foto-korosi (Kishore Kumar et al., 2020). Semikonduktor yang dapat diaplikasikan dalam sel surya adalah TiO₂, ZnO, SnO₂ (Ibraheem & Kamalakkannan, 2020).

c. *Sensitizer*

Sensitizer memainkan peran penting dalam solar sel, pewarna ini menyerap sinar matahari dan menghasilkan eksiton di mana elektron disuntikkan dari tingkat LUMO ke dalam band konduksi fotoanoda dan hole disuntikkan dari tingkat HOMO ke dalam elektrolit redoks. Jumlah penyerapan foton oleh *sensitizer* menentukan efisiensi konversi foto (Shilpa et al., 2023).

d. Elektrolit

Tugas utama dalam elektrolit adalah meregenerasi zat pewarna yang teroksidasi menggunakan I⁻ yang berfungsi sebagai donor elektron dalam elektrolit. Proses oksidasi menghasilkan I₃, I₃ menerima elektron dari sumber eksternal untuk meregenerasi I⁻ (Prakash & Janarthanan, 2023).

e. Elektroda pembanding

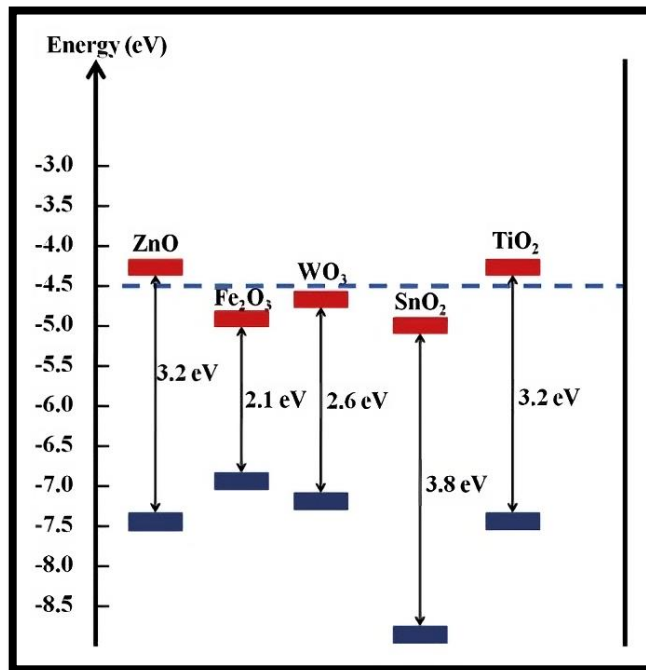
Elektroda pembanding meregenerasi elektrolit dengan mengumpulkan elektron dari sirkuit eksternal. Elektroda pembanding yang paling menjanjikan yaitu logam mulia, bahan karbon, bahan komposit, senyawa logam transisi, dan polimer konduktif (Don et al., 2020).

2.3 Semikonduktor Titanium Dioksida (TiO_2)

Fotokatoda merupakan komponen DSSC yang dapat meningkatkan efisiensi sehingga fotokatoda yang ideal harus memenuhi beberapa tipe ideal seperti berikut:

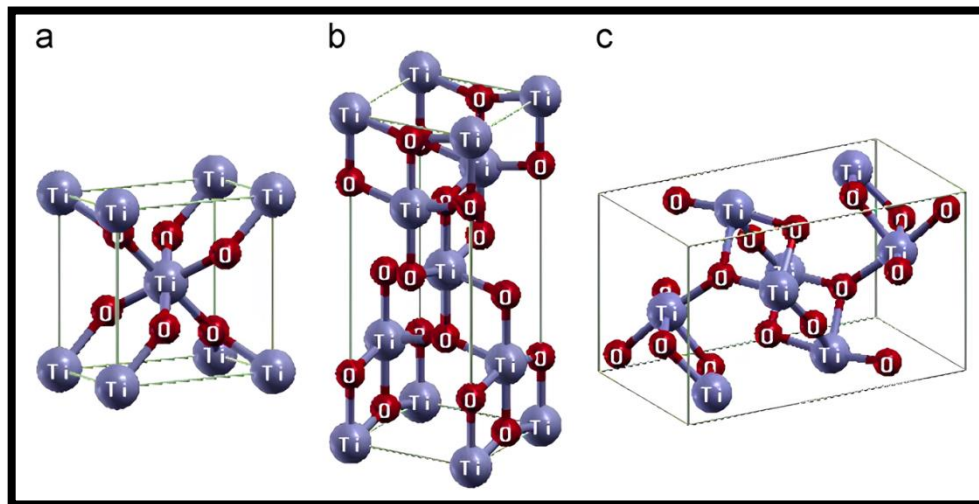
- a. Luas permukaan yang tinggi untuk meningkatkan kapasitas penyerapan zat pewarna.
- b. Fotokatoda mampu memindahkan elektron dari pewarna ke sirkuit eksternal dan injeksi elektron cepat dari zat pewarna.
- c. Ukuran pori harus dirancang dengan hati-hati untuk memfasilitasi difusi optimum zat pewarna dan elektrolit.
- d. Fotokatoda harus memiliki resistansi yang tinggi terhadap korosi.
- e. Fotokatoda harus memiliki kemampuan untuk menyerap/memantulkan cahaya matahari.
- f. Fotokatoda harus menjadi akseptor yang baik.
- g. Fotokatoda harus memiliki kontak antarmuka yang optimum dengan molekul zat pewarna dengan lapisan konduktif pada substrat.

Fotokatoda adalah lapisan berpori dari semikonduktor oksida logam yang didukung oleh kaca penghantar transparan (TCO). Penelitian yang telah dilakukan terkait fotokatoda semikonduktor yaitu TiO_2 , ZnO dan SnO_2 , posisi pita celah dan band gap dari beberapa semikonduktor di tunjukkan pada gambar 2.3. Diantara semua bahan oksidasi tersebut, TiO_2 adalah semikonduktor yang paling banyak digunakan dalam fotokatoda DSSC dengan ketebalan sekitar $10 \mu\text{m}$ (Samanta & English, 2019). Salah satu faktor untuk meningkatkan efisiensi adalah porositas lapisan TiO_2 (AL-Baradi, 2020).



Gambar 2.3 Posisi pita dari beberapa semikonduktor (Biswas & Chatterjee, 2020)

TiO₂ dapat diaplikasikan pada sensor gas, perangkat fotovoltaik, sensor cahaya UV dan beberapa aplikasi biomedis (Pugazhenthiran et al., 2020; Tian et al., 2021). TiO₂ merupakan semikonduktor yang memiliki stabilitas kimia yang tinggi, ikatan yang baik dengan pigmen, dan celah pita yang sesuai yaitu 3,20 eV yang biasanya ditemukan dalam bentuk anatase, rutile dan brookite (Adiguna & Indonesia, 2021). Fase rutile dan anatase lebih stabil secara termal dan memiliki luas permukaan yang lebih tinggi dibandingkan brookite seperti yang ditunjukkan gambar 2.4



Gambar 2.4 TiO₂ : (a) rutile, (b) anatase, (c) brookite
(Mohamad et al., 2015)

Fase anatase lebih fotoaktif, memiliki celah pita yang lebih besar, indeks bias yang lebih tinggi, dan koefisiens difusi elektron yang lebih tinggi daripada rutile (Khalid Hossain et al., 2017). Namun, rutile adalah polimorf yang paling stabil secara termal (Dussan et al., 2017). Anatase mendominasi pada suhu rendah <math><800^{\circ}</math> C sedangkan rutile berada pada fase kesetimbangan untuk setiap suhu (Mohamad et al., 2015). Anatase bersifat metastabil dan cenderung berubah menjadi rutile saat dipanaskan (Alazoumi et al., 2021).

Sifat fisik TiO₂ dipengaruhi oleh suhu annealing, yang mampu mengubah TiO₂ amorf menjadi anatase menjadi rutile. Secara umum TiO₂ akan bersifat amorf pada saat deposisi dan kemudian menjadi anatase setelah annealing pada suhu antara 300°C dan 600°C, yang dapat berubah menjadi fase rutile setelah annealing pada suhu 700°C dan 1000°C (Fazli et al., 2016). Perlakuan suhu pada fotokatoda mampu meningkatkan permukaan TiO₂ sehingga meningkatkan fotocurrent perangkat sehingga meningkatkan efisiensi konversi daya (Sadikin et al., 2020)

2.4 Dye sensitizer

Zat pewarna memainkan peranan penting dalam penyerapan dan konversi cahaya menjadi listrik. Efisiensi DSSC sebagian bergantung pada jenis zat pewarna yang digunakan sebagai sensitizer. Faktor-faktor yang mempengaruhi pemilihan zat pewarna termasuk spektrum absorpsi zat pewarna, waktu hidup eksitasi elektron, transfer muatan dari zat pewarna ke TiO₂, dan pelekatan zat pewarna pada permukaan TiO₂ (Ammar et al., 2019). Zat pewarna yang digunakan dalam DSSC dapat dikategorikan menjadi zat pewarna alami dan sintesis (Arulraj et al., 2019). Zat pewarna alami didapatkan pada tanaman.

Pigmentasi tanaman memainkan peran penting dalam menentukan absorpsi fotoaktif pada pewarna alami (Ashok et al., 2018). Struktur elektronik pigmen tanaman akan bereaksi dengan sinar matahari dan mengubah panjang gelombang yang akan ditransmisikan atau dipantulkan oleh jaringan tanaman. Pigmen dapat diidentifikasi berdasarkan panjang gelombang absorpsi maksimum, λ_{max} , dan warna yang dipersepsikan oleh manusia (Shalini et al., 2015). Berbagai jenis pigmen alami dapat diekstraksi dari berbagai bagian tanaman seperti bunga, daun, buah, akar, kulit kayu, dan biji (Taya et al., 2015). Kinerja zat pewarna alami lebih baik daripada zat pewarna sintesis karena adanya asam organik yang berbeda mampu mencegah rekombinasi elektron dengan elektrolit dan agregasi zat pewarna, sehingga meningkatkan penyuntikan muatan di dalam sel (Rajan & Cindrella, 2019). Kelebihan dari zat pewarna alami sebagai fotosensitizer yaitu koefisien absorpsi yang besar, sumber yang tidak terbatas, biaya rendah, teknik fabrikasi yang rendah, ramah lingkungan, reduksi tinggi dari logam mulia (Omar et al., 2020a)

Pewarna alami yang telah diaplikasikan sebagai sensitizer dalam DSSC termasuk betanin, klorofil, antosianin dan karatenoid (Hosseinnezhad et al., 2020; Treat et al., 2016). Beberapa penelitian tentang antosianin sebagai pewarna alami hampir ada pada semua buah berwarna dan bunga. Dengan melihat struktur kimianya, antosianin mengandung kelompok auxochrome seperti gugus karbonil (-COOH) dan hidroksil (-OH) dan beberapa diantaranya memiliki kelompok katekol yang dapat menyerap cahaya pada rentang energi tampak dari sinar

matahari (Valerio et al., 2020). Antosianin memberikan warna merah muda, merah, oranye, merah jambu, ungu, biru dan biru-hitam pada bunga, sementara auron memberikan warna kuning (Ruta & Farcasanu, 2019).

Betalain adalah pigmen yang larut dalam air yang dapat ditemukan di akar, buah, kelopak bunga, daun, dan batang (Omar et al., 2020b). Betalain memiliki kelompok fungsional $-COOH$ untuk berikatan dengan nanostruktur TiO_2 , betalain dapat menyerap cahaya dalam daerah tampak (Abu Bakar et al., 2016). Dalam struktur kimianya, betalain mengandung kelompok fungsional hidroksil yang membawa heterosiklik N. Dalam lingkungan asam, betalain dapat memberikan absorpsi yang kuat dalam rentang 400-600 nm karena kombinasi warna betaksantin kuning-oranye dan betasianin merah-pink atau merah-ungu (Kusumawati et al., 2021)

Klorofil adalah pigmen hijau yang ditemukan di daun tanaman hijau, alga dan cyanobacteria. Klorofil dapat menyerap cahaya dari panjang gelombang merah, biru, dan ungu serta mendapatkan warnanya melalui pantulan warna hijau (Al-Alwani et al., 2017). Klorofil memiliki absorpsi maksimum pada 670 nm yang berfungsi sebagai sensitizer dalam rentang cahaya tampak. Senyawa ini mencakup tiga gugus karboksilat dalam satu molekul tanpa adanya ion logam berat dianggap sebagai sensitizer cahaya yang ramah lingkungan (Siddick et al., 2018). Selain itu, struktur elektronik pigmen klorofil memungkinkan interaksi dengan sinar matahari sehingga menyerap foton dalam wilayah tampak, mengubah arus listrik dengan mengubah panjang gelombang dan meningkatkan kinerja DSSC (Arulraj et al., 2019; Siddick et al., 2018).

Karoten atau karotenoid memiliki lebih dari 600 anggota yang merupakan keluarga isoprenoid terbesar yang memberikan warna merah, kuning, dan oranye pada buah dan bunga (Shalini et al., 2015). Senyawa karoten terdiri dari delapan unit isoprenoid dan memiliki potensi besar sebagai pemanen energi dan *sensitizer* untuk aplikasi DSSC. Keberadaan ekstrak alami seperti alkohol dan asam organik membantu dalam adsorpsi pewarna, mencegah rekombinasi elektrolit, dan mengurangi akumulasi pewarna dalam DSSC (Omar et al., 2020b).

2.5 Buah Manggis (*Garcinia Mangostana*)



Gambar 2.5 Buah Manggis

- Kingdom* : *Plantae*
Divisi : *Tracheophyta*
Class : *Magnoliopsida*
Ordo : *Malpighiales*
Famili : *Clusiaceae*
Genus : *Garcinia L.*
Spesies : *Garcinia Mangostana L*

Manggis adalah tanaman asli Indonesia dan telah lama dibudidayakan di berbagai daerah. Buah dari tanaman ini juga disebut manggis, berwarna ungu kemerahan saat matang, meskipun ada juga varietas yang kulitnya berwarna merah. Secara umum, buah ini dikonsumsi karena rasanya yang manis, sedangkan kulit buahnya dibuang. Berdasarkan penelitian, kulit manggis mengandung antosianin, senyawa flavonoid yang berwarna ungu kemerahan pada kulit buah yang telah matang (Sofyan et al., 2018).

Ekstrak kulit manggis sangat berpotensi sebagai *sensitizer* yang efektif dalam solar cell karena memiliki rentang serapan elektronik yang luas sehingga sel surya yang dihasilkan akan memiliki respon spektral dengan rentang yang cukup luas di area terlihat (Yahya & Sasongko, 2019). Pewarna alami yang mengandung antosianin memiliki efisiensi tertinggi karena membantu mobilitas dari semikonduktor, fungsi ini disebabkan karena adanya gugus karbonil ($-C=O$) dan hidroksil ($-OH$) yang ada dalam struktur antosianin (Maiaugree et al., 2015).

Penelitian yang dilakukan oleh Tontapha dkk, menggunakan α -mangostin dan antosianin yang diekstrak dengan pelarut berbeda-beda, seperti aseton yang diasamkan dengan etanol. Penelitian ini menggunakan elektrolit berbasis lithium oksalat menunjukkan bahwa efisiensi DSSC yang disensitisasi dengan pewarna alami lainnya, seperti ekstrak blueberry, bayam, dan kubis merah (Ung et al., 2017).

2.6 Parameter Karakterisasi DSSC

Beberapa parameter yang digunakan untuk mengukur kemampuan dalam menghasilkan energi listrik, yaitu sebagai berikut:

a. Kerapatan Arus (J_{sc})

Kerapatan arus merupakan arus maksimum yang menghasilkan sel surya (I_{sc}) per satuan luas, umumnya disebut dalam miliampere (mA) atau ampere (A) per centimeter kuadrat (cm^2).

b. Tegangan Rangkaian (V_{oc})

Tegangan rangkaian diukur dalam volt (V) atau milivolt (mV), pada kondisi rangkaian terbuka maka diukurlah nilai V_{oc} . Arus rangkaiannya semakin mendekati angka nol jika sel surya semakin dekat dengan nilai tegangan maksimum.

c. Fill Factor

Parameter fill factor menentukan daya maksimum (P_{MP}) sel surya bersama dengan V_{oc} dan I_{sc} (arus hubung singkat).

$$FF = \frac{P_{MP}}{V_{oc} \times I_{sc}} \quad (2.5)$$

Keterangan:

FF = fill factor

P_{MP} = Daya maksimum (mV)

V_{oc} = Tegangan open circuit (V)

I_{sc} = Arus Maksimum (mA)

d. Efisiensi (η)

Efisiensi keseluruhan DSSC ditentukan oleh kerapatan arus (J_{sc}), tegangan (V_{oc}), Fill Factor (FF), dan intensitas cahaya (I_0). Perhitungan ini diukur dalam persen (%) dan mewakili proporsi energi matahari yang diubah sebagai energi listrik.

$$\eta = \frac{I_{sc} \times V_{oc} \times FF}{P_{in}} \quad (2.6)$$

Keterangan:

η = Efisiensi (%)

J_{sc} = Kerapatan Arus (mA/cm²)

V_{oc} = Tegangan open circuit (V)

FF = Fill Factor

I_0 = Intensitas Cahaya (Cd)