

Skripsi

**OPTIMALISASI KINERJA *DYE SENSITIZED SOLAR CELL* DENGAN
PEMANFAATAN EKSTRAK DAUN MANGGA (*Mangifera indica L.*) DAN
EKSTRAK KULIT BUAH NAGA (*Hyclocereus polyrhizus*) SEBAGAI
SENSITIZER ALAMI**

RATI B.

H021 19 1083



DEPARTEMEN FISIKA

FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM

UNIVERSITAS HASANUDDIN

MAKASSAR

2024

**OPTIMALISASI KINERJA *DYE SENSITIZED SOLAR CELL* DENGAN
PEMANFAATAN EKSTRAK DAUN MANGGA (*Mangifera indica L.*) DAN
EKSTRAK KULIT BUAH NAGA (*Hyclocereus polyrhizus*) SEBAGAI
*SENSITIZER ALAMI***

SKRIPSI

*Diajukan Sebagai Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Sains
Pada Program Studi Fisika Departemen Fisika
Fakultas Matematika Dan Ilmu Pengetahuan Alam*

RATI B.

H021 19 1083

DEPARTEMEN FISIKA

FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM

UNIVERSITAS HASANUDDIN

MAKASSAR

2024

HALAMAN PENGESAHAN

**OPTIMALISASI KINERJA *DYE SENSITIZED SOLAR CELL* DENGAN
PEMANFAATAN EKSTRAK DAUN MANGGA (*Mangifera indica L.*) DAN
EKSTRAK KULIT BUAH NAGA (*Hyclocereus polyrhizus*) SEBAGAI
SENSITIZER ALAMI**

Disusun dan diajukan Oleh:

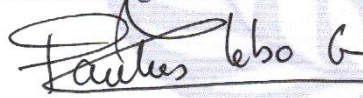
**RATI B.
H021 19 1083**

Telah dipertahankan dihadapan Panitia Ujian yang dibentuk dalam Rangka
Penyelesaian Studi Program Sarjana Program Studi Fisika
Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Hasanuddin
Pada 24 Januari 2024

Dan dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan:

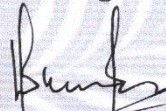
Menyetujui,

Pembimbing Utama




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

Pembimbing Pertama



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

Ketua Program Studi

Prof. Dr. Arifin, M.T.
NIP. 19670520 199403 1 002

PERNYATAAN KEASLIAN

Yang bertanda tangan dibawah ini:

Nama : Rati B.
NIM : H021191083
Program Studi : Fisika
Jenjang : S1

Menyatakan dengan sebenarnya bahwa karya tulisan saya yang berjudul:

**OPTIMALISASI KINERJA *DYE SENSITIZED SOLAR CELL* DENGAN
PEMANFAATAN EKSTRAK DAUN MANGGA (*Mangifera indica L.*) DAN
EKSTRAK KULIT BUAH NAGA (*Hycocereus polyrhizus*) SEBAGAI
*SENSITIZER ALAMI***

Adalah karya tulis berdasarkan hasil pemikiran dan penelitian saya, bukan merupakan hasil pengambilalihan tulisan maupun pemikiran orang lain. Jika terdapat karya orang lain dalam skripsi ini, maka akan dicantumkan sumber yang benar dan jelas. Demikian surat pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya, jika dikemudian hari terdapat ketidakbenaran dan penyimpangan dalam pernyataan ini, maka saya berhak menerima sanksi atas perbuatan tersebut.

Makassar, 24 Januari 2024

Yang menyatakan,



Rati B.
H021 19 1083

ABSTRAK

Dye sensitized solar cell (DSSC) adalah sistem fotovoltaiik yang menggunakan pewarna untuk mengubah energi matahari menjadi listrik. Pada penelitian ini, DSSC dibuat dalam bentuk *sandwich* dengan menggunakan kombinasi ekstrak daun mangga dan kulit buah naga. Untuk pendeposisian pasta TiO₂ digunakan teknik *spin coating*. Hasil karakterisasi UV-Vis menunjukkan panjang gelombang puncak daun mangga, kulit buah naga, dan *dye* campuran (CAM 1:1, CAM 1:2, CAM 2:1) berturut-turut adalah 528 dan 648 nm, 447 nm, dan 648 nm. Hasil FTIR menunjukkan adanya gugus hidroksil O-H, gugus karbonil C=O, dan ikatan C-O pada daun mangga dan kulit buah naga. Efisiensi DSSC yang dihasilkan dari pewarna daun mangga sebesar 0,00186% dan efisiensi DSSC kulit buah naga sebesar 0,00058%. Variasi kombinasi dari daun mangga dan kulit buah naga (CAM 1:1, CAM 1:2, dan CAM 2:1) menunjukkan efisiensi masing-masing sebesar 0,00071%, 0,00002%, dan 0,00019%. Pewarna daun mangga memiliki efisiensi paling baik dibandingkan pewarna lainnya.

Kata Kunci: DSSC, efisiensi, spin coating, daun mangga, kulit buah naga

ABSTRACT

Dye sensitized solar cell (DSSC) is a photovoltaic system that uses dye to convert solar energy into electricity. In this study, the DSSC was made in the form of a sandwich using a combination of mango leaf extract and dragon fruit peel. For the deposition of TiO₂ paste, spin coating technique was used. UV-Vis characterization results show the peak wavelength of mango leaves, dragon fruit peel, and mixed dye (CAM 1:1, CAM 1:2, CAM 2:1) are 528 and 648 nm, 447 nm, and 648 nm, respectively. FTIR results showed the presence of O-H hydroxyl groups, C=C carbonyl groups, and C-O bonds in mango leaves and dragon fruit peels. The efficiency of DSSC produced from mango leaf dye is 0.00186% and the efficiency of dragon fruit peel DSSC is 0.00058%. Combination variations of mango leaves and dragon fruit peels (CAM 1:1, CAM 1:2, and CAM 2:1) showed efficiencies of 0.00071%, 0.00002%, and 0.00019%, respectively. Mango leaf dye has the best efficiency compared to other dyes.

Keywords: DSSC, efficiency, spin coating, mango leaf, dragon fruit peel

KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan kehadirat Tuhan Yang Maha Esa yang telah melimpahkan rahmat-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi ini dengan judul “Optimalisasi Kinerja *Dye Sensitized Solar Cell* dengan Pemanfaatan Ekstrak Daun Mangga (*Mangifera indica L.*) dan Ekstrak Kulit Buah Naga (*Hyclocereus polyrhizus*) Sebagai *Sensitizer* Alami”. Skripsi ini disusun sebagai salah satu syarat akademik untuk memperoleh gelar sarjana pada Program Studi Fisika Departemen Fisika Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Hasanuddin. Penulis menyadari bahwa penyelesaian skripsi ini tidak terlepas dari bantuan dan dorongan yang diberikan oleh berbagai pihak yang secara konsisten memberikan bantuan baik secara langsung maupun tidak langsung. Oleh karena itu, pada kesempatan ini perkenankanlah penulis untuk menyampaikan ucapan terima kasih yang tulus kepada:

1. Kedua orang tua, ayahanda **Benyamin Buttu P** dan ibunda tersayang **Liling**, terima kasih atas kerja keras, kesabaran, kasih sayang dan doa terbaiknya serta bantuan biaya untuk memenuhi segala kebutuhan penulis dalam menyelesaikan tugas akhir ini. Terima kasih juga kepada **Kakak Minggu dan Obet** yang selalu siap menjadi sponsor untuk memenuhi semua kebutuhan penulis, serta kepada **Adik Yoel dan Prisil** yang selalu mendukung.
2. **Prof. Dr. Paulus Lobo Gareso, M.Sc.** selaku pembimbing utama dan **Prof. Dr. Dahlang Tahir, S.Si., M.Si.** selaku pembimbing pendamping penulis yang telah sabar membimbing serta memberikan pendapat dan solusi selama penyelesaian penelitian tugas akhir ini.
3. **Prof. Dr. Sri Suryani, DEA.** dan **Bapak Eko Juarlin, S.Si., M.Si.** selaku Tim Penguji, telah meluangkan waktunya dalam memberikan masukan dan kritik yang membangun kepada penulis guna penyempurnaan tugas akhir ini.
4. **Prof. Dr. Sri Suryani, DEA.** dan **Bapak Eko Juarlin, S.Si., M.Si.** sebagai Penasehat Akademik Penulis selama menempuh perkuliahan.

5. Seluruh **Dosen Pengajar dan Staf Departemen Fisika** yang telah memberikan ilmunya dan banyak membantu dalam mengurus dokumen-dokumen yang diperlukan untuk menyelesaikan tugas akhir ini.
6. Keluarga tercinta sekaligus sponsor penulis, **Om Palangi, Kak Sarce, Kak Bungan**, terima kasih atas bantuan keuangan kalian dari awal studiku hingga tahap ini.
7. **Pak Yusuf, Pak Rahmat, Pak Subaer dan Kak Imam** yang telah meluangkan waktunya untuk membantu pengujian sampel pada penelitian tugas akhir ini.
8. Kakak Asisten Laboratorium Material dan Energi **Azlan, Syarif dan Ardi** telah banyak membantu selama proses penelitian tugas akhir ini.
9. **Patner meneliti Stania dan Alya**, terima kasih telah berbagi suka dan duka penelitian ini, serta berbagi stres dan permasalahan bersama. Selalu ada permasalahan yang membuat kepala pusing disetiap langkahnya, namun Tim Dssc mampu mengatasinya.
10. Teman baik penulis (**Sinta dan Musda**) dan my roommate (**Yesmin**) selama empat tahun, walaupun tidak berperan penting dalam proses penelitian ini, terima kasih telah menjadi teman penulis dalam perkuliahan dan mendengarkan keluh kesah penulis jika ada kendala dalam penelitian serta memberikan saran-saran yang membangun.
11. Teman Fisika 2019, **Rasak, Gunawan, Hajrul, Enjel, Yoriska, Maria, Sire, Lela, Ririn, Suci, Eni, Salsa, Asira, Daya, Risma, Atul, Umni, Rara, Fitri** dan yang tidak dapat dituliskan satu-persatu. Terima kasih atas segala bantuannya selama perkuliahan dan penyelesaian tugas akhir ini.
12. **Kakak, adik dan teman-teman di lab Material** yang banyak memberikan bantuan dan bimbingan dalam penggunaan peralatan lab, **teman-teman di lab Elins** yang selalu labnya ditempati menonton film, **teman-teman di lab Teori** yang bersedia meminjamkan printernya untuk tugas akhir, dan juga **teman-teman di lab Optik**, walaupun tidak punya lab, tapi selalu memberi semangat, haha.

13. Teman SIS, **Nia, Syakira dan Lisna** sebagai teman healing dan yang selalu memberikan semangat dalam menyelesaikan tugas akhir ini.
14. Kepada seluruh pihak yang mungkin tidak sempat penulis sebutkan satu persatu. Terima kasih atas segala dukungan, partisipasi, dan apresiasinya yang diberikan kepada penulis.

Penulis juga menyadari bahwa skripsi ini masih jauh dari kata sempurna. Namun, ini adalah hasil terbaik yang dapat diberikan oleh penulis pada penelitian ini. Oleh karena itu, penulis mengucapkan permohonan maaf yang sebesar-besarnya. Akhir kata, semoga tulisan ini dapat memberikan manfaat untuk berbagai pihak.

Makassar, 24 Januari 2024



Rati B.

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	ii
HALAMAN PENGESAHAN	iii
PERNYATAAN KEASLIAN	iv
ABSTRAK	v
ABSTRACT	vi
KATA PENGANTAR	vii
DAFTAR ISI	x
DAFTAR GAMBAR	xii
DAFTAR TABEL	xiii
DAFTAR LAMPIRAN	xiv
BAB I PENDAHULUAN	1
I.1 Latar Belakang	1
I.2 Rumusan Masalah	3
I.3 Tujuan Penelitian	3
I.4 Ruang Lingkup Penelitian	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	4
II.1 Sel Surya (Solar Cell)	4
II.2 Material DSSC	5
II.2.1 Substrat	5
II.2.2 Elektroda Kerja (<i>Working Electrode</i>)	6
II.2.3 Elektrolit	6
II.2.4 Elektroda Lawan (<i>Counter Electrode</i>)	7
II.2.5 Sensitizer Pewarna (<i>Dye Sensitizer</i>)	7
II.3 Klorofil	8
II.4 Daun Mangga sebagai <i>Dye Sensitizer</i>	9
II.5 Antosianin	10
II.6 Kulit Buah Naga sebagai <i>Dye Sensitizer</i>	11
II.7 Efisiensi Solar Sel (DSSC)	12
BAB III METODOLOGI PENELITIAN	14
III.1 Waktu dan Tempat Penelitian	14

III.2 Alat dan Bahan Penelitian	14
III.2.1 Alat Penelitian.....	14
III.2.2 Bahan Penelitian	14
III.3 Prosedur Penelitian.....	15
III.4 Bagan Alir Penelitian	20
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	21
IV.1 UV-Vis	21
IV.2 FTIR	23
IV.3 XRD	25
IV.4 Performa DSSC	26
BAB V PENUTUP	29
V.1 Kesimpulan.....	29
V.2 Saran	29
DAFTAR PUSTAKA	30
LAMPIRAN.....	36

DAFTAR GAMBAR

Gambar II.1 Skema struktur dan cara kerja sel surya peka pewarna.....	5
Gambar II.2 Struktur molekul klorofil.....	9
Gambar II.3 Daun mangga.....	10
Gambar II.4 Struktur molekul antosianin.....	11
Gambar II.5 Kulit buah naga.....	12
Gambar II.6 Kurva I-V (DSSC).....	12
Gambar III.1 Proses ekstraksi daun mangga dan kulit buah naga.....	15
Gambar III.2 Proses pembuatan dan pendeposisian pasta TiO ₂	16
Gambar III.3 Perendaman kaca pada <i>dye</i> selama 48 jam.....	17
Gambar III.4 Pembuatan larutan elektrolit.....	17
Gambar III.5 Pembuatan elektroda lawan.....	17
Gambar III.6 Fabrikasil sel DSSC.....	18
Gambar III.7 Skema rangkaian pengujian arus dan tegangan pada DSSC.....	18
Gambar IV.1 spektrum UV-Vis kulit buah naga, daun mangga, dan variasi komposisi campuran pewarna.....	22
Gambar IV.2 Spektrum FTIR dari daun mangga, kulit buah naga, bubuk TiO ₂ ..	23
Gambar IV.3 Spektrum XRD dari TiO ₂ , kulit buah naga, daun mangga, dan variasi campuran pewarna (CAM 1:1, CAM 2:1, CAM 1:2).....	25

DAFTAR TABEL

Tabel 4.1 Identifikasi gugus fungsi spektrum FTIR.....	23
Tabel 4.2 Intensitas puncak TiO ₂ dan pewarna.....	26
Tabel 4.3. Pengujian Arus-Tegangan DSSC.....	27

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1 Tabel Ukuran Kristal TiO ₂ dan Pewarna.....	36
Lampiran 2 Data Pengukuran Arus dan Tegangan.....	38
Lampiran 3 Perhitungan Efisiensi DSSC.....	41
Lampiran 4 Hasil Uji Spektrofotometer UV-Vis.....	45
Lampiran 5 Hasil FTIR.....	50
Lampiran 6 Dokumentasi Penelitian.....	53

BAB I

PENDAHULUAN

I.1 Latar Belakang

Sejak awal abad ke-20, permintaan energi semakin meningkat setiap hari. Salah satu faktor yang mempengaruhi peningkatan penggunaan energi adalah pertumbuhan penduduk. Seiring bertambahnya jumlah penduduk, konsumsi energi, khususnya energi listrik juga meningkat[1]. Energi listrik merupakan salah satu jenis energi yang paling banyak digunakan manusia dalam kehidupan sehari-hari. Kebutuhan energi yang meningkat ini berbanding terbalik dengan ketersediaan sumber daya yang ada. Energi yang kita gunakan saat ini berasal dari bahan bakar fosil berbasis karbon seperti batubara, gas alam, minyak mentah, dan jumlah yang ada semakin berkurang. Hampir 90% listrik kita berasal dari bahan bakar fosil ini. Namun, konsumsi bahan bakar fosil juga menyebabkan masalah lingkungan seperti perubahan iklim global, penipisan ozon, polusi udara, polusi tanah, polusi air, dan hujan asam[1],[2]. Munculnya masalah pencemaran lingkungan dan meningkatnya kebutuhan energi mendorong para peneliti untuk mengeksplorasi sumber energi yang bersih, terbarukan, dan melimpah. Diantara sumber energi terbarukan, energi matahari merupakan sumber daya yang paling menjanjikan dengan sedikit pencemaran lingkungan[3],[4].

Energi matahari diubah menjadi listrik menggunakan sistem fotovoltaik. DSSC adalah sel fotovoltaik generasi baru yang dapat secara langsung mengubah cahaya tampak menjadi listrik dengan menyerap cahaya insiden dan kemudian mentransfer muatan dari pewarna ke semikonduktor celah pita lebar[5]. DSSC telah menarik banyak perhatian karena keramahan lingkungannya, biaya produksi rendah, ekstraksi yang mudah dari sumber daya alam, dekomposisi yang mudah di lingkungan, fabrikasi sederhana, dan kinerja sel yang baik dalam kondisi cahaya rendah[6].

Adapun komponen utama DSSC adalah elektroda kerja yang terdiri dari lapisan semikonduktor yang dilapisi dengan pewarna sebagai *sensitizer*, larutan elektrolit, dan elektroda lawan. Titanium dioksida (TiO_2), timah oksida (SnO_2),

seng oksida (ZnO), dan cadmium oksida (CdO) merupakan semikonduktor celah pita lebar (WBSC) yang digunakan dalam DSSC[7],[8]. TiO₂ paling banyak digunakan karena sifat fotokimianya yang stabil bila digunakan sebagai elektroda pada kondisi suhu tinggi, transmisi cahaya yang baik, biaya murah, dan tidak beracun[6],[9]. Pewarna memainkan peran penting sebagai *sensitizer* karena harus memiliki spektrum serapan yang luas dan memiliki gugus kimia yang mendukung semikonduktor TiO₂ untuk penahan pewarna[3]. Pewarna alami yang digunakan dapat diekstrak dari sumber daya alam seperti daun, bunga, kulit pohon, buah, dan biji buah[10]. Pewarna alami juga dapat diekstrak dari sisa-sisa limbah, ini mengurangi limbah lingkungan[11].

Molekul pewarna yang biasa digunakan adalah klorofil, antosianin, karotenoid, kurkumin, betalain, dan sebagainya[2],[3],[12],[13]. Dari beberapa molekul pewarna yang tersedia, antosianin dan klorofil paling banyak ditemukan pada daun, buah dan tumbuhan. Molekul antosianin mengandung turunan karbonil dan hidroksil, yang dapat membentuk ikatan yang baik dengan permukaan titanium dioksida[8]. Namun, antosianin masih menunjukkan pita serapan cahaya tampak yang kurang lebar. Spektrum penyerapan sinar matahari yang sempit adalah salah satu faktor utama yang membatasi kinerja perangkat DSSC. Salah satu solusi untuk mengatasi keterbatasan tersebut adalah dengan mencampurkan kedua zat pewarna. Klorofil paling menjanjikan mengingat perannya sebagai *sensitizer* yang meniru fenomena fotosintesis. Penggunaan kombinasi dua pewarna alami dengan spektrum serapan yang berbeda menawarkan peluang yang sangat baik untuk meningkatkan kinerja sel surya dengan jangkauan serapan cahaya yang lebih luas[3].

Beberapa penelitian telah dilakukan dengan menggunakan pewarna alami, misalnya oleh Oluwaseun Adedokun et.al[14] dengan menggunakan empat pewarna alami yang di ekstrak dari berbagai kulit buah yaitu pisang, delima, mangga, dan nanas, yang menunjukkan efisiensi konversi sel masing-masing sebesar 0,009%, 0,010%, 0,024%, dan 0,002%. Efisiensi dari ekstrak kulit buah mangga memiliki efisiensi tertinggi dibandingkan dengan pewarna lainnya yaitu 0,024%. Namun, efisiensi yang diperoleh dengan menggunakan pewarna alami tunggal kurang dari 1%. Sedangkan Tamara et.al menggunakan dua kombinasi

pewarna dari jahe dan daun mangga dengan efisiensi masing-masing 0,054% dan 0,248%. Kombinasi kedua pewarna menunjukkan efisiensi sebesar 1,431% [15]. Terbukti bahwa penggabungan dua jenis pewarna dapat meningkatkan efisiensi sel DSSC.

Pada penelitian ini, kinerja sel DSSC ditingkatkan dengan mencampurkan pewarna alami, antosianin yang diekstrak dari kulit buah naga dan klorofil yang diekstrak dari daun mangga. Kulit buah naga dan daun mangga memiliki spektrum serapan yang berbeda dan dapat digunakan sebagai *sensitizer*. Selain itu, dari segi lingkungan, penggunaan kulit buah naga dan daun mangga dapat mengurangi limbah lingkungan. Selain mencampurkan dua zat pewarna, dilakukan juga variasi komposisi pewarna campuran untuk melihat perbandingan pewarna yang optimal untuk memberikan kinerja/efisiensi sel DSSC yang tinggi.

I.2 Rumusan Masalah

Adapun rumusan masalah pada penelitian ini adalah sebagai berikut

1. Bagaimana pengaruh penggunaan pewarna alami tunggal dan campuran terhadap nilai absorbansi pewarna pada panjang gelombang tampak?
2. Bagaimana pengaruh variasi komposisi pewarna campuran terhadap efisiensi/kinerja sel DSSC?

I.3 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk:

1. Menganalisis pengaruh penggunaan pewarna alami tunggal dan campuran terhadap nilai absorbansi pewarna pada panjang gelombang tampak.
2. Menganalisis pengaruh variasi komposisi pewarna campuran terhadap efisiensi/kinerja sel DSSC.

I.4 Ruang Lingkup Penelitian

Adapun ruang lingkup pada penelitian ini yaitu merancang sel DSSC menggunakan pewarna alami antosianin dan klorofil yang diekstraksi dari kulit buah naga dan daun mangga sebagai *dye sensitizer*, karakterisasi menggunakan UV-Vis, FTIR, XRD, dan Solar simulator.

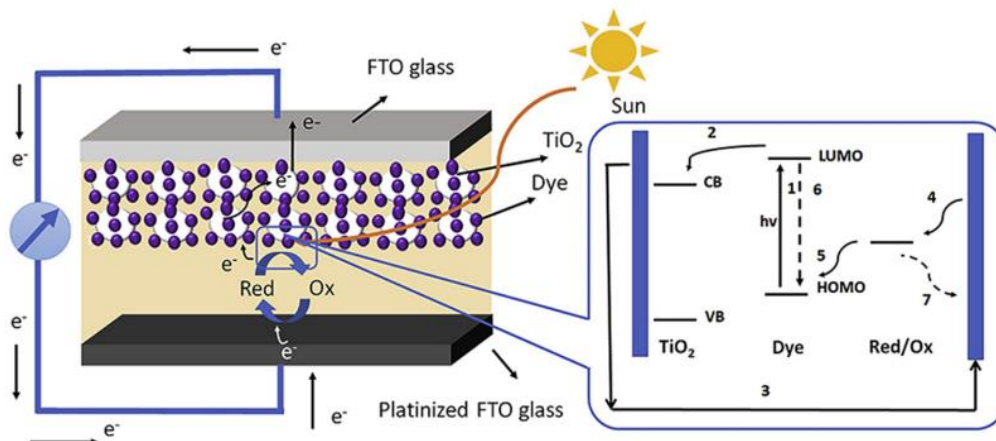
BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

II.1 Sel Surya (Solar Cell)

Matahari adalah salah satu sumber energi terbarukan yang paling melimpah dan menjanjikan di Bumi. Salah satu pemanfaatan energi surya adalah sebagai sumber energi alternatif pengganti bahan bakar fosil untuk memenuhi kebutuhan energi khususnya listrik. Energi matahari akan diubah menjadi listrik menggunakan sistem fotovoltaik. Sistem fotovoltaik (PV) adalah teknologi yang mengubah energi cahaya secara langsung menjadi listrik. Sel fotovoltaik dibagi menjadi tiga generasi berbeda. Generasi pertama yaitu sel surya berbasis wafer silikon, dan generasi kedua yaitu CIGS, CdTe, GaAs. Generasi ketiga adalah sel surya quantum dot, sel surya organic, sel surya multi-junction, dan sel surya peka warna. Di antara semua teknologi surya, sel surya peka warna (DSSC) adalah perangkat fotovoltaik yang telah menarik banyak perhatian karena hemat biaya dan ramah lingkungan dibandingkan dengan sel surya silikon, CdTe, dan CIGS[11],[16].

Pada tahun 1991, Grätzel dan O'Regan memperkenalkan perangkat fotovoltaik jenis baru yang disebut sel surya peka warna (DSSC) atau sel surya Grätzel. DSSC adalah perangkat fotovoltaik generasi ketiga yang mengubah cahaya tampak menjadi energi listrik berdasarkan sensitisasi semikonduktor[17]. Pada dasarnya, DSSC bekerja dengan mentransfer elektron dari molekul pewarna ke semikonduktor dengan cara menyerap foton. Ketika pewarna menerima sinar matahari dengan energi yang lebih tinggi dari energi celah pita semikonduktor, elektron dalam orbital molekul tertinggi (HUMO) yang diduduki tereksitasi ke orbital molekul kosong terendah (LUMO). Selanjutnya, elektron ditransfer ke pita konduksi semikonduktor oksida (biasanya TiO_2/ZnO). Setelah itu, elektron bergerak melalui anoda dan katoda ke sirkuit eksternal. Ketika elektron memasuki sirkuit, keadaan pasangan redoks berubah dari teroksidasi menjadi tereduksi. Elektron yang diperoleh dari pembalikan pasangan redoks digunakan untuk meregenerasi pewarna. Proses ini berlangsung terus menerus sebagai suatu siklus sehingga dihasilkan arus yang kontinyu[11],[18], [19].



Gambar II.1 Skema struktur dan cara kerja sel surya peka pewarna[18]

Pada umumnya, DSSC terdiri atas empat komponen utama yaitu elektroda kerja (*working electrode*) yang dilapisi semikonduktor TiO_2/ZnO pada substrat kaca transparan yang bertindak sebagai fotoanoda, pewarna sebagai *sensitizer*, larutan elektrolit, dan elektroda lawan (*counter electrode*). Larutan elektrolit yang digunakan merupakan pasangan redoks iodida/yodium (I^-/I_3^-) yang ditempatkan diantara elektroda kerja dan elektroda lawan[18].

II.2 Material DSSC

II.2.1 Substrat

Substrat merupakan salah satu material penyusun DSSC dan berperan sebagai badan yang menopang seluruh komponen sel surya. Selain itu, substrat ini dapat berfungsi sebagai tempat pengendapan bahan semikonduktor TiO_2/ZnO dan katalis berbasis karbon. Substrat ini berupa lapisan film tipis (*thin film*) transparan yang bersifat konduktif. Lapisan konduktif pada substrat kaca berfungsi sebagai jalur aliran arus masuk dan keluar sel DSSC[20].

Transparent Conductive Oxide (TCO) adalah substrat kaca transparan yang biasa digunakan dalam DSSC. Jenis TCO yang umum digunakan adalah *indium tin oxide* (ITO) dan *fluorene thin oxide* (FTO). Kaca berlapis ITO memiliki transmisi cahaya yang tinggi, namun karena penggunaan indium, biaya materialnya menjadi mahal. Di sisi lain, kaca berlapis FTO memiliki stabilitas suhu tinggi yang baik dan biaya rendah, sehingga dapat menjadi kandidat terbaik untuk kaca konduktif DSSC, meskipun transmisinya lebih rendah daripada ITO[20].

II.2.2 Elektroda Kerja (*Working Electrode*)

Selain substrat, material penyusun lain dalam DSSC adalah elektroda. Elektroda adalah lapisan tipis yang terbuat dari bahan semikonduktor yang didesposisikan di atas substrat kaca transparan konduktif dan disensitisasi dengan pewarna yang bertindak sebagai fotoanoda. Bahan semikonduktor yang digunakan sebagai fotoanoda harus memenuhi beberapa kriteria, yaitu luas permukaan dan porositas yang tinggi, dan sifat-sifatnya harus disesuaikan dengan *sensitizer* yang digunakan untuk meningkatkan efisiensi sel DSSC[20],[21].

Beberapa bahan semikonduktor yang umum digunakan adalah seng oksida (ZnO), titanium dioksida (TiO₂), timah oksida (SnO₂), magnesium oksida (MgO) dan cadmium oksida (CdO)[21],[22]. Di antara bahan semikonduktor tersebut, titanium dioksida (TiO₂) adalah yang paling banyak digunakan, karena struktur mesopori dan luas permukaannya yang tinggi meningkatkan jumlah molekul pewarna yang terserap, yang memiliki efek meningkatkan penyerapan sinar matahari oleh fotoanoda. TiO₂ yang umum digunakan memiliki struktur anatase dengan energi celah pita sekitar 3,2 eV[23],[24].

II.2.3 Elektrolit

Dalam DSSC, elektrolit ditempatkan di antara elektroda kerja dan elektroda lawan untuk meregenerasi molekul pewarna dan berfungsi sebagai media transportasi pembawa muatan antara pewarna dan dua elektroda. Beberapa sifat yang harus dimiliki elektrolit adalah viskositas rendah, sifat dielektrik tinggi, titik didih tinggi, dan tekanan uap yang dapat diabaikan[21].

Secara umum, elektrolit dibagi menjadi tiga jenis, yaitu elektrolit padat, elektrolit cair, dan elektrolit ionik anorganik. Di antara ketiga jenis elektrolit ini, elektrolit cair paling sering digunakan dalam DSSC karena menawarkan efisiensi yang cukup tinggi dalam mengubah foton menjadi arus listrik. Elektrolit cair adalah yodium cair atau triiodida yang terdiri dari pasangan redoks iodida/yodium (I⁻/I₃⁻) [18]. Namun kelemahan elektrolit cair ini adalah stabilitasnya rendah dan mudah bocor. Hal yang sama berlaku untuk elektrolit ionik anorganik, yang terdegradasi dari waktu ke waktu, menyebabkan penurunan efisiensi sel. Akhirnya, elektrolit padat berdasarkan polimer *polyethylene glycol* (PEG). Dari segi stabilitas dan tidak

ada kebocoran, elektrolit padat memiliki kinerja terbaik di antara elektrolit cair dan elektrolit ionik anorganik. Namun, efisiensi konversi foton yang dihasilkan oleh elektrolit padat tidak sebaik elektrolit cair[21].

II.2.4 Elektroda Lawan (*Counter Electrode*)

Elektroda lawan (*counter electrode*) merupakan material DSSC yang berperan sebagai katalis untuk mereduksi pasangan redoks pada larutan elektrolit. Oleh karena itu, diperlukan elektroda pembanding yang memiliki resistansi yang rendah dan aktivitas transfer elektron dan elektrokatalitik yang tinggi untuk meningkatkan arus hubung singkat pada DSSC[18].

Platina adalah katalis yang telah menunjukkan kinerja baik dan memberikan efisiensi sel yang tinggi, yang menjadikannya salah satu katalis yang paling umum digunakan dalam DSSC. Namun, karena platina adalah logam mulia yang membutuhkan biaya produksi mahal, maka bahan berbasis karbon digunakan sebagai katalitik karena biayanya murah dan mudah ditemukan di alam[18],[21].

II.2.5 Sensitizer Pewarna (*Dye Sensitizer*)

Sensitizer merupakan komponen yang sangat berperan penting dalam DSSC karena berfungsi untuk menyerap cahaya matahari pada rentang spektrum yang luas. Karena itu, *sensitizer* harus memiliki spektrum serapan maksimum yang luas dari sinar tampak hingga inframerah-dekat, memiliki gugus karboksil atau hidroksil untuk berikatan baik dengan TiO_2 , injeksi elektron yang tinggi ke fotoanoda, dan tidak mudah terdegradasi[24],[25],[26].

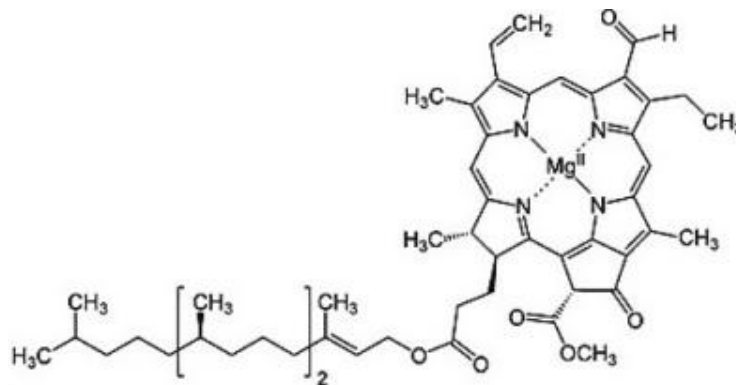
Dye sensitizer menggunakan pewarna alami dan sintesis. Pewarna sintetis berbasis ruthenium memiliki beberapa keunggulan seperti penyerapan sinar matahari yang luas, injeksi elektron yang tinggi, stabilitas tinggi dan telah memenuhi persyaratan sebagai *sensitizer* yang baik. Namun, pewarna kompleks ruthenium membutuhkan pemurnian yang tinggi sehingga membutuhkan biaya produksi yang mahal, ketersediaan yang rendah, beracun, dan memerlukan proses sintesis yang rumit. Sedangkan pewarna alami mudah diekstrak, murah, tidak beracun, ramah lingkungan, dan ketersediaannya melimpah di alam sehingga berpeluang besar untuk menggantikan pewarna berbasis ruthenium[2],[18].

Pewarna alami dapat diekstrak dari limbah lingkungan atau dari sumber daya alam seperti biji, akar, daun, bunga, dan buah[21]. Molekul pewarna alami yang umumnya yang terdapat ditanaman yaitu klorofil, antosianin, karetonoid, kurkumin, betalain, dan sebagainya. Di antara banyak molekul pewarna yang ada, antosianin dan klorofil yang paling banyak ditemukan di daun, buah, dan tanaman[2].

II.3 Klorofil

Klorofil, juga dikenal sebagai zat hijau daun, adalah pigmen yang dimiliki oleh banyak organisme yang berperan penting dalam proses fotosintesis. Tumbuhan, alga dan beberapa bakteri fotosintetik memiliki warna hijau karena klorofil. Klorofil menyerap cahaya dari panjang gelombang merah, biru, dan ungu serta memantulkan panjang gelombang hijau[27],[28]. Pada tumbuhan dan alga hijau, klorofil berasal dari plastida yang belum dewasa dan tidak berwarna yang disebut proplastida dan terdapat didalam kloroplas. Kloroplas adalah tempat berlangsungnya proses fotosintesis dimana di dalamnya terdapat membran tilakoid yang berfungsi untuk menyerap cahaya matahari serta mengubahnya menjadi energi kimia dalam bentuk ATP[29].

Klorofil merupakan pigmen yang diklasifikasikan ke dalam keluarga klorin. Dimana klorofil adalah senyawa siklik tetrapirrol yang memiliki struktur porfirin dengan satu cincin pirol dengan inti ion magnesium (ion Mg). Berdasarkan struktur ligannya klorofil dibedakan menjadi klorofil-a, klorofil-b, klorofil-c1, klorofil-c2, dan klorofil-f[18],[30],[31]. Klorofil-a yang bersifat nonpolar dan klorofil-b yang sedikit polar merupakan pigmen utama dalam proses fotosintetis pada tumbuhan tingkat tinggi untuk penyerapan sinar matahari. Klorofil dapat digunakan sebagai *sensitizer* pada DSSC karena mampu menyerap sinar matahari pada rentang panjang gelombang dari 400-700 nm[32].



Gambar II.2 Struktur molekul klorofil[11]

II.4 Daun Mangga sebagai *Dye Sensitizer*

Indonesia merupakan negara dengan iklim tropis dan banyak menghasilkan buah-buahan tropis yang mendunia, salah satunya adalah mangga. Mangga (*Mangifera indica L.*) merupakan tanaman hortikultura yang banyak ditanam karena buahnya yang manis dan aromatik, dan dapat dikonsumsi segar atau diolah menjadi bentuk permen mangga, keripik, sirup mangga dan dodol mangga[33]. Tanaman mangga berasal dari Asia Selatan kemudian menyebar ke seluruh Asia Tenggara. Mayoritas tanaman mangga yang dibudidayakan masyarakat Indonesia adalah mangga Arumanis dan mangga Manalagi. Kedua tanaman mangga ini mampu berbuah selama beberapa musim dan memiliki intensitas buah yang cukup tinggi. Pada penelitian ini daun mangga jenis arumanis digunakan sebagai *sensitizer* untuk DSSC. Daun mangga arumanis mengandung berbagai metabolit sekunder seperti alkaloid, flavonoid, tanin, triterpenoid sehingga berpotensi untuk diekstrak dan digunakan sebagai pewarna alami DSSC[34],[35].

Secara umum, tanaman mangga terdiri atas beberapa bagian yaitu daun, buah, dan batang. Pohon mangga memiliki ketinggian sekitar 10-40 meter, batangnya tegak, buahnya berwarna orange atau kuning muda saat matang, dan daunnya lebat dengan beberapa warna. Warna daun pada tanaman mangga bervariasi warnanya, dari kuning kehijauan saat masih muda hingga hijau tua saat sudah tua. Hal ini menunjukkan adanya perbedaan kandungan klorofil pada setiap daun. Semakin tua usia daun maka kandungan klorofil pada daun semakin tinggi. Namun pada daun tua yang tidak dapat berfotosintesis, daun menjadi kuning dan kandungan klorofilnya rusak[29]. Intensitas cahaya juga mempengaruhi kandungan

klorofil pada daun. Semakin banyak cahaya yang didapat, semakin tinggi kandungan klorofilnya. Namun, jika intensitas cahaya terlalu tinggi, klorofil akan rusak. Oleh karena itu, untuk memperoleh kandungan klorofil yang banyak, daun harus mendapat sinar matahari yang cukup[30]. Berdasarkan hal di atas, daun mangga yang baik digunakan sebagai *sensitizer* pada DSSC, yaitu daun mangga berwarna hijau tua yang terpapar sinar matahari yang cukup untuk mendapatkan kandungan klorofil yang lebih tinggi pada daun tersebut. Kandungan klorofil yang tinggi pada daun mangga dapat meningkatkan efisiensi sel DSSC.



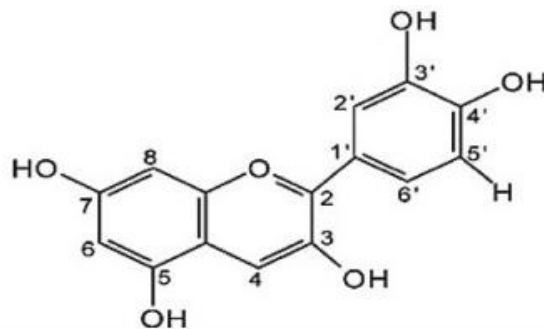
Gambar II.3 Daun mangga

II.5 Antosianin

Antosianin termasuk golongan senyawa flavonoid yang memberikan warna merah, ungu, dan biru pada beberapa buah, daun, dan bunga. Kata anthocyanin berasal dari kata Yunani " anthos ", yang berarti bunga dan " cyanos ", yang berarti biru. Antosianin adalah senyawa yang larut dalam air dengan pigmen kemerahan[31],[36]. Warna merah dan ungu pada buah dan bunga berasal dari struktur dasar antosianin, yang terdiri dari polihidroksiglikosida dan garam 2-fenil-1-benzopiridinium atau flavylium. Secara kimia, semua antosianin adalah turunan glikosida dari cyanidin. Antosianin adalah struktur di mana cincin aromatik terhubung ke cincin heterosiklik yang mengandung oksigen, delphinidin, geranium, yang melimpah di alam[36],[37].

Berdasarkan struktur kimianya, antosianin memiliki gugus karbonil dan hidroksil yang dapat membantu dalam transfer elektron ke pita konduksi karena dapat membentuk ikatan yang baik ke permukaan TiO₂. Antosianin dapat

digunakan sebagai *sensitizer* dalam DSSC karena mampu menyerap cahaya pada rentang panjang gelombang 520-550 nm. Semakin banyak sinar matahari yang dapat diserap pewarna, semakin tinggi efisiensi DSSC yang dihasilkan[28],[31]. Namun, stabilitas pigmen antosianin rendah. Beberapa faktor dapat mempengaruhinya yaitu suhu, pH, keberadaan enzim, penyimpanan, cahaya, oksidator, dan oksigen[36].



Gambar II.4 Struktur molekul antosianin[11]

II.6 Kulit Buah Naga sebagai *Dye Sensitizer*

Pada tahun 1870, karena penampilannya yang menarik dan cantik, tanaman buah naga pertama kali dibawa ke Vietnam di kawasan Indochina oleh warga Perancis dari Guiana (Amerika Serikat) sebagai tanaman hias. Pada tahun 1997, buah naga ini berhasil dibawa ke Indonesia dan mulai dibudidayakan karena rasanya yang enak dan memberikan berbagai manfaat bagi kesehatan manusia[38]. Buah naga merupakan salah satu tanaman tropis yang memiliki daya adaptasi yang kuat terhadap lingkungan dan perubahan cuaca seperti cahaya, curah hujan, dan angin.

Berdasarkan warna kulit dan dagingnya, buah naga diklasifikasikan menjadi empat spesies buah yaitu buah naga daging merah (*Hylocereus polyrhizus*), buah naga daging super merah (*Hylocereus costaricensis*), buah naga daging putih (*Hylocereus undatus*), dan buah naga kulit kuning daging putih (*Selenicereus megalanthus*)[38].

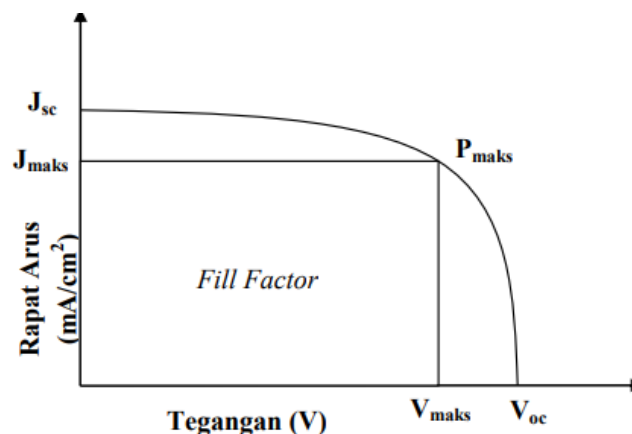


Gambar II.5 Kulit buah naga

30-35% buah naga adalah kulitnya, jika kulit buah naga dibuang akan mencemari lingkungan. Banyak peneliti yang telah mencoba memanfaatkan limbah kulit buah naga, salah satunya sebagai *dye sensitizer* di DSSC[39]. Menurut Sinta marito et al[40], *sensitizer* pewarna alami dari kulit buah naga merah memiliki kandungan antosianin yang lebih tinggi dibandingkan dengan pewarna alami lainnya seperti kulit manggis dan rosella sehingga pada penelitian tersebut pewarna alami yang digunakan adalah kulit buah naga merah. Warna merah pada kulit buah naga didapatkan dari antosianin pada flavonoid. Antosianin pada kulit buah naga dapat digunakan sebagai *dye sensitizer* pada DSSC karena dapat menyerap cahaya pada rentang panjang gelombang 450-580 nm[32],[39].

II.7 Efisiensi Solar Sel (DSSC)

Kinerja fotovoltaik DSSC menggunakan pewarna alami dapat ditentukan dengan metode kurva arus dan tegangan (I-V). Beberapa parameter yang digunakan dalam pengukuran efisiensi sel DSSC yaitu arus hubung singkat (I_{sc}), tegangan rangkaian terbuka (V_{oc}), arus maksimum (I_{maks}), tegangan maksimum (V_{maks}), dan fill faktor (FF)[41].



Gambar II.6 Kurva I-V (DSSC)

a. Tegangan rangkaian terbuka (V_{oc})

Tegangan rangkaian terbuka (V_{oc}) merupakan beda potensial dalam rangkaian terbuka pada saat arus sama dengan nol[11].

b. Arus hubungan pendek (I_{sc})

Arus hubung singkat (I_{sc}) adalah arus yang didapatkan ketika tegangan yang melewati sel surya sama dengan nol. Arus hubung singkat sangat berkaitan dengan kinerja fotoanoda dan elektroda lawan. Bila efisiensi pemanenan cahaya yang dilakukan oleh fotoanoda dan elektroda lawan meningkat, maka nilai arus hubung singkat I_{sc} juga akan meningkat[18].

c. Fill faktor (FF)

Faktor pengisian (*fill faktor*) adalah perbandingan daya maksimum yang dikeluarkan terhadap hasil kali ($V_{oc} \times J_{sc}$) yang didefinisikan ke dalam persamaan berikut:

$$FF = \frac{V_{maks}J_{maks}}{V_{oc}J_{sc}} \quad (2.1)$$

Dimana,

V_{maks} = tegangan maksimum (mV)

J_{maks} = rapat arus maksimum (mA/cm²)

V_{oc} = tegangan rangkaian terbuka (mV)

J_{sc} = rapat arus hubung singkat (mA/cm²)

d. Efisiensi konversi energi (η)

Efisiensi konversi energi listrik yang dihasilkan terhadap energi matahari yang masuk secara keseluruhan dari sel surya didefinisikan sebagai rasio output maksimum sel dibagi dengan daya input cahaya insiden. Efisiensi sel dapat dihitung menggunakan persamaan berikut:

$$\eta = \frac{J_{sc} \times V_{oc} \times FF}{P_{in}} \quad (2.2)$$

Dimana,

FF = faktor pengisian (*fill faktor*)

P_{in} = daya input (W/m²)