

SKRIPSI

**PENGARUH KOMPOSISI CAMPURAN ANTOSIANIN UBI JALAR
UNGU (*Ipomoea Batatas L.*) DAN KLOOROFIL DAUN PEPAYA (*Carica
papaya*) TERHADAP EFISIENSI DSSC**

OLEH :

**ANRIYAN
D021171010**



**DEPARTEMEN TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS HASANUDDIN
MAKASSAR
2022**

SKRIPSI

**PENGARUH KOMPOSISI CAMPURAN ANTOSIANIN UBI JALAR
UNGU (*Ipomoea Batatas L.*) DAN KLOOROFIL DAUN PEPAYA (*Carica
papaya*) TERHADAP EFISIENSI DSSC**

OLEH :

**ANRIYAN
D021171010**

**Merupakan salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik
Mesin pada Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin**

**DEPARTEMEN TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS HASANUDDIN
MAKASSAR
2022**

LEMBAR PENGESAHAN

Tugas akhir ini diajukan untuk memenuhi salah satu persyaratan mengikuti Ujian Akhir guna memperoleh gelar Sarjana Teknik Mesin pada Departemen Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin

Pada tanggal 18 Oktober 2022 dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan

JUDUL :

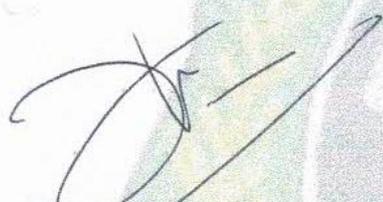
PENGARUH KOMPOSISI CAMPURAN ANTOSIANIN UBI JALAR UNGU (*Ipomoea Batatas L.*) DAN KLOROFIL DAUN PEPAYA (*Carica papaya*) TERHADAP EFISIENSI DSSC

ANRIYAN
D021171010

Telah diperiksa dan disetujui oleh :

Dosen Pembimbing I

Dosen Pembimbing II


Azwar Hayat, ST., M.Sc., Ph.D

NIP. 19840126 201212 1 002


Dr. Eng. Jalaluddin, ST., MT

NIP. 19720825 200003 1 001

Mengetahui,
Ketua Departemen Teknik Mesin
Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin




Dr. Eng. Jalaluddin, ST., MT

NIP. 19720825 200003 1 001

PERNYATAAN KEASLIAN

Yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Anriyan
NIM : D021 17 1010
Program Studi : Teknik Mesin
Jenjang : S1

Menyatakan dengan ini bahwa karya tulisan saya berjudul

**PENGARUH KOMPOSISI CAMPURAN ANTOSIANIN UBI JALAR
UNGU (*Ipomoea Batatas L.*) DAN KLOOROFIL DAUN PEPAYA (*Carica
papaya*) TERHADAP EFISIENSI DSSC**

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

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

Gowa, 18 Oktober 2022

Yang Menyatakan



Anriyan

DAFTAR RIWAYAT HIDUP

Nama : Anriyan

Tempat Tanggal Lahir : Jeneponto, 9 Mei 1998

Jenis kelamin : Laki-laki

Kebangsaan : Indonesia

Agama : Islam

No.HP/WA : 085398897551

Email : anriyan2@gmail.com

Alamat : Pekang Labbu

Riwayat Pendidikan : 1. SD Negeri 6 Kasuara
2. SMP Negeri 2 Bulukumba
3. SMA Negeri 1 Bulukumba

Riwayat Organisasi : 1. Himpunan Mahasiswa Mesin Fakultas Teknik
Universitas Hasanuddin
2. Unit Kegiatan Mahasiswa Keilmuan dan Penalaran
Ilmiah Universitas Hasanuddin

Pengalaman Kerja :



ABSTRAK

ANRIYAN (D021171010). Pengaruh Komposisi Campuran Antosianin Ubi Jalar Ungu (*Ipomoea Batatas L.*) dan Klorofil Daun Pepaya (*Carica papaya*) terhadap Efisiensi DSSC (Dibimbing oleh Azwar Hayat, ST., M.Sc., Ph.D dan Dr. Ir. Eng. Jalaluddin, ST., MT).

DSSC merupakan salah satu pilihan energi alternatif yang berpotensi untuk dikembangkan dalam mengatasi krisis energi dunia. Telah dilakukan fabrikasi dan karakterisasi *Dye Sensitized Solar Cell* (DSSC) hasil ekstraksi *dye* ubi jalar ungu (*Ipomoea Batatas L.*), *dye* daun pepaya (*Carica papaya*), dan campuran keduanya (Cocktail) dengan struktur *sandwich* menggunakan pasta TiO_2 yang dideposisi pada kaca konduktif dengan metode *doctor blade*. Penelitian ini dilakukan untuk mengetahui pengaruh komposisi campuran dan pengaruh lama perendaman campuran *dye* antosianin ubi jalar ungu dan *dye* klorofil daun pepaya terhadap efisiensi DSSC. Penelitian dilakukan dengan variasi *dye*, dan variasi lama perendaman kaca substrat yang telah dilapisi semikonduktor TiO_2 dengan lama perendaman 12 jam, 24 jam dan 48 jam. Pengujian dilakukan untuk mengukur tegangan dan arus dengan menggunakan multimeter dengan sumber cahaya lampu LED 20 Watt. Dari hasil pengujian diperoleh tegangan dan arus yang lebih tinggi dan stabil pada DSSC dengan *dye cocktail* UJU:DP (1:3) dari pada DSSC dengan *dye cocktail* UJU:DP (1:1), *dye cocktail* UJU:DP (3:1), *dye* ubi jalar ungu maupun dari pada DSSC dengan *dye* daun pepaya. Sedangkan pada variasi lama perendaman, tegangan dan arus yang dihasilkan oleh DSSC dengan lama perendaman 48 jam lebih tinggi dan stabil dari pada DSSC dengan lama perendaman 24 jam dan 12 jam. Sehingga diperoleh efisiensi tertinggi pada variasi komposisi campuran UJU:DP (1:3) dengan lama perendaman 48 jam sebesar 0,68086 %.

Kata Kunci : *Sel Surya, Dye Sensitized Solar Cell (DSSC), Ubi Jalar Ungu (Ipomoea Batatas L.), Daun Pepaya (Carica papaya), Dye Cocktail.*

ABSTRACT

ANRIYAN (D021171010). Effect of Mixed Composition Anthocyanin of Purple Sweet Potato (*Ipomoea Batatas L.*) and Chlorophyll of Papaya Leaf (*Carica papaya*) on DSSC Efficiency (Supervised by Azwar Hayat, ST., M.Sc., Ph.D dan Dr. Ir. Eng. Jalaluddin, ST., MT).

DSSC is an alternative energy option that has the potential to be developed in overcoming the world energy crisis. Fabrication and characterization of Dye Sensitized Solar Cell (DSSC) extracted from purple sweet potato dye (*Ipomoea Batatas L.*), papaya leaf dye (*Carica papaya*), and a mixture of the two (Cocktail) with a sandwich structure using TiO₂ paste deposited on conductive glass by the method doctor blades. The research was conducted to determine the effect of the composition of the mixture and the effect of immersion time on a mixture of purple sweet potato anthocyanin dye and papaya leaf chlorophyll dye on the efficiency of DSSC. The research was conducted with variations of dye, and variations of immersion time of glass substrate that has been coated with a TiO₂ semiconductor with immersion time of 12 hours, 24 hours and 48 hours. Tests were carried out to measure voltage and current using a multimeter with a 20 Watt LED light source. From the test results obtained higher and more stable voltage and current on DSSC with dye cocktail UJU:DP (1:3) than DSSC with dye cocktail UJU:DP (1:1), dye cocktail UJU:DP (3:1), purple sweet potato dye or from DSSC with papaya leaf dye. Meanwhile, in the variation of immersion time, the voltage and current produced by DSSC with a duration of immersion of 48 hours were higher and more stable than DSSC with a duration of immersion of 24 hours and 12 hours. So, the highest efficiency is obtained in the variation of the composition of the mixture of UJU:DP (1:3) with an immersion time of 48 hours of 0,68086 %.

Keywords: *Solar Cells, Dye Sensitized Solar Cell (DSSC), Purple Sweet Potato (Ipomoea Batatas L.), Papaya Leaf (Carica papaya), Dye Cocktail.*

KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan kehadirat Allah SWT, karena berkat rahmat dan karunia-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan tugas akhir ini yang berjudul **“PENGARUH KOMPOSISI CAMPURAN ANTOSIANIN UBI JALAR UNGU (*Ipomoea Batatas L.*) DAN KLOOROFIL DAUN PEPAYA (*Carica papaya*) TERHADAP EFISIENSI DSSC”**.

Penyusunan tugas akhir ini merupakan salah satu syarat dalam menyelesaikan studi untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik pada Departemen Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin Makassar.

Banyak kendala yang dihadapi oleh penulis dalam rangka penyusunan tugas akhir ini, berbagai pihak telah banyak memberikan dorongan, bantuan serta masukan sehingga dalam kesempatan ini penulis dengan tulus menyampaikan terima kasih kepada:

1. Kedua orang tua tercinta Ayahanda Kadir dan Almarhumah Ibunda Layu serta seluruh keluarga besar yang selalu memberikan doa yang tak henti-hentinya kepada penulis, nasihat, semangat hingga motivasi selama menyelesaikan skripsi hingga akhir.
2. Prof. Dr. Eng. Ir. Muhammad Isran Ramli, S.T., M.T. selaku Dekan Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.
3. Dr. Ir. Eng. Jalaluddin, ST., MT. Sebagai Ketua Departemen Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin beserta seluruh staf Departemen Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin atas segala bantuan dan kemudahan yang diberikan.
4. Azwar Hayat, ST., M.Sc., Ph.D. dan Dr. Ir. Eng. Jalaluddin, ST., MT. Sebagai Dosen Pembimbing I dan Dosen Pembimbing II yang telah memberikan waktu, arahan, dan saran selama proses pengerjaan skripsi ini.
5. Dr. Eng. Lukmanul Hakim Arma, ST., MT., dan Dr. Hairul Arsyad, ST., MT., selaku penguji yang telah memberikan saran-saran selama proses pengerjaan skripsi.

6. Bapak/Ibu dosen Departemen Teknik Mesin Universitas Hasanuddin yang telah memberikan ilmu, nasehat dan pengalaman kepada penulis selama menempuh studi di dunia perkuliahan.
7. Seluruh teman-teman mahasiswa Teknik Mesin khususnya Angkatan 2017 ZYNCROMESH. Terimakasih atas bantuan dan dukungan serta semangatnya.
8. Partner penelitian kak Wahyu Budiman yang telah banyak membantu memberikan bantuan dan motivasi kepada penulis.
9. Serta seluruh pihak yang telah membantu yang tidak bisa disebutkan satu per satu.

Penulis menyadari bahwa naskah tugas akhir ini masih banyak kekurangan oleh karena itu segala kritik dan saran dari pembaca sangat diharapkan demi perbaikan tugas akhir ini. Akhirnya semoga tugas akhir ini dapat memberikan manfaat bagi perkembangan rekayasa energi surya.

Gowa, 18 Oktober 2022

Penulis

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL.....	i
LEMBAR PENGESAHAN.....	iii
PERNYATAAN KEASLIAN.....	iv
DAFTAR RIWAYAT HIDUP.....	v
ABSTRAK.....	vi
KATA PENGANTAR.....	viii
DAFTAR ISI.....	x
DAFTAR TABEL.....	xii
DAFTAR GAMBAR.....	xiii
DAFTAR ISTILAH.....	xvi
BAB I PENDAHULUAN	
A. Latar Belakang.....	1
B. Rumusan Masalah.....	4
C. Tujuan Penelitian.....	4
D. Batasan Masalah.....	5
E. Manfaat Penelitian.....	5
BAB II TEORI DASAR	
A. Sel Surya.....	6
B. <i>Dye Sensitized Solar Cell</i> (DSSC).....	8
C. Material DSSC.....	11
D. Metode Pendeposisian DSSC.....	15
E. Ubi Jalar Ungu (<i>Ipomoea Batatas L.</i>).....	16
F. Pepaya (<i>Carica papaya</i>).....	18
G. <i>Spray Pyrolysis Deposition</i> (SPD).....	21

H. Spektrofotometer UV-Vis.....	22
I. Absorbansi.....	26
J. <i>Band Gap</i> Energi.....	28
K. Parameter Pengukuran.....	30
 BAB III METODOLOGI PENELITIAN	
A. Waktu dan Tempat.....	35
B. Alat dan Bahan.....	35
C. Diagram Alir (<i>Flow Chart</i>).....	36
D. Metode Penelitian.....	37
E. Prosedur Penelitian.....	37
F. Karakterisasi dan Pengujian.....	41
 BAB IV PEMBAHASAN	
A. Hasil Analisis.....	43
A.1 Kaca Konduktif.....	43
A.2 Pelapisan Elektroda TiO ₂	45
A.3 Ekstraksi <i>Dye</i>	46
A.4 Hasil Karakterisasi UV-Vis.....	52
A.5 Hasil Pengukuran Arus dan Tegangan.....	59
A.6 Hasil Perhitungan Efisiensi DSSC.....	74
B. Evaluasi.....	78
 BAB V PENUTUP	
A. Kesimpulan.....	80
B. Saran.....	81
DAFTAR PUSTAKA.....	83
 LAMPIRAN	
Lampiran 1. Hasil Pengujian UV-Vis.....	90
Lampiran 2. Hasil Pengujian dan Perhitungan DSSC.....	100
Lampiran 3. Dokumentasi.....	108
Lampiran 4. Persuratan.....	112

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1	Spektrum gelombang cahaya tampak.....	26
Tabel 2.2	Nilai <i>luminous efficacy</i> dari berbagai jenis sumber cahaya.....	34
Tabel 4.1	Nilai absorbansi dan panjang gelombang dari <i>dye</i> ubi jalar..... dan <i>dye</i> daun pepaya	53
Tabel 4.2	Nilai absorbansi dan panjang gelombang dari <i>dye</i> campuran..... ubi jalar ungu dan daun pepaya	55
Tabel 4.3	Hasil pengujian arus, tegangan, dan efisiensi <i>dye</i> ubi jalar..... ungu	62
Tabel 4.4	Hasil pengujian arus, tegangan, dan efisiensi <i>dye</i> daun pepaya.....	63
Tabel 4.5	Hasil pengujian arus, tegangan, dan efisiensi <i>dye</i> campuran..... (<i>cocktail</i>)	66
Tabel 4.6	Hasil pengukuran suhu DSSC.....	73
Tabel 4.7	Hasil perhitungan efisiensi DSSC.....	75

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	(a) Sel surya silikon, (b) Sel surya film tipis, (c) DSSC.....	6
Gambar 2.2	Proses pengubahan energi matahari menjadi energi listrik..... pada sel surya	8
Gambar 2.3	Struktur <i>Dye Sensitized Solar Cell</i> (DSSC).....	9
Gambar 2.4	Ilustrasi prinsip kerja DSSC.....	10
Gambar 2.5	Ubi jalar ungu (<i>Ipomoea batatas L.</i>).....	16
Gambar 2.6	Struktur kimia antosianin.....	17
Gambar 2.7	Ikatan khelat yang terjadi antara gugus Ti^{4+} dengan..... molekul antosianin	18
Gambar 2.8	Daun papaya (<i>Carica papaya L.</i>).....	18
Gambar 2.9	Struktur kimia klorofil.....	19
Gambar 2.10	Pengikatan TiO_2 dengan zat warna klorofil.....	20
Gambar 2.11	Skema dari metode <i>spray pyrolysis deposition</i>	22
Gambar 2.12	Instrument spektrofotometer UV-Vis.....	23
Gambar 2.13	Absorbansi sinar UV-Vis oleh material.....	24
Gambar 2.14	Spektrum gelombang cahaya tampak.....	25
Gambar 2.15	Absorpsi cahaya oleh sampel.....	27
Gambar 2.16	<i>Band gap</i> energi semikonduktor.....	28
Gambar 2.17	Bentuk khusus dari kurva I-V <i>solar cell</i>	30
Gambar 2.18	Spektrum pancaran matahari.....	34

Gambar 3.1	<i>Flow chart</i> penelitian.....	36
Gambar 3.2	Struktur DSSC pada penelitian ini.....	41
Gambar 3.3	Skema rangkaian pengujian I-V pada divasi DSSC.....	42
Gambar 4.1	(a) Proses penyemprotan larutan SnCl ₂ pada kaca substrat,..... (b) Kaca substrat yang telah dilapisi larutan SnCl ₂	44
Gambar 4.2	Pengukuran nilai resistansi pada kaca konduktif yang telah di <i>sintering</i>	44
Gambar 4.3	a) Pembuatan batas pelapisan TiO ₂ , (b) Proses pelapisan..... lapisan tipis TiO ₂ dengan spatula	45
Gambar 4.4	Penimbangan (a) daging ubi jalar ungu dan (b) daun..... pepaya sebelum dihaluskan dan dicampurkan pelarut	46
Gambar 4.5	Proses penyaringan ekstrak (a) ubi jalar ungu dan..... (b) daun pepaya dengan menggunakan kertas saring	47
Gambar 4.6	Hasil penyaringan ekstrak (a) ubi jalar ungu dan..... (b) daun pepaya	47
Gambar 4.7	Hasil ekstraksi (a) ubi jalar ungu, (b) daun pepaya,..... (c) <i>cocktail</i> UJU:DP (1:3), (d) <i>cocktail</i> UJU:DP (1:1) dan (e) <i>cocktail</i> UJU:DP (3:1)	48
Gambar 4.8	Perendaman kaca yang telah dilapisi TiO ₂ pada <i>dye</i>	49
Gambar 4.9	Spektrum FTIR ubi jalar ungu.....	50
Gambar 4.10	Spektrum FTIR daun pepaya.....	51
Gambar 4.11	Grafik hasil analisa UV-Vis <i>dye</i> ubi jalar ungu dan <i>dye</i> daun pepaya	53
Gambar 4.12	Grafik hasil analisa UV-Vis <i>dye</i> campuran UJU:DP (1:3),..... UJU:DP (1:1) dan UJU:DP (3:1)	54

Gambar 4.13	Grafik hasil analisa UV-Vis <i>dye</i> ubi jalar ungu, <i>dye</i> daun.....	56
	pepaya, <i>dye</i> campuran UJU:DP (1:3), <i>dye</i> campuran UJU:DP (1:1), dan <i>dye</i> campuran UJU:DP (3:1)	
Gambar 4.14	<i>Band gap</i> energi <i>dye</i> ubi jalar ungu.....	57
Gambar 4.15	<i>Band gap</i> energi <i>dye</i> daun pepaya.....	57
Gambar 4.16	<i>Band gap</i> energi <i>dye</i> UJU:DP (1:3).....	57
Gambar 4.17	<i>Band gap</i> energi <i>dye</i> UJU:DP (1:1).....	58
Gambar 4.18	<i>Band gap</i> energi <i>dye</i> UJU:DP (3:1).....	58
Gambar 4.19	Grafik lama perendaman <i>dye</i> tunggal terhadap tegangan.....	61
Gambar 4.20	Grafik lama perendaman <i>dye</i> tunggal terhadap arus.....	61
Gambar 4.21	Kurva I-V <i>dye</i> tunggal.....	61
Gambar 4.22	Grafik lama perendaman <i>dye</i> campuran terhadap tegangan.....	64
Gambar 4.23	Grafik lama perendaman <i>dye</i> campuran terhadap arus.....	64
Gambar 4.24	Kurva I-V <i>dye</i> campuran.....	65
Gambar 4.25	Kurva I-V semua <i>dye</i>	67
Gambar 4.26	Grafik waktu pengujian DSSC terhadap suhu.....	72
Gambar 4.27	Grafik lama perendaman terhadap efisiensi DSSC.....	74

DAFTAR ISTILAH

AM	: <i>Amplitudo Modulation</i>
CE	: <i>Counter-Elektrode</i>
DP	: Daun Pepaya
DSSC	: <i>Dye Sensitized Solar Cell</i>
FF	: <i>Fill Factor</i>
FTO	: <i>Flourine Tin Oxide</i>
HEC	: <i>Hidroxy Ethyl Cellulose</i>
HOMO	: <i>High Occupied Molecular Orbital</i>
Isc	: <i>Short Circuit Current</i>
ITO	: <i>Indium Tin Oxide</i>
LPD	: <i>Liquid Phase Deposition</i>
LUMO	: <i>Low Unoccupied Molecular Orbital</i>
MOCVD	: <i>Metal Organic Chemical Vapour Deposition</i>
MPP	: <i>Maximum Power Point</i>
PEG	: <i>Polyethylene Glycol</i>
PV	: <i>Photovoltaic</i>
SPD	: <i>Spray Pyrolysis Deposition</i>
TCO	: <i>Transparant Conductive Oxide</i>
UJU	: Ubi Jalar Ungu
Voc	: <i>Open Circuit Voltage</i>
WE	: <i>Working Electrode</i>

BAB I

PENDAHULUAN

A. Latar Belakang

Energi merupakan suatu hal yang tidak dapat dipisahkan dengan manusia saat ini karena ketergantungan manusia akan energi tersebut. Energi yang paling banyak digunakan saat ini adalah energi fosil yang keberadaannya kian lama semakin berkurang karena penggunaannya yang tidak terkontrol sehingga menjadi suatu permasalahan yang harus segera ditangani. Oleh karena itu peneliti dunia mulai berlomba-lomba mencari cara menciptakan energi alternatif yang dapat memenuhi kebutuhan manusia, dimana energi yang dihasilkan dapat diperbaharui. Salah satu energi yang dapat diperbaharui yaitu energi yang berasal dari matahari atau surya, dimana terdapat beberapa cara untuk memanfaatkan energi tersebut yang salah satunya yaitu dengan mengubahnya menjadi energi listrik dengan menggunakan sel surya atau *solar cell*.

Sel surya atau *solar cell* merupakan salah satu pembangkit listrik terbarukan yang sangat potensial untuk digunakan masa mendatang. Sel surya atau *solar cell* bekerja dengan cara mengkonversi cahaya matahari secara langsung yang berupa radiasi matahari menjadi energi listrik sehingga sel surya atau *solar cell* ini sangat cocok digunakan di wilayah tropis seperti di Indonesia. Indonesia sebagai Negara tropis mempunyai banyak wilayah yang disinari matahari dengan baik sehingga penggunaan sel surya di Indonesia menjadi alternatif yang sangat menjanjikan dalam menghasilkan energi yang terbarukan dimasa mendatang. Namun penggunaan sel surya atau *solar cell* masih terbilang cukup mahal, hal tersebut dikarenakan bahan utama pembuatannya adalah silikon yang dalam proses fabrikasi atau produksinya cukup mahal sehingga harganya menjadi lebih mahal dari pada sumber energi dari fosil. Maka dari itu diperlukannlah sel surya yang harganya relatif lebih murah tetapi dengan kinerja sel yang tinggi. Salah satu solusi untuk mengatasi hal tersebut yaitu dengan cara pembuatan sel surya organik. Sel ini

terbuat dari ekstrak bahan organik dengan fabrikasi yang lebih mudah, sederhana tanpa menggunakan peralatan yang canggih dan mahal serta dengan bentuk yang fleksibel dan beraneka warna.

Sel surya organik menggunakan zat warna organik sebagai *dye*-nya yang dikenal dengan *Dye Sensitized Solar Cell* (DSSC). DSSC merupakan salah satu sumber energi yang bagus dikembangkan untuk masa yang akan datang karena biaya produksinya yang relatif murah. Berbeda dengan sel surya konvensional dimana semua proses melibatkan material silikon itu sendiri, pada DSSC absorpsi cahaya dan separasi muatan listrik terjadi pada proses yang terpisah dimana absorpsi cahaya dilakukan oleh molekul *dye* sedangkan separasi muatan dilakukan oleh semikonduktor ionorganik nanokristal (Maulana, 2021). DSSC mengkonversi cahaya tampak menjadi listrik dengan menggunakan sistem fotoelektrokimia. DSSC terdiri atas fotoanoda dari kaca TCO (*Transparent Conductive Oxide*) dengan substrat ITO (*Indium tin oxide*) yang dilapisi semikonduktor seperti TiO_2 , ZnO , SnO_2 , Nb_2O_5 dengan berbagai metode seperti *doctor blade*, *screen printing*, elektroposisi, dan *spin coating* (Dwioknain, 2018).

Pada umumnya pewarna (*dye*) yang digunakan pada DSSC merupakan pewarna sintesis atau non-organik seperti *ruthenium complex* dan PGE (Maharditya, 2019). Namun *dye* sintesis memiliki kelemahan diantaranya harganya yang cukup mahal dan juga mengandung logam berat yang tidak baik untuk lingkungan (Pera, 2018). Maka dari itu pewarna organik digunakan sebagai pengganti pewarna non-organik tersebut karena mempunyai biaya produksi yang murah, ketersediaannya melimpah di alam, tidak berbahaya dan tidak beracun (Maharditya, 2019). Salah satu sumber pewarna organik adalah berbagai jenis tanaman dimana bagian yang digunakan adalah pigmen aktif organik yang dapat ditemukan pada bagian tanaman yang meliputi bunga, daun, buah-buahan, kulit buah dan akar (Wulandari, 2019). Pigmen aktif organik tersebut adalah suatu zat yang berupa pigmen warna yang ada pada komponen tumbuhan seperti klorofil, antosianin, karoten, kurkumin, dan pigmen warna lainnya yang dapat

digunakan sebagai *sensitizer* dalam DSSC. Zat dalam bentuk pigmen inilah yang dapat diolah menjadi pewarna alami (*natural dye*) (Santika, 2021). Beragam ekstrak tumbuhan telah dimanfaatkan sebagai *sensitizer* di DSSC seperti bunga kenikir (Pera, 2019), daun sambang darah (Maharditya, 2019), jantung pisang (Wulandari, 2019) dan buah senduduk (Yuniawati, 2021). *Dye* alami tersebut mampu memberikan efek *photovoltaic* meskipun memiliki efisiensi yang lebih rendah yaitu sebesar 1% - 2,5% dibandingkan dengan *dye* sintetik yang memiliki efisiensi sebesar 4% - 5% (Santika, 2021).

Terdapat beberapa faktor yang mempengaruhi besar kecilnya efisiensi DSSC, salah satunya adalah penggunaan jenis *dye* yang digunakan. *Dye* dengan daya sarap yang tinggi dapat membantu meningkatkan efisiensi DSSC. Meskipun *dye* alami lebih ramah lingkungan dan tersedia melimpah di alam dibandingkan *dye* sintesis, namun daerah serapan yang dimilikinya relatif sempit (Fistiani, Nurosyid dan Suryana, 2017). Maka dari itu diperlukan lebih dari satu jenis *dye* alami yang dicampurkan atau digabungkan untuk membuat daerah serapan absorbansinya menjadi lebih luas sehingga dapat meningkatkan nilai efisiensi DSSC. Menurut Manurung (2021) menyatakan bahwa pengaruh penggunaan *dye* campuran dapat meningkatkan efisiensi kerja DSSC. Hal tersebut terjadi karena pengaruh penggunaan *dye* campuran meningkatkan nilai absorbansi DSSC. *Dye* yang memiliki nilai absorbansi tertinggi adalah campuran *dye* buah naga-daun pandan yaitu sebesar 0,907% pada panjang gelombang 500 nm dibandingkan dengan *dye* tunggal sehingga menghasilkan efisiensi tertinggi sebesar 0,00283% dibandingkan efisiensi tertinggi dari *dye* tunggal yang besarnya sekitar 0,00207%. Dalam hal ini, mencampur lebih dari satu jenis *dye* alami akan berpengaruh terhadap performa DSSC yang akan dihasilkan. Selain pencampuran *dye* alami, pengaruh komposisi campuran *dye* juga berperan penting dalam menentukan tingkat efisiensi dari DSSC. Hal ini sejalan dengan penelitian yang dilakukan Fistiani, dkk. (2017) yang menyatakan bahwa campuran *dye* dengan perbandingan antosianin dari kol merah dengan klorofil dari daun bayam sebesar 1:3 akan meningkatkan absorbansi pada

panjang gelombang 400 nm hingga 450 nm dan memiliki efisiensi tertinggi sebesar 0,15%. Choiri (2020) juga mengatakan bahwa pengaruh campuran karotenoid kunyit dan klorofil daun pepaya menghasilkan absorbansi tertinggi pada variasi campuran (1:1) sebesar 1,8697 % (a.u) pada panjang gelombang 494 nm, sedangkan nilai absorbansi terendah pada variasi campuran (1:3) sebesar 1,5095 pada panjang gelombang 489 nm. Nilai efisiensi terbesar dihasilkan pada variasi campuran (1:1) sebesar 0,309%, sedangkan nilai efisiensi terendah pada variasi campuran (3:1) sebesar 0,219%.

Berdasarkan penelitian-penelitian sebelumnya maka penulis berinisiatif melakukan penelitian dengan tujuan untuk meningkatkan nilai efisiensi DSSC berbahan organik mendekati efisiensi DSSC berbahan sintetik dengan cara mencampurkan dua jenis *dye* yang berbeda yaitu antosianin ubi jalar ungu dan klorofil daun pepaya dengan berbagai variasi komposisi campuran antosianin dan klorofil (1:3, 1:1, dan 3:1) dengan judul penelitian **“Pengaruh Komposisi Campuran Antosianin Ubi Jalar Ungu (*Ipomoea Batatas L.*) Dan Klorofil Daun Pepaya (*Carica papaya*) Terhadap Efisiensi DSSC”**.

B. Rumusan Masalah

Adapun rumusan masalah dalam penelitian ini adalah :

1. Bagaimana pengaruh komposisi campuran *dye* antosianin ubi jalar ungu dan *dye* klorofil daun pepaya terhadap efisiensi kerja *Dye Sensitized Solar Cell* (DSSC)?
2. Bagaimana pengaruh lama perendaman komposisi campuran *dye* antosianin ubi jalar ungu dan *dye* klorofil daun pepaya terhadap efisiensi kerja *Dye Sensitized Solar Cell* (DSSC)?

C. Tujuan Penelitian

Adapun tujuan dari penelitian adalah :

1. Mengidentifikasi pengaruh komposisi campuran *dye* antosianin ubi jalar ungu dan *dye* klorofil daun pepaya terhadap efisiensi kerja *Dye Sensitized Solar Cell* (DSSC).

2. Mengidentifikasi pengaruh lama perendaman komposisi campuran *dye* antosianin ubi jalar ungu dan *dye* klorofil daun pepaya terhadap efisiensi kerja *Dye Sensitized Solar Cell* (DSSC).

D. Batasan Masalah

Adapun batasan masalah dalam penelitian adalah sebagai berikut :

1. Material semikonduktor TiO_2 (*Titanium Dioxide*).
2. Deposisi larutan TiO_2 dengan metode *doctor blade*.
3. *Dye* alami yang digunakan adalah ekstrak daging ubi jalar ungu dan ekstrak daun pepaya dengan menggunakan metode *cocktail* (1:3, 1:1, 3:1).
4. Variasi waktu perendaman lapisan TiO_2 pada ekstrak *dye* yaitu selama 12 jam, 24 jam, dan 48 jam.
5. Penyusunan DSSC disusun secara *sandwich*.
6. Rangkaian DSSC kemudian dikarakterisasi berdasarkan sifat listriknya yang berupa efisiensi.

E. Manfaat Penelitian

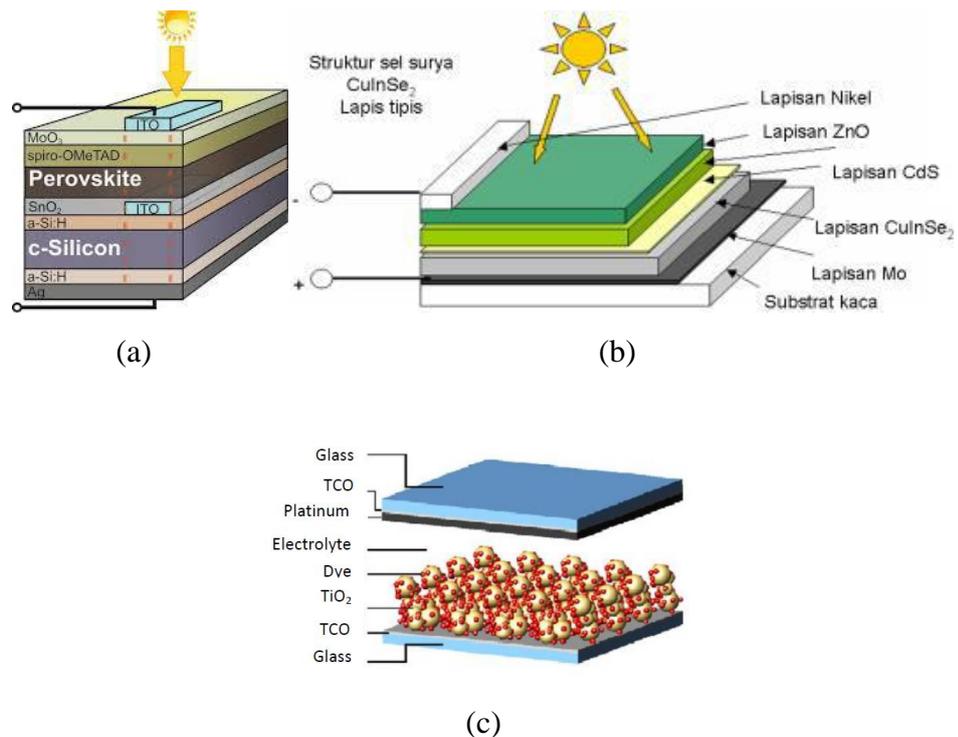
Adapun manfaat dari penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Dapat memberikan informasi kepada masyarakat dan peneliti mengenai potensi bahan semikonduktor TiO_2 terhadap *Dye Sensitized Solar Cell* (DSSC).
2. Memberikan informasi mengenai pengaruh komposisi campuran *dye* antosianin ubi jalar ungu dan *dye* klorofil daun pepaya terhadap efisiensi kerja *Dye Sensitized Solar Cell* (DSSC).
3. Sebagai referensi penelitian DSSC selanjutnya.

BAB II TEORI DASAR

A. Sel Surya

Sel surya (solar cell) atau yang juga dikenal dengan nama PV (*Photovoltaic*) merupakan pembangkit listrik yang mampu mengkonversi sinar matahari menjadi arus listrik. Fotovoltaik terdiri dari dua kata yaitu photo dan volt, photo yang diturunkan dari bahasa Yunani untuk cahaya dan volt yang berhubungan dengan listrik. Sehingga secara bahasa, fotovoltaik dapat diartikan cahaya-listrik. Yaitu proses perubahan cahaya (foton) menjadi listrik (voltase) disebut efek fotovoltaik (Sari, 2021). Berdasarkan perkembangan teknologi saat ini, sel surya dibedakan menjadi tiga generasi yaitu generasi pertama, sel surya yang terbuat dari silikon tunggal dan silikon multi kristal. Generasi kedua, sel surya tipe lapisan tipis (Misalnya, Sel surya polimer) dan generasi ketiga salah satunya sel surya organik (*Dye Sensitized Solar Cell*) (Dwioknain, 2018)



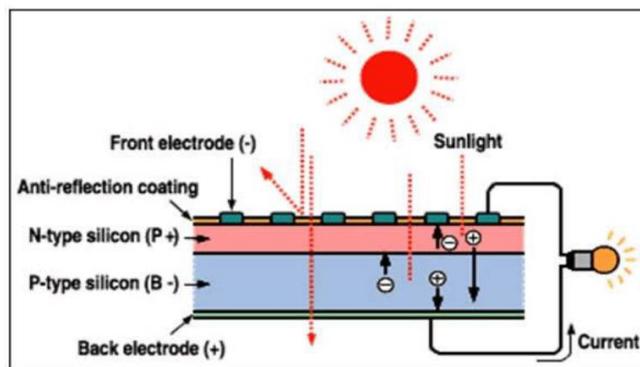
Gambar 2.1 (a) Sel surya silikon, (b) Sel surya film tipis, (c) DSSC (Manurung, 2021 dan Afandi, 2016)

Gambar 2.1 merupakan beberapa jenis sel surya yang telah berhasil dikembangkan. Generasi pertama sel surya (Gambar 2.1 (a)) adalah sel surya dengan bahan dasar silikon kristal tunggal dan silikon multi kristal. Sel surya ini mempunyai efisiensi konversi energi sinar matahari yang paling tinggi diantara ketiga generasi sel surya yang lain, yakni mencapai 40%. Dibalik nilai efisiensi konversi energinya yang tinggi, sel surya ini memiliki beberapa kekurangan yang diantaranya adalah proses fabrikasinya yang susah dan mahal (Maharditya, 2019). Sel surya generasi kedua (Gambar 2.1 (b)) merupakan modifikasi dari sel surya generasi pertama yang disebut sel surya lapis tipis (*thin film solar cell*). Biaya produksi yang diperlukan pada generasi kedua ini lebih murah jika dibandingkan dengan generasi pertama tetapi efisiensinya lebih rendah (Mukarromah, 2016). Pembuatan sel surya generasi ketiga (Gambar 2.1 (c)) untuk memperbaiki kinerja perangkat sehingga meningkatkan jumlah arus listrik dibandingkan dengan sel surya generasi kedua namun mempertahankan biaya produksi tetap rendah. Sel surya generasi ketiga ini memiliki berbagai macam produk dengan inovasi yang potensial yaitu sel surya polimer, sel *nanocrystalline*, dan *dye-sensitized solar cells* (Choiroh, 2020).

Berdasarkan bahan yang digunakan untuk menangkap cahaya matahari sel surya dibedakan menjadi dua yaitu bahan anorganik dan organik. Sel Surya anorganik adalah sel surya yang menggunakan bahan-bahan anorganik untuk menangkap foton yang dipancarkan oleh matahari. Biasanya menggunakan silikon sebagai material yang menangkap energi foton yang dipancarkan oleh matahari. Sel surya organik menggunakan material organik atau *dye* untuk menangkap foton yang dipancarkan oleh sumber matahari. Material organik yang digunakan diperoleh dari pigmen tumbuhan, karoten, antosianin, klorofil, dan lain sebagainya. Pewarna (*dye*) yang digunakan dapat berlapis tunggal atau lebih. Hingga saat ini penggunaan pewarna (*dye*) secara berlapis masih terbatas. (Wulandari, 2019)

Prinsip kerja sel surya mengonversi energi surya menjadi energi listrik melalui beberapa tahapan proses yaitu yang pertama adalah absorpsi cahaya

dalam semikonduktor untuk menghasilkan muatan energi berupa kutub positif (tipe-p) dan kutub negatif (tipe-n), kemudian pembangkitan serta pemisahan muatan positif dan negatif bebas ke daerah-daerah lain dari sel surya untuk membangkitkan tegangan dalam sel surya, setelah itu muatan-muatan yang terpisah tersebut dipindahkan ke terminal-terminal listrik dalam bentuk aliran tenaga listrik. Pembentukan perbedaan tegangan pada sambungan kutub positif dan negatif dalam sel surya merupakan reaksi terhadap radiasi cahaya tampak yang digunakan untuk menghasilkan energi (Choiroh, 2020 dan Hutasuhut, 2021)



Gambar 2.2 Proses perubahan energi matahari menjadi energi listrik pada sel surya (Hutasuhut, 2021)

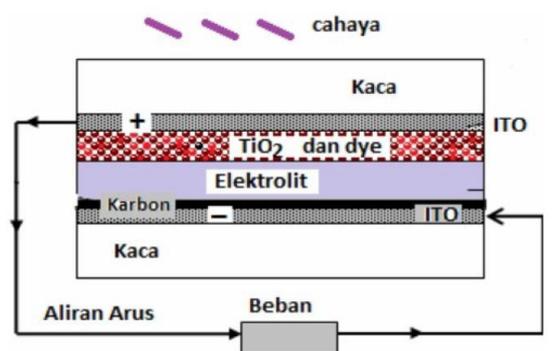
Keuntungan menggunakan sel surya diantaranya yaitu dapat mengkonversi langsung energi matahari menjadi energi listrik, ramah lingkungan serta tanpa emisi saat dioperasikan, dapat diintegrasikan pada bangunan atau konstruksi serta berbentuk modular sehingga jumlah sel surya yang dipakai dapat disesuaikan dengan kebutuhan (Wolf, 1977 dalam Maharditya, 2019).

B. *Dye Sensitized Solar Cell (DSSC)*

DSSC merupakan sel surya generasi ketiga yang dikembangkan pertama kali oleh professor Michael Gratzel pada tahun 1991 (Musaffa, 2018). Sebuah DSSC terdiri atas fotoanoda dari kaca TCO (*Tranparant Conductive Oxide*) jenis FTO (*Fluorine Tin Oxide*) yang dilapisi semikonduktor berband gap

tinggi seperti TiO_2 , ZnO , SnO_2 , Nb_2O_5 dan ditumbuhkan dengan berbagai metoda seperti *doctor blade*, *screen printing*, elektroposisi, *spin coating*, *tape casting*, *dip coating*, *liquid phase deposition (LPD)*, *metal organic chemical vapour deposition (MOCVD)* dan *Mix-solvent-thermal method*. Elektroda lawan (*counter electrode*) adalah kaca TCO yang dilapisi logam platina atau karbon. Di antara kedua elektroda terdapat zat elektrolit yang berfungsi menjaga transpor elektron dapat tetap berlangsung. (Dahlan, Tjiauw, dan Hermansyah, 2016).

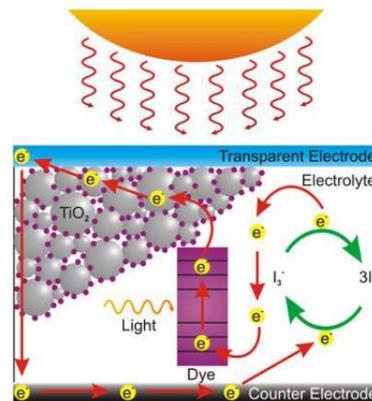
Pewarna merupakan bagian penting dari DSSC yang mampu menyerap cahaya dan mengirimkan elektron ke pita konduksi semikonduktor. Pewarna secara signifikan mempengaruhi keefektifan DSSC. Setiap pewarna harus memiliki beberapa karakteristik khusus seperti: a) absorpsi pada spektra kisaran cahaya tampak dan inframerah dekat, b) mengandung karboksil atau hidroksil yang dapat mengikat kuat dengan oksida semikonduktor untuk mendorong infus elektron ke celah pita konduksi semi konduktor, c) memiliki stabilitas yang baik dalam menyerap foton, d) HOMO (*Highest Occupied Molecular Orbital*) harus lebih rendah dari potensial redoks elektrolitnya, e) LUMO (*Lowest Unoccupied Molecular Orbital*) harus cukup tinggi dari pita konduksi semikonduktor (Soya dan Pirim, 2021).



Gambar 2.3 Struktur *Dye Sensitized Solar Cell (DSSC)* (Makrif, 2018)

Cara kerja dari *Dye Sensitized Solar Cell* ini adalah, apabila permukaan sel terkena sinar matahari, elektron-elektron *dye* dari level HOMO (*Highest Occupied Molecular Orbital*) tereksitasi ke tingkat energi LUMO (*Lowest Occupied Molecular Orbital*)

Unoccupied Molecular Orbital) dengan adanya foton yang berenergi sesuai. Prinsip kerja *Dye Sensitized Solar Cell* (DSSC) ini mirip dengan fungsi klorofil proses fotosintesis tumbuhan. Lapisan semikonduktor bertindak sebagai akseptor atau kolektor elektron yang ditransfer dari *dye* teroksidasi. Elektrolit redoks, yang terdiri dari pasangan iodida dan triiodida (I^-/I_3^-) bertindak sebagai mediator redoks sehingga dapat menghasilkan proses siklus di dalam sel (Makrif, 2018).



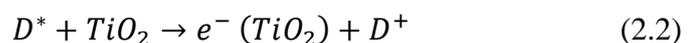
Gambar 2.4 Ilustrasi prinsip kerja DSSC (Manurung, 2021)

Prinsip kerja dari DSSC, pada dasarnya merupakan reaksi dari transfer elektron, meliputi (Hardianti, 2018; Manurung, 2021; dan Novhandi, 2018) :

1. Terjadinya eksitasi elektron pada molekul *dye* akibat absorpsi foton. Elektron tereksitasi dari *ground state* (D) ke *excited state* (D^*). Ketika foton dari sinar matahari menimpa elektroda kerja pada DSSC, energi foton tersebut diserap oleh larutan *dye* yang melekat pada permukaan partikel TiO_2 . Sehingga elektron dari *dye* mendapatkan energi untuk dapat tereksitasi (D^*).



2. Kemudian setelah eksitasi, elektron yang tereksitasi dari molekul *dye* langsung terinjeksi menuju pita konduksi atau *conduction band* (E_{CB}) titania (TiO_2) yang bertindak sebagai akseptor atau kolektor elektron sehingga molekul *dye* teroksidasi (D^+).



3. Elektron akan mengalir menuju elektroda CE (*Counter-Elektrode*) melalui rangkaian eksternal setelah mencapai elektroda WE (*Working Electrode*).
4. Elektrolit redoks biasanya berupa pasangan *iodine* dan *triiodine* (I^-/I_3^-) yang bertindak sebagai mediator elektron sehingga dapat menghasilkan proses siklus dalam suatu sel. 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.



Adanya katalis yang berupa molekul karbon pada elektroda CE (*Counter Electrode*), elektron diterima oleh elektrolit sehingga *hole* yang terbentuk pada elektrolit (I_3^-), akibat donor elektron pada proses sebelumnya, berekombinasi dengan elektron membentuk *iodide* (I^-). *Iodide* ini digunakan untuk mendonor elektron kepada *dye* yang teroksidasi, sehingga terbentuk suatu siklus transfer elektron. kemudian dari siklus ini, secara langsung akan terjadi konversi cahaya matahari menjadi listrik.



5. Molekul yang tereksitasi masuk kembali ke dalam sel dan bereaksi dengan elektrolit menuju *dye* teroksidasi. Elektrolit menyediakan elektron pengganti untuk molekul *dye* teroksidasi. Sehingga *dye* kembali ke keadaan awal dengan persamaan reaksi:



C. Material DSSC

C.1 Substrat FTO (*Flourine Tin Oxide*)

Substrat yang digunakan pada DSSC yaitu jenis FTO (*Flourine Tin Oxide*) yang merupakan kaca transparan bersifat konduktif. Substrat pada kaca itu sendiri berfungsi sebagai pelindung sel surya dan tempat mengalirnya muatan yaitu lapisan konduktif (Manurung, 2021).

C.2 Semikonduktor TiO₂

Material semikonduktor adalah suatu padatan (solid) dan seperti logam, konduktivitas elektriknya juga ditentukan oleh elektron valensinya. Namun, berbeda dengan logam yang konduktivitasnya menurun dengan kenaikan temperatur, konduktivitas dari material semikonduktor ini akan meningkat secara *significant*. Material semikonduktor merupakan bahan yang secara umum digunakan sel surya sebagai penghasil elektron bebas (Baqi, 2016).

Penggunaan semikonduktor pada *Dye sensitized solar cell* (DSSC) memberikan performa dalam mengkonversikan energi cahaya menjadi energi listrik, yang sangat ditentukan oleh *layer* oksida yang digunakan. Penggunaan oksida semikonduktor dalam fotoelektrokimia dikarenakan kestabilannya menghadapi fotokorosi, selain itu pita energinya yang besar ($>3\text{eV}$) dibutuhkan untuk transparansi semikonduktor pada sebagian besar spektrum cahaya matahari sehingga foton cahaya yang terserap pun lebih banyak. Struktur nanopori pada *layer* oksida semikonduktor DSSC sangat mempengaruhi kemampuannya dalam menyerap cahaya, hal ini dikarenakan struktur nanopori mempunyai karakteristik luas permukaan yang tinggi, dengan demikian *dye* yang terabsorpsi semakin banyak sehingga kerja sistem pun lebih maksimal. *Layer* semikonduktor yang paling sering digunakan pada DSSC adalah TiO₂ (*Titanium Dioksida*) (Caniago, 2019).

C.3 Dye (Zat Warna)

Untuk mendapatkan performa yang baik, zat warna sensitiser harus memenuhi beberapa persyaratan. (1) Idealnya, mampu menyerap semua cahaya matahari mulai dari panjang gelombang dekat-IR hingga mencapai 920 nm, (2) secara struktur harus memiliki gugus fungsi yang mampu mengikat zat warna ke permukaan semikonduktor, yang secara umum gugus karboksilat atau fosfonat, (3) harus memiliki energi *Lowest Unoccupied Molecular Orbital* (LUMO) dibawah pita konduksi dari semikonduktor untuk menjamin terjadinya injeksi elektron, (4) posisi

energi *Highest Occupied Molecular Orbital* (HOMO) harus berada dibawah potensial redoks dari elektrolit, (5) memiliki stabilitas yang baik. Jika zat warna masih memiliki performa yang baik setelah 108 putaran, hal tersebut sama dengan 20 tahun stabil untuk menyerap cahaya matahari (Apriliani, 2017).

Proses fotosintesis pada tumbuhan telah membuktikan adanya senyawa pada tumbuhan yang dapat digunakan sebagai *dye*. Zat-zat tersebut ditemukan pada daun atau buah, yaitu antosianin, xantofil dan klorofil. Peneliti telah membuktikan bahwa klorofil dan xantofil dapat tereksitasi dengan adanya penyinaran pada *dye*. Dalam DSSC pewarna alami sebagai *sensitizer* memainkan peran kunci untuk menyerap foton dari sinar matahari atau lampu dengan mengubahnya menjadi arus listrik. Jenis-jenis pewarna seperti kompleks logam, organik dan alami biasanya digunakan sebagai *sensitizer* (Ardian, 2016).

Adapun jenis-jenis zat yang dapat memberikan pigmen warna pada tumbuhan yaitu (Afandi, 2016) :

1. Antosianin, yaitu senyawa yang mampu menyerap cahaya matahari dengan baik, antosianin inilah yang menyebabkan warna merah dan ungu pada banyak buah dan bunga.
2. *Beta-Carotene*, yaitu pigmen yang mempunyai dua fungsi antara lain pigmen pembantu dalam proses fotosintesis dan pemberi warna kuning kemerahan pada bunga, daun, buah dan sayuran.
3. Tanin, yaitu senyawa yang memberi pigmen warna kuning Kejinggaan.
4. Xantofil, yaitu pigmen kuning grup karotenoid pada daun.
5. Klorofil, yaitu pigmen warna hijau dan paling banyak ditemukan pada tumbuhan hijau dan menjadi penyerap utama cahaya tampak penyinaran yang menyatu dalam daun untuk melakukan fotosintesis.

C.4 Elektrolit

Larutan elektrolit merupakan larutan yang digunakan untuk proses reaksi redoks pada elektroda pembanding. Elektrolit adalah suatu

komponen terpenting pada DSSC, karena elektrolit berfungsi sebagai penyedia elektron atau pengganti elektron yang mengalami eksitasi pada *dye* (Yuniawati, 2021). Elektrolit pada DSSC memiliki fungsi sebagai mediator redoks sehingga terjadi proses siklus didalam sel. Selain itu dapat pula meregenerasi molekul *dye* yang teroksidasi dan juga dapat menyempurnakan sirkuit listrik sebagai perantara elektron antara elektroda kawan dengan elektroda lawan. Pada umumnya elektrolit yang digunakan dalam DSSC ialah elektrolit yang mengandung ion redoks *iodide* dan *triiodide* dalam pelarut (Maulana, 2021).

Elektrolit yang sering digunakan pada DSSC terdiri dari pasangan *iodine* (I) dan *triiodine* (I^3) sebagai redoks dalam pelarut. Selain menggunakan aquades, pelarut lain yang dapat digunakan dalam larutan elektrolit yaitu *Polyethylene Glycol* (PEG). PEG dapat menembus ke dalam serapan *dye* TiO_2 baik untuk perbandingan ukuran partikel yang kecil maupun pada diameter pori skala nano dan dapat menjaga kestabilan kerja. PEG termasuk dalam golongan alkohol dengan dua buah gugus OH^- yang berulang dan termasuk bahan yang dapat larut dalam air. PEG bisa berbentuk padatan maupun cairan kental (gel), tergantung pada komposisi dan berat molekulnya (Dwioknain, 2018).

C.5 Elektroda Pembanding (*Counter Elektrode*)

Counter elektrode digunakan sebagai katalis dalam DSSC. Penggunaan katalis dibutuhkan untuk mempercepat kinetika reaksi proses reduksi *triiodide* pada FTO. Umumnya digunakan platina sebagai katalis dalam berbagai aplikasi dikarenakan efisiensi katalitiknya yang tinggi. Namun, platina merupakan material yang mahal. Sebagai alternatif, Kay & Grätzel mengembangkan desain DSSC menggunakan *counter-elektroda* karbon. Karbon digunakan karena memiliki luas permukaan yang tinggi, sehingga keaktifannya dalam reduksi triiodida dapat menyerupai platina (Satriani W., 2017). Karbon yang digunakan pada DSSC dapat berupa karbon pensil yang diarsirkan pada permukaan elektroda pembanding atau dengan cara pembakaran pada nyala api lilin.

D. Metode Pendeposisian DSSC

Metode konvensional yang sering dilakukan adalah metode *doctor blade*, yaitu pendeposisian lapisan semikonduktor dengan cara meratakan pasta (TiO_2) pada kaca substrat menggunakan pengaduk kemudian dikeringkan lalu disentering pada temperatur dan waktu tertentu (Afandi, 2016).

Doctor blading adalah teknik pelapisan dengan menempatkan pisau tajam pada jarak tetap dari permukaan substrat yang akan dilapisi (biasanya 10-500mm). Larutan pelapisnya kemudian diletakkan di depan mata pisau yaitu kemudian bergerak secara linear melintasi substrat yang menghasilkan film basah yang tipis (Wulandari, 2019).

Hal pertama yang perlu dilakukan ialah membentuk bingkai area pada substrat yang akan dilapisi dengan bahan semikonduktor menggunakan *scotch tape* sebagai pembatas pada bagian atas, bawah, kanan dan kiri bagian substrat. Kemudian gunakan *rod glass* untuk meratakan bahan semikonduktor pada substrat yang dimulai dari ujung bingkai. Teknik ini memiliki kekurangan yaitu sulitnya mengatur keseragaman ketebalan lapisan bahan semikonduktor yang dideposisikan pada substrat dan gerakan saat pelapisan menggunakan *rod glass* (Maulana, 2021).

Metode *doctor blade* dengan gerakan batang kaca di atas substrat dilakukan pada kecepatan konstan yang dipengaruhi oleh tinggi dan sudut kontak pelapisan. Batang kaca berfungsi untuk menyebarkan pasta bahan semikonduktor ke permukaan secara homogen dengan ketebalan merata. Metode ini ekonomis dengan biaya fabrikasi murah, langkah sederhana dan meminimalkan partikel yang terbuang hanya 5% sehingga bahan awal yang dibutuhkan lebih sedikit. Pelapisan dilakukan pada ketebalan sekitar 10-500 μm Ketebalan lapisan dalam kondisi basah tergantung pada tegangan permukaan dan viskositas dari bahan semikonduktor yang sudah disintesis. Metode ini dapat digunakan untuk produksi massal perangkat elektronik dengan lapisan bahan keramik karena membutuhkan lebih sedikit bahan awal dibandingkan dengan metode lain. Namun, metode pelapisan *doctor blade* memiliki beberapa kekurangan yaitu evaporasi atau kecenderungan

mengkristal membutuhkan waktu lebih lama pada konsentrasi pasta yang tinggi. Area efektif perangkat fotovoltaik didasarkan pada kecocokan karakteristik bahan antara penerima dan penyuplai elektron untuk menurunkan tingkat kehilangan efisiensi (Choiroh, 2020).

E. Ubi Jalar Ungu (*Ipomoea Batatas L.*)

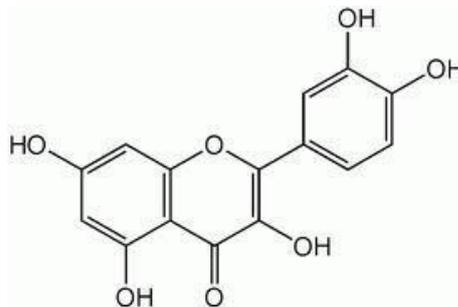
Ubi jalar ungu (*Ipomoea batatas L.*) merupakan salah satu bahan pangan yang tinggi zat gizi serta memiliki peluang sebagai substitusi bahan pangan utama, sehingga bila diterapkan mempunyai peran penting dalam upaya penganeekaragaman pangan dan dapat diproses menjadi aneka ragam produk yang mampu mendorong pengembangan agro-industri dalam diversifikasi pangan (Dewi. 2019). Ubi jalar ungu mempunyai nama ilmiah *Ipomea batatas L.* Berikut taksonomi dan klasifikasi tanaman ubi jalar (Khairuliani. 2019) adalah sebagai berikut :



Gambar 2.5 Ubi jalar ungu (*Ipomoea batatas L.*) (Riswan, 2017)

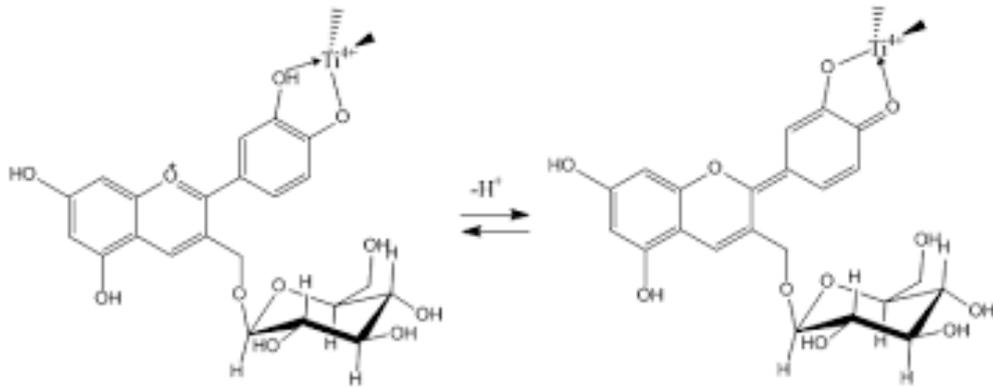
Kingdom	: Plantae
Divisi	: Spermatophyta
Sub divisi	: Angiospermae
Kelas	: Dicotyledonae
Ordo	: Solanales
Famili	: Convolvulaceae
Genus	: Ipomoea
Species	: Ipomoea batatas L.
Nama lokal	: Ubi Jalar Ungu

Ubi jalar ungu (*Ipomoea Batatas L.*) merupakan sumber karbohidrat dan kalori yang cukup tinggi. Kandungan lainnya berupa protein, lemak, serat kasar, vitamin dan mineral. Warna ungu pada umbi ubi jalar ungu disebabkan oleh antosianin, senyawa yang memiliki khasiat antioksidan dua hingga tiga kali lebih tinggi dari beberapa varietas blueberry memiliki kadar antosianin 560 mg/100 g umbi, lebih tinggi dari ubi jalar ungu asal Jepang varietas *Ayaurasaki* dan *Yagawamurasaki*. Varietas Ubi jalar ungu (*Ipomoea Batatas L.*) yang dikenal di Indonesia umumnya dikelompokkan berdasarkan warna daging ubi jalar yaitu berwarna putih, kuning, merah, dan ungu (Khairuliani, 2019). Pigmen antosianin pada ubi jalar ungu lebih tinggi konsentrasinya dan lebih stabil bila dibandingkan antosianin dari sumber lain, seperti kubis, *blueberries* dan jagung merah (Damayanti, Hardeli dan Sanjaya, 2014).



Gambar 2.6 Struktur kimia antosianin (Aziza, 2018)

Saat molekul antosianin ini berinteraksi dengan TiO_2 terjadi pengikatan TiO_2 dengan zat warna antosianin, menggantikan OH^- dari struktur antosianin pada gugus hidroksil dimana Ti(IV) berkombinasi dengan proton dari antosianin (Hardeli, Suwardani, Riky, Fernando, Maulidis dan Ridwan, 2013). Ikatan yang terjadi pada zat warna antosianin dengan TiO_2 dapat melalui suatu ikatan khelat, ikatan tersebut dapat terjadi antara gugus hidroksil dari antosianin dengan gugus Ti^{4+} pada TiO_2 , seperti terlihat pada Gambar 2.7 berikut :



Gambar 2.7 Ikatan khelat yang terjadi antara gugus Ti^{4+} dengan molekul antosianin (Caniago, 2019)

F. Pepaya (*Carica papaya*)

Tanaman pepaya (*Carica papaya L.*) merupakan tanaman herbal. Batang berbentuk bulat, berongga, bergetah, dan terdapat bekas pangkal daun. Dapat hidup pada ketinggian tempat 1 m - 1.000 mdpl dan pada suhu udara $220^{\circ}C$ – $260^{\circ}C$. Pada umumnya semua bagian dari tanaman baik akar, batang, daun, biji dan buah dapat dimanfaatkan. Bunganya terdiri atas tiga jenis yaitu bungan jantan, bunga betina dan bungan sempurna (Cahyani, 2020).



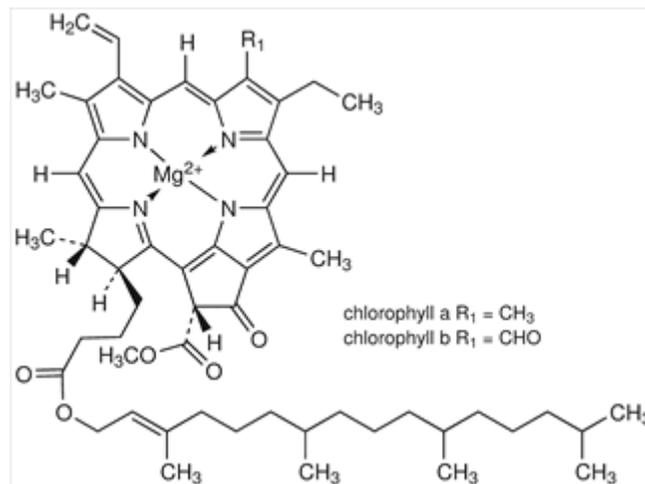
Gambar 2.8 Daun pepaya (*Carica papaya L.*) (Almubarak, 2021)

Tanaman pepaya memiliki taksonomi dan klasifikasi (Almubarak, 2021) sebagai berikut :

Kingdom : Plantae
 Subkingdom : Tracheobionta
 Superdivisi : Spermatophyta

Divisi : Magnoliophyta
 Kelas : Magnoliopsida
 Subkelas : Dilleniidae
 Ordo : Violales
 Family : Caricaceae
 Genus : *Carica*
 Spesies : *Carica papaya L*

Kandungan klorofil total daun pepaya berjumlah 29,5973 mg/g dengan rincian klorofil a sebesar 21,4850 mg/g dan klorofil b sebesar 8,1300 mg/g. Kandungan klorofil daun pepaya ini lebih tinggi daripada kangkung yang kandungan klorofil totalnya hanya berjumlah 16,7667 mg/g (klorofil a sebesar 13,1911 mg/g dan klorofil b sebesar 3,5856 mg/g) dan bayam yang kandungan klorofil totalnya berjumlah 23,0222 mg/g (klorofil a sebesar 18,2622 mg/g dan klorofil b sebesar 4,7700 mg/g) (Setiari, 2009).



Gambar 2.9 Struktur kimia klorofil (Putri, 2019)

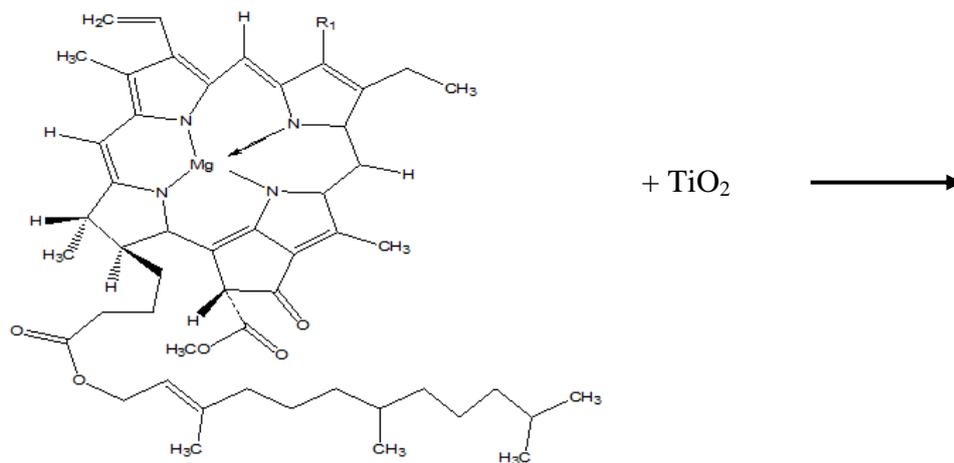
Klorofil mempunyai pigmen yang berfungsi pada tumbuhan yaitu sebagai proses fotosintesis, anti-oksidan, dan memoles daun serta buah yang masih mentah dengan warna hijau. Klorofil dibagi menjadi dua (Kurniawati, 2018), yaitu :

a. Klorofil a

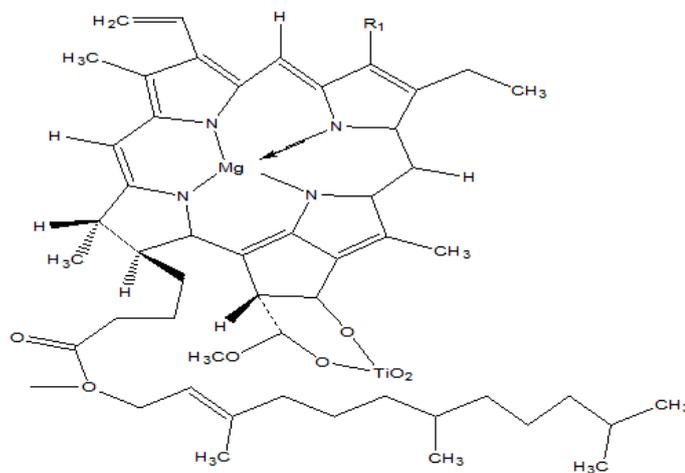
Mengandung warna hijau dan mempunyai rumus molekul $C_{55}H_{72}O_5N_4$, sehingga dapat mengabsorpsi panjang gelombang pada rentan *blue* violet dan merah.

b. Klorofil b

Mengandung warna biru dan mempunyai rumus molekul $C_{55}H_{70}O_6N_4$, yang mana biasanya hanya terdapat pada alga hijau. Klorofil b memiliki gugus aldehid yang menyebabkan klorofil ini berwarna hijau kekuningan.



Klorofil



Gambar 2.10 Pengikatan TiO_2 dengan zat warna klorofil (Ramadhani, 2017)

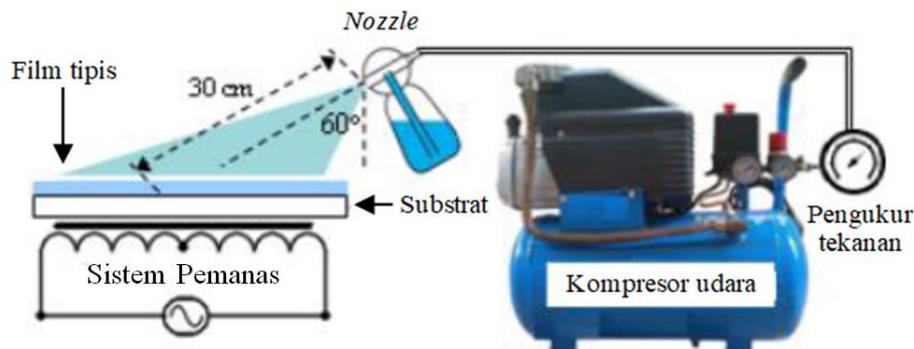
Perbedaan Struktur dan pigmen pada klorofil a dan klorofil b dapat berpengaruh terhadap penyerapan gelombang cahaya dan kemampuan klorofil dalam menangkap energi cahaya. Struktur klorofil a dan klorofil b hampir sama, yang membedakan adalah gugus pengikat yang terdapat pada masing-masing klorofil tersebut dimana gugus pengikat klorofil a adalah CH_3 sedangkan klorofil b adalah CH (Putri, 2019). Pengikatan TiO_2 dengan zat warna klorofil dapat dilihat pada gambar 2.10.

G. *Spray Pyrolysis Deposition (SPD)*

Spray pyrolysis deposition adalah teknik pemrosesan yang sedang dikembangkan untuk pembuatan film tipis dan tebal, pelapis keramik, dan bubuk. Teknik ini memiliki keunggulan yaitu penyemprotan pirolisis dengan proses yang sangat sederhana dan relatif hemat biaya (terutama biaya peralatan). Teknik *Spray pyrolysis* hanya membutuhkan persiapan yang sederhana untuk pembuatan film dengan berbagai macam komposisi. *Spray pyrolysis* tidak membutuhkan substrat atau bahan kimia berkualitas tinggi. Metode ini telah digunakan untuk deposisi film padat, film berpori, produksi serbuk, dan film berlapis-lapis. *Spray pyrolysis* sudah dipakai selama beberapa dekade dalam industri kaca dan pembuatan sel surya . Peralatan *Spray pyrolysis* terdiri dari alat penyemprot, larutan prekursor, pemanas substrat, dan pengontrol suhu (Perednis dan Gauckler, 2005).

Teknik *spray pyrolysis* merupakan salah satu metode pembuatan film tipis yang hemat biaya dan membutuhkan waktu yang singkat untuk mensintesis film tipis. Teknik *spray pyrolysis*, dibandingkan dengan metode lain menunjukkan kemampuan deposisi yang seragam dan deposisi yang luas. Ada berbagai parameter dalam *spray pyrolysis* untuk meningkatkan kualitas film tipis. Parameter tersebut meliputi konsentrasi larutan prekursor, kecepatan semprot, suhu substrat, jarak *nozzle* ke substrat, tekanan gas pembawa dan sudut semprotan. Dengan bantuan teknik *spray pyrolysis*, film tipis dapat disintesis dalam tekanan sekitar. Teknik *spray pyrolysis* sangat berguna untuk aplikasi berbiaya rendah (Sahu, 2015). Meskipun demikian,

spray pyrolysis memiliki beberapa kekurangan, di antaranya sulit untuk dihilangkan setelahnya, film memiliki ukuran butir yang relatif kecil dan kekasaran permukaan yang tinggi (Moises, 2015). Peralatan *spray pyrolysis deposition* terdiri dari alat penyemprot, larutan prekursor, pemanas substrat, dan pengontrol suhu yang dapat di lihat pada Gambar 2.11.



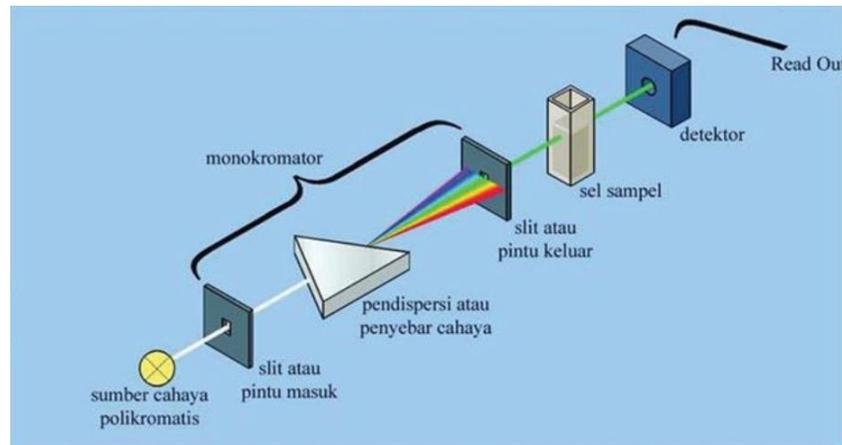
Gambar 2.11 Skema dari metode *spray pyrolysis deposition* (Putra, 2018)

H. Spektrofotometer UV-Vis

Spektrofotometer merupakan alat yang digunakan untuk mengukur kemampuan pigmen dalam menyerap berbagai macam panjang gelombang cahaya. Sedangkan spektrofotometri adalah salah satu metode dari kimia analisis yang digunakan untuk menentukan komposisi suatu sampel baik secara kuantitatif atau kualitatif yang didasarkan pada interaksi antara suatu materi dengan cahaya. Sedangkan peralatan yang digunakan dalam melakukan spektrofotometri ialah spektrofotometer. Cahaya yang dimaksud dapat berupa cahaya visibel, UV dan inframerah (Putri, 2019).

Cahaya yang diserap diukur sebagai absorbansi (A) sedangkan cahaya yang dihamburkan diukur sebagai transmitansi (T), dinyatakan dengan hukum *Lambert-beer* atau hukum *Beer* “Jumlah radiasi cahaya tanpak (*ultraviolet*, inframerah dan sebagainya) yang diserap atau ditransmisikan oleh suatu larutan merupakan suatu fungsi eksponen dari konsentrasi zat dan tebal larutan”. Keuntungan utama metode spektrofotometer adalah memberikan cara sederhana untuk menetapkan kualitas zat yang sangat kecil. Selain itu, hasil yang diperoleh cukup akurat karena dimana angka dibaca

langsung dan dicatat oleh detektor sehingga dapat dicetak dalam bentuk angka digital maupun grafik yang sudah diregresikan (Ardian, 2016). Secara sederhana instrument spektrofotometer UV-Vis terdiri dari sumber cahaya, monokromator, sel sampel, detektor, *read out* (pembaca). Dapat terlihat pada gambar 2.12.

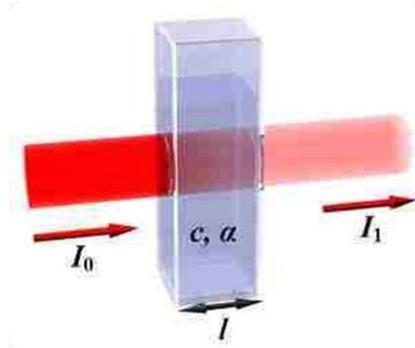


Gambar 2.12 Instrument spektrofotometer UV-Vis (Hasibun, 2021)

Spektrometer merupakan piranti yang menghasilkan spektrum sinar dengan panjang gelombang tertentu, sedangkan fotometer merupakan piranti yang digunakan untuk cahaya yang melewati suatu sampel, sedangkan sinar tampak (*Visible*) merupakan spektrum radiasi yang dihasilkan oleh alat spektrofotometer itu sendiri. Dalam laboratorium, spektrofotometer sinar tampak (*Visible*) digunakan untuk menentukan konsentrasi, panjang gelombang serapan maksimum (λ_{max}) dan nilai absorbansi atau transmitansi sinar pada mengukur intensitas sampel larutan. Hasil pengukuran menggunakan spektrofotometer merupakan fungsi absorbansi atau transmitansi terhadap panjang gelombang sinar (Afandi, 2018).

Sumber sinar polikromatis untuk sinar UV adalah lampu *deuterium*, sedangkan sinar *visible* atau sinar tampak adalah lampu *wolfram*. Monokromator pada spektrofotometer UV-Vis digunakan lensa prisma dan filter optik. Sel sampel berupa kuvet yang terbuat dari kuarsa atau gelas dengan lebar yang bervariasi. Detektor berupa detektor foto atau detektor

panas atau detektor dioda foto, berfungsi menangkap cahaya yang diteruskan dari sampel dan mengubahnya menjadi arus listrik.

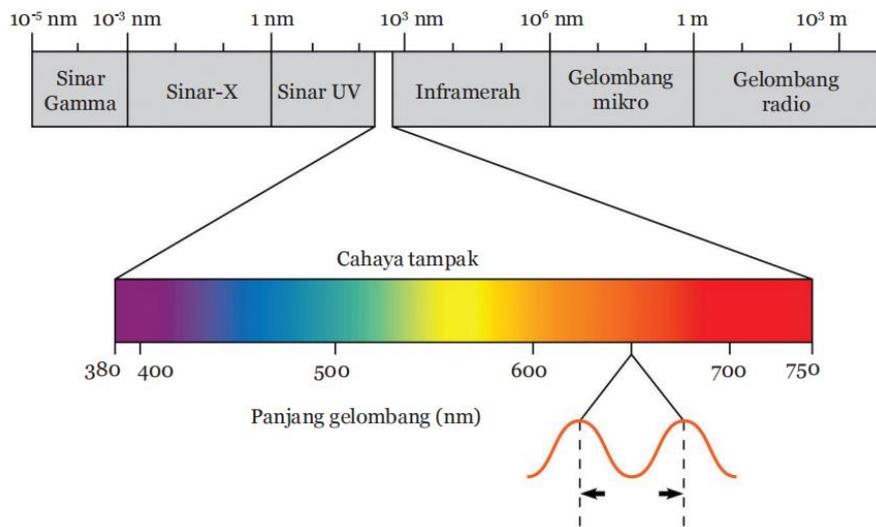


Gambar 2.13 Absorbansi sinar UV-Vis oleh material (Manurung, 2021)

Prinsip dasar spektrofotometer yaitu apabila suatu sinar dengan karakteristik tertentu melalui sebuah senyawa (larutan, padatan maupun bubuk), maka senyawa tersebut akan menyerap sinar tersebut pada panjang gelombang tertentu. Ketika sinar tersebut (I_0) melewati senyawa tersebut, maka sinyal tersebut akan keluar dengan intensitas yang berbeda (I) karena adanya serapan oleh senyawa yang dilewati dengan intensitas tertentu (I_a). Gejala dari cahaya yang melewati senyawa tersebut disebut Transmittansi (T) (Mahardiya, 2019).

Cahaya matahari merupakan gabungan cahaya dengan panjang gelombang dan spektrum warna yang berbeda-beda. Spektrum gelombang elektromagnetik meliputi gelombang radio dan televisi, gelombang mikro, gelombang inframerah, gelombang tampak (*visible light*), gelombang ultraviolet, sinar X dan sinar gamma. Dari spektrum gelombang elektromagnetik tersebut hanya bagian yang sangat kecil yang dapat ditangkap oleh indera penglihatan yaitu cahaya tampak (*visible light*). Pada gambar 2.14 dapat dilihat perbedaan panjang gelombang dan frekuensi dari cahaya tampak menimbulkan warna yang berbeda yaitu merah, jingga, kuning, hijau, biru, nila dan ungu yang disebut juga spektrum tampak. Daya tembus dari setiap spektrum tampak tersebut pada kolom air yang sama adalah berbeda-beda. Spektrum cahaya yang memiliki panjang gelombang pendek memiliki daya

tembus yang lebih dalam dibandingkan gelombang panjang. Pada air jernih gelombang yang sedikit diserap adalah gelombang pendek (Mustofa, 2013).



Gambar 2.14 Spektrum gelombang cahaya tampak (Rachmayati, 2014)

Dari Gambar 1 dapat kita lihat berbagai spektrum gelombang elektromagnetik berdasarkan panjang gelombang dengan panjang gelombang terendah berupa sinar gamma hingga gelombang AM (*Amplitudo Modulation*) dengan panjang gelombang tertinggi. Dari sederetan gelombang elektromagnetik, segmen yang paling penting bagi kehidupan adalah pita sempit yang panjang gelombangnya berkisar antara 380 nm hingga 750 nm. Radiasi ini dikenal sebagai cahaya tampak karena terdeteksi oleh mata manusia sebagai bermacam-macam warna. (Rizal, 2018).

Dalam spektrum cahaya terdapat warna asli dan warna komplementer, warna asli merupakan warna yang diserap oleh benda, sedangkan warna komplementer merupakan warna yang diteruskan atau warna yang terlihat oleh mata manusia (tampak). Sebagai contoh larutan atau benda akan terlihat berwarna kuning karena menyerap spektrum warna biru. Hal ini menjadi salah satu inti dari metode spektroskopi sinar tampak, dimana sampel yang akan diuji harus bersifat tembus cahaya dan berwarna (Afandi, 2018). Adapun perbedaan panjang gelombang untuk setiap segmen warna dari gelombang cahaya tampak di tunjukkan pada tabel 2.1.

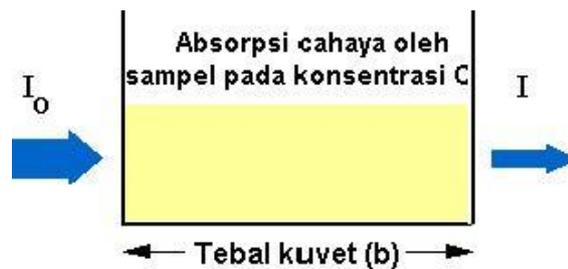
Tabel 2.1 Spektrum gelombang cahaya tampak (Afandi, 2018 dan Rizal, 2018)

Panjang Gelombang (nm)	Warna yang Diserap	Warna Komplementer (Warna yang Terlihat)	Energi Foton (eV)
380 – 435	Ungu	Hijau Kekuningan	3,09 – 2,84
435 – 480	Biru	Kuning	2,84 – 2,58
480 – 490	Biru Kehijauan	Jingga	2,58 – 2,52
490 – 520	Hijau Kebiruan	Merah	2,52 – 2,47
520 – 565	Hijau	Ungu Kemerahan	2,47 – 2,21
565 – 580	Hijau Kekuningan	Ungu	2,21 – 2,13
580 – 590	Kuning	Biru	2,13 – 2,08
590 – 625	Jingga	Biru Kehijauan	2,08 – 2,03
625 – 750	Merah	Hijau Kebiruan	2,03 – 1,65

I. Absorbansi

Ketika radiasi atau sinar putih melewati cairan berwarna, radiasi yang memiliki panjang gelombang tertentu akan diserap sedangkan radiasi lainnya akan dipancarkan. Absorbansi adalah rasio intensitas cahaya yang diserap dengan intensitas cahaya yang datang. Besar absorbansi atau serapan tergantung pada kandungan zat didalamnya. Semakin banyak kandungan zat dalam sampel, molekul yang akan menyerap cahaya dengan panjang gelombang tertentu yang menyebabkan nilai absorbansi yang dihasilkan lebih besar, dengan kata lain nilai absorbansi setara dengan konsentrasi (Nurwahidah, 2021). Jika sebuah molekul bergerak dari tingkat energi ke tingkat energi yang lebih rendah, sejumlah energi akan dilepaskan. Energi ini dapat dihamburkan sebagai radiasi, dan dapat dikatakan telah terjadi emisi radiasi. Peristiwa penyerapan energi terjadi apabila molekul terkena radiasi elektromagnetik pada frekuensi yang sesuai sehingga molekul naik ke tingkat yang lebih tinggi. Radiasi dengan panjang gelombang tertentu akan diabsorpsi secara selektif dan radiasi lainnya akan ditransmisikan jika radiasi

diteruskan melalui larutan yang berwarna. Perbandingan intensitas sinar yang diserap dengan intensitas sinar datang disebut absorbansi. Nilai absorbansi berbanding lurus dengan zat yang terkandung pada sampel. Apabila zat yang terkandung pada suatu sampel semakin banyak maka cahaya yang akan diserap pada panjang gelombang tertentu oleh suatu molekul juga semakin banyak, sehingga nilai absorbansi semakin besar. Oleh karena itu, nilai absorbansi berbanding lurus dengan zat yang terkandung di dalamnya (Nurwahidah, 2021).

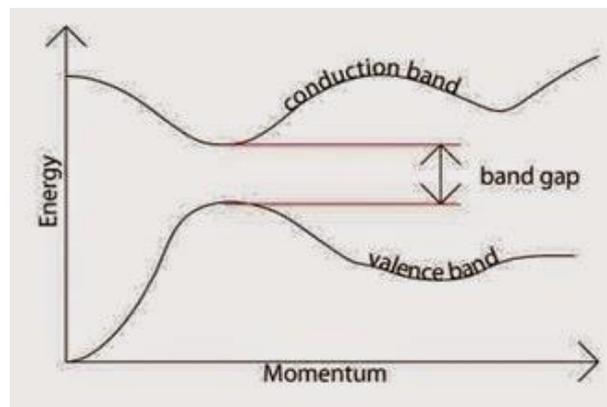


Gambar 2.15 Absorpsi cahaya oleh sampel (Ahriani, 2021)

Absorbansi atau serapan bahan adalah respon medium atau bahan, dimana molekul di dalamnya mengalami perpindahan energi dari keadaan dasar menuju keadaan tereksitasi apabila terdapat cahaya yang melaluinya. Untuk memperoleh spektrum absorpsi dari sampel maka dilakukan dengan cara mengkarakterisasi sampel menggunakan UV-Vis. Grafik panjang gelombang dan nilai absorbansi merupakan hasil dari karakterisasi yang diperoleh (Ahriani, 2021). Interaksi yang diamati pada spektrofotometri UV-Vis yaitu absorpsi dengan panjang gelombang tertentu di daerah UV-Vis oleh spesi kimia yang dianalisa. Cahaya yang diserap diukur sebagai absorbansi (A) sedangkan cahaya yang dihamburkan diukur sebagai transmitansi (T). Berdasarkan hukum Lambert-Beer yang berbunyi: “Hubungan linieritas antara absorban dengan konsentasi larutan analit dan berbanding terbalik dengan transmitan” (Wulandari, 2017). Dimana jika nilai absorbansinya besar maka semakin besar pula konsentrasi analitnya ($A \approx C$), begitupun sebaliknya. Jika absorbansi di plot terhadap konsentrasi maka akan dihasilkan garis linier (Ahriani, 2021).

J. *Band Gap Energi*

Band gap energi atau celah pita energi merupakan perbedaan antara ujung atas pita valensi (E_v) dengan ujung bawah pita konduksi (E_c) atau energi minimum yang diperlukan untuk mengeksitasi elektron dari pita valensi ke pita konduksi (Misa, Pingak, dan Sutaji, 2018). *Band gap* energi adalah energi minimum yang dibutuhkan untuk mengeksitasi elektron dari pita valensi ke pita konduksi. Berdasarkan pengisian elektron, pita energi dapat dibedakan menjadi 2 jenis, yaitu pita valensi dan pita konduksi. Pita valensi adalah pita energi teratas yang terisi penuh oleh elektron, dan pita konduksi adalah pita energi yang berada di atas pita valensi yang terisi oleh sebagian atau tidak terisi sama sekali oleh elektron (Triwardiati dan Ernawati, 2018).



Gambar 2.16 *Band gap* energi pada semikonduktor (Triwardiati dan Ernawati, 2018)

Salah satu metode yang dapat digunakan untuk menentukan nilai *band gap* suatu material adalah dengan menggunakan metode *Tauc plot*. Metode *Tauc plot* biasanya digunakan untuk menentukan nilai *band gap* suatu semikonduktor. Namun metode tersebut juga dapat digunakan untuk menentukan nilai *band gap* dari ekstraksi *dye* dengan melihat data hasil absorbansi spektrofotometer UV-Vis untuk menghitung nilai celah pita energi atau *band gap* energi tersebut. Penentuan *band gap* energi atau celah pita energi material sangat penting untuk dikaji. Hal ini karena dengan

mengetahui nilai celah energi suatu material, dapat ditentukan apakah material tersebut bersifat isolator, semikonduktor atau konduktor. Selain itu, salah satu topik penelitian yang sedang dikembangkan adalah identifikasi potensi material-material organik sebagai *dye* alami pada *Dye Sensitized Solar Cells* (DSSC). Salah satu syarat suatu *dye* alami adalah memiliki nilai celah energi yang lebih kecil dari nilai celah energi semikonduktor yang digunakan pada DSSC (Ati, 2020).

Untuk menghitung nilai *band gap dye* dapat menggunakan persamaan 2.6 (Aliah dan Pitriana, 2016).

$$(\alpha hv) = A (hv - E_g)^{\frac{n}{2}} \quad (2.6)$$

Dimana:

- α = koefisien absorpsi (cm^{-1})
- hv = energi foton (eV)
- A = absorbansi
- E_g = *band gap* energi atau celah pita energi (eV)
- n = nilai transisi (transisi langsung $n=1$ dan transisi tidak langsung $n=2$)

Koefisien absorpsi dapat dihitung dengan persamaan 2.7.

$$I = I_0 e^{-\alpha l} \quad (2.7)$$

Dimana:

- I = intensitas yang melewati bahan (watt/cm^2)
- I_0 = intensitas awal sebelum mengenai bahan (watt/cm^2)
- e = bilangan *Euler* atau irasional
- α = koefisien absorpsi (cm^{-1})
- l = ketebalan sampel (cm)

Dari persamaan 2.7 diatas, koefisien absorpsi dapat dituliskan sebagai persamaan berikut :

$$\alpha = 2,302 A \quad (2.8)$$

Nilai *band gap* bahan dapat ditentukan dengan membuat kurva linier hubungan $(\alpha hv)^2$ ($m^{-1} eV$)² pada sumbu y terhadap hv (eV) pada sumbu x. Persamaan 2.6 dapat ditulis ulang sebagai :

$$(\alpha hv)^2 = (hv - E_g) \quad (2.9)$$

Dimana:

α = koefisien absorpsi (cm^{-1})

hv = energi foton (eV)

E_g = *band gap* energi atau celah pita energi (eV)

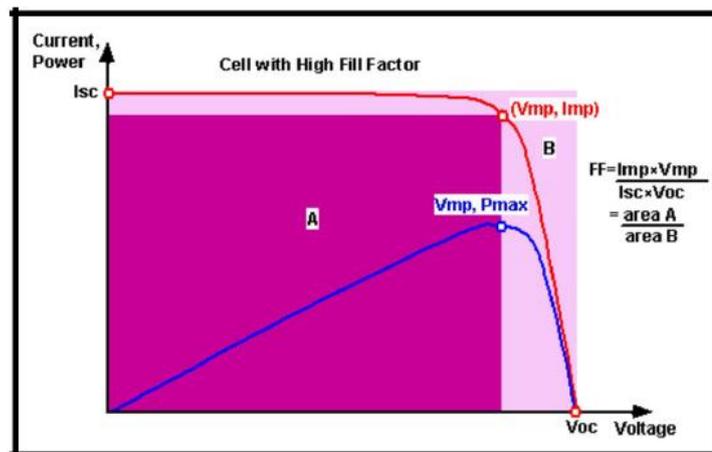
Ketika $(\alpha hv)^2$ bernilai nol, maka akan terjadi perpotongan kurva di sumbu x (hv (eV)) dan nilai perpotongan tersebut merupakan nilai *band gap* dari bahan.

$$0 = (hv - E_g) \quad (2.10)$$

$$E_g = hv \quad (2.11)$$

K. Parameter Pengukuran

Parameter yang akan diukur untuk mengetahui efisiensi dari DSSC adalah arus dan tegangan, dimana arus dan tegangan dapat ditampilkan melalui kurva dua dimensi (x,y) yang merupakan kurva arus tegangan (I-V) untuk memudahkan dalam pengukuran yang ditunjukkan pada gambar di bawah ini :



Gambar 2.17 Bentuk khusus dari kurva I-V *solar cell* (Natsir, 2019)

Keterangan pada gambar 2.17 :

1. Tegangan rangkaian terbuka (*Open Circuit Voltage*); V_{OC}
2. Arus hubungan pendek (*Short Circuit Current*); I_{SC}
3. *Fill Factor* (FF)
4. Arus tegangan pada MPP : I_{mpp}, V_{mpp} .

Sel dalam kondisi *short circuit*, arus maksimum atau arus *short circuit* (I_{SC}) dihasilkan, sedangkan pada kondisi *open circuit* tidak ada arus yang dapat mengalir sehingga tegangannya maksimum, disebut tegangan *open-circuit* (V_{OC}). Titik pada kurva I-V yang menghasilkan arus dan tegangan maksimum disebut titik daya maksimum (MPP). Karakteristik penting lainnya dari sel surya yaitu *fill factor* (FF), *fill factor* (FF), merupakan rasio tegangan dan arus pada keadaan daya maksimum dan tegangan *open circuit* (V_{OC}), dan arus *short circuit* (I_{SC}), yang dapat diperoleh dengan persamaan (Natsir, 2019).

$$FF = \frac{V_{max} \times I_{max}}{V_{oc} \times I_{sc}} \quad (2.12)$$

Dimana:

FF = *Fill Factor*

V_{max} = tegangan maksimum (mV)

I_{max} = rapat arus maksimum (mA/cm^2)

V_{OC} = tegangan pada saat *open circuit* (mV)

I_{SC} = rapat arus yang dihasilkan pada keadaan *short circuit* (mA/cm^2)

Persamaan *fill factor* digunakan untuk mengukur bagaimana luasan persegi pada karakteristik I-V suatu sel surya, secara empiris hubungan antara *fill factor* dengan V_{OC} . Keterbatasan utama dalam persamaan berikut adalah bahwa persamaan ini mewakili FF maksimum, walaupun dalam praktiknya FF akan lebih rendah karena adanya kerugian resistif parasit, yang dibahas dalam Pengaruh Resistensi Parasit. Oleh karena itu, FF paling banyak ditentukan dari pengukuran kurva I-V dan didefinisikan sebagai daya

maksimum dibagi dengan produk $I_{SC} \times V_{OC}$. (Natsir, 2019). Persamaan *fill factor* empiris dapat diuraikan melalui persamaan berikut :

$$FF = \frac{V_{oc} - \ln(V_{oc} + 0,72)}{V_{oc} + 1} \quad (2.13)$$

Efisiensi sel surya dapat didefinisikan sebagai perbandingan dari Daya Maksimum (P_{max}) panel surya dengan daya intensitas matahari (*irradiance* matahari) :

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_{light}} \times 100\% \quad (2.14)$$

Dimana :

η = efisiensi sel surya (%)

P_{max} = daya maksimum yang dihasilkan sel surya (Watt)

P_{light} = daya dari sinar yang mengenai sel surya (Watt)

Dengan P_{max} adalah :

$$P_{max} = V_{oc} \times I_{sc} \times FF \quad (2.15)$$

Dimana :

V_{OC} = tegangan pada saat *open circuit* (mV)

I_{SC} = rapat arus yang dihasilkan pada keadaan *short circuit* (mA/cm²)

FF = *Fill Factor*

Dan P_{light} adalah :

$$P_{light} = I_V \times A \quad (2.16)$$

Dimana :

I_V = intensitas cahaya (W/m²)

A = luas permukaan aktif DSSC (m²)

Sementara P_{light} yang diperoleh melalui parameter *lux*. *Lux* adalah lumen per satuan. *Lux (luminous flux)* dapat diartikan pula sebagai total dari cahaya tampak yang menunjukkan intensitas pencahayaan pada suatu permukaan tertentu. Cahaya akan tampak semakin redup bila seiring bertambahnya

luasan area yang disinari. Cahaya memiliki dualitas sifat sebagai materi dan gelombang. Dengan sendirinya cahaya memiliki energi dalam tingkatan tertentu. Daya (W) yang dikirimkan oleh suatu sumber cahaya berbanding lurus dengan iluminasi, E_v (lm) dikalikan dengan luasan area (m^2) dibagi dengan *luminous efficiency*, η (lm/W). Yang diekspresikan sebagai berikut :

$$P_{light}(W) = E_v(lm) \left(\frac{A(m^2)}{\eta(\frac{lm}{W})} \right) \quad (2.17)$$

Dimana:

P_{light} = Daya yang dihasilkan oleh suatu sumber cahaya (Watt)

E_v = Iluminasi atau intensitas penerangan (lm)

A = Luasan area yang disinari (m^2)

η = *Luminous Efficacy* (lm/W)

dapat pula diperoleh dengan menggunakan persamaan yang dijabarkan sebagai berikut :

$$P_{light} = \frac{\phi_v(lm)}{\eta(\frac{lm}{W})} \quad (2.18)$$

Dimana:

ϕ_v = intensitas penyinaran (lm)

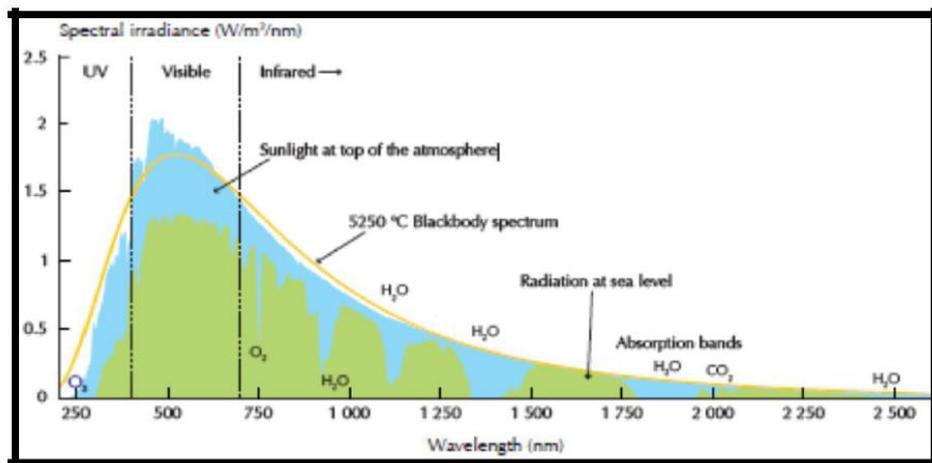
η = *Luminous Efficacy* (lm/W)

Nilai efisiensi ini yang menjadi ukuran global dalam menentukan kualitas performansi sel surya. Efisiensi dari sel surya tergantung pada temperatur dari sel dan yang lebih penting lagi adalah kualitas illuminasi. Misalnya total intensitas cahaya dan intensitas spektrum yang terdistribusi. Oleh karena itu, standar kondisi pengukuran harus dikembangkan sejalan dengan pengujian sel surya di laboratorium. Kondisi standar yang telah digunakan untuk menguji solar sel dengan intensitas cahaya 1000 W/m^2 , distribusi spektrum dari pancaran matahari seperti gambar dibawah dan temperatur sel 25°C .

Daya yang dikeluarkan *solar cell* pada kondisi ini adalah daya normal dari sel, atau modul, dan dicatat sebagai puncak daya (*peak watt*), W_p (Novhandi, 2018).

Tabel 2.2 Nilai *luminous efficacy* dari berbagai jenis sumber cahaya (Novhandi, 2018)

<i>Light type</i>	<i>Typical luminous efficacy</i> (lumens/watt)
<i>Tungsten incandescent light bulb</i>	12.5 – 17.5
<i>Halogen lamp</i>	16 – 24
<i>Fluorescent lamp</i>	45 – 75
<i>LED lamp</i>	80 – 100
<i>Metal halide lamp</i>	75 – 100
<i>High pressure sodium vapor lamp</i>	85 – 100
<i>Low pressure sodium vapor lamp</i>	100 – 200
<i>Mercury vapor lamp</i>	35 – 65



Gambar 2.18 Spektrum pancaran matahari (Novhandi, 2018)