

SKRIPSI

**ANALISIS PENGARUH RANGKAIAN *PHOTOVOLTAIC* TERHADAP
EFISIENSI PADA MESIN *EL EQUIPO DE ENERGÍA SOLAR*
*FOTOVOLTAICA CONTROLADO (EESFC)***

OLEH

LULU FAJRIANI PASRAH ARUNSAE

D21116322



DEPARTEMEN MESIN FAKULTAS TEKNIK

UNIVERSITAS HASANUDDIN

GOWA

2021

SKRIPSI

**ANALISIS PENGARUH RANGKAIAN *PHOTOVOLTAIC* TERHADAP
EFISIENSI PADA MESIN *EL EQUIPO DE ENERGÍA SOLAR*
*FOTOVOLTAICA CONTROLADO (EESFC)***

DI SUSUN OLEH

LULU FAJRIANI PASRAH ARUNSAE

D211 16 322

**Merupakan Salah Satu Syarat Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
Mesin Pada Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin**

DEPARTEMEN MESIN FAKULTAS TEKNIK

UNIVERSITAS HASANUDDIN

GOWA

2021

LEMBAR PENGESAHAN

**ANALISIS PENGARUH RANGKAIAN *PHOTOVOLTAIC* TERHADAP EFISIENSI
PADA MESIN *EL EQUIPO DE ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA CONTROLADO*
(*EESFC*)**

Disusun dan diajukan oleh

LULU FAJRIANI PASRAH ARUNSAE

D211 16 322

Telah dipertahankan di hadapan Panitia Ujian yang dibentuk dalam rangka Penyelesaian Studi
Program Sarjana Program Studi Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin

Pada tanggal 12 April 2021

dan dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan

Menyetujui,

Pembimbing Utama,



Dr. Eng. Jalaluddin, ST., MT.

NIP. 19720825 200003 1 001

Pembimbing Pendamping



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

NIP 19840126 201212 1 002

Ketua Program Studi,



PERNYATAAN KEASLIAN

Yang bertanda tangan dibawah ini:

Nama : Lulu Fajriani Pasrah Arunsae

NIM : D21116322

Program Studi : Teknik Mesin

Jenjang : S1

Menyatakan dengan ini bahwa karya tulisan saya berjudul

**“Analisis Pengaruh Rangkaian *Photovoltaic* Terhadap Efisiensi Pada Mesin
El Equipo De Energia Solar Fotovoltaica Controlado (EESFC)”**

Adalah karya tulisansaya sendiri dan bukan merupakan pengambilan alihan tulisan oranglain bahwa skripsi yang saya tulis ini benar-benar merupakanhasil karya saya sendiri.

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

Gowa, 23 Maret 2021

Yang membuat pernyataan,



Lulu Fajriani Pasrah Arunsae

DAFTAR RIWAYAT HIDUP

Nama : Lulu Fajriai Pasrah Arunsae
Tempat Tanggal Lahir : Bau-Bau, 15 Juli 1998
Alamat : Jl. STPP Gowa, Bontomarannu, Gowa
Jenis Kelamin : Perempuan
Agama : Islam
Telepon : 082157442617
E-mail : sabriantilulu@gmail.com

Riwayat Pendidikan

- SDN 1 PALATIGA
- SMPN 1 BAU-BAU
- SMAN 1 BAU-BAU

Riwayat Organisasi:

- MARCH
- HMM FT-UH
- KOMTEK SMFT-UH
- OKFT-UH
- CSR FT-UH.

Pengalaman Kerja

- PT. DIRGANTARA INDONESIA, AIRCRAFT SERVICE (Desember 2018- Februari 2019)

KATA PENGANTAR

Puji syukur kehadirat Allah SWT, yang telah memberikan rahmat dan hidayah-Nya agar saya selaku penulis dapat menyelesaikan penelitian dan skripsi ini yang menjadi salah satu syarat kelulusan di Departemen Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Hasanuddin dan shalawat serta salam kita sampaikan kepada junjungan kita Nabi Muhammad SAW yang telah membawa umat islam ke kehidupan yang lebih beradab.

Saya menyadari dalam menyelesaikan skripsi dan penelitian ini tidaklah mudah, banyak hambatan dan masalah yang dihadapi hingga sampai ke titik ini. Namun berkat doa dan dukungan dari berbagai pihak akhirnya penelitian dan skripsi ini telah selesai.

Oleh karena ini dengan penuh rasa hormat dan tulus saya selaku penulis mengucapkan banyak terima kasih kepada Bapak Dr-Eng. Jalaluddin , ST, MT selaku pembimbing pertama dan Bapak Azwar Hayat, ST,M.Sc.,Ph.D selaku pembimbing kedua, yang telah memberikan sangat banyak pelajaran berharga bagi saya, yang tidak bisa ternilai harganya dengan apapun, meluangkan waktu dan tenaganya dan juga memberikan motivasi dan ide-ide kepada saya sehingga saya dapat menyelesaikan skripsi ini.

Tak lupa secara khusus penulis haturkan ucapan terima kasih kepada Ayahanda saya Juhardin sekaligus motivasi hidup yang telah memberikan sangat banyak pelajaran berharga kepada saya, Ibunda Darlina yang telah merawat saya tanpa lelah dari kecil hingga saat ini, dan memberikan semangat serta dukungan yang tidak ada habisnya kepada saya, dan juga kepada adik saya Indah sabrianti Parawansah, Waode Andini Triseptiani dan Muhammad Sa'ad yang telah memberikan dukungan dan semangat kepada saya, serta keluarga besar yang namanya tidak bisa disebutkan satupersatu yang selalu ada memberikan dukungan kepada saya.

Pada kesempatan ini pula perkenankan penulis menghaturkan ucapan terima kasih kepada semua pihak yang telah membantu dalam menyelesaikan penelitian dan skripsi ini, ucapan terima kasih kepada:

1. Ibu Prof. Dwia Aris Tina Pulubuhu, selaku Rektor Universitas Hasanuddin beserta stafnya.
2. Bapak Dr-Eng. Jalaluddin, ST,MT selaku Ketua Departemen Mesin FT-UH
3. Bapak Dr-Eng. Andi Amijoyo Mochtar, ST,M.Sc selaku penasehat akademik yang telah membimbing dan membantu penulis selama menjalani studi.
4. Seluruh dosen penguji, bapak Dr-Eng. Andi Amijoyo Mochtar, ST,M.Sc, dan ibu Dr. Eng Novriany Amaliah ST.,MT yang telah memberikan masukan untuk menyempurnakan skripsi saya.
5. Seluruh staf administrasi Departemen Mesin (Pak Mansyur, Pak Irwan, Bu Suri serta yang lain) yang membantu mengurus dan memudahkan perjalanan berkas menuju Rektorat.
6. Seluruh teman-teman mahasiswa Jurusan Mesin, COMPREZZOR 2016 khususnya teman-teman cewek saya Radhwa Yumna Ginting dan Adhyeta Marchelly Tahir. Terima kasih atas bantuan dan dukungannya serta semangat yang diberikan.
7. Semua pihak yang tidak sempat disebutkan namanya satu per satu. Semoga Allah SWT membalas kebaikan kalian semua baik dengan pahala ataupun rejeki. penulis menyadari skripsi ini masih jauh dari kata sempurna, sehingga penulis dengan sangat terbuka menerima keritikan dan saran yang membangun untuk memperbaiki skripsi ini kedepannya, agar berguna bagi pembaca nantinya

ABSTRAK

Lulu Fajriani Pasrah Arunsae. Analisis Pengaruh Rangkaian *Photovoltaic* Terhadap Efisiensi Pada Mesin *El Equipo De Energía Solar Fotovoltaica Controlado (EESFC)* (dibimbing oleh Dr. Eng. Jalaluddin, ST, MT. dan Azwar Hayat, ST,M.Sc.,Ph.D).

Penelitian ini menggunakan mesin *El Equipo de Energía Solar Fotovoltaica Controlado (EESFC)* pada panel surya *polycrystalline* dan *monocrystalline* secara seri dan paralel, untuk mengetahui karakteristik dan efisiensi yang di hasilkan oleh panel surya tersebut yang dilakukan di laboratorium energi terbarukan Universitas Hasanuddin. Pada penelitian ini menunjukkan bahwa karakteristik panel *polycrystalline* dan *monocrystalline* secara tunggal yaitu semakin tinggi intensitas cahaya yang diterima maka semakin besar arus yang dihasilkan tetapi tegangan akan semakin berkurang dikarenakan meningkatnya temperatur. Berdasarkan rangkaiannya, pada rangkaian seri dari kedua panel surya memiliki karakteristik yaitu pada kurva I-V, tegangan yang dihasilkan semakin meningkat tetapi arus yang di hasilkan cenderung tetap sedangkan rangkaian paralel baik panel surya *polycrystalline* maupun *monocrystalline* yaitu pada kurva I-V tegangan yang di hasilkan cenderung tetap, arus yang dihasilkan semakin meningkat. Rangkaian seri memiliki intensitas cahaya dan efisiensi yang lebih besar dari pada rangkaian paralel baik itu panel surya *polycrystalline* maupun *monocrystalline*. *Monocrystalline* memiliki efisiensi yang lebih besar dari pada *polycrystalline* hal ini di karenakan *monocrystalline* disusun menggunakan kristal utuh sedangkan *polycrystalline* disusun dari potongan-potongan kristal. Berdasarkan rangkaiannya rangkaian seri menghasilkan efisiensi yang lebih besar dibandingkan dengan rangkaian paralel. Dapat dilihat bahwa pada panel surya *polycrystalline* seri memiliki peningkatan dari 0,05 % hingga 21,75% sedangkan paralel 3,35% hingga 18,35 %. Sedangkan untuk panel surya *monocrystalline* seri menghasilkan efisiensi yang meningkat pula dari 0,45 % hingga 25,40% dan *monocrystalline* paralel menghasilkan efisiensi yang meningkat pula dari 4,92 % hingga 21,15%.

Kata kunci: *Polycrystalline, Monocrystalline, Seri, Paralel, Mesin EESFC*

ABSTRACT

Lulu Fajriani Pasrah Arunsae. Analysis Of The Effect Of Circuits Photovoltaic On Efficiency In El Equipo De Energía Solar Fotovoltaica Controlado (EESFC) Machine (supervised by Dr. Eng. Jalaluddin, ST, MT. dan Azwar Hayat, ST,M.Sc.,Ph.D).

This research uses the El Equipo de Energía Solar Fotovoltaica Controlado (EESFC) machine on solar panels polycrystalline and monocrystalline in series and parallel, to determine the characteristics and the efficiency generated by these solar panels which is carried out in the Hasanuddin University renewable energy laboratory. The results of this study indicate that the characteristics of the panels polycrystalline and monocrystalline singly, namely the higher the light intensity received, the greater the current generated but the resulting voltage decreases due to increasing temperature. Based on the series, the series of the two solar panels have characteristics, namely on curve IV, the resulting voltage increases but the resulting current tends to remain, while the parallel circuit of both solar panels, polycrystalline and monocrystalline namely on curve IV the resulting voltage tends to be constant, the current generated more increasing. Series circuits have greater light intensity and efficiency than parallel circuits, be it solar panels polycrystalline or monocrystalline. Monocrystalline has a greater efficiency than polycrystalline this is because monocrystalline is composed of whole crystals, while polycrystalline is composed of pieces of crystals. Based on the series circuit, the efficiency is greater than the parallel circuit. It can be seen that in the solar panels polycrystalline series has an increase from 0.05% to 21.75% while parallel 3.35% to 18.35%. As for the solar panels monocrystalline series resulted in increased efficiency from 0.45% to 25.40% and monocrystalline parallel resulted in increased efficiency from 4.92% to 21.15%.

Key Word: *Polycrystalline, Monocrystalline, Seri, Paralel, El Equipo De Energía Solar Fotovoltaica Controlado (EESFC)*

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL.....	i
LEMBAR PENGESAHAN.....	ii
PERNYATAAN KEASLIAN.....	iii
DAFTAR RIWAYAT HIDUP.....	iv
KATA PENGANTAR.....	v
ABSTRAK.....	vii
DAFTAR ISI.....	ix
DAFTAR GAMBAR.....	xi
NOMENKLATUR	xiii
BAB I. PENDAHULUAN	
I.1 Latar belakang	1
I.2 Rumusan Masalah	2
I.3 Tujuan Penelitian.....	3
I.4 Batasan Masalah	3
I.5 Manfaat Penelitian	3
BAB II. TINJAUAN PUSTAKA	
II.1 <i>Photovoltaic cell</i>	4
II.2 Karakteristik Sel Surya.....	10
II.3 Radiasi Matahari Dibumi	13
II.4 Jenis-Jenis Panel Surya.....	14
II.5 Rangkaian Panel Surya.....	18

II.6 Efisiensi Panel Surya.....	20
BAB III. METODOLOGI PENELITIAN	
III.1 Waktu Penelitian dan Tempat	21
III.2 Alat Dan Bahan	21
III.2.1 Alat Yang Digunakan.....	21
III.2.2 Bahan Yang Digunakan.....	28
III.3 Metode Pengambilan data	28
III.4 Proses Pengambilan Data.....	29
III.5 Skema Instalasi Pengujian.....	31
III.6 Bagan Alir Penelitian.....	32
BAB IV. HASIL DAN PEMBAHASAN	
IV.1 Analisa Hasil Pengujian Eksperimental	33
IV.2 Pembahasan	47
BAB V. KESIMPULAN	
V.1 Kesimpulan	60
V.2 Saran	60
DAFTAR PUSTAKA	61
LAMPIRAN.....	63

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 :Proses perubahan pada sel surya.....	5
Gambar 2.2 : Struktur pita sebuah semikonduktor.....	6
Gambar2.3:Tingkat energi yang dihasilkan oleh sambungan p-n semikonduktor.....	6
Gambar 2.4 : Rangkaian equivalen listrik.....	8
Gambar 2.5 : <i>Shunt Resistance</i> dan <i>Series resistance</i>	9
Gambar 2.6 : Panel Surya <i>Monocrystalline silicon</i>	15
Gambar 2.7 : Panel Surya <i>Polycrystalline silicon</i>	17
Gambar 2.8 : Rangkaian seri sel surya.....	18
Gambar 2.9 : Grafik Arus terhadap Tegangan pada rangkaian seri.....	19
Gambar 2.10: Rangkaian paralel sel surya.....	19
Gambar 2.11 : Grafik Arus terhadap Tegangan pada rangkaian paralel.....	20
Gambar 3.1 : Mesin <i>El Equipo De Energía Solar Fotovoltaica Controlado (EESFC)</i>	21
Gambar 3.2 : Lampu hologen.....	22
Gambar 3.3 : Bagian <i>Solar Simulator</i>	22
Gambar 3.4 : <i>Charge regulatr</i>	23
Gambar 3.5 : <i>Storage battery</i>	24
Gambar 3.6 : Konsol Elektronik di layar komputer.....	24
Gambar 3.7 : Konsol Elektronik.....	25
Gambar 3.8 : Modul beban DC.....	25
Gambar 3.9 : Layar komputer pemelihan.....	25
Gambar 3.10 : Inverter fase tunggal.....	26
Gambar 3.11 : Modul beban AC.....	27
Gambar 3.12 : (a) <i>monocrystalline photovoltaic</i> . (b) <i>polycrystalline</i>	28

Gambar 3.13 : Skema Instalasi Pengujian.....	31
Gambar 3.14 : Diagram alur penelitian.....	32
Gambar 4.1 : Karakteristik arus dengan tegangan panel surya <i>polycrystalline</i> dan <i>monocrystalline</i>	47
Gambar 4.2 : Karakteristik temperatur,tegangan, arus dan daya (pout) terhadap waktu pada panel surya <i>polycrystalline</i>	48
Gambar 4.3 : Temperatur,tegangan, arus dan daya (pout) terhadap waktu pada panel surya <i>monocrystalline</i>	49
Gambar 4.4 : Perbandingan karakteristik antara arus dengan tegangan panel surya <i>polycrystalline</i> dan <i>monocrystalline</i> secara seri.....	50
Gambar 4.5 : Perbandingan karakteristik arus tegangan panel surya <i>polycrystalline</i> dan <i>monocrystalline</i> secara paralel.....	52
Gambar 4.6 : Perbandingan karakteristik daya keluar (Pout) dengan waktu pada panel surya <i>polycrystalline</i> maupun <i>monocrystalline</i> secara seri.....	53
Gambar 4.7 : Perbandingan karakteristik daya keluar (Pout) dengan waktu panel surya <i>polycrystalline</i> dan <i>monocrystalline</i> secara Paralel.....	53
Gambar 4.8: Perbandingan pengaruh tegangan dengan Daya(Pout) pada panel surya <i>polycrystalline</i> maupun <i>monocrystalline</i> secara seri.....	55
Gambar 4.9 : Perbandingan pengaruh tegangan dengan Daya(Pout) pada panel surya <i>polycrystalline</i> maupun <i>monocrystalline</i> secara paralel.....	55
Gambar 4.10 : Perbandingan Intensitas cahaya terhadap efisiensi panel surya <i>polycrystalline</i> dan <i>monocrystalline</i> secara seri maupun paralel..	57
Gambar 4.11 : Perbandingan efisiensi panel surya <i>polycrystalline</i> dan <i>monocrystalline</i> secara seri maupun paralel. Terhadap waktu penyerapan.....	58

NOMENKLATUR

Simbol	Keterangan	Satuan
FF	<i>Fill Factor</i>	
V_{MP}	Tegangan maksimum dari panel surya	V
I_{MP}	Arus maksimum dari panel surya	A
P_{MP}	Daya maksimum dari panel surya	W
V_{OC}	Tegangan rangkaian terbuka	V
I_{SC}	Arus hubung singkat	A
P	Daya	W
V	Tegangan	V
I	Arus	A
$P_1 P_2 P_3$	Daya pengujian 1,2,3,....	W
T1	Temperatur Lingkungan	°C
T2	Temperatur Panel 2	°C
T3	Temperatur Panel 1	°C
E	Intensitas Cahaya	W/m^2
η	Efisiensi	%
P_{out}	Daya Keluar	W

BAB I

PENDAHULUAN

I.1. Latar Belakang

Sebuah elemen semikonduktor yang dapat mengkonversi energi surya menjadi energi listrik dengan prinsip fotovoltaik di sebut sel surya. Kumpulan beberapa sel surya disebut dengan modul surya, sedangkan kumpulan dari beberapa modul surya panel surya. Sel surya dipengaruhi oleh dua variabel fisis untuk menghasilkan tegangan dan arus listrik yaitu intensitas radiasi cahaya matahari dan suhu lingkungan. Sel surya menghasilkan tegangan dan arus listrik yang sebanding dengan intensitas radiasi cahaya matahari yang di terima sel surya. Sedangkan apabila suhu lingkungan semakin tinggi dengan intensitas radiasi cahaya matahari yang tetap, maka tegangan panel surya akan berkurang dan arus listrik yang dihasilkan akan bertambah. (Suryana, 2016)

Energi surya atau yang lebih di kenal dengan *photovoltaic cell* adalah sebuah wadah semikonduktor yang mampu merubah langsung energi surya menjadi energi listrik. Berdasarkan data penyinaran matahari yang dihimpun dari 18 lokasi di Indonesia menunjukkan bahwa radiasi suryadi Indonesia dapat diklasifikasikan berturut-turut untuk kawasan barat dan timur Indonesia dengan distribusi penyinaran

- Kawasan barat Indonesia (KBI) = 4.5 kWh/m²hari, variasi bulanan sekitar 10%
- Kawasan timur Indonesia (KTI) = 5.1 kWh/m².hari, variasi bulanan sekitar 9%
- Rata-rata Indonesia = 4.8 kWh/m².hari, variasi bulanan sekitar 9%.

Dari data yang telah diambil diatas dapat di tarik kesimpulan bahwa radiasi matahari itu tersedia merata hampir setiap tahun dan kawasan timur Indonesia memiliki penyinaran yang lebih baik di banding kan kawasan barat Indonesia. (Imam Kholik, 2015)

Energi terbarukan merupakan salah satu solusi yang tepat dalam penggunaan energi fosil yang semakin lama semakin habis, solusi untuk meningkatkan rasio elektrifikasi ini (Bazilian et al. 2013).

Di Indonesia, umumnya terdapat tiga jenis panel yang terdapat dipasaran yaitu Monokristalin, *Polycrystalline*, dan Amorphus. Ketiga jenis sel surya tersebut memiliki karakteristik masing-masing dan efisiensi yang dimiliki berbeda-beda. Panel surya tidak selalu menghasilkan daya keluaran yang sama tiap waktunya karena beberapa faktor yaitu atmosfer bumi, orientasi panel, tiupan angin, radiasi matahari, dan suhu kerja panel surya (Jarnawi 2018).

Untuk alat yang digunakan dalam penelitian ini adalah mesin *El Equipo De Energía Solar Fotovoltaica Controlado* (EESFC). Dimana mesin *El Equipo De Energía Solar Fotovoltaica Controlado* (EESFC) adalah Unit komputer yang mengontrol energi surya fotovoltaik menggunakan hukum konversi untuk siaran langsung konversi radiasi matahari menjadi listrik. Energi yang diserap disediakan oleh simulasi radiasi matahari, yang dalam kasus ini disuplai oleh panel dengan sumber cahaya yang kuat (lampu).

Sehingga untuk itu penulis melakukan penelitian untuk mengetahui perbedaan output yang di hasilkan dari panel surya *monocrystalline* dan *polycrystalline* secara seri, paralel atau seri-paralel, dengan melakukan pengujian dan mengetahui karakteristik serta efisiensi yang di hasilkan panel surya *monocrystalline* dan *polycrystalline* secara seri, paralel atau seri-paralel menggunakan mesin EESFC dengan judul “**ANALISIS PENGARUH RANGKAIAN PHOTOVOLTAIC TERHADAP EFISIENSI PADA MESIN EL EQUIPO DE ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA CONTROLADO (EESFC)**”

I.2. Rumusan Masalah

1. Bagaimana karakteristik material fotovoltaik yaitu *monocrystalline* dan *polycrystalline*?

2. Bagaimana efisiensi yang di hasilkan fotovoltaik *monocrystalline* dan *polycrystalline* jika di susun secara seri dan paralel?
3. Bagaimana efisiensi fotovoltaik *monocrystalline* dan *polycrystalline* dengan variasi waktu penyerapan cahaya (*soakig time*)?

I.3. Tujuan Penelitian

1. Menganalisis karakteristik material fotovoltaik *monocrystalline* dan *polycrystalline*
2. Menganalisis efisiensi yang di hasilkan fotovoltaik *monocrystalline* dan *polycrystalline* jika di susun secara seri dan paralel
3. Menganalisis efisiensi fotovoltaik *monocrystalline* dan *polycrystalline* dengan variasi waktu penyerapan cahaya (*soakig time*)

I.4. Batasan Masalah

1. Material fotovoltaik yang digunakan adalah *monocrystalline* dan *polycrystalline*
2. Variasi yang diteliti adalah susunan paralel dan seri dari fotovoltaik *monocrystalline* atau *polycrystalline* dan waktu penyerapan cahaya dari keduanya.
3. perbandingan yang di analisis adalah efisiensi yang keluar dari fotovoltaik *monocrystalline* dan *polycrystalline* baik dari rangkaian nya maupun waktu penyerapan cahaya.

I.5. Manfaat Penelitian

1. Bagi penulis adalah sebagai wadah pengaplikasian pengetahuan yang dimiliki, khususnya dalam bidang energi terbarukan.
2. Bagi akademik adalah sebagai bahan informasi untuk penelitian selanjutnya yang kemudian bisa dikembangkan untuk penelitian lebih lanjut.
3. Bagi masyarakat umum adalah sebagai acuan dalam penggunaan alat Fotovoltaik terutama dalam memilih material dari fotovoltaik itu sendiri.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

II.1. Photovoltaic cell

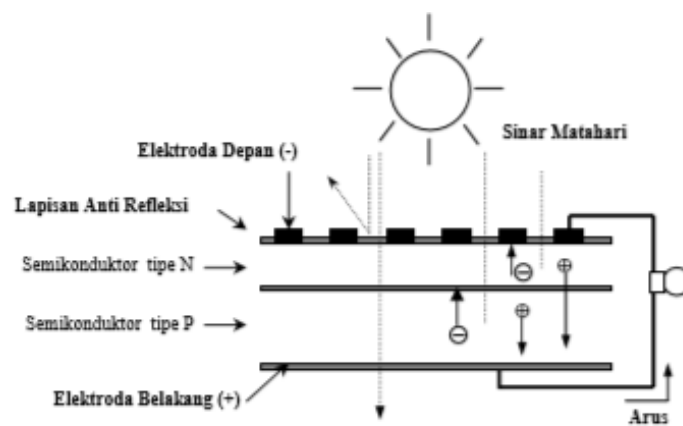
Salah satu sumber energi yang ramah lingkungan dan sangat menjanjikan pada masa yang akan datang adalah *Solar cell* (panel surya), karena tidak terdapat polusi yang dihasilkan selama proses konversi energi, serta sumber energi yang banyak tersedia dalam kehidupan sehari-hari adalah sinar matahari. Seperti Indonesia yang beriklim tropis yang menerima matahari sepanjang tahun. Energi terbarukan yang lain dapat menggunakan kombinasi dengan panel surya ini dapat menjadi pembangkit listrik tenaga angin, pembangkit listrik tenaga air, sistem penyimpanan energi, mesin untuk menghasilkan air, sistem energi cadangan dan produk-produk energi yang efisien lainnya. (Napitupulu dkk, 2017)

Bentuk fisik sel panel surya sangat mirip dengan dioda pertemuan klasik *p-n*. Ketika cahaya diserap oleh persimpangan, energi dari foton diserap ditransfer ke sistem elektron dari bahan, mengakibatkan penciptaan pembawa muatan yang dipisahkan di persimpangan. Pembawa muatan mungkin pasang ion elektron dalam larutan elektrolit cair atau "lubang elektron" dalam bahan semikonduktor padat. Pembawa muatan di wilayah persimpangan membuat gradien potensial, mendapatkan dipercepat di bawah medan listrik dan beredar sebagai arus melalui sirkuit eksternal.

Asal-usul potensi fotovoltaik adalah perbedaan dalam potensi kimia, yang disebut tingkat Fermi, dari elektron dalam dua bahan terisolasi. Ketika mereka bergabung, persimpangan pendekatan keseimbangan termodinamika baru. Kesetimbangan tersebut dapat dicapai hanya ketika tingkat Fermi sama dalam dua bahan. Hal ini terjadi dengan aliran elektron dari satu bahan ke yang lain, sampai perbedaan tegangan ditetapkan antara dua bahan yang memiliki potensi sama dengan perbedaan awal tingkat Fermi. Potensi ini mendorong *photocurrent*.

Secara sederhana aliran arus listrik pada sel surya adalah aliran elektron yang terjadi jika persambungan bahan semikonduktor bertipe p dan n (*p-n junction*

semiconductor) terkena sinar matahari. Saat sambungan p-n terkena sinar matahari maka elektron-elektron memantul melalui celah foton menuju ke pita konduksi, meninggalkan proton di dalamnya. Karena dipengaruhi oleh potensial intrinsik dan sambungan, sehingga elektron dan proton bergerak berlawanan dan membangkitkan tegangan dan menghasilkan energi listrik. Proses perubahan energi matahari menjadi energi listrik ditunjukkan dalam gambar 2.1

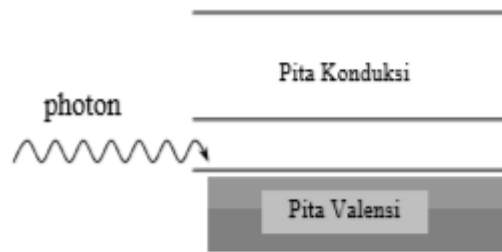


Gambar 2.1 Proses perubahan energi matahari menjadi energi listrik pada sel surya

Sumber: Rusminto Tjatur W. 2003.

Absorber (penyerap) adalah bagian utama pengubah energi sinar matahari menjadi listrik. Tetapi setiap lapisan dari sel surya juga berpengaruh terhadap efisiensi dari sel surya tersebut. Sinar matahari terdiri dari bermacam-macam jenis gelombang elektromagnetik, oleh karena itu penyerap disini diharapkan dapat menyerap sebanyak mungkin radiasi sinar yang berasal dari cahaya matahari. Lebih detail lagi bisa dijelaskan bahwa semikonduktor adalah bahan yang memiliki struktur seperti isolator akan tetapi memiliki celah energi kecil sehingga memungkinkan elektron bisa melompat dari pita valensi ke pita konduksi. Hal

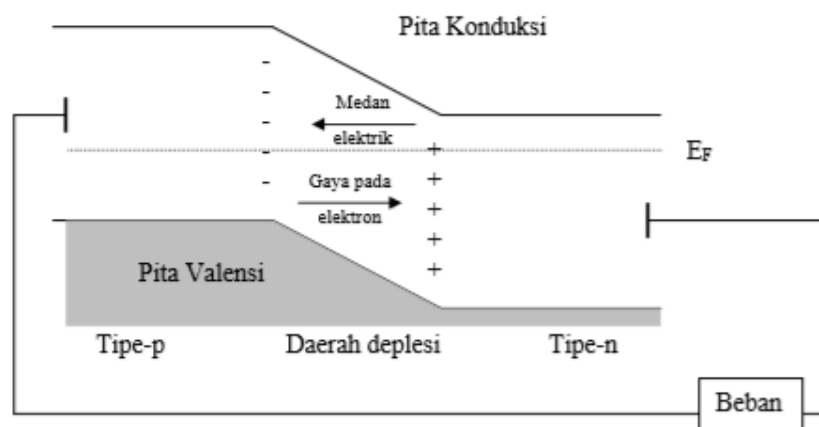
tersebut dapat dijelaskan dengan pita-pita energi seperti gambar 2.2 (Rusminto, 2005)



Gambar 2.2 Struktur pita sebuah semikonduktor

Sumber: Rusminto Tjatur W. 2005.

Elektron dari pita konduksi dapat meloncat ke pita valensi ketika sambungan tersebut dikenai photon dengan energi tertentu. Tingkat energi yang dihasilkan diperlihatkan pada gambar 2.3.



Gambar 2.3 Tingkat energi yang dihasilkan oleh sambungan p-n semikonduktor

Sumber: Rusminto Tjatur W. 2005.

Sel surya mengalirkan arus listrik yaitu ketika proton-proton yang terdapat dalam sinar matahari jatuh pada permukaan bahan sel surya (*absorber*) akan di serap, di pantulkan dan di lewatkan begitu saja seperti terlihat pada gambar 2.1. Dan hanya foton dengan tingkat energi tertentu yang akan membebaskan elektron dari ikatan atomnya. Tingkat energi ini disebut energi *band-gap* yang didefinisikan

sebagai sejumlah energi yang dibutuhkan untuk mengeluarkan elektron dari ikatan kovalennya sehingga terjadilah aliran arus listrik.

Elektron dari pita valensi akan tereksitasi ke pita konduksi. Elektron menjadi pembawa n dan meninggalkan hole, pembawa p. Pembawa p akan bergerak menuju persambungan demikian juga pembawa n akan bergerak ke persambungan, perpindahan tersebut menghasilkan beda potensial. Arus dan daya yang dihasilkan fotovoltaiik ini dapat dialirkan ke rangkaian luar. Untuk membebaskan elektron dari ikatan kovalennya, energi foton (hc) harus sedikit lebih besar/diatas daripada energi *band-gap*. Jika energi foton terlalu besar dari pada energi *band-gap*, maka ekstra energi tersebut akan dirubah dalam bentuk panas pada sel surya. Karenanya sangatlah penting pada sel surya untuk mengatur bahan yang dipergunakan, yaitu dengan memodifikasi struktur molekul dari semikonduktor yang dipergunakan.

Agar efisiensi sel surya bisa tinggi maka foton yang berasal dari sinar matahari harus bisa diserap yang sebanyak-banyaknya, kemudian memperkecil refleksi dan rekombinasi serta memperbesar konduktivitas dari bahannya. Agar foton bisa diserap sebanyak-banyaknya, maka penyerap harus memiliki energi band-gap dengan jangkauan yang lebar, sehingga memungkinkan untuk bisa menyerap sinar matahari yang mempunyai energi sangat bermacam-macam tersebut..(Rusminto, 2005)

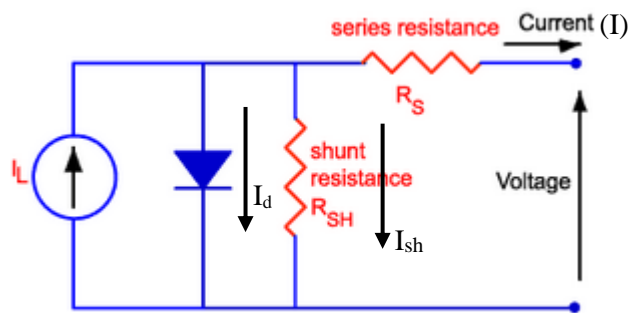
Solar cell (panel surya) adalah alat yang merubah sinar matahari menjadi listrik melalui proses aliran-aliran elektron negatif dan positif didalam cell modul tersebut karena perbedaan electron. Hasil dari aliran elektron-elektron akan menjadi listrik DC yang dapat langsung dimanfaatkan untuk mengisi baterai / aki sesuai tegangan dan ampere yang diperlukan. Panel Surya adalah komponen utama yang diperlukan untuk instalasi pembangkit listrik tenaga surya, panel surya terbuat dari bahan semikonduktor (Luque dan Hegedus, 2003).

Panel surya memiliki dua lapisan semikonduktor dengan muatan yang berbeda. Pada bagian lapisan panel surya bermuatan positif dan pada bagian lapisan diatasnya bermuatan negatif.(Swanson 2009).

Pada saat permukaan panel surya menerima cahaya matahari, beberapa foton dari cahaya matahari akan diserap oleh atom semikonduktor untuk membebaskan elektron dari ikatan atomnya sehingga menjadi elektron yang bergerak bebas. Adanya perpindahan elektron-elektron inilah yang menyebabkan terjadinya arus listrik. (Rofiq, 2018)

- Rangkaian Equivalen Listrik

Pada umumnya panel surya atau photovoltaic (PV) memiliki rangkaian ekuivalen. Rangkaian ekuivalen panel surya terdiri dari sebuah arus fotovoltaiik, sebuah dioda, hambatan seri (R_s) dan hambatan paralel (R_{sh}). Hambatan yang terdapat pada panel surya ada dua yaitu *shunt resistance* (R_{sh}) yaitu hambatan internal yang terjadi pada material, sedangkan *series resistance* (R_s) adalah hambatan yang terjadi karena rangkaian. Ditunjukkan pada gambar di bawah ini

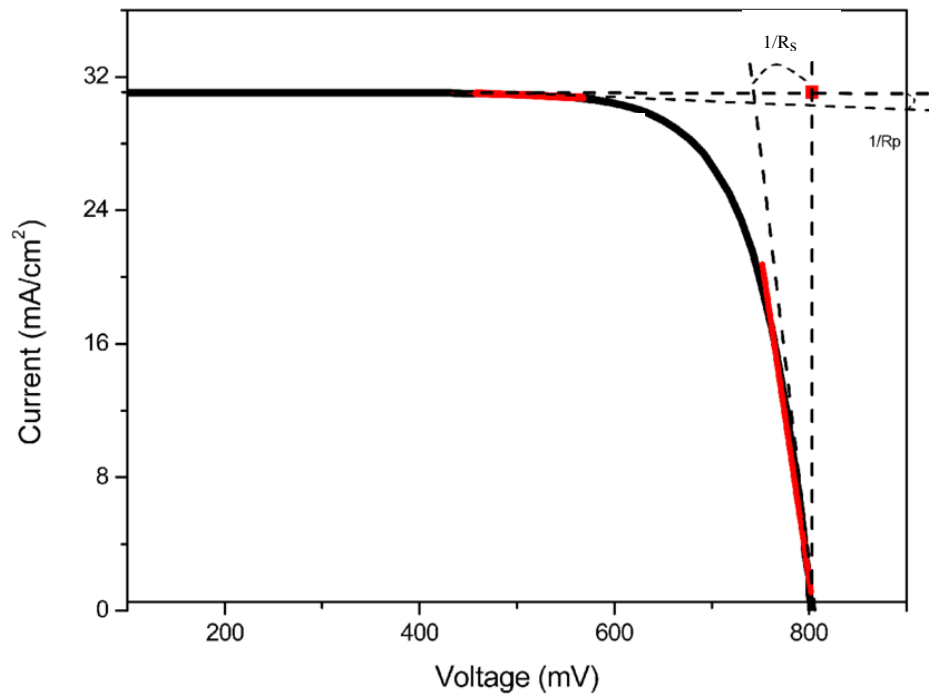


Gambar 2.4 Rangkaian ekuivalen listrik

Sumber: M. A. Green. (1992).

Arus terminal keluaran (I) sama dengan arus yang dibangkitkan cahaya (I_L) dikurangi arus dioda (I_d) dan arus kebocoran shunt (I_{sh}). Resistansi seri (R_s) mewakili resistansi internal terhadap aliran arus dan rangkaian, dan bergantung pada kedalaman sambungan p-n, ketidakmurnian, dan resistansi kontak. Resistansi shunt (R_{sh}) adalah hambatan internal dari material. Dalam panel surya yang ideal, $R_s = 0$ (tanpa kehilangan seri), dan $R_{sh} = \infty$ (tidak ada kebocoran ke *ground*). Dalam sel silikon satu inci persegi berkualitas tinggi, $R_s = 0,05$ hingga $0,10$ ohm dan $R_{sh} = 200$ hingga 300 ohm. Efisiensi konversi panel surya sensitif terhadap variasi kecil R_s , tetapi tidak sensitif terhadap variasi R_{sh} . Peningkatan kecil pada R_s dapat menurunkan output panel surya secara signifikan. Dalam rangkaian ekuivalen, arus

yang dikirim ke beban eksternal sama dengan arus yang dihasilkan oleh iluminasi (I_L), dikurangi arus dioda (I_d) dan arus ground-shunt (I_{sh}). (M. A. Green. 1992)



Gambar 2.5 Shunt Resistance dan Series resistance

Sumber: Oumar Absatou. (2016).

Resistansi seri dan shunt dapat digambarkan sebagai perubahan karakteristik IV yang ideal. Resistansi seri, kerugian R_s terutama disebabkan oleh resistansi kontak dari kontak depan dan belakang sel surya. Komponen lain yang berkontribusi terhadap resistansi seri adalah resistansi pada bahan semikonduktor. Nilai R_s yang tinggi menyebabkan penurunan FF sel surya yang pada akhirnya mempengaruhi efisiensi. Resistansi shunt (R_{sh}) digunakan untuk memodelkan arus bocor. Resistansi shunt terutama muncul karena arus bocor yang dibuat di dalam sel surya. Karakteristik superimposisi I-V aktual diperoleh dengan karakteristik ideal. Dimungkinkan untuk menyimpulkan resistansi seri di area di mana sel surya berperilaku sebagai generator tegangan dan resistansi shunt di area tegangan yang luas, berperilaku sebagai generator arus. Karakteristik ideal dari sel surya adalah setara dengan dioda ideal dengan tegangan ambang batas yang sama dengan tegangan hubungan singkat (*short-circuit current*) sel, dimasukkan ke dalam

rangkaian yang menyuplai arus yang setara dengan arus hubung singkat.(Oumar Absatou,2016)

Pada kondisi temperatur dan radiasi konstan, karakteristik arus-tegangan dari model rangkaian tersebut adalah

$$I = I_L - I_d - I_{sh} = I_L - I_o \{ \exp[(V + IR_s) / a] - 1 \} - \frac{V + IR_s}{R_{sh}} \dots\dots\dots (1)$$

Daya panel surya adalah hasil kali diantara tegangan dan arus yang mengalir, untuk mencapai nilai daya diperlukan data tegangan dan arus,berikut ini adalah rumus mencari daya yang ditunjukkan pada persamaan dibawah ini:

$$P = V \times I \times FF \dots\dots\dots(2)$$

Dengan : P = Daya (watt)

V = Tegangan (volt)

I = Arus (A)

FF = Fill Factor

Shunt resistance (R_{sh}) untuk kebanyakan sel surya modern berharga sangat besar sehingga suku terakhir pada persamaan 1 dapat diabaikan. Namun jika pada tegangan rendah kurva I-V memperlihatkan slope negatif bukan berupa garis yang hampir horisontal barulah *shunt resistance* perlu diperhitungkan.(Duffie,1991).

II.2. Karakteristik Sel Surya

Pada perkembangan sains dan teknologi, terdapat teknologi sel surya yang sudah di inovasikan. Ada terdapat sel surya generasi satu, dua, tiga dan empat, dengan struktur atau bagian-bagian penyusun sel yang berbeda pula. Pada umumnya *solar cell* memiliki karakteristik yang berbeda tergantung dengan variasi intensitas cahaya yang di terima berbeda-beda. Karakteristik *solar cell* tersebut dapat digambarkan melalui grafik I-V. Panel surya berfungsi sebagai sumber arus jika pada rangkaian tertutup. (Putriyani dkk, 2019).

Kapasitas daya dari sel atau modul surya dilambangkan dalam watt peak (W_p) dan diukur berdasarkan standar pengujian Internasional yaitu *Standard Test*

Condition (STC). Standar ini mengacu pada intensitas radiasi sinar matahari sebesar 1000 W/m^2 yang tegak lurus sel surya pada suhu 25°C Modul panel surya memiliki hubungan antara arus dan tegangan. Pada saat tahanan variable bernilai tak terhingga (*open circuit*) maka arus bernilai minimum (nol) dan tegangan pada sel berada pada nilai maksimum, yang dikenal sebagai tegangan *open circuit* (V_{oc}). Pada keadaan yang lain, ketika tahanan variable bernilai nol (*short circuit*) maka arus bernilai maksimum, yang dikenal sebagai arus *short circuit* (I_{sc}). Jika tahanan variable memiliki nilai yang bervariasi antara nol dan tak terhingga maka arus (I) dan tegangan (V) akan diperoleh nilai yang bervariasi. (Napitupulu dkk, 2017)

Sel surya terbuat dari rangkaian dua atau lebih lapisan semikonduktor yang didukung oleh piranti lain untuk meningkatkan efisiensinya. Berdasarkan konfigurasi semikonduktor yang menyusunnya, secara umum sel surya. Pada tipe p-n junction sel surya terdiri dari dua lapisan semikonduktor yaitu tipe n (sebagai window) dan tipe p (sebagai adsorber). Tebal lapisan *window* berkisar antara $0,6\text{-}1 \mu\text{m}$ sedangkan tebal lapisan adsorber berkisar antara $1\text{-}2 \mu\text{m}$. Semikonduktor sendiri ialah suatu material yang dapat bersifat sebagai konduktor dan insulator pada kondisi tertentu. Contoh semikonduktor yang paling terkenal ialah silikon. Silikon memiliki empat elektron valensi sehingga agar dapat stabil silikon harus melepas empat elektron terluarnya atau justru menangkap empat elektron. Jadi pada silikon murni, material memiliki kecenderungan yang sama untuk menangkap atau melepas elektron. Semikonduktor semacam ini disebut semikonduktor intrinsik (tipe 1). (Putriyani dkk, 2019).

Ada lima tipe umum struktur panel sel surya (Pahlevi, Reza. 2014)

a. Substrat/Metal backing

Material yang menopang seluruh komponen sel surya adalah substrat. Material substrat juga harus mempunyai konduktifitas listrik yang baik karena juga berfungsi sebagai kontak terminal positif sel surya, sehingga umumnya digunakan material metal atau logam seperti aluminium atau *molybdenum*. Untuk sel surya organik dan sel surya *dye-sensitized* (*DSSC*), substrat juga berfungsi sebagai tempat masuknya cahaya sehingga material yang digunakan

yaitu material yang konduktif tapi juga transparan seperti *Indium Tin oxide* (ITO) dan *Flourine Doped Tin Oxide* (FTO).

b. Material semikonduktor

Bagian inti dari sel surya adalah material semikonduktor. Bagian ini biasanya mempunyai tebal sampai beberapa ratus mikrometer untuk sel surya generasi pertama (silikon), dan 1-3 mikrometer untuk sel surya lapisan tipis serta berfungsi untuk menyerap cahaya dari sinar matahari. Dalam kehidupan sehari-hari, semikonduktor yang digunakan adalah material silikon, yang umum diaplikasikan di industri elektronik. Sedangkan untuk sel surya lapisan tipis, material semikonduktor yang umum digunakan dan telah masuk pasaran Bagian semikonduktor tersebut terdiri dari *junction* atau gabungan dari dua material semikonduktor yaitu semikonduktor tipe-p (material-material yang disebutkan diatas) dan tipe-n (*silikon tipe-n, CdS,dll*) yang membentuk p-n junction.

c. Kontak metal / *contact grid*

Selain substrat sebagai kontak positif, diatas sebagian material semikonduktor biasanya dilapiskan material metal atau material konduktif transparan sebagai kontak negatif

d. Lapisan anti reflektif

Efleksi cahaya harus diminimalisir agar mengoptimalkan cahaya yang terserap oleh semikonduktor. Oleh karena itu biasanya sel surya dilapisi oleh lapisan anti-refleksi. Material anti refleksi ini adalah lapisan tipis material dengan besar indeks refraktif optik antara semikonduktor dan udara yang menyebabkan cahaya dibelokkan ke arah semikonduktor sehingga meminimumkan cahaya yang dipantulkan kembali.

e. Enkapsulasi / *cover glass*

Bagian ini berfungsi sebagai enkapsulasi untuk melindungi modul surya dari hujan atau kotoran.

II.3. Radiasi Matahari di Bumi

Radiasi matahari yang tersedia diluar atmosfer bumi atau sering disebut konstanta radiasi matahari sebesar 1357 W/m^2 dikurangi intensitasnya oleh penyerapan dan pemantulan oleh atmosfer sebelum mencapai permukaan bumi. Ozon di atmosfer menyerap radiasi, selain itu terjadi pengurangan intensitasnya oleh molekul-molekul gas, debu, dan uap air dalam atmosfer sebelum mencapai bumi yang disebut sebagai radiasi sebaran. Radiasi matahari terdiri dari energi elektromagnetik dari berbagai panjang gelombang. Mulai dari gelombang paling pendek yaitu ultraviolet hingga gelombang paling panjang yaitu *infrared*. Sedangkan yang dapat dikonversi oleh sel surya hanya spektrum cahaya visual diantara gelombang violet sampai merah yang menghasilkan listrik (Jacobson, 2009).

Radiasi matahari yang sampai ke bumi itu terdapat bermacam-macam. Berdasarkan radiasi matahari terbagi atas tiga kelompok yaitu

1. Sinar Ultra Violet (UV) yang termaksud sinar tidak tampak memiliki panjang gelombang yaitu
UV Extrim : 100-200 nm
UV-C : 200-280 nm
UV-B : 280-315 nm
UV-A : 315-400 nm
2. Sinar tampak memiliki panjang gelombang yang terdiri dari
Sinar Ungu : 400-435 nm
Intensitas sinar ungu : 20 W/m^2
Sinar Biru : 435-490 nm
Sinar Hijau : 490-574 nm
Sinar Kuning : 574-595 nm
Intensitas sinar kuning : 1000 W/m^2
Sinar jingga : 595-626 nm
Intensitas sinar jingga: $600-800 \text{ W/m}^2$
Sinar Merah : 626-760 nm

Intensitas sinar merah : 400 W/m^2

3. Sinar Inframerah memiliki panjang gelombang yaitu

Inframerah pendek : $760\text{-}20.000 \text{ nm}$

Inframerah jauh: $> 20.000 \text{ nm}$

Faktor yang mempengaruhi penerimaan radiasi matahari di bumi yaitu

1. Sudut datang sinar matahari; sinar datang yang tegak lurus lebih baik di banding dengan sinar datang yang condong. Hal ini disebabkan sinar datang yang tegak lurus bisa menyinari wilayah yang lebih sempit di banding sinar datang yang condong.
2. Panjang hari; Tergantung pada musim dan letak lintang suatu tempat
3. Pengaruh Atmosfer; yaitu terletak pada kejernihan atmosfer. Semakin jernih atmosfer maka memberikan energi radiasi yang kuat, sedangkan semakin banyak bahan penyerap sinar di atmosfer maka semakin turun energi radiasi.

Insolation (*Incoming Solar Radiation*) adalah radiasi matahari yang sampai di permukaan bumi yang terdiri dari radiasi langsung dan radiasi baur. Sedangkan radiasi yang hanya di manfaatkan oleh tanaman adalah *Photosynthetically Active Radiation* (PAR) dan kisarannya hampir mendekati sinar tampak. Tetapan radiasi surya (Solar constant) yang sebesar 1.360 W/m^2 adalah energi radiasi yang datang di permukaan atmosfer selama satu tahun. (Usmadi, 2006).

II.4. Jenis-Jenis Solar Panel atau Panel Surya

1. Panel Surya *Monocrystalline silicon* (*mono-silicon* atau *single silicon*)

Monocrystalline adalah Salah satu jenis panel dari bahan silikon yang banyak dipakai, panel yang paling efisien, serta menghasilkan daya listrik persatuan luas yang paling tinggi tingkat ke efisensinya tinggi 17% - 18% (Setiawan 2019). Untuk tipe *monocrystalline*, mempunyai ciri khas berwarna hitam (berasal dari silikon murni) berbentuk bundar atau segi delapan (tepatnya segi empat yang dipotong di keempat sisinya). Bentuk *monocrystalline silicon* seperti pada Gambar 2.4, bersumber dari silikon ingot yang dipotong.



Gambar 2.6 Panel Surya Monocrystalline silicon (mono-silicon atau single silicon)

Sumber: Napitupulu RAM, Simanjuntak S, Sibarani S. (2017).

Material *monocrystalline* biasanya dapat menurunkan biaya produksi sambil mempertahankan efisiensi konversi energi yang relatif tinggi sebagai sel surya. Dominasi silikon *Crystalline* dapat dikaitkan dengan kematangan teknologi, dan menurunkan biaya produksi langsung, dengan potensi penurunan biaya lebih lanjut dibandingkan dengan teknologi *photovoltaic* lainnya. (Moehlecke,2012).

Silikon *monocrystalline* terdiri dari satu kristal yang sangat besar, multikristal terbuat dari banyak butiran kolumnar yang tumbuh tegak lurus ke bagian bawah wadah. Sel-sel yang dihasilkan dari silikon *monocrystalline* memiliki efisiensi yang lebih tinggi daripada sel-sel berbasis *wafer multi-crystal* (untuk struktur yang serupa). Ini dijelaskan oleh beberapa fitur silikon *monocrystalline*. Pertama-tama, orientasi kristalografi dapat dipilih sehingga *etsa anisotropik* yang menghasilkan piramida acak pada permukaan wafer dapat digunakan, akibatnya mengurangi refleksi optik sel. Kedua, batas butir dan dislokasi adalah situs rekombinasi primer lubang-elektron yang hanya ada dalam sel multikristal. Akhirnya, tingkat kemurnian yang lebih tinggi dapat dicapai dengan proses *Czochralski*. Untuk meningkatkan jumlah sel surya pada bidang modul, batang ini digergaji menjadi persegi atau pseudo-persegi (persegi dengan sudut membulat) ingot sebelum dipotong menjadi *wafer*. Ingot ini adalah sebuah material potongan *crystal silicon* yang sedang melalui proses

czochralsk. Silikon dipotong selama langkah ini dapat sekali lagi cair untuk membentuk ingot baru, tetapi meningkatkan biaya produksi *wafer monocrystalline*, suatu proses yang secara inheren lebih mahal daripada multikristal *ingot casting* (Ehrenreich, 1979).

Keuntungannya adalah untuk lahan yang sempit dengan intensitas matahari yang tinggi menjadikan sel surya *monocrystalline* sangat baik dibandingkan yang jenis *polycrystalline*, tipe mono juga dibentuk rapat susunan modulnya, tapi kerugian dalam proses produksinya akan terjadi. Dan kemampuan menyerap panas dan besarnya daya output dengan dimensi yang kecil saja mampu menghasilkan daya yang cukup besar. Kelemahan dari panel jenis ini adalah tidak akan berfungsi baik ditempat yang cahaya mataharnya kurang (teduh), efisiensinya akan turun drastis dalam cuaca berawan serta modulnya tidak rapat yang menjadi kerugian menyerap panas. (Mustofa. 2015)

2. Panel Surya *Polycrystalline silicon (multicrystalline, multi-silicon, ribbon)*

Panel ini memiliki level silikon yang lebih rendah dari panel *monocrystalline*. Maka panel ini sedikit lebih murah dan sedikit lebih rendah efisiensinya dari panel *monocrystalline*. Panel *polycrystalline* merupakan panel surya / solar cell yang memiliki susunan kristal acak. Yang membedakan tipe *polycrystalline* dengan *monocrystalline* yaitu *polycrystalline* memerlukan luas permukaan yang lebih besar dibandingkan dengan jenis *monocrystalline* untuk menghasilkan daya listrik yang sama, dan juga *polycrystalline* dapat menghasilkan listrik pada saat mendung. Dan panel surya *polycrystalline* ini tidak memerlukan proses *czochralsk*. (Richard dkk 2017)



Gambar 2.7 Panel Surya *Polycrystalline silicon*

Sumber: Napitupulu RAM, Simanjuntak S, Sibarani S. (2017).

Modul panel surya *polycrystalline* umumnya terdiri dari sejumlah *monocrystalline* yang berbeda dan digabungkan satu sama lain dalam satu sel. Pengolahan sel surya *polycrystalline* lebih ekonomis, yang dihasilkan oleh pendinginan cetakan *grafit* yang diisi dengan silikon cair. Sel surya *polycrystalline* saat ini adalah sel surya yang paling populer. Sel surya ini merupakan sel surya yang paling banyak digunakan hingga 48% dari produksi sel surya di seluruh dunia selama 2008. Selama pemadatan silikon cair, berbagai struktur kristal terbentuk. Meskipun mereka sedikit lebih murah untuk dibuat dibandingkan dengan panel surya silikon *monocrystalline*, namun kurang efisien kira-kira sekitar 12% - 14%. (Setiawan 2019)

Panel surya *polycrystalline* ini dihasilkan dari proses metalurgi *grade silicon* dengan pemurnian kimia. Dimana *silicon* baku di cairkan dan dituang kedalam cetakan persegi kemudian di dinginkan dan di potong sesuai bentuk yang di inginkan. Adapun ciri-cirik fisik dari panel *polycrystalline* ini di bandingkan dengan panel *monocrystalline* yaitu memiliki warna kebiruan, bentuknya biasanya kotak atau persegi panjang dengan pola-pola guratan kebiruan dan bila di susun panel *polycrystalline* ini terlihat lebih rapat. (Setiawan 2019)

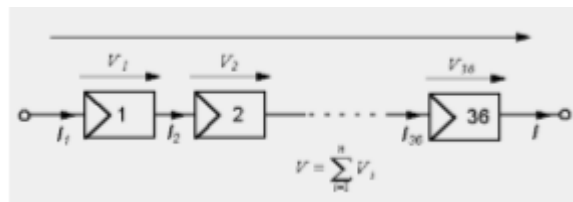
II.5 Rangkaian Panel Surya

Pada dasarnya tegangan yang dihasilkan oleh sel surya sangat kecil sehingga untuk meningkatkan tegangan dari sel surya itu harus rangkai beberapa sel surya sehingga menjadi modul sel surya. Biasanya rangkaian sel surya ini di analogikan dengan rangkaian baterai sebagai sumber listrik dalam rangkaian. Dalam rangkaian sel surya ini terdapat dua yang dapat di pakai yaitu rangkaian seri dan rangkaian paralel. Untuk menentukan jenis rangkaian apa yang sesuai di pakai yaitu harus di sesuaikan dengan nilai tegangan dan arus keluaran yang di inginkan. (Hosenberg, 2003)

Rangkaian panel surya yaitu

1. Rangkaian seri

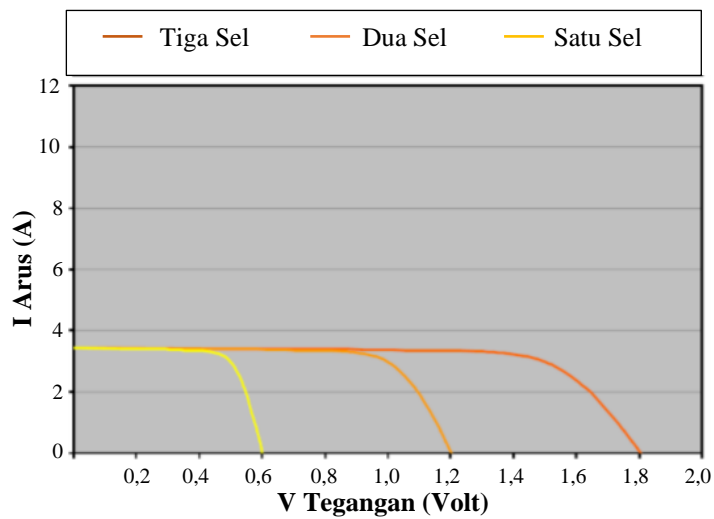
Rangkaian seri yaitu jika lintasan aliran arus listrik melewati semua elemen pada rangkaian. Rangkaian seri sel surya ini menghasilkan arus yang sama di seluruh rangkaian dengan tegangan total yang dihasilkan itu sama dengan jumlah tegangan yang dihasilkan pada sebuah sel surya. (Hosenberg, 2003)



Gambar 2.8 Rangkaian seri sel surya

Sumber: Kininger Franz 2003

Muatan listrik yang bergerak dalam suatu pengantar dapat menimbulkan aliran listrik, dan juga untuk menimbulkan arus listrik yaitu arah pengantar berlawanan dengan gerak elektron. Untuk rangkaian seri ini arus listrik yang masuk sama arus listrik yang keluar dari rangkaian, tidak terjadi penambahan arus listrik dari rangkaian ini tetapi memiliki tegangan yang semakin besar sesuai dengan jumlah rangkaian nya. Dapat di lihat gambar 2.7 (Hosenberg, 2003)

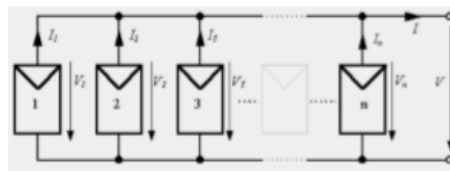


Gambar 2.9 Grafik Arus terhadap Tegangan pada rangkaian seri

Sumber: Kininger Franz 2003.

2. Rangkaian Paralel

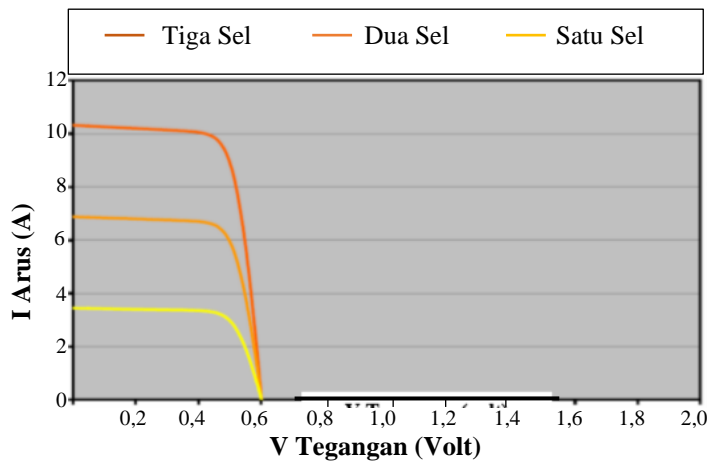
Rangkaian paralel yaitu jika lintasan dalam rangkaian lebih dari satu ulur mengalirkan arus listrik untuk melewati semua komponen dalam rangkaian. Rangkaian paralel sel surya menghasilkan tegangan total yang sama dengan tegangan yang masuk ke dalam rangkaian. Rangkaian ini jarang di tetapkan karena mengasilkan arus total yang tinggi dan tegangan total yang kecil. (Hosenberg, 2003)



Gambar 2.10 Rangkaian Paralel Sel surya

Sumber: Kininger Franz 2003.

Untuk grafik rangkaian paralel dapat di lihat di gambar 2.9 yang menjelaskan bahwa untuk tegangan masuk sama dengan tegangan yang di hasilkan dari rangkaian ini. Sedangkan arus listrik yang di hasilkan itu semakin bertambah sehingga akan menghasilkan arus listrik total yang lebih besar.



Gambar 2.11 Grafik Arus terhadap Tegangan pada rangkaian paralel

Sumber: Kininger Franz 2003

II.6. Efisiensi Panel Surya

Titik daya maksimum yang di hasilkan sel surya disebut sebagai MPP (*Maximum Power Point*). Tegangan maksimum (V_{MPP}) biasanya kurang dari tegangan dari rangkaian terbuka sehingga arus I_{MPP} lebih rendah juga di bandingkan dengan arus rangkaian pendek. Perbandingan antara daya listrik maksimum sel surya atau daya output yang dikeluarkan dengan daya pancaran radiasi yang berasal dari cahaya matahari pada sel surya.

$$\eta = \frac{I \times V \times FF}{(G)(A)} \times 100\% \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100\% \quad \dots\dots\dots (4)$$

Dimana : P_{out} = daya yang di hasilkan sel surya

P_{in} = daya masuk

G= intensitas matahari

A= luas permukaan sel surya