

BAB II

LANDASAN TEORI

2.1 Energi

Pengertian energi adalah sesuatu yang dapat membuat sebuah benda, baik itu benda hidup maupun benda mati mampu melakukan pekerjaan (usaha) atau melakukan perubahan.

Energi primer dalam neraca energi menunjukkan jumlah energi yang tersedia di suatu wilayah. Pasokan energi primer mencakup banyaknya jumlah energi yang di produksi, diimpor, diekspor dan ketersediaan stok.

Dari total pasokan energi primer yang ada di Indonesia pada tahun 2021 yaitu sebesar 472,4 MTOE dengan pasokan terbesar nya adalah batubara sebesar 78,2 MTOE (37,6%), diikut dengan minyak sebesar 69,5 MTOE (33,4%) dan gas sebesar 35 MTOE (16,8%) dan untuk sisanya sebesar 25,3 MTOE (12,2%) yang dipenuhi oleh EBT terdiri dari energi air, panas bumi, surya, angin, dan bionergi (Suparyanto & Rosad, 2022).

2.1.1 Produksi Energi

Produksi energi yang ada di Indonesia pada tahun 2021 yaitu sebesar 472,4 MTOE, sebagian besar (94,6%) yang berasal dari energi fosil yang mencakup seperti batubara, gas dan minyak. Sedangkan produksi energi baru terbarukan sekitar 5,4% yang berasal dari energi nasional. Batubara menyumbang energi terbesar dalam salah satu produksi energi setara dengan 613,9 juta ton. Di sisi lain produksi minyak dan gas terus menunjukkan penurunan yang di akibatkan oleh sumur yang sudah tua. Tetapi pada tahun 2021 terdapat penambahan cadangan baru

sebesar 696 MBOE dengan secara keseluruhan sehingga mendapat lonjakan mencapai 116% sebagaimana yang ditampilkan pada tabel 2.1 di bawah.

Tabel 2. 1 Peningkatan RRR (Reserves Replacement Ratio)

(Suparyanto & Rosad, 2022)

Tahun	Cadangan Minyak (MMSTB)	Cadangan Gas & Asosiasi Gas (BSCF)	Produksi Minyak (MMSTB)	Produksi Gas (BSCF)	RRR	Target RRR
2016	7.251	144.060	303	3.070	64%	60%
2017	3.171	142.720	292	2.963	55%	60%
2018	3.157	135.550	282	2.997	106%	100%
2019	2.676	77.293	272	2.810	354%	100%
2020	4.169	62.390	259	2.443	102%	100%
2021	3.947	60.612	240	2.434	116%	100%

Sedangkan dari produksi EBT menunjukkan peningkatan dibandingkan dengan sebelumnya, terutama dengan naiknya produksi dari PLTA dan PLTP tahun 2021 sebesar 372,6 GWh dan 336 GWh (Suparyanto & Rosad, 2022).

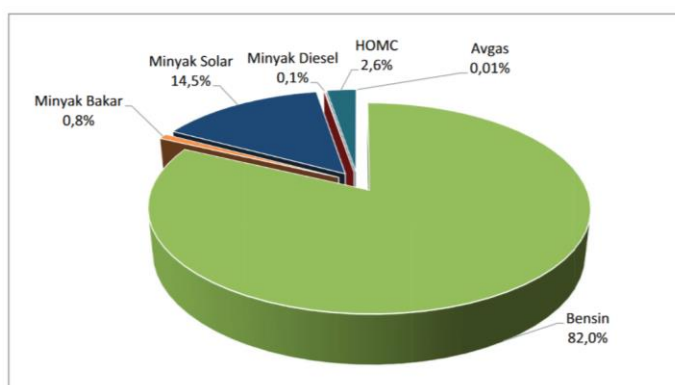
2.1.2 Ekspor Energi

Produksi energi pada tahun 2021 sekitar 59,2% yang dipergunakan untuk keperluan ekspor seperti gas dan batubara masih menjadi andalan penerimaan negara dalam ekspor energi, tercatat sebesar 70,9% (255,9% MTOE) ekspor batubara pada tahun 2021. Sedangkan ekspor untuk minyak mentah sebesar 6,1 MTOE atau 18,2% dari total produksi minyak mentah. Sementara untuk ekspor gas yang terdiri dari LNG dan gas pipa sebesar 33,2% dari total produksi gas pada tahun 2021 yang sesuai dengan Kebijakan Energi Nasional yang mengamanatkan perubahan paradigma kebijakan pengelolaan energi dengan mengutamakan pemanfaatan energi serta untuk meningkatkan nilai tambah di dalam negeri. Pemerintah mulai mengalokasikan prioritas pemanfaatan gas untuk memenuhi dalam negeri. Demikian pula untuk batubara secara bertahap akan dialokasikan

pemanfaatannya untuk pemenuhan dalam negeri terutama pada pembangkit listrik dan industri yang melalui pengembangan gasifikasi batubara untuk pengembangan sebagai substitusi LPG dan metanol yang dibutuhkan oleh sektor industri dan akan direncanakan pada tahun 2025 (Suparyanto & Rosad, 2022).

2.1.3 Impor Energi

Total dari impor energi yang ada di Indonesia pada tahun 2021 mencapai 48,5 MTOE atau hanya 23,3% dari total pasokan energi primer. Dari beberapa jenis energi yang masih diimpor yaitu batubara kalori tinggi, minyak mentah, BBM dan LPG. Indonesia masih sangat membutuhkan BBM dikarenakan konsumsi BBM di Indonesia semakin tahun semakin meningkat sejalan dengan meningkatnya jumlah kendaraan seperti sepeda motor. Impor BBM terdiri dari bensin yang mencapai 82,03% dari total BBM. Selain itu untuk impor minyak solar mencapai 14,47 dan sisanya 2,61% HOMC dan 0,89% terdiri dari avgas, minyak bakar dan minyak diesel. Gambaran impor produk kilang terlihat pada Gambar 2.1 berikut.



Gambar 2. 1 Impor BBM Tahun 2021

(Suparyanto & Rosad, 2022)

Pada tahun 2021 impor minyak mentah yaitu sebesar 89,87 juta barel dan kondensat Indonesia sebesar 14,53 juta barel atau 28,5% dari total kebutuhan minyak mentah untuk kilang (Suparyanto & Rosad, 2022).

2.2 Potensi Energi Baru Terbarukan di Indonesia

Berkurangnya produksi energi saat ini pada energi fosil terutama pada minyak bumi serta komitmen global dalam pengurangan emisi gas kaca, mendorong pemerintah untuk meningkatkan peran energi baru terbarukan yang berjalan secara terus menerus sebagai salah satu bagian dalam menjaga ketahanan dan kemandirian energi sesuai dengan PP No. 79 Tahun 2014 tentang Kebijakan Energi Nasional, target energi baru terbarukan pada tahun 2025 paling sedikit yaitu 23% dan 31% pada tahun 2050. Indonesia mempunyai potensi yang cukup besar untuk perkembangan energi baru terbarukan untuk mencapai target bauran energi primer tersebut, bisa dilihat pada tabel 2.2 di bawah.

Tabel 2. 2 Potensi Energi Baru Terbarukan.
(Tim Sekretaris Jenderal Dewan Energi Nasional, 2019)

Jenis Energi	Potensi
Tenaga Air	94,3 GW
Panas Bumi	28,5 GW
Bioenergi	PLT Bio : 32,6 GW dan BBN : 200 Ribu Bph
Surya	207,8 GWp
Angin	60,6 GW
Energi Laut	17,9 GW

Total potensi energi baru terbarukan ekuivalen 442 GW yang digunakan untuk pembangkit listrik, sedangkan BBN dan Biogas sebesar 200 ribu BPh yang digunakan untuk keperluan bahan bakar pada sektor transportasi, rumah tangga, komersial dan industri. Pemanfaatan EBT untuk pembangkit listrik tahun 2018 yaitu sebesar 8,8 GW atau 14% dari total kapasitas pembangkit listrik fosil atau non fosil yaitu sebesar 64,5 GW (Tim Sekretaris Jenderal Dewan Energi Nasional, 2019).

2.2.1 Potensi Energi Surya

Indonesia yaitu salah satu wilayah dengan kondisi sinar matahari yang terus bersinar sepanjang tahun di setiap berbagai wilayah. Menjadikan salah satu potensi besar bagi wilayah Indonesia untuk pengembangan PLTS. Pada tahun 2021 telah dilakukan pemutakhiran data energi surya yaitu sebesar 3.294,4 GW seperti yang ditunjukkan pada tabel 2.3. Pemutakhiran tersebut berfokus pada metode perhitungan potensi surya berdasarkan klasifikasi intensitas radiasi mulai dari 3,75 kWh/m²/hari dan disaring dengan peta tutupan lahan (pemukiman, tanah terbuka, dan savana) tidak termasuk *protected area*. Salah satu yang meningkatkan potensi energi surya yaitu karena perhitungan dimasukan juga potensi PLTS Terapung seperti pada tabel 2.3 dibawah.

Tabel 2. 3 Sebaran Potensi Energi Surya per Provinsi

(Suparyanto & Rosad, 2022)

No	Provinsi	Potensi Surya (GW)
1	Bali	21,6
2	Banten	51,8
3	Bengkulu	13,9
4	DI Yogyakarta	30,3
5	DKI Jakarta	40,4
6	Gorontalo	6,5
7	Jambi	121,7
8	Jawa Barat	155,5
9	Jawa Tengah	185,9

10	Jawa Timur	176,4
11	Kalimantan Barat	91,6
12	Kalimantan Selatan	52,7
13	Kalimantan Tengah	149,5
14	Kalimantan Timur	100,8
15	Kalimantan Utara	35,5
16	Kepulauan Bangka Belitung	46,5
17	Kepulauan Riau	29,7
18	Lampung	121,5
19	Maluku	77,5
20	Maluku Utara	17,2
21	Nanggroe Aceh Darussalam	99,2
22	Nusa Tenggara Barat	23,4
23	Nusa Tenggara Timur	369,5
24	Papua	252,3
25	Papua Barat	65,8
26	Riau	290,4
27	Sulawesi Barat	19,8
28	Sulawesi Selatan	60,4
29	Sulawesi Tengah	39,3
30	Sulawesi Tenggara	85,0
31	Sulawesi Utara	12,0

32	Sumatera Barat	43,2
33	Sumatera Selatan	285,2
34	Sumatera Utara	122,4
TOTAL		3.294,4

Potensi energi yang ada di Indonesia secara umum bisa dikatakan cukup, sehingga dapat dijadikan salah satu pedoman dan referensi dalam menyusun perencanaan pembangunan sumber energi PLTS untuk masa depan. Berdasarkan dari peta potensi wilayah yang mempunyai potensi terbesar yaitu Provinsi Nusa Tenggara Timur, Riau, Sumatera Selatan dan Papua, namun secara umum untuk potensi di setiap Provinsi sudah termasuk relatif tinggi. Untuk wilayah yang memiliki intensitas radiasi matahari paling tinggi yaitu berada pada wilayah timur Indonesia seperti Nusa Tenggara Timur. Dalam RUEN (Rencana Umum Energi Nasional), PLTS ditargetkan akan mencapai 14,2 GW tahun 2030 (Suparyanto & Rosad, 2022).

2.2.2 Potensi Energi Surya di Wilayah Provinsi Jawa Barat

Secara umum, wilayah provinsi jawa barat memiliki berbagai macam sumber energi, baik itu dari sumber energi tak terbarukan seperti minyak dan gas bumi, maupun sumber energi baru terbarukan seperti tenaga air, panas bumi, tenaga angin, tenaga surya dan biomassa. Secara astronomis wilayah jawa barat terletak di 5°50' - 7°50' LS. Dari kondisi tersebut wilayah provinsi jawa barat memiliki potensi paparan tenaga surya yang cukup besar dan lama penyinaran matahari harian yang cukup panjang.

Berdasarkan dari hasil kajian paparan surya harian di wilayah provinsi jawa barat berkisar antara 4,18 kWh/m² sampai 5,00 kWh/m², untuk potensi paparan surya tertinggi yaitu berada di wilayah kabupaten dan kota sukabumi, sementara untuk paparan surya terendah yaitu berada di wilayah sebagian besar priangan timur seperti kabupaten dan kota tasikmalaya, kabupaten ciamis dan kota banjar. Pada tabel 2.4 menunjukkan data potensi energi surya yang berada di wilayah provinsi jawa barat.

Tabel 2. 4 Tabel Data Potensi Energi Surya di Wilayah Provinsi Jawa Barat
(Rizki Yandri, 2020)

No	Kabupaten/Kota	Paparan Surya Harian (kWh/m ² .hari)	Potensi Tenaga Surya Rata-Rata (W/m ²)
1.	Kabupaten Tasikmalaya	4,18	191,49
	Kabupaten Ciamis		
	Kota Banjar		
	Kota Tasikmalaya		
2.	Kabupaten Bogor	4,33	198,24
	Kota Bogor		
	Kota Depok		
3.	Kabupaten Bandung Barat	4,38	200,62
	Kabupaten Sumedang		
	Kabupaten Cianjur		
	Kabupaten Purwakarta		
	Kabupaten Bekasi		
	Kabupaten Karawang		
	Kabupaten Subang		
	Kota Bandung		
	Kota Cimahi		

	Kota Bekasi		
4.	Kabupaten Bandung	4,46	203,96
	Kabupaten Garut		
5.	Kabupaten Cirebon	4,62	211,53
	Kabupaten Indramayu		
	Kabupaten Majalengka		
	Kabupaten Kuningan		
	Kota Cirebon		
6.	Kabupaten Sukabumi	5,00	228,78
	Kota Sukabumi		
Rata-Rata		4,50	205,77

Pemanfaatan energi surya di wilayah provinsi jawa barat masih sangat terbatas pada PLTS yang bersifat mandiri dengan kapasitas terpasang serta produksi energi rendah jika dilihat dari penyediaan PLTS di wilayah provinsi jawa barat (Rizki Yandri, 2020).

2.3 Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS)

Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) merupakan salah satu pembangkit listrik yang menggunakan panel surya yang memanfaatkan energi sinar matahari dengan cara mengkonversi energi cahaya menjadi energi listrik seperti pada gambar 2.2 dibawah.



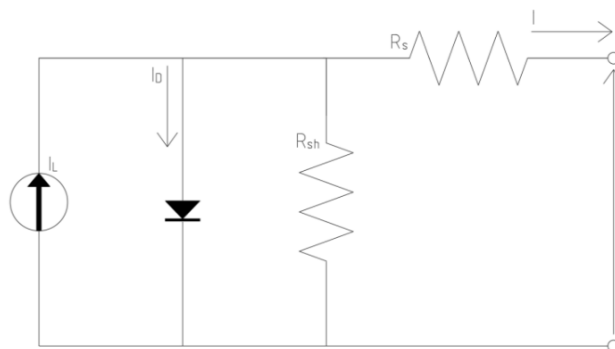
Gambar 2. 2 Panel Surya

(Saugi, 2012)

Secara umum PLTS memiliki beberapa komponen utama yaitu seperti modul surya sebagai pembangkit listrik, inverter untuk mengkonversi sistem tegangan DC menjadi sistem tegangan AC, *charger controller* dan baterai sebagai tempat penyimpanan energi listrik (Plts et al., 2019).

Listrik tenaga surya ini dihasilkan melalui proses yang dinamakan *photovoltaic*, pada proses ini sinar matahari diserap oleh panel solar *cell* yang dapat memecahkan elektron supaya bergerak sehingga akan menghasilkan energi listrik.

Rangkaian ekivalen sel surya terdiri dari sumber arus (I_L), arus diode (I_D), dan hambatan seri (R_s). Rangkaian pada Gambar 2.3 digunakan untuk mendapatkan persamaan matematika sel surya, sehingga dapat digunakan untuk simulasi.



Gambar 2. 3 Rangkaian Ekivalen *Photovoltaic*

(Juan & Satria, 2023)

Dari Gambar 2.3, I_L adalah arus yang dihasilkan langsung oleh penyinaran matahari pada sel surya. Hambatan R_s menunjukkan hambatan sel surya, sehingga menurut hukum kirchoff nilai arus output sel surya adalah sebagai berikut:

$$I = I_L - I_D \quad (2.1)$$

Adapun rumus efisiensi pada Gambar 2.3 adalah sebagai berikut :

$$\eta = \frac{P_{Elektrik}}{P_{Cahaya}} = \frac{V \times I}{A \times S_T} \quad (2.2)$$

di mana :

V = Tegangan yang dibangkitkan Photovoltaic (Volt)

I = Arus yang dibangkitkan Photovoltaic (Ampere)

A = Luas penampang Photovoltaic (m^2)

S_T = Radiasi matahari (W/m^2)

Energi keluaran *Photovoltaic* didapat dengan mengalikan nilai arus *output* dengan *peak sun hour* (PSH) dan dikalikan tegangan output, persamaannya ditulis sebagai berikut :

$$E_{out} = V \times I \times PSH \quad (2.3)$$

di mana :

E = Energi *output Photovoltaic* (Wh)

PSH = Nilai efektif dalam satuan waktu (h)

Penentuan kapasitas PLTS bergantung pada energi harian beban dan memiliki kerugian dengan asumsi 5% dari total beban maka, dapat dicari dengan persamaan :

$$E_T = 1,05 \times P_T \times h \quad (2.4)$$

Di mana :

E_T = Energi Total (kWh)

P_T = Daya (Watt)

h = lamanya pemakaian beban (jam)

area *array* (PV area) diperhitungkan dengan menggunakan rumus sebagai berikut :

$$PV_{area} = \frac{E_T}{G_{AV} \times TCF \times \eta_{PV} \times \eta_{out}} \quad (2.5)$$

di mana :

PV_{area} = Luas Permukaan Panel Surya (m²)

E_T = Energi Total (kWh/day)

G_{AV} = Intensitas Matahari harian (kW/m²/day)

TCF = *Temperature Correction Factor* (%)

η_{PV} = Efisien Panel Surya (%)

η_{out} = efisiensi keluaran

Menentukan kapasitas dan modul surya maka diperlukan pengukuran *Temperature Correction Factor* (TCF), untuk mengetahui nilai TCF menggunakan persamaan 2.6 dan mencari efisiensi keluaran dirumuskan pada persamaan 2.7.

$$TCF = \frac{P_{MPP} - (\text{temperature coefficient factor} \times P_{MPP} \times \text{Kenaikan suhu})}{P_{MPP}} \quad (2.6)$$

$$\eta_{out} = \eta_{bcu} \eta_{inv} \quad (2.7)$$

di mana :

η_{bcu} = Efisiensi *battery charger unit*

η_{inv} = Efisiensi inverter

Dari perhitungan area array, maka besar daya yang dihasilkan PLTS (*wattpeak*) dapat diperhitungkan dengan rumus sebagai berikut :

$$P_{WP} = PV_{area} \times PSI \times \eta_{PV} \quad (2.8)$$

di mana :

PV_{area} = Luas Permukaan Panel Surya (m^2)

PSI = Peak Solar *Insolation* adalah 1.000 W/m^2

η_{PV} = Efisiensi Panel Surya (%)

Selanjutnya berdasarkan besar daya yang akan dibangkitkan (*wattpeak*), maka jumlah panel surya yang dibutuhkan, diperhitungkan dengan rumus sebagai berikut :

$$\eta_{PV} = \frac{P_{WP}}{P_{MPP}} \quad (2.9)$$

di mana :

η_{PV} = Jumlah unit panel

P_{WP} = daya yang dibangkitkan (Wp)

P_{MPP} = daya maksimum keluaran panel surya (Watt)

untuk menghitung jumlah battery yang akan digunakan yaitu dengan menggunakan rumus sebagai berikut :

$$\eta_{battery} = \frac{kWh}{VAh} \quad (3.0)$$

di mana :

$\eta_{battery}$ = Jumlah battery

kWh = Kebutuhan beban harian

VAh = Kapasitas battery

Untuk menghitung kapasitas inverter yaitu hasil dari perbandingan antara kapasitas keluaran sistem PV dengan sistem pemrosesan inverter, ditentukan dengan membagi nilai output pembangkit dengan rasio inverter rentang 1,15 – 1,55.

$$kW = \frac{kW}{DC/AC} \quad (3.1)$$

di mana :

kW = Satuan daya listrik

DC/AC = Satuan rasio inverter

2.4 Komponen Sistem PLTS

Pembangkit Listrik Tenaga Surya memiliki beberapa komponen yaitu diantaranya (Fernanda et al., 2021).

2.4.1 Panel Surya

Panel Surya merupakan komponen yang berfungsi untuk mengubah cahaya matahari menjadi energi listrik melalui proses fotoelektrik, energi yang dihasilkan adalah arus searah (DC) seperti pada gambar 2.4 dibawah.



Gambar 2. 4 Panel Surya

(Ken, 2022)

2.4.2 Solar Charge Controller (SCC)

Solar Charge Controller (SCC) atau dikenal sebagai *Battery Charge Regulator* (BCR) merupakan komponen elektronik daya di PLTS yang mempunyai fungsi dengan mengatur tegangan dan arus pengisian berdasarkan daya yang tersedia dari larik modul fotovoltaik dan stasiun pengisian baterai agar lebih optimal seperti pada gambar 2.5 dibawah.



Gambar 2. 5 Solar Charge Controller (SCC)

(Gautama et al., 2021)

2.4.3 Baterai

Baterai memiliki fungsi untuk menyimpan daya yang dihasilkan oleh panel surya. Daya yang disimpan digunakan pada saat radiasi matahari rendah atau pada malam hari. Baterai menyimpan listrik dalam bentuk daya kimia dan baterai memiliki 2 tujuan penting untuk sistem PLTS yaitu memberikan daya listrik kepada

sistem ketika daya tidak disediakan oleh panel surya serta untuk menyimpan kelebihan daya yang dihasilkan oleh panel surya seperti pada gambar 2.6 dibawah.



Gambar 2. 6 Baterai

(Gautama et al., 2021)

2.4.4 Inverter

Inverter merupakan perangkat elektronik yang berfungsi mengkonversi arus listrik searah (DC) dari solar panel menjadi listrik bolak-balik (AC) dan untuk fungsi inverter di PLTS ini adalah untuk menyuplai perangkat yang menggunakan arus listrik bolak-balik (AC) seperti pada gambar 2.7 dibawah.



Gambar 2. 7 Inverter

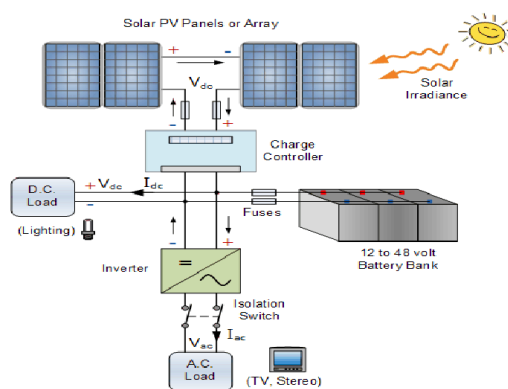
(Gautama et al., 2021)

2.3.1 Jenis-Jenis Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya

Secara garis besar sistem PLTS dibagi menjadi 3 jenis berdasarkan aplikasi dan konfigurasinya yaitu (Teknika et al., 2020).

2.3.1.1 Sistem PLTS *Off-Grid*

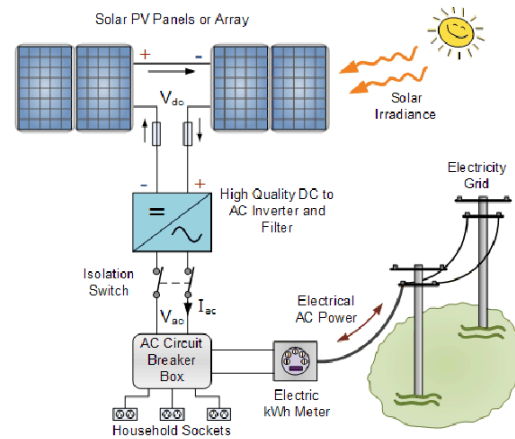
Sistem PLTS *off-Grid* merupakan sistem PLTS yang hanya mengandalkan satu-satunya sumber pembangkit listrik yaitu dengan menggunakan radiasi dari sinar matahari dengan bantuan panel surya untuk menghasilkan energi listrik. Jenis sistem PLTS Sistem *PLTS off-Grid* ini biasanya dimanfaatkan pada daerah-daerah pelosok yang tidak terjangkau oleh jaringan listrik dari PLN seperti pada gambar 2.8 dibawah.



Gambar 2. 8 Sistem PLTS *Off-Grid*
(Gautama et al., 2021)

2.3.1.2 Sistem PLTS *On-Grid*

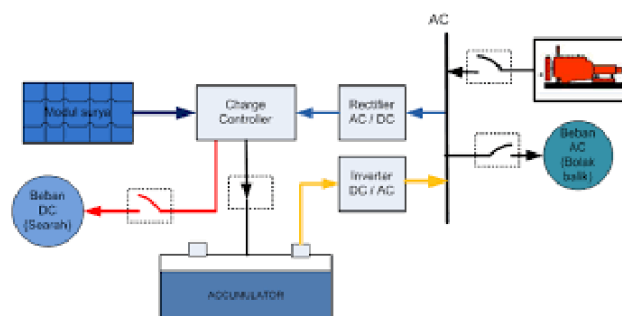
Sistem PLTS *On-Grid* merupakan sistem PLTS yang sistemnya terhubung dengan listrik PLN dan mengoptimalkan pemanfaatan energi matahari melalui modul surya yang menghasilkan energi listrik semaksimal mungkin. Jenis sistem PLTS ini biasanya digunakan untuk daerah perkotaan yang sudah menggunakan jaringan listrik dari PLN yang bertujuan untuk penghematan penggunaan energi listrik PLN sehingga dapat memperkecil biaya tagihan listrik PLN seperti pada gambar 2.9 dibawah.



Gambar 2. 9 Sistem PLTS On-Grid
(Gautama et al., 2021)

2.3.1.3 Sistem PLTS Hybrid

Sistem PLTS *Hybrid* merupakan sistem pembangkit listrik yang dikombinasikan dengan 2 atau bisa lebih dengan sistem pembangkit lain, biasanya sumber pembangkit ini bersumber dari pembangkit listrik tenaga diesel, gas alam atau angin. Salah satu contoh sistem PLTS *Hybrid* yaitu seperti PLTS *Genset*, PLTS Mikrohidro, PLTS Energi Angin dan lainnya. Sistem PLTS *Hybrid* ini merupakan salah satu solusi untuk mengurangi bahan bakar terutama untuk di daerah pedesaan yang masih mengandalkan PLTD atau genset sebagai sumber energi listrik seperti pada gambar 2.10 dibawah.



Gambar 2. 10 Sistem PLTS Hybrid
(Gautama et al., 2021)

2.5 Prinsip Kerja PLTS

Prinsip kerja PLTS pada dasarnya menggunakan panel surya sebagai komponen utama dan ada juga sistem kontrol dengan *solar charger controller* atau *solar inverter* yang dapat mengatur daya listrik yang dihasilkan untuk dapat digunakan pada beban. Ada 2 cara untuk melakukan penggunaan ini yaitu sebagai berikut (ayu, 2020)

2.5.1 Penggunaan Langsung

Dimana daya listrik panel surya dimanfaatkan langsung oleh beban untuk peralatan DC seperti lampu dan pompa air sedangkan untuk peralatan AC seperti lemari pendingin atau televisi.

2.5.2 Penggunaan dengan Bank Penyimpanan

Penggunaan dengan bank penyimpanan yaitu dengan baterai. Dalam hal ini energi akan disimpan terlebih dahulu agar dapat digunakan sewaktu-waktu dan bahkan dalam kondisi ketika tidak ada matahari.

2.6 Jenis Panel Surya

Panel surya dapat dibedakan menjadi 3 jenis berdasarkan bentuk dan ukuran tetapi jenis utama nya terbagi menjadi tiga bagian yaitu monokristal, polikristal dan amorphous (Kristiawan et al., 2019).

2.6.1 Monokristal (*mono-crystalline*)

Monokristal merupakan modul surya yang mempunyai efisiensi sebesar 15% pada suhu 25°C dan menurun menjadi 12-15% pada suhu 50°C dan memiliki efisiensi hasil tinggi pada setiap satuan luas PV module tetapi sel surya ini mempunyai kelemahan yaitu tidak berfungsi dengan baik ketika tidak mendapatkan sinar matahari yang tertutup oleh awan seperti pada gambar 2.11 dibawah.



Gambar 2. 11 Panel Jenis *Monocrystalline*

(Gautama et al., 2021)

2.6.2 Polikristal (*Poly-crystalline*)

Polikristal merupakan modul surya yang memiliki susunan kristal acak karena modul surya ini menggunakan proses pengecoran. Polikristal mempunyai efisiensi yang lebih rendah dibandingkan dengan monokristal yaitu 12% - 14% dan modul surya ini memiliki harga yang lebih murah dari monokristal seperti pada gambar 2.12 dibawah.

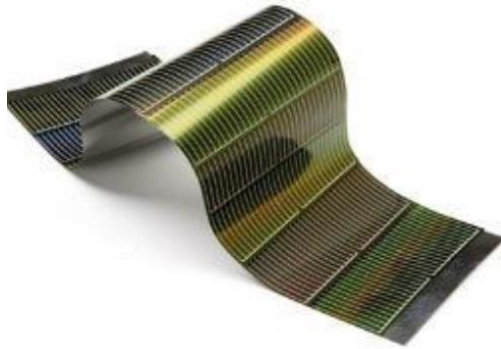


Gambar 2. 12 Panel Jenis *Polycrystalline*

(Gautama et al., 2021)

2.6.3 Amorphous

Amorphous merupakan jenis modul surya yang memiliki efisiensi 4% - 65% dan modul surya ini memiliki bahan utama yang terbuat dari non kristal sehingga memiliki bentuk yang pasti seperti pada gambar 2.13 dibawah.



Gambar 2. 13 Panel Jenis Amorphous

(Gautama et al., 2021)

Perbedaan dari ketiga modul surya ini dijelaskan pada tabel 2.5 dibawah.

Tabel 2. 5 Perbedaan modul surya Monokristal, Polikristal dan Amorphous

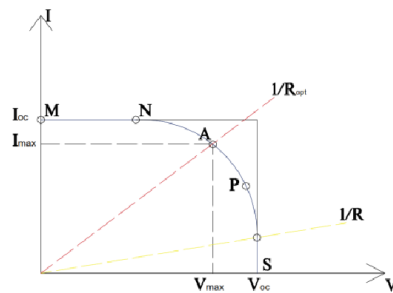
(Juan & Satria, 2023)

Jenis Modul	Kelebihan	Kekurangan
Monokristal (<i>mono-crystalline</i>)	Panel yang memiliki efisiensi yang tinggi dan memiliki massa pakai $\pm$ 25 tahun	Jenis panel surya termahal
Polikristal (<i>Poly-crystalline</i>)	Efisiensi dan biaya panel seimbang, dan memiliki massa pakai $\pm$ 25 tahun	Nilai efisiennya = <i>mono-crystalline</i> > Poly-crystalline > Amorphous

		Temperature mempengaruhi produktivitas dan daya tahan
Amorphous	Temperature tinggi tidak mempengaruhi produktivitas dan biaya rendah	Efisiensi yang rendah dan massa pakai lebih yang pendek dibandingkan dengan monocrystalline dan polycrystalline

2.7 Karakteristik Sel Surya

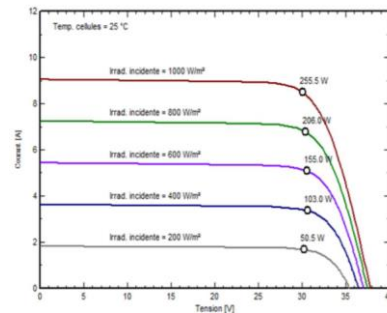
Karakteristik sel surya yaitu kurva hubungan arus dan tegangan yang mempengaruhi dari radiasi sinar matahari dan suhu. Daya maksimal (W_p) pada sel surya dapat diraih dengan radiasi matahari pada saat kondisi $1000W/m^2$ dan suhu pada kondisi $25^\circ C$ sesuai *standar tes condition* (STC) seperti pada gambar 2.14 dibawah. (Juan & Satria, 2023).



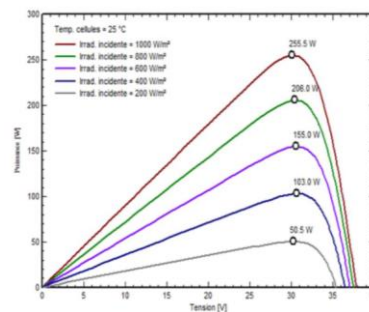
Gambar 2. 14 Karakteristik Sel Surya

(Juan & Satria, 2023)

Karakteristik keluaran Daya, Tegangan dan Arus modul surya jenis *monocrystalline* (Module PV: SolarWord, Sunmodule SW 225 mono) yang ditunjukkan pada **Gambar 2.15** dan **Gambar 2.16**.

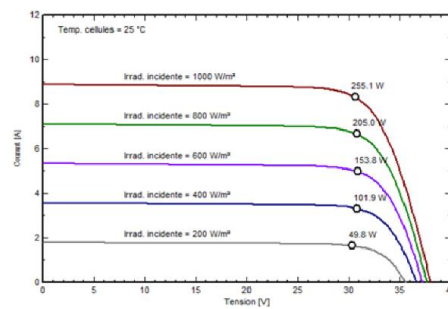


Gambar 2. 15 Karakteristik I-V Module *monocrystalline*
(Juan & Satria, 2023)

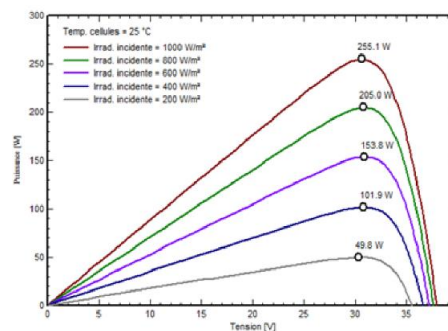


Gambar 2. 16 Karakteristik P-V Modul *Monocrystalline*
(Juan & Satria, 2023)

Karakteristik keluaran Daya, Tegangan dan Arus pada jenis modul surya *Polycrystalline* (Module PV SolarWord, Sunmodule SW 255 poly) yang di tunjukkan pada gambar **Gambar 2.17** dan **Gambar 2.18**.



Gambar 2. 17 Karakteristik I-V Modul *Polycrystalline*
(Juan & Satria, 2023)



Gambar 2. 18 Karakteristik P-V Modul *Polycrystalline*
(Juan & Satria, 2023)

Dari semua grafik di atas rendah atau tinggi nya grafik pada karakteristik sel surya di pengaruhi oleh daya dari intensitas cahaya radiasi matahari ketika menyinari permukaan bumi.

2.8 HOMER (*Hybrid Optimization Model for Energy Renewable*)

Homer yaitu perangkat lunak yang dikembangkan oleh *U.S.National Renewable Energy Laboratory* (NREL) yang bekerjasama dengan *Mistaya Engineering*, dan dilindungi hak ciptanya oleh *Midwest Reserch Institute* (MRI) digunakan juga oleh Departemen Energi Amerika (DOE). Homer mempunyai tujuan untuk mengoptimalkan sistem pembangkit listrik. Perangkat lunak homer ini juga menyediakan output berupa *lifecycle cost*, estimasi kapasitas sistem, emisi gas kaca, dan pemodelan sistem tenaga listrik dan terdapat biaya selama melakukan

pengoperasian. Pengoperasian homer mempunyai tugas utama yang di antaranya yaitu simulasi, optimalisasi dan analisis sensitivitas (Arun et al., 2021).

2.8.1 Simulasi

Dalam proses ini homer dapat menentukan konfigurasi komponen-komponen perencanaan pembangkit listrik dan strategi operasi yang dapat menentukan bagaimana komponen tersebut bekerja dalam periode waktu tertentu.

2.8.2 Optimalisasi

Setelah melakukan proses simulasi maka langkah selanjutnya akan dilakukan proses optimalisasi, di dalam proses ini akan dimulai simulasi untuk memodelkan dan merancang konfigurasi sistem secara khusus, proses optimalisasi dilakukan untuk menentukan kemungkinan teroptimal dalam konfigurasi sistem. Pada daftar hasil optimalisasi, homer mengurutkan nilai NPC dari mulai terendah sampai tertinggi. Sistem dikatakan optimal jika salah satu konfigurasi sistem menunjukkan NPC terendah untuk jangka waktu yang telah ditentukan. Homer mensimulasikan konfigurasi berbeda-beda, apabila hasil dari konfigurasi homer tidak layak maka homer tidak akan menampilkan hasil optimalisasi sistem tersebut.

2.9 Penelitian Terkait

Tabel 2. 6 Penelitian Terkait

No	Judul Jurnal	Nama Peneliti	Tempat dan Tahun Penelitian	Pembahasan Jurnal
1	Perencanaan Pembangkit Listrik Tenaga Surya Menggunakan Software HOMER di Departemen	Victor Ragidup Tua Manullang, Agung Nugroho dan Enda Wista Sinuraya	Universitas Diponegoro 2020	Perencanaan Pembangkit Listrik Tenaga Surya dengan menggunakan Software Homer.

	Teknik Industri Universitas Diponegoro			
2	Perancangan Pembangkit Listrik Tenaga Surya 100 Wp untuk Penerangan Lampu di Ruang Selasar Fakultas Teknik Universitas Riau Kepulauan	Pamor Gunoto dan Sofan Sofyan	Universitas Riau 2020	Upaya untuk mengurangi penggunaan energi listrik dari PLN dalam rangka penghematan biaya penerangan lampu setiap bulannya.
3	Penentuan Komponen Sistem PLTS 100 Wp pada Floating Photovoltaic sebagai Sumber Energi Lampu Penerangan 20 W pada kolam Politeknik Negeri Jakarta	Muhamad Farhan Fernanda, Benhur Nainggolan dan Indra Silanegara	Politeknik Negeri Jakarta 2021	Pembuatan <i>Floating Photovoltaic</i> pada kolam Politeknik Negeri Jakarta.
4	Potensi Pembangkit Listrik Tenaga Surya Atap Gedung Sekolah di Kota Denpasar	H. Kristiawan, I.N.S Kumara dan I.A.D Giriantari	Kota Denpasar 2019	Penerapan sistem <i>Building Applied Photovoltaic</i> (BAP) dan efisiensi penggunaan solar panel pada <i>rooftop</i> .
5	Perencanaan dan Analisis Ekonomi Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) Terpusat untuk Desa Mandiri	Bambang Winardi, Agung Nugroho dan Erlin Dolphina	Desa Kaliwungu Kecamatan Mandiraja Kabupaten Banjarnegara 2019	Menentukan besar kapasitas peralatan sistem <i>photovoltaic</i> pada PLTS dan menghitung atau menganalisis perkiraan biaya menggunakan metode ekonomi teknik untuk mengetahui kelayakan investasi proyek PLTS.