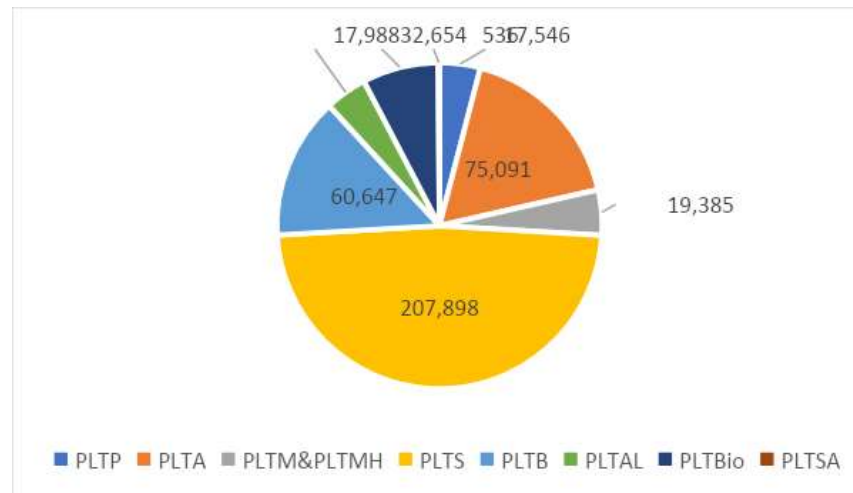


BAB II

LANDASAN TEORI

2.1 Potensi Energi Terbarukan di Indonesia

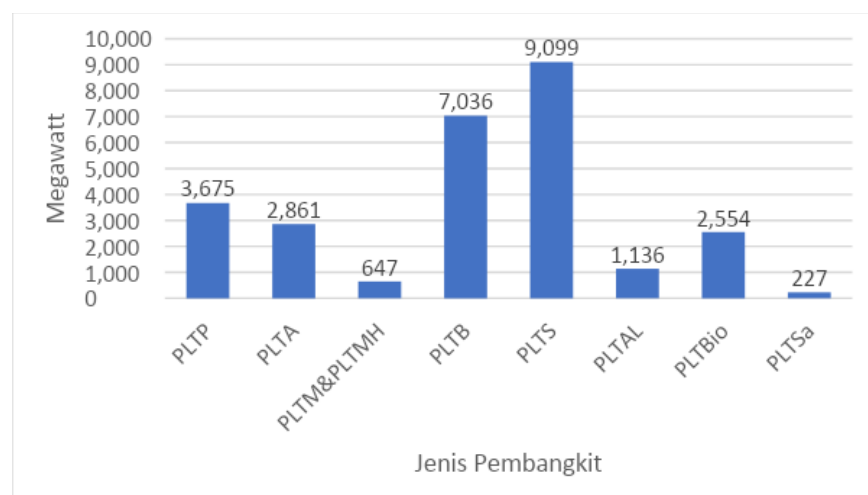
Indonesia kaya akan dengan potensi energi terbarukan (energi surya, air, bayu, biomassa, laut, dan panas bumi) yang belum dimanfaatkan secara optimal. Menurut data ESDM, dengan teknologi yang ada saat ini, potensi listrik energi terbarukan mencapai 432 Gigawatt, atau 7-8 kali dari total kapasitas pembangkit terpasang saat ini. Dari potensi tersebut, baru sekitar 7 Gigawatt yang telah dimanfaatkan secara komersial, dan hingga tahun 2028 akan ada penambahan sekitar 29 Gigawatt oleh PLN berdasarkan Rencana Usaha Penyediaan Tenaga Listrik (RUPTL) 2019-2028. Sementara itu, Rencana Umum Energi Daerah (RUED) yang disusun oleh 34 pemerintah provinsi mengindikasikan total kapasitas terpasang energi terbarukan pada tahun 2025 mencapai 48 Gigawatt. Dari jumlah potensi energi terbarukan yang ada energi surya memiliki potensi lebih dari 200 Gigawatt dengan efisiensi teknologi *photovoltaic* yang tersedia saat ini. Namun, pemanfaatan energi surya dalam pembangkitan energi listrik masih kurang dari 10 Gigawatt. Potensi energi surya ini tersebar diseluruh wilayah Indonesia, dengan potensi terbesar ada di Kalimantan Barat(20 Gigawatt), Sumatera Selatan(17 Gigawatt), dan Kalimantan Timur(13 Gigawatt). Daerah tersebut merupakan daerah yang juga memiliki cadangan batu bara terbesar, maka ada peluang peralihan sumber energi dari batu bara menuju energi surya di daerah tersebut. (Haryanto, 2017). Gambar 2.1 menunjukkan potensi energi terbarukan yang ada di Indonesia.



Gambar 2. 1 Potensi Energi Terbarukan di Indonesia

(Haryanto, 2017)

Dari total keseluruhan potensi energi terbarukan yang ada di Indonesia, Jawa Barat memiliki potensi terbesar dan nilai potensinya dapat diuraikan pada gambar 2.2.



Gambar 2. 2 Potensi Energi Terbarukan di Jawa Barat

(Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral, 2016)

Di provinsi Jawa Barat potensi energi terbarukan terbesar adalah energi surya dan angin dengan total energi 16.135 Megawatt, sehingga potensi untuk

memanfaatkan sumber energi tersebut menjadi sebuah pembangkit *hybrid* memiliki nilai pemanfaatan energi yang baik.

2.1.1 Potensi Energi di Kota Tasikmalaya

Tasikmalaya merupakan salah satu Kota yang terletak di Provinsi Jawa Barat yang memiliki potensi energi terbarukan seperti panas bumi, matahari, angin, dan biomassa. Karena berada di daerah ekuator Kota Tasikmalaya memiliki peluang memperoleh sumber energi matahari hampir sepanjang tahun dengan tingkat radiasi yang memadai untuk digunakan sebagai sumber energi alternatif. Energi angin juga cukup potensial untuk dikembangkan di daerah kota tasikmalaya. Kedua potensi energi terbarukan tersebut bisa dimanfaatkan untuk perkembangan energi terbarukan di Kota Tasikmalaya. (Hasibuan, 2015).

2.1.1.1 Sumber Daya Energi Matahari

Dari data yang didapat melalui NASA prediction of worldwide energy resource, potensi energi matahari yang ada di kampus Mugarsari Universitas Siliwangi Kota Tasikmalaya mempunyai nilai rata-rata radiasi matahari sekitar 4,60 kWh/m²/d. Tabel 2.1 menunjukkan nilai rata-rata radiasi matahari di daerah kampus Mugarsari Universitas Siliwangi yang diambil dari tahun 1983-2005.

Tabel 2. 1 Rata-rata radiasi matahari per bulan selama 22 tahun

Mounth	Solar Radiation (kWh/m²/d)
Januari	4.370
Februari	4.500
Maret	4.640
April	4.600
Mei	4.540
Juni	4.350
Juli	4.450
Agustus	4.470
September	5.030

Oktober	4.840
November	4.490
Desember	4.600

2.1.1.2 Sumber Daya Energi Angin

Dari data yang didapat melalui NASA prediction of worldwide energy resource, potensi energi angin yang ada di daerah kota Tasikmalaya mempunyai kecepatan angin rata-rata 3,57 m/s. Tabel 2.2 menunjukkan nilai kecepatan angin di kampus Mugarsari Universitas Siliwangi yang diambil dari tahun 1984-2013.

Tabel 2. 2 rata-rata kecepatan angin per bulan selama 30 tahun

Bulan	Kecepatan Angin (knot) (m/s)
Januari	3,050
Februari	3,190
Maret	2.800
April	2,900
Mei	3.420
Juni	3.780
Juli	4.280
Agustus	4.570
September	4.500
Oktober	3.980
November	3,310
Desember	3,050

2.2 Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS)

Pembangkit Listrik Tenaga Surya adalah sistem pembangkit listrik yang merubah foton dari matahari menjadi energi listrik menggunakan wafer *photovoltaic* (PV). Di Indonesia, sistem pembangkit listrik PV sedang mengalami tren penggunaan yang tinggi. Sistem PV merupakan salah satu program besar pemerintah untuk meningkatkan persentase Energi Terbarukan (RNE) untuk ketersediaan energi primer. Tingginya penggunaan system PV kemudian berdampak pada penurunan biaya pemasangan dan biaya modul panel surya,

penurunan biaya pemasangan sebesar 40% menjadi 75%. Sejak tahun 1975 PV mengalami kemajuan yang sangat signifikan. Dimulai dengan PV tipe film tipis dengan efisiensi kurang dari 10%, kemudian berlanjut ke PV tipe Sel Kristal Si yang dimulai dengan efisiensi sekitar 15% pada tahun 1977, dan kemudian sel PV tipe multijungsi yang dimulai dengan efisiensi sekitar 16% pada tahun 1983, PV yang sedang berkembang dimulai pada efisiensi 5% pada tahun 1991. Kemudian pada tahun 2015, seluruh jenis PV mengalami peningkatan efisiensi. PV tipe sel multijunction khususnya (konsentrator tiga persimpangan) mencapai 46%, perkembangan PV dari tahun 1975-2020 akan ditunjukkan pada Gambar 2.3. (Hiron *et al.*, 2021)



Gambar 2. 3 Perkembangan efisiensi PV dari tahun 1975 sampai 2020

(Hiron *et al.*, 2021)

Pada perangkat lunak HOMER untuk menghitung daya pada PV dapat dihitung dengan pendekatan matematika. Perangkat lunak HOMER pengolah data dan kalkulasi menghitung keluaran daya PV menggunakan persamaan:

$$W_p = V.I \quad (2.1)$$

Dimana:

W_p = Daya pada PV Ketika terkena radiasi matahari (watt)

V = Tegangan pada PV (V)

I = Arus pada PV (A)

Sel surya terbuat dari bahan semikonduktor, material sel surya yang sering digunakan yaitu silikon kristal. Pada saat ini silikon merupakan bahan yang banyak digunakan dalam pembuatan sel surya. HOMER memodelkan PV array sebagai keluaran dari sel surya menggunakan persamaan:

$$P_{pv} = F_{pv} Y_{pv} PSH \quad (2.2)$$

Dimana:

P_{pv} = Keluaran pada PV (kWh/d)

F_{pv} = *Pv derating factor* (0,7-0,85)

Y_{pv} = Daya yang diizinkan dari PV array (kW)

PSH = *Peak Sun Hour* (jam)

Untuk menentukan jumlah panel yang dibutuhkan dapat diperhitungkan dengan menggunakan persamaan:

$$\eta_{PV} = \frac{P_{WP}}{P_{MPP}} \quad (2.3)$$

Dimana:

η_{pv} = Jumlah Panel

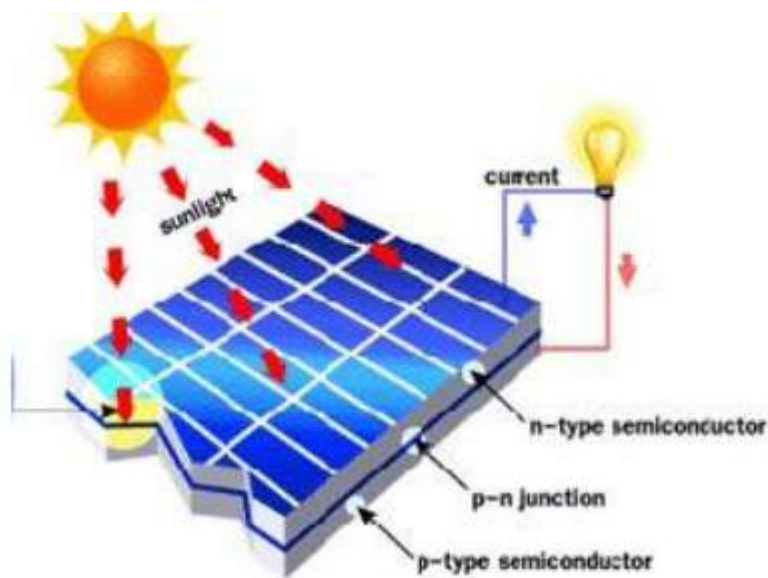
P_{wp} = Daya yang akan dibangkitkan

P_{mpp} = Daya maksimum keluaran panel (watt)

2.2.1 Mekanisme Kerja Panel Surya

Panel Surya atau modul *photovoltaic* merupakan semikonduktor yang mengkonversi Cahaya matahari menjadi energi listrik. Konversi ini disebut efek *photovoltaic*, dengan kata lain efek *photovoltaic* merupakan fenomena dimana

suatu sel *photovoltaic* menyerap energi Cahaya dan mengubahnya menjadi energi listrik. Mekanisme konversi energi Cahaya terjadi akibat adanya perpindahan elektron bebas di dalam suatu atom. Sel surya umumnya menggunakan bahan semikonduktor sebagai penghasil elektron bebas.



Gambar 2. 4 Mekanisme Kerja Panel Surya

Material semikonduktor adalah padatan berupa logam, yang konduktivitas elektriknya ditentukan oleh elektron valensinya. Material semikonduktor konduktivitasnya akan meningkat secara signifikan saat foton dari sumber Cahaya membentuk suatu elektron valensi dari atom semikonduktor. Elektron yang terlepas bermuatan negatif menjadi bebas bergerak di dalam bidang kristal dan berada pada daerah peta konduksi dari material semikonduktor. Hilangnya elektron mengakibatkan suatu kekosongan pada struktur kristal yang disebut dengan "hole" dengan muatan positif. Daerah semikonduktor dengan elektron bebas dan bersifat negatif bertindak sebagai donor elektron. Daerah ini disebut dengan *negative type (n-type)*. Sedangkan daerah semikonduktor dengan hole, bersifat positif bertindak sebagai penerima (*acceptor*) electron. Daerah ini disebut *positive type (p-type)*.

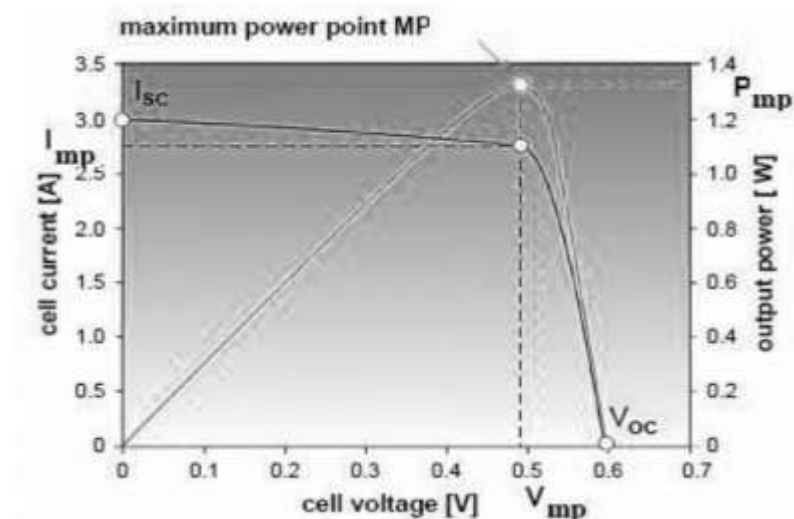
Ikatan dari kedua sisi positif dan negatif menghasilkan energi listrik internal yang akan mendorong elektron bebas dan *hole* untuk bergerak ke arah berlawanan. Elektron akan bergerak menjauhi sisi positif, sedangkan *hole* bergerak menjauhi sisi negatif. Ketika p-n *junction* dihubungkan dengan beban maka tercipta sebuah arus listrik (Julisman, Sara and Siregar, 2017).

Sel surya mempunyai kurva karakteristik yang dapat menunjukkan adanya hubungan antara arus (I) dengan tegangan keluaran (V) yaitu kurva I-V dan daya dengan tegangan keluaran sel surya (kurva P-V). Ketika berada di titik kerja maksimal maka daya keluaran yang dapat dihasilkan akan maksimal juga. Tegangan di *maximum power point* (VMPP) lebih kecil dari pada tegangan dari rangkaian terbuka *open circuit voltage* (Voc), dan arus MPP lebih rendah dari arus short circuit *short circuit current* (Isc). Dari penjelasan tersebut maka didapatkan rumus daya maksimum (PMMP) dinyatakan dalam persamaan:

$$P_{MPP} = V_{MPP} \times I_{MPP} \quad (2.5)$$

Untuk memungkinkan perbandingan antara sel surya dan modul, daya MPP diukur berdasarkan kondisi uji standar (Standart Test Conditions, STC) ($E = 1000 \text{ W/m}^2$, $\theta = 25^\circ \text{ C}$, AM 1.5). Daya yang dihasilkan dari modul PV terhadap cuaca biasanya lebih rendah. Oleh karena itu daya STC memiliki unit Wp (Watt Peak). Selain itu parameter selanjutnya ialah faktor pengisian atau fill factor. Faktor pengisian yaitu kriteria kualitas sel surya yang menunjukkan seberapa baik kurva I-V sesuai dengan persegi panjang VOC dan ISC. Nilai dari FF selalu lebih kecil dari 1 dan biasanya antara 0,75 dan 0,85. Untuk mendapatkan nilai FF dapat menggunakan persamaan:

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



Gambar 2. 5 Kurva Karakteristik Arus-Tegangan dan Daya-Tegangan pada Sel Surya

(Roza and Mujirudin, 2019)

2.2.2 Komponen Panel Surya

Panel Surya berfungsi untuk menangkap sinar matahari dan merubah radiasi matahari menjadi energi listrik dengan proses *photovoltaic*. Panel surya bisa menghasilkan listrik karena terbuat dari enam komponen yang saling terkait dan dirangkai menjadi satu kesatuan utuh sehingga terlihat seperti lempengan kotak persegi Panjang. Gabungan komponen-komponen ini membuat panel surya mempunyai kemampuan menangkap dan merubah sinar matahari menjadi energi listrik (Pasangpanelsurya, 2022).

1. Bingkai Panel Surya

Bingkai panel surya terbuat dari alumunium anodized dan terpasang mengelilingi modul, bahan yang dipakai punya kemampuan untuk menghindari terjadinya korosi, bingkai ini dipasang agar panel surya menjadi lebih kokoh dan kuat sekaligus menghindari benturan secara langsung dengan komponen lain di dalamnya.

2. Kaca Pelindung Panel Surya

Kaca pada panel surya dipasang untuk melindungi sel *photovoltaic* dari kontak langsung dengan debu, air, dan lingkungan yang tidak menentu. Kaca ini menjadi komponen paling berat dan menyumbang bobot paling besar dari total berat panel surya.

3. Enkapsulasi Panel Surya

Enkapsulasi atau laminasi adalah struktur lapisan yang berada di antara sel *photovoltaic* dan kaca pelindung, struktur ini terbuat dari bahan ethylene-vinyl (EVA) dan berfungsi sebagai pencegah kerusakan mekanis pada sel *photovoltaic*. Pemakaian EVA juga dimaksudkan untuk mengisolasi tegangan sel *photovoltaic* agar tidak keluar menuju komponen lain. Laminasi bisa mengalami kerusakan yang disebut sebagai delaminasi.

4. Sel *Photovoltaic*

Sel *photovoltaic* adalah komponen utama dari panel surya dan terbuat dari bahan semikonduktor. Sel *photovoltaic* atau dikenal dengan sel surya berfungsi untuk menangkap radiasi sinar matahari dan mengubahnya menjadi listrik searah atau *direct current* (DC). Ada banyak sel-sel yang ada di dalam modul surya, sel-sel ini terkoneksi satu sama lain untuk mencapai tegangan tinggi tertentu melalui kawat busbar.

5. Lembar Insulasi

Lembar insulasi atau *backsheet* adalah struktur panel surya yang berfungsi melindungi dan mengisolasi sel *photovoltaic* dari kelembaban dan cuaca yang tidak menentu, struktur ini bisa bertahan dalam waktu yang lama karena dibuat dari bahan plastik.

6. Kotak Penghubung

Kotak penghubung atau *junction box* adalah struktur di dalam panel surya yang berfungsi menghubungkan rangkaian sel *photovoltaic* ke beban atau ke modul surya lain. Sebagai terminal penghubung, struktur ini tersusun atas kawat busbar, kabel, dan bypass diode, kotak penghubung panel surya juga dilengkapi dengan segel yang tahan debu dan tahan air.

2.2.3 Klasifikasi Jenis Panel Surya

Di era modern ini panel surya sudah berkembang pesat dari tahun-tahun sebelumnya, ada beberapa jenis panel surya yang bisa kita gunakan sesuai dengan kebutuhan yang kita miliki. Jenis panel surya memiliki kelebihan dan kekurangannya masing-masing (Sanspower; Ecatalog, 2020). Berikut adalah klasifikasi jenis panel surya:

1. Monocrystalline Silicon

Jenis panel surya monocrystalline merupakan jenis panel surya yang paling banyak digunakan karena kelebihan yang dimilikinya. Panel surya ini terbuat dari silikon yang diiris tipis-tipis dengan menggunakan mesin, kelebihan dari panel surya monocrystalline yaitu penampangnya dapat menyerap Cahaya matahari dengan lebih efisien dibanding dengan panel surya lainnya, atau bisa dikatakan merupakan panel surya yang paling efisien. Efisien konversi Cahaya matahari menjadi energi listrik yang dimiliki oleh bahan sel surya ini adalah sekitar 15-25%. Jumlah ini merupakan jumlah yang cukup besar jika dibandingkan dengan sel surya yang lain meski dengan ukuran penampang yang sama. Sayangnya kekurangan jenis panel surya ini yaitu membutuhkan Cahaya yang sangat

terang Ketika beroperasi, ia akan mengalami penurunan efisiensi jika berada pada cuaca yang berawan atau mendung. Ciri-ciri panel surya monocrystalline yaitu memiliki warna hitam dan juga bentuk yang tipis. Gambar 2.5 memperlihatkan modul surya monocrystalline silicon.

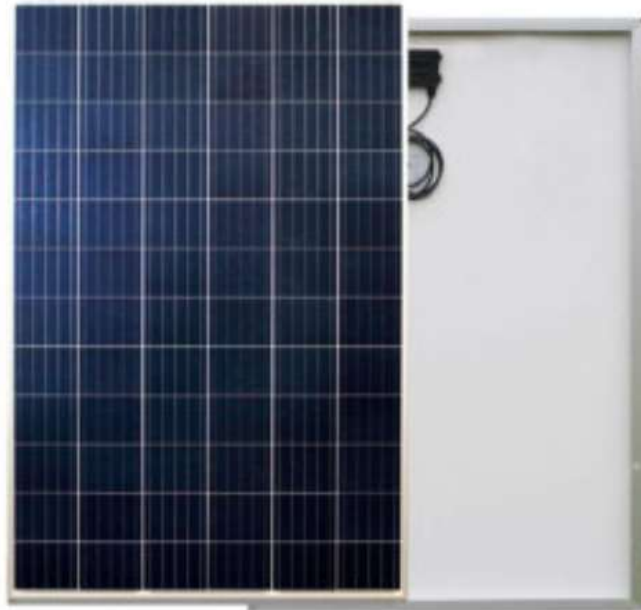


Gambar 2. 6 modul surya monocrystalline silicon
(Sanspower; Ecatalog, 2020)

2. Polycrystalline Silicon

Panel surya polycrystalline merupakan panel surya yang terbuat dari batang silikon yang kemudian dicairkan. Teknologi panel ini memiliki kelebihan dari segi susunannya yang lebih rapi dan lebih rapat. Kekurangan dari panel surya polycrystalline yaitu sulit digunakan pada daerah yang rawan mendung dan dengan curah hujan yang tinggi. Efisiensi dari jenis panel surya ini berkisar antara 14-17%. Ciri dari panel surya polycrystalline yaitu berwarna biru dan memiliki penampilan yang unik karena terkesan

seperti ada retakan di dalam sel surya yang dimilikinya. Gambar modul surya polycrystalline silicon dapat dilihat pada gambar 2.6.



Gambar 2. 7 modul surya polycrystalline silicon
(Sanspower; Ecatalog, 2020)

3. Thin Film Solar Cell

Thin film solar cell merupakan sebuah teknologi panel surya yang dibuat dengan menggunakan sel surya yang tipis yang kemudian dipasangkan pada sebuah lapisan dasar, jika dilihat secara fisik panel surya ini merupakan panel surya yang memiliki dua lapisan. Kelebihan dari panel surya ini adalah memiliki bobot yang sangat ringan dan memiliki sifat yang lebih fleksibel karena memiliki ukuran yang sangat tipis. Kekurangan dari panel surya ini yaitu efisiensi yang dimilikinya cukup rendah, yaitu berkisar 8,5-11%. Oleh karena itu panel surya ini lebih cocok digunakan untuk kebutuhan komersil. Gambar modul surya jenis ini dapat dilihat pada gambar 2.7.



Gambar 2. 8 modul surya Thin film solar cell

(Sanspower; Ecatalog, 2020)

4. Compound Thin Film Triple Junction Photovoltaic

Teknologi panel surya ini memiliki tiga lapisan. Namun panel surya jenis ini tidak bisa digunakan untuk kebutuhan sehari-hari, karena jenis panel surya ini merupakan jenis panel surya yang digunakan untuk perangkat yang diterbangkan ke luar angkasa. Oleh karena itu kemampuan efisiensinya sangat tinggi, panel surya ini bisa menghasilkan daya listrik hingga 45%, jauh lebih besar dari jenis panel surya lainnya. Panel surya ini memiliki kekurangan yaitu mempunyai bobot yang sangat berat dan juga sangat rapuh jika dibandingkan dengan jenis panel surya lainnya. Gambar modul surya jenis ini dapat dilihat pada gambar 2.8.



Gambar 2. 9 modul surya Compound Thin Film Triple Junction Photovoltaic
(Sanspower; Ecatalog, 2020)

2.2.4 *Shading*

Bayangan (*Shading*) merupakan salah satu faktor terpenting yang mempengaruhi kinerja panel Photovoltaic (PV). Umumnya PLTS dibangun sangat berdekatan dengan bangunan terutama pada daerah perkotaan dan menyebabkan bayangan pada modul PLTS terutama yang dipasang di atap. Terkadang karena desain PLTS yang salah, bayangan sendiri juga dimungkinkan terjadi. Faktor lain yang dapat menyebabkan kerugian adalah pohon terutama pada PLTS atap. Jadi, pepohonan disekitarnya harus dianalisis dengan baik ketika sistem PLTS dirancang (Pengaruh *et al.*, 2023).

2.3 **Pembangkit Listrik Tenaga Angin/Bayu (PLTB)**

Pembangkit Listrik Tenaga Angin/Bayu adalah suatu pembangkit listrik energi terbarukan yang menggunakan angin sebagai sumber energi untuk menghasilkan energi listrik. Turbin angin atau *wind turbine* adalah kincir angin yang digunakan untuk memutar generator listrik dan menghasilkan energi listrik. Perkembangan teknologi turbin angin dalam dua dekade terakhir menghasilkan

turbin angin yang modular dan mudah dipasang, saat ini sebuah turbin angin modern 100 kali lebih kuat dibanding beberapa tahun yang lalu.

Pembangkit listrik tenaga angin/bayu ini terdiri dari empat bagian yang terdiri dari rotor, transmisi, elektrikal dan tower. Bagian rotor terdiri dari baling-baling, umumnya berbentuk seperti baling-baling pesawat. Dengan bentuk seperti ini diharapkan energi angin yang tertangkap bisa maksimal agar bobotnya lebih ringan. Baling-baling ini biasanya dibuat dari fiberglass atau material komposit (Bachtiar and Hayyatul, 2018). Pada perangkat lunak HOMER untuk menghitung kecepatan angin menggunakan persamaan:

$$(P) = \frac{1}{2} \times \rho \times V^3 \times A \times \eta \quad (2.7)$$

P = Daya

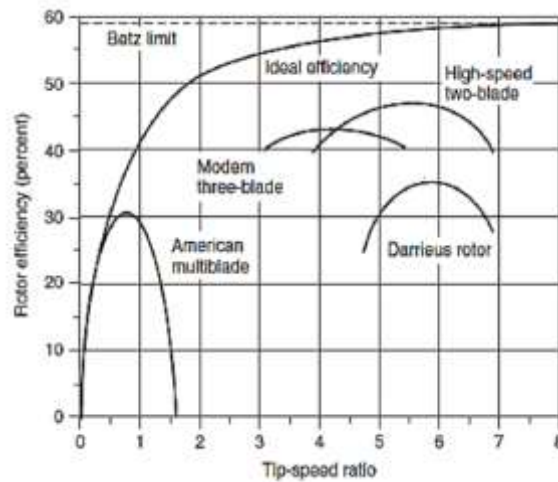
ρ = Massa jenis angin (1.225 kg/m³)

V = Kecepatan angin (m/s)

A = Luas penampang ($m^2 = \frac{1}{4} \times \pi \times D$)

η = Efisiensi (%)

Turbin angin tidak bisa menyerap energi angin secara menyeluruh dan memiliki daya serap menurut tipe yang digunakan. Daya serap tersebut dikenal dengan Coefisien Power (Cp). Coefisien Power maksimal yang akan dicapai turbin angin adalah 59,3%. Angka 16/27 (59,3%) disebut Betz limit, berdasarkan nama ilmuwan jerman yaitu Albert Betz sekitar tahun 1920. TSR (Tip Speed Ratio) adalah perbandingan kecepatan angin pada ujung bilah dan angin, jika semakin besar TSR-nya maka akan semakin besar putarannya (Maizana *et al.*, 2022). Gambar 2.9 menunjukkan efisiensi rotor terhadap TSR (Tip Speed Ratio).

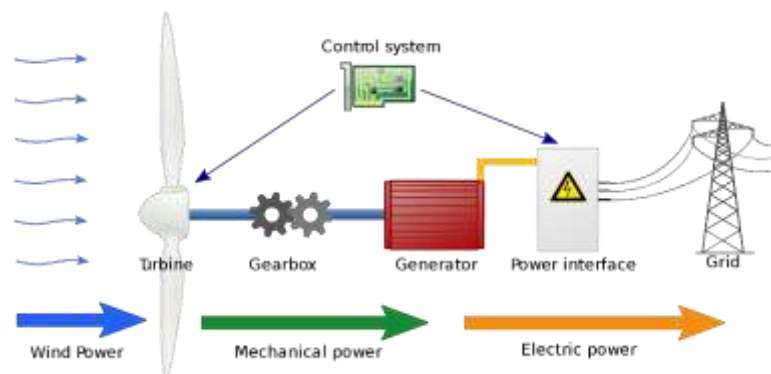


Gambar 2. 10 Efisiensi Rotor terhadap TSR

(Maizana *et al.*, 2022)

2.3.1 Mekanisme Kerja Turbin Angin

Turbin angin bekerja dengan mengkonversi energi angin menjadi energi rotasi melalui *blade* turbin. Konsep dasar turbin angin adalah untuk mengkonversi energi kinetic dari angin menjadi mekanik yang akan digunakan untuk memutar rotor dari turbin angin dan menghasilkan energi listrik.



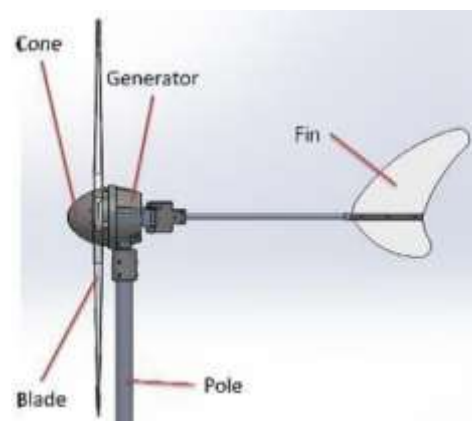
Gambar 2. 11 Mekanisme Kerja Turbin Angin

Perputaran *blade* dapat terjadi karena angin menghempas ke arah *blade* dengan bentuk *airfoil* tertentu akan menghasilkan gaya angkat pada ketiga *blade* yang menyebabkan pergerakan dari *blade* yang kemudian perputaran tersebut akan dihubungkan dengan sebuah *gearbox* yang digunakan untuk merubah rasio

kecepatan yang dihasilkan oleh *blade* untuk digunakan pada generator agar mendapat putaran yang maksimal. Kemudian hasil energi listrik dari generator akan disalurkan dengan kabel ke dasar tiang dimana terletak transformator *step up* (Sudrajat *et al.*, 2020).

2.3.2 Komponen Turbin Angin

Turbin angin tersusun dari beberapa komponen, gambar 2.10 akan memperlihatkan komponen yang ada pada turbin angin.



Gambar 2. 12 Komponen Turbin Angin

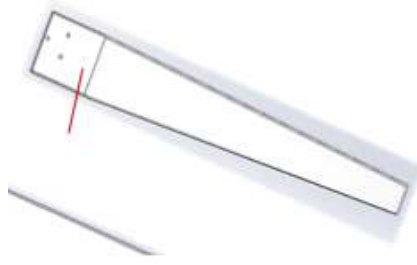
(Bachtiar and Hayyatul, 2018)

Berikut adalah penjelasan mengenai komponen yang ada pada turbin angin:

1. Sudu/*Blade*

Sudu adalah bagian rotor dari turbin angin. Rotor ini menerima energi kinetic dari angin dan diubah kedalam energi gerak putar. Menggunakan prinsip-prinsip aerodinamika seperti pesawat. *Blade* memiliki 3 jenis berdasarkan desainnya, berikut adalah jenis-jenis blade:

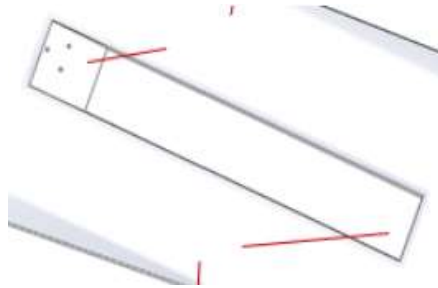
- a. Taper, taper merupakan *blade* yang dari pangkalnya akan mengecil ke ujung seperti diperlihatkan pada gambar 2.11.



Gambar 2. 13 Blade Taper

(Bachtiar and Hayyatul, 2018)

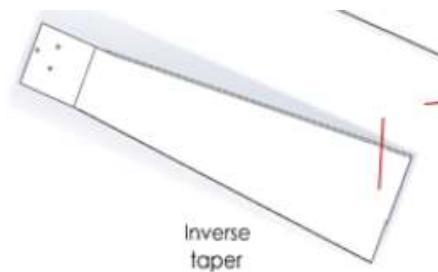
- b. Taper Less, taper less merupakan *blade* yang dari pangkal sampai ujungnya memiliki ukuran yang sama, dapat dilihat seperti pada gambar 2.12.



Gambar 2. 14 Blade Taper Less

(Bachtiar and Hayyatul, 2018)

- c. Inverse Taper, *Blade* ini merupakan *blade* yang ujungnya membesar seperti pada gambar 2.13.



Gambar 2. 15 Blade Inverse Taper

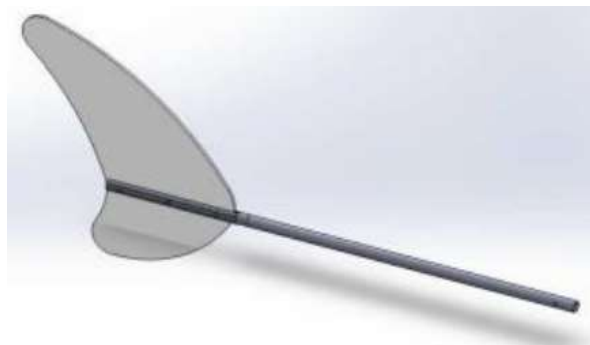
(Bachtiar and Hayyatul, 2018)

2. Tower

Tower atau tiang penyangga adalah bagian struktur dari turbin angin yang memiliki fungsi sebagai struktur utama penopang komponen sistem terangkai sudu, poros, dan generator.

3. Ekor

Ekor pada turbin angin berguna untuk merubah posisi generator dan turbin angin agar sesuai dengan arah datangnya angin, bentuk ekor turbin angin dapat dilihat pada gambar 2.14.

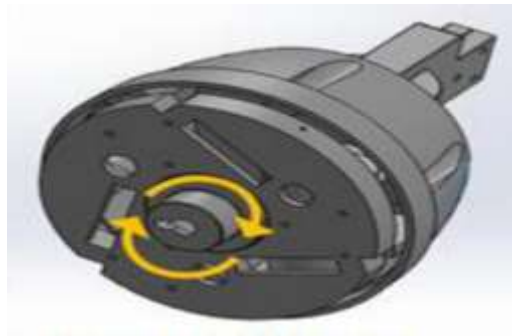


Gambar 2. 16 Ekor Turbin Angin
(Bachtiar and Hayyatul, 2018)

4. Generator

Generator adalah salah satu komponen terpenting dalam sistem turbin angin, generator ini dapat mengubah energi gerak menjadi energi listrik. Generator ada dua jenis, yaitu generator AC (arus bolak-balik) dan generator DC (arus searah), Generator AC dan generator DC memiliki perbedaan prinsip. Untuk generator DC kumparan jangkar ada pada bagian rotor dan terletak di antara kutub-kutub magnet yang tetap di tempat, diputar oleh tenaga mekanik. Pada generator AC, konstruksinya sebaliknya yaitu, kumparan jangkar disebut juga kumparan stator karena berbeda pada tempat

yang tetap, sedangkan kumparan rotor bersama-sama dengan kutub magnet diputar oleh tenaga mekanik. Jika kumparan rotor yang berfungsi sebagai pembangkit kumparan medan magnet yang terletak di antara kutub magnet utara dan selatan diputar oleh tenaga angin atau tenaga lainnya, maka pada kumparan rotor akan timbul medan magnet atau fluks yang bersifat bolak-balik atau fluks putar. Flux putar ini akan memotong-motong kumparan stator, sehingga pada ujung-ujung kumparan stator timbul gaya gerak listrik karena pengaruh induksi dan flux putar tersebut (*et al.*, 2019). Bentuk generator seperti pada gambar 2.15.



Gambar 2. 17 Generator

(Bachtiar and Hayyatul, 2018)

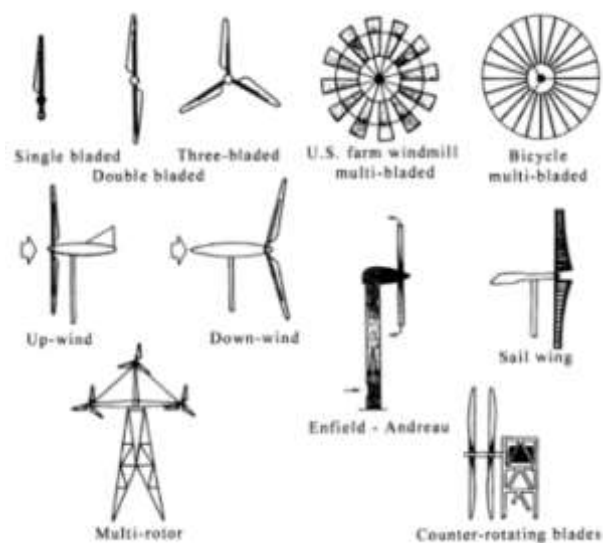
2.3.3 Klasifikasi Jenis Turbin Angin

Turbin angin pada umumnya diklasifikasikan menurut arah porosnya, yaitu turbin angin sumbu horizontal (HAWT) dan turbin angin sumbu vertikal (VAWT) (Nakhoda and Saleh, 2015). Berikut klasifikasi jenis turbin angin:

1. *Horizontal Axis Wind Turbine* (HAWT)

HAWT merupakan turbin angin yang memiliki poros rotasi sejajar dengan permukaan tanah. Agar rotor dapat berputar dengan baik, arah angin harus sejajar dengan poros turbin dan tegak lurus terhadap arah putaran

rotor. Biasanya turbin HAWT memiliki *blade* berbentuk *airfoil* seperti bentuk sayap pada pesawat. Secara umum semakin banyak jumlah *blade* maka semakin tinggi putaran turbin. Kelebihan dari turbin HAWT yaitu memiliki efisiensi yang tinggi dan *cut-in wind speed* rendah. Kekurangannya adalah turbin jenis ini memiliki desain yang lebih rumit karena rotor hanya dapat menangkap angin dari satu arah sehingga dibutuhkan pengarah angin. Gambar 2.16 memperlihatkan macam-macam desain turbin angin HAWT.



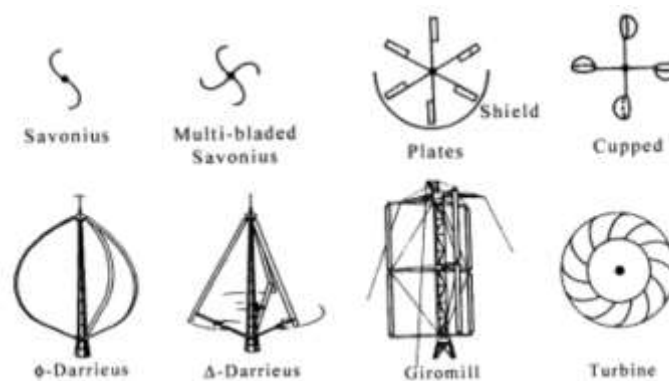
Gambar 2. 18 Macam-macam Desain Turbin Angin HAWT

(Nakhoda and Saleh, 2015)

2. *Vertical Axis Wind Turbine* (VAWT)

VAWT merupakan turbin angin sumbu tegak yang Gerakan poros dan rotor sejajar dengan arah angin, sehingga rotor dapat berputar pada semua arah angin. Kelebihan dari turbin VAWT yaitu memiliki torsi yang tinggi sehingga dapat berputar pada kecepatan angin rendah, generator dapat diletakan dibagian bawah turbin sehingga mempermudah perawatan

dan kerja turbin tidak dipengaruhi arah angin. Kekurangannya yaitu kecepatan angin di bagian bawah sangat rendah sehingga apabila tidak memakai tower akan menghasilkan putaran yang rendah, dan efisiensi lebih rendah dibandingkan turbin HAWT. Ada tiga model pada turbin VAWT, yaitu savonius, darrieus, dan H rotor. Turbin savonius memanfaatkan gaya *drag* sedangkan darrieus dan H rotor memanfaatkan gaya *lift*. Jenis desain turbin VAWT bisa dilihat pada gambar 2.17.



Gambar 2. 19 Macam-macam Desain Turbin Angin VAWT

(Nakhoda and Saleh, 2015)

2.4 Pembangkit Listrik Tenaga *Hybrid* (PLTH)

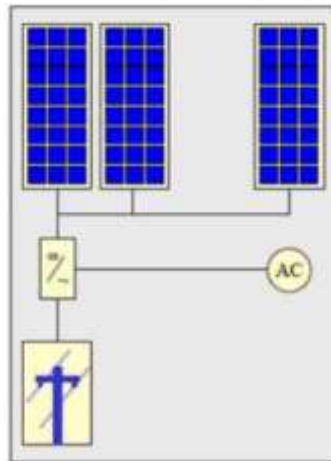
Pembangkit *hybrid* adalah suatu sistem pembangkit listrik yang menggunakan lebih dari satu jenis sumber energi untuk mensuplai satu beban yang sama. Pembangkit listrik tenaga *hybrid* dalam system penggabungan sumber pembangkit listrik mempunyai model penggabungan sumber pembangkit. Model pembangkit listrik tenaga *hybrid* dengan kombinasi sumber energi yang dapat diperbarui (*renewable*) dengan yang tidak dapat diperbarui (*unrenewable*).

Sistem pembangkit listrik *hybrid* umumnya yang ada pada saat ini yaitu PLTS-mikrohydro, PLTS-genset, dan PLTS-tenaga angin. Tujuan utama

pengembangan sistem pembangkit listrik *hybrid* yaitu untuk menjamin suplai energi primer pada pembangkit sehingga produksi listrik tetap terjamin untuk memenuhi kebutuhan konsumen. Selain itu pembangkit listrik tenaga *hybrid* juga mengkombinasi keunggulan dari setiap pembangkit sekaligus menutupi kelemahan masing-masing pembangkit dalam kondisi tertentu, sehingga secara keseluruhan sistem dapat beroperasi lebih ekonomis dan efisien pada berbagai kondisi pembebanan. Tipe pembebanan adalah *keyword* penting dalam sistem *hybrid*, dimana untuk setiap load profile yang berbeda akan diperlukan sistem *hybrid* dengan komposisi tertentu, agar dapat dicapai system yang optimum. Pembangkit Listrik *hybrid* bisa di bangun dengan sistem *grid-connected (on grid)* maupun *stand-alone (off grid)* (Sunardiyo *et al.*, 2022).

2.4.1 On Grid

Grid-connected (on grid) merupakan sistem pembangkit Listrik yang terhubung dengan jaringan Listrik distribusi dari PLN. Karena sistem terhubung dengan jaringan Listrik PLN maka daya nya lebih optimal, ketika energi yang dihasilkan oleh pembangkit Listrik tidak optimal beban masih bisa beroperasi dengan suplai daya dari jaringan Listrik PLN. Namun untuk penerapan sistem *on grid* harus dekat dengan sumber jaringan Listrik distribusi PLN. Gambar 2.18 memperlihatkan skematik sistem *on grid*.

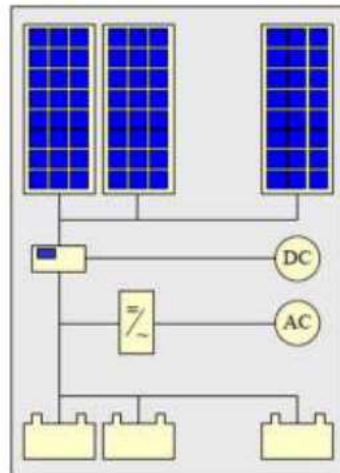


Gambar 2. 20 Skematik sistem on grid

(Halim, 2022)

2.4.2 *Off Grid*

Stand-alone (off grid) adalah sistem pembangkit Listrik yang tidak terhubung dengan jaringan Listrik distribusi dari PLN. Karena sistem ini tidak terhubung dengan jaringan Listrik distribusi PLN maka untuk penempatannya bisa dimana saja, namun karena sistem ini tidak terhubung dengan jaringan distribusi dari PLN maka Ketika energi yang dihasilkan oleh pembangkit tidak optimal maka daya yang di berikan pada beban pun akan berkurang, oleh karena itu pada sistem *off grid* ini biasanya menggunakan baterai sebagai energi Cadangan yang digunakan saat pembangkit tidak dapat menghasilkan energi pada keadaan maksimal. Gambar 2.19 memperlihatkan skematik sistem *off grid*.



Gambar 2. 21 Skematik sistem off grid

(Halim, 2022)

2.4.3 Komponen Pembangkit Listrik *Hybrid*

Pembangkit Listrik *hybrid* umumnya terdiri dari beberapa komponen seperti pembangkit Listrik (energi baru terbarukan/konvensional), baterai, dan inverter. Berikut penjelasan mengenai komponen pembangkit Listrik *hybrid* :

1. Baterai

Baterai adalah sebuah alat yang dapat menyimpan energi listrik yang terdiri dari dua atau lebih sel elektrokimia yang dapat mengubah energi kimia yang tersimpan menjadi energi listrik. Setiap sel memiliki kutub positif (katoda) dan kutub negatif (anoda). Kutub yang bertanda positif memiliki energi potensial yang lebih tinggi daripada kutub yang bertanda negatif. Untuk kapasitas baterai tersendiri tergantung pada tipe, umur, temperatur, dan rate of discharge. Untuk menghitung kebutuhan baterai bisa menggunakan persamaan :

$$Cadangan\ Energi = \frac{Total\ Kebutuhan\ Daya}{(100\% - 5\%)} \quad (2.8)$$

Untuk menentukan jumlah baterai yang akan digunakan bisa dilakukan perhitungan dengan persamaan :

$$Jumlah\ Baterai = \frac{Cadangan\ Energi}{Kapasitas\ Baterai} \quad (2.9)$$

2. Inverter

Inverter adalah sebuah rangkaian yang dapat mengubah tegangan DC menjadi tegangan bergelombang AC. Ada 3 jenis inverter yaitu inverter *off-grid*, *on-grid* dan *hybrid*. Pada inverter *off-grid* hanya mengandalkan sumber tegangan dari panel surya, turbin angin, baterai dan pembangkit lainnya yang tidak terkoneksi dengan jaringan listrik distribusi PLN. Sedangkan, sistem *on-grid* dapat dihubungkan dengan jaringan Listrik distribusi PLN. Berdasarkan gelombang keluaran yang dihasilkan oleh inverter terdapat 3 macam gelombang keluaran yaitu square wave, modified sine wave, dan pure sine wave. Untuk menghasilkan daya yang optimal, pemilihan inverter harus diperhitungkan. Kapasitas Inverter harus memiliki nilai DC-AC Rasio sebesar 1,2. Nilai ini merupakan nilai perbandingan antara kapasitas daya yang dibangkitkan dengan kapasitas Inverter, ditulis :

$$DC - AC\ RATIO = \frac{P_{pv}}{P_{in}} \quad (2.10)$$

Maka

$$P_{in} = \frac{P_{pv}}{DC-AC\ RATIO} \quad (2.11)$$

P_{in} = Kapasitas daya inverter (kW)

P_{pv} = Daya maksimal Array (Watt)

2.5 HOMER (Hybrid Optimization Model for Energy Renewable)

HOMER *Energy* adalah perangkat lunak pemodelan microgrid terkemuka yang digunakan untuk membuat model pembangkit listrik *hybrid*. Salah satu tool populer untuk desain sistem PLTH menggunakan energi terbarukan. HOMER mensimulasikan dan mengoptimalkan sistem pembangkit listrik baik *stand alone* (*off grid*) maupun *grid connected* (*on grid*) yang dapat terdiri dari kombinasi pembangkit listrik konvensional turbin angin, *photovoltaic*, mikrohidro, biomassa, generator (diesel/bensin), *microturbine*, *fuel cell*, baterai, dan penyimpanan hidrogen, melayani beban listrik maupun termal (Tenaga *et al.*, 2017).

HOMER mensimulasikan operasi sistem dengan menyediakan perhitungan energy balance untuk setiap 8,760 jam dalam setahun. Jika sistem mengandung baterai dan generator diesel/bensin, HOMER juga dapat memutuskan, untuk setiap jam, apakah generator diesel/bensin beroperasi dan apakah baterai diisi atau dikosongkan. Selanjutnya HOMER menentukan konfigurasi terbaik sistem dan kemudian memperkirakan biaya instalasi dan operasi sistem selama masa operasinya (life time costs) seperti biaya awal, biaya penggantian komponen-komponen, biaya O&M, biaya bahan bakar, dan lain-lain. Saat melakukan simulasi, HOMER menentukan semua konfigurasi sistem yang mungkin, kemudian ditampilkan berurutan menurut net presents costs - NPC (atau disebut juga life cycle costs). Jika analisa sensitivitas diperlukan, HOMER akan mengulangi proses simulasi untuk setiap variabel sensitivitas yang ditetapkan (Studi *et al.*, 2010).

2.5.1 Prinsip Kerja HOMER

HOMER bekerja berdasarkan 3 hal, yaitu simulasi, optimasi, dan analisa sensitivitas. Ketiga hal tersebut bekerja secara beruntun dan memiliki fungsi

masing- masing, sehingga didapat hasil yang optimal (Akbar, Hiron and Nadrotan, 2019).

2.5.2 Simulasi

HOMER dapat mensimulasikan konfigurasi pembangkit listrik dengan beberapa kombinasi baik *stand alone (off grid)* maupun *grid connected (on grid)* yang dapat terdiri dari kombinasi pembangkit listrik konvensional turbin angin, *photovoltaic*, mikrohidro, biomassa, generator (diesel/bensin), *microturbine*, *fuel cell*, baterai, dan penyimpanan hidrogen, melayani beban listrik maupun termal (Studi *et al.*, 2010).

2.5.3 Optimasi

HOMER akan melakukan proses optimasi setelah proses simulasi selesai dilakukan. Proses simulasi memodelkan dan merancang konfigurasi sistem secara khusus, maka proses optimasi dilakukan untuk menentukan kemungkinan teroptimal dalam konfigurasi sistem. Pada daftar hasil optimasi, Homer mengurutkan nilai NPC dari terendah hingga tertinggi. Sistem dikatakan optimal, apabila salah satu konfigurasi sistem menunjukkan NPC terendah untuk jangka waktu yang telah ditentukan, Homer mensimulasikan konfigurasi yang berbeda-beda, apabila konfigurasi sistem tidak layak, maka Homer tidak menampilkan hasil optimasi sistem tersebut.

2.6 Net Present Cost (NPC)

Net present cost (NPC) adalah semua biaya yang digunakan dalam proyek pembangunan komponen baik pemasangan maupun dalam pengoprasian suatu proyek (Akbar, Hiron and Nadrotan, 2019) Net present cost dapat diketahui dengan persamaan 2.12:

$$NPC = Capital Cost + Replacement Cost + O\&M Cost - Salvage \quad (2.12)$$

Dimana :

Capital Cost = Biaya komponen

Replacement Cost = Biaya ganti komponen

O&M Cost = Biaya operasional dan perawatan

Salvage = Biaya yang tersisa dari komponen

2.7 Cost Of Energy (COE)

Cost of energy merupakan biaya yang dikeluarkan untuk menghasilkan energi listrik per 1 kWh. COE dapat diketahui dengan membagi biaya tahunan dengan produksi energi tahunan oleh pembangkit *hybrid* (Akbar, Hiron and Nadrotan, 2019). Nilai COE dapat diketahui dengan persamaan 2.13:

$$COE = \frac{TAC}{Etot\ served} \quad (2.13)$$

Dimana :

TAC (*total annualized cost*) = Biaya total tahunan pembangkit *hybrid*

Etot served = Total energi tahunan untuk beban (kWh)

2.8 Mesin Aerator

Aerator adalah alat untuk membantu melarutkan oksigen yang ada di udara ke dalam air. Prinsip kerja alat ini adalah membuat permukaan air sebanyak mungkin bersentuhan dengan udara. Tujuannya adalah agar kandungan oksigen dalam air itu cukup serta gas dan kotoran yang biasanya menimbulkan busuk dapat terusir dari air. Pemanfaatan mesin aerator biasanya digunakan pada akuarium, kolam budidaya ikan bioflok, dan tambak (Devrifqi and Mowaviq, 2021). Untuk menentukan kapasitas dan jumlah mesin aerator pada satu kolam budidaya ikan bioflok kita harus mengetahui terlebih dahulu kapasitas air pada satu kolam ikan,

setelah mengetahui kapasitas air kita dapat menghitung berapa kapasitas dan jumlah mesin aerator yang tepat untuk digunakan pada kolam tersebut. Kadar oksigen terlarut yang optimal pada budidaya ikan bioflok berkisar antara 4-6,5 mg/L. Mesin aerator dengan daya 10 Watt dapat mengaerasi 1.000 liter air (Bioflok Nusantara, 2022). Gambar 2.20 memperlihatkan mesin aerator.



Gambar 2. 22 Mesin Aerator

(Arifin *et al.*, 2022)

2.9 Penelitian Terkait

Tabel 2. 3 Penelitian Terkait

No	Judul Jurnal	Nama peneliti	Tempat dan Tahun Penelitian	Pembahasan
1.	Model Integrasi Pv Dan Wind Turbin Sebagai Pembangkit Energi Listrik Baru Terbarukan Pada	Nouval Hidayat Muchtar	PT. MOD VANAME INDONESIA, 2022	Pembuatan model pembangkit Listrik <i>hybrid on grid</i> Pv dan Wind Turbin untuk mensuplai daya yang dibutuhkan oleh PT. MOD VANAME

	Peternakan Tambak Udang Di Pt . Mod Vaname Indonesia			INDONESIA. Pembangkit Listrik <i>hybrid</i> ini dapat membangkitkan daya sebesar 1.558,246 kWh/hari dengan pasokan dari PLTS sebesar 1.436 kWh/hari dan PLTB sebesar 122,246 kWh/hari.
2.	Rancang Bangun Pembangkit Listrik Hybrid Tenaga Surya dan Bayu Untuk Simulasi Pompa Aerator Kolam 25 W	Devrifqi, Uray Muhammad Mowaviq, Muhammad Imbarothur	Jl. Kebraon Indah Permai D19, Kel. Kebraon, Kec. Karang pilang, Kota Surabaya, 2021	Rancang bangun pembangkit Listrik <i>hybrid off grid</i> PLTS dan PLTB untuk memenuhi daya mesin aerator 25W dengan menggunakan 4 buah panel surya tipe monocrystalline 100 wp sebanyak 4 buah dan 1 turbin angin generator 3 fasa 12V 300W.

				<p>pembangkit Listrik <i>hybrid</i> ini dapat menghasilkan daya sebesar 384,61Wh, PLTS(316,84 Wh) PLTB(67,77Wh). Energi ini dapat digunakan untuk melayani beban dalam kisaran waktu 14,2 jam sebesar 242,25 Wh dan mendapat energi sisa sebesar 142,36 Wh yang dapat disimpan kedalam baterai.</p>
3.	<p>Pemanfaatan Energi Surya Sebagai Energi Alternatif Aerator Untuk Meningkatkan Kualitas Air Kolam Ikan Hias Berukuran Kecil</p>	<p>Arifin, Zaenal Saroso, Bagus Argo Kurniawan, Agung Ageftry, Farhan Dio</p>	2022	<p>Pembuatan pembangkit Listrik tenaga surya untuk memenuhi kebutuhan beban mesin aerator 25 Watt dengan menggunakan panel surya tipe Polycrystalline</p>

				100Wp sebanyak 1 buah, panel ini bisa menghasilkan Listrik rata-rata per harinya sebesar 440W dan mampu untuk memenuhi beban mesin aerator 25W selama 24 jam dengan daya yang terpakai sebesar 406,6 Watt
--	--	--	--	---