

BAB II

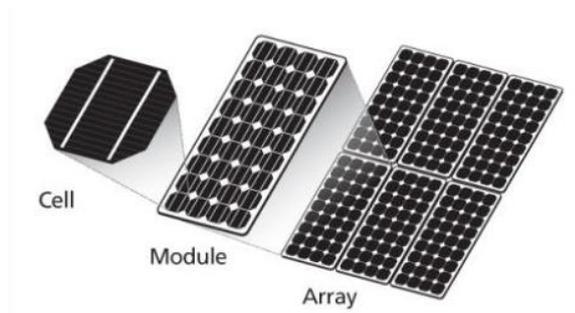
TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Landasan Teori

2.1.1 Pembangkit Listrik Tenaga Surya

Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) merupakan sebuah pembangkit yang menciptakan energi listrik dengan mengubah foton yang ada pada energi matahari melalui sel-sel surya (Usman, 2014). Foton dari sinar matahari yang mengenai sel surya melepaskan energi sehingga elektron dari atom semikonduktor terlepas. Terlepasnya elektron tersebut menyebabkan atom semikonduktor mengalami kekosongan, dan selanjutnya disebut *hole*. Elektron yang dapat bergerak bebas tertarik ke arah semikonduktor-n, sedangkan *hole* tertarik ke arah semikonduktor-p. Ketika kedua semikonduktor tersebut terhubung oleh beban maka arus listrik akan mengalir melewati *pn-junction* (M. Syukri, 2010).

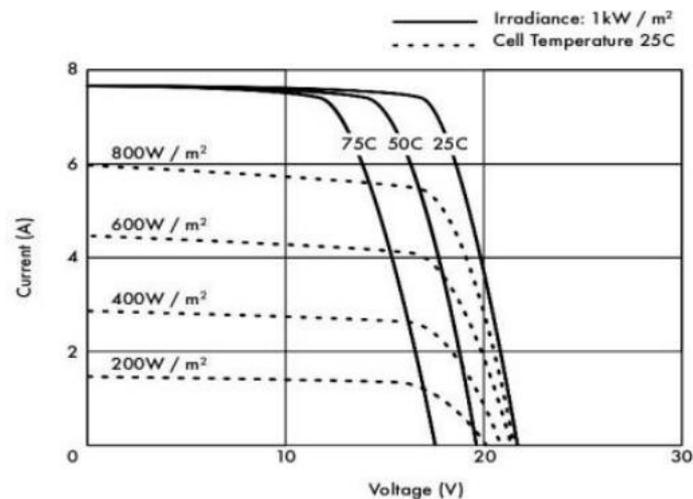
Sel-sel surya dihubungkan secara seri dan paralel pada suatu panel agar menghasilkan daya listrik yang tinggi, dengan jumlah antara 32 – 40 sel surya per panel (Quaschnig, 2005).



Gambar 2. 1 Hubungan Sel Surya, Modul, dan Array (Nabipour Afrouzi et al., 2013)

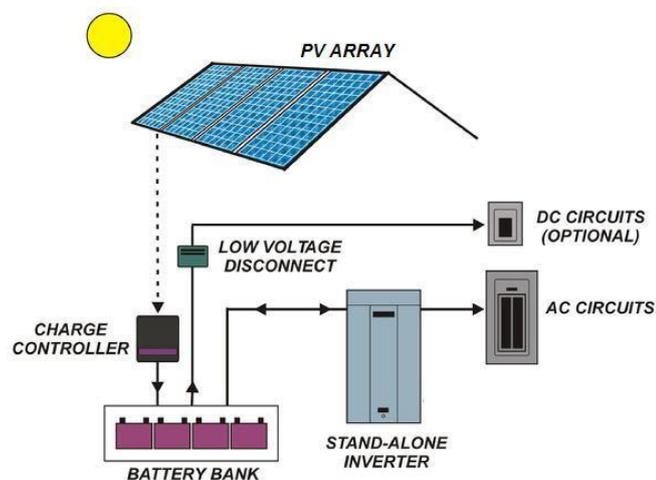
Panel surya memiliki karakteristik tegangan terhadap arus dan karakteristik pengaruh suhu. Karakteristik terhadap tegangan dan arus terlihat pada kurva bahwa ketika tegangan dan arus berada pada titik kerja maksimal (*maximum power point*) maka akan menghasilkan daya keluaran maksimum pula (V_{MPP}). Tegangan V_{MPP} lebih kecil dari tegangan rangkaian terbuka V_{OC} , begitu juga dengan arus I_{MPP} lebih kecil dari nilai arus hubung singkat I_{OC} (Janna & Widodo, 2021).

Karakteristik pengaruh suhu, yaitu semakin tinggi suhu modul surya maka tegangan yang dihasilkan semakin menurun. Sel surya akan bekerja optimal pada suhu 25°C . Selain itu perubahan suhu juga berpengaruh terhadap daya yang dihasilkan, semakin tinggi suhu modul surya maka daya yang dihasilkan akan semakin menurun.



Gambar 2. 2 Kurva Karakteristik Pengaruh Suhu Terhadap Daya Output (Quaschnig, 2005)

Sistem PLTS biasanya memuat panel surya, inverter, baterai, serta sistem pengendali baterai sebagai komponen utama (Santiari, 2011).

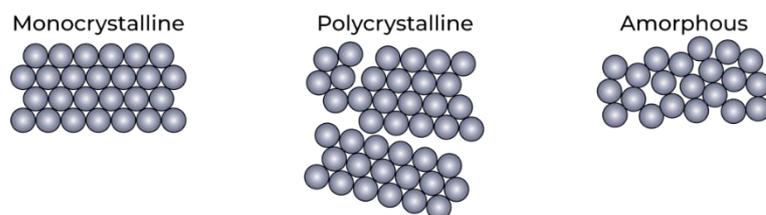


Gambar 2. 3 Sistem Skematik PLTS Off-Grid (Alkhalidi, 2018)

Berdasarkan struktur kristal semikonduktornya, panel surya memiliki tiga jenis yaitu (Bakhtiari, 2020):

a. Monokristal (*monocrystalline*)

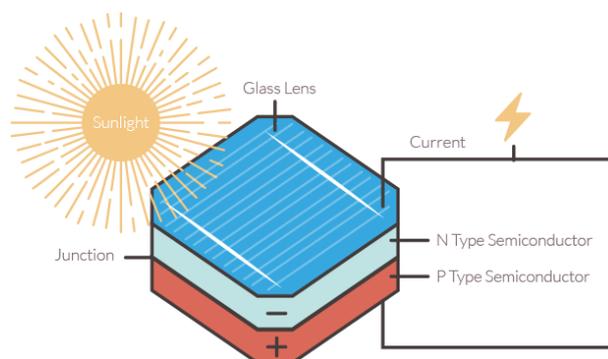
Panel dengan jenis ini memiliki silikon dengan tingkat kemurnian yang tinggi. Struktur kristalnya hampir sempurna (rapat, saling mengikat, dan tidak memiliki jarak satu sama lain), sehingga merupakan bahan semikonduktor dengan kualitas terbaik.



Gambar 2. 4 Susunan Silikon pada Panel Surya Monokristal, Polikristal, dan Amorphous (Bakhtiari, 2020)

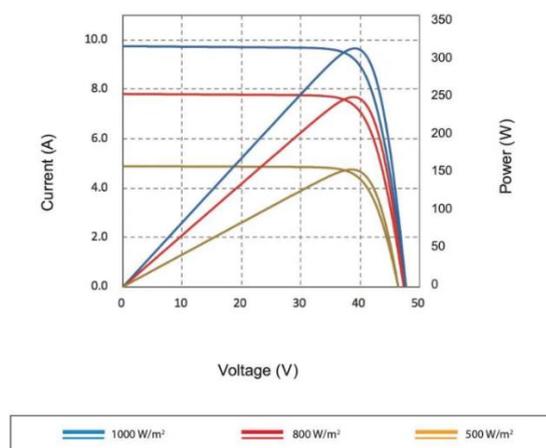
Panel ini memiliki prinsip kerja yang sama seperti sel surya silikon kristalin pada umumnya. Foton dari sinar matahari menyebabkan elektron dari atom semikonduktor lepas dan atom tersebut mengalami kekosongan (*hole*). Ketika semikonduktor-n (elektron yang lepas) dan semikonduktor-p (*hole*) terhubung oleh

beban, maka arus listrik akan mengalir melalui *pn-junction* (M. Syukri, 2010). Oleh karena itu juga panel jenis ini memiliki efisiensi paling tinggi yaitu sekitar 14 – 17%, namun persentase tersebut akan berkurang apabila cuaca berawan (Suwarti & Wahyono, 2019).



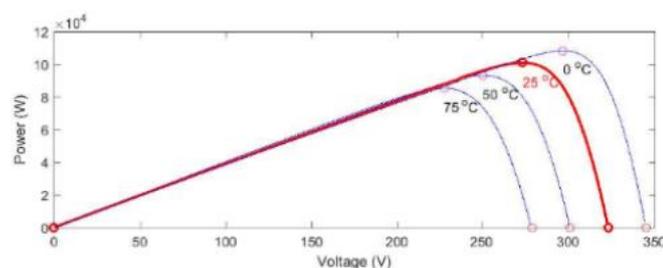
Gambar 2. 5 Struktur dan Prinsip Kerja Sel Surya Monokristal (Solar Power Authority, 2018)

Panel ini cenderung kurang terpengaruh oleh suhu tinggi dibandingkan dengan panel polikristal dan memproduksi daya listrik per satuan luas paling tinggi dibandingkan dengan jenis lainnya (Purwoto et al., 2018). Berbagai kelebihan tersebut membuat harga panel ini mahal.



Gambar 2. 6 Kurva Karakteristik I-V dan P-V pada Panel Monokristal *Grosun* 400W (Yuanfar, 2018)

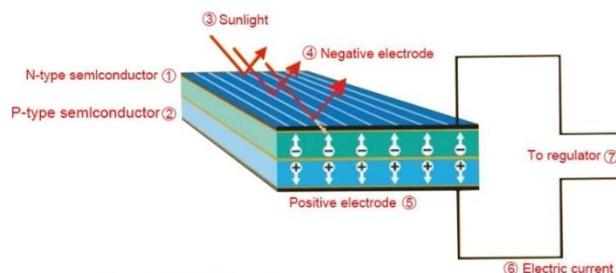
Gambar 2. 7 menunjukkan bahwa semakin tinggi suhu pada panel monokristal maka daya output yang dihasilkan oleh panel tersebut akan berkurang, begitu pula sebaliknya semakin rendah suhu panel atau suhu operasional maka daya output yang dihasilkan akan semakin rendah.



Gambar 2. 7 Kurva Pengaruh Suhu terhadap Daya Output Array Panel Monokristal SunPower SPR-31E-WHT-D (Verayiah & Iyadurai, 2017)

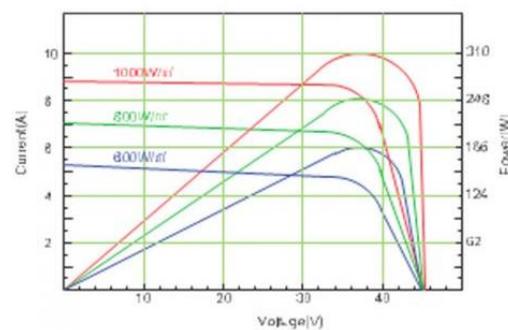
b. Polikristal (*polycrystalline*)

Panel ini dibuat dari ingot silikon persegi yang dicairkan, dicetak menjadi balok-balok dan kemudian dipotong menjadi pelat tipis. Panel ini tersusun dari kumpulan kristal silikon sehingga sel yang tersusun kurang sempurna dibandingkan dengan sel monokristal. Karena terbuat dari material yang sama dengan panel monokristal, prinsip kerjanya juga sama. Perbedaannya yaitu panel polikristal menyerap lebih sedikit energi matahari dan menghasilkan lebih sedikit listrik dibandingkan dengan panel monokristal (Niclas, 2020).



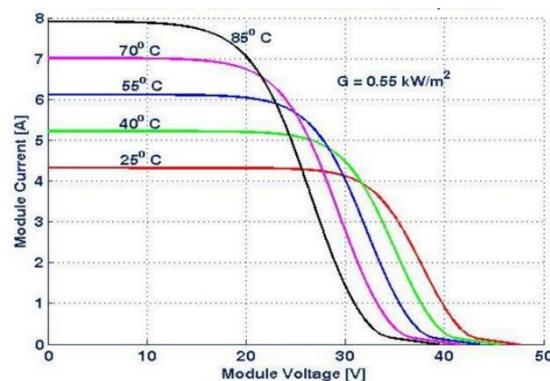
Gambar 2. 8 Struktur dan Prinsip Kerja Sel Surya Polikristal (Shenzen Aoshike Technology Co., 2018)

Panel ini memiliki harga yang lebih murah karena proses pembuatan yang lebih mudah (Susanti, 2018). Selain itu, panel ini memiliki efisiensi yang lebih rendah yaitu sekitar 11,5 – 14%, namun masih bisa memproduksi listrik pada saat berawan (Suwarti & Wahyono, 2019).



Gambar 2. 9 Kurva Karakteristik I-V dan P-V pada Panel Polikristal PLIMA 320W (PLIMA, 2017)

Gambar 2. 10 menunjukkan bahwa semakin tinggi suhu panel polikristal maka arus output yang dihasilkan oleh panel tersebut akan semakin tinggi dan tegangan output semakin menurun, sedangkan semakin rendah suhu panel atau suhu operasional maka arus output semakin rendah dan tegangan output semakin tinggi.

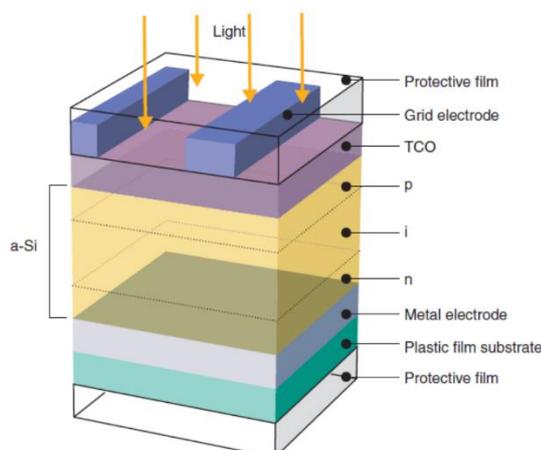


Gambar 2. 10 Kurva Pengaruh Suhu terhadap Output Arus dan Tegangan pada Panel Polikristal KD315 (Mustapha et al., 2013)

c. *Thin Film Solar Cell (TFSC)*

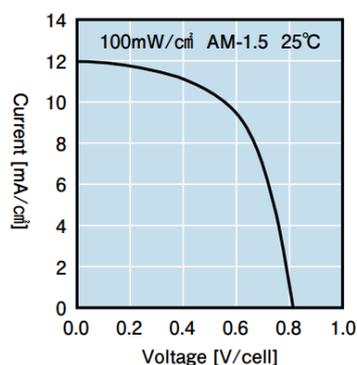
Panel surya ini terbuat dari satu atau lebih lapisan bahan *thin film* yang menyerap cahaya dan menghasilkan listrik. Sel *thin film* berukuran 200 atau 300 kali lebih tipis daripada sel silikon. Selain sel yang tipis, panel tipe ini juga ringan dan fleksibel. Silikon yang digunakan pada pembuatan panel ini sedikit sehingga emisi karbon yang dihasilkan juga sedikit (Smeaton, 2022). Sel surya ini memiliki efisiensi dalam rentang 4 – 12% (Alkhalidi, 2018). Panel ini memiliki harga yang paling terjangkau dibandingkan dengan panel monokristal atau polikristal karena mudah untuk diproduksi. Selain itu biaya instalasinya akan murah karena pemasangannya yang mudah dan membutuhkan lebih sedikit tenaga kerja, namun karena efisiensinya yang rendah maka agar dapat menghasilkan listrik yang setara dengan panel konvensional, diperlukan area yang lebih besar (Richardson, 2019). Sel surya ini memiliki beberapa jenis berdasarkan material penyusunnya, yaitu *Amorphous Thin-Film Silicon (a-Si)*, *Cadmium Telluride (CdTe)*, dan *Copper Indium Gallium Selenide (CIGS)* (Usman, 2014).

- *Amorphous silicon (a-Si)*



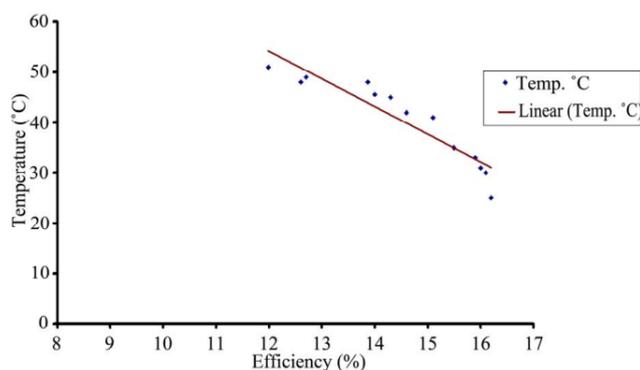
Gambar 2. 11 Struktur dan Prinsip Kerja Sel Surya *Amorphous silicon* (Fraas, 2014)

Panel surya ini tersusun dari sel surya yang terbuat dari silikon amorf, yang merupakan silikon non-kristal. Panel jenis ini paling populer diantara panel surya *thin film* karena teknologinya yang paling mirip dengan panel konvensional.



Gambar 2. 12 Kurva Karakteristik I-V pada Sel Surya *Amorphous silicon* Panasonic (Panasonic, 2019)

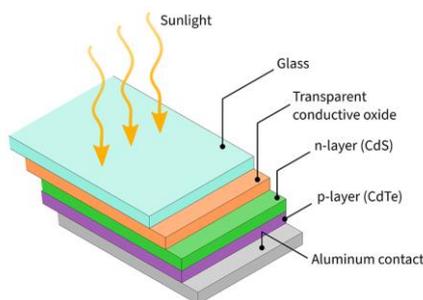
Material penyusun panel ini tidak beracun dan memiliki daya tahan yang lebih baik daripada panel surya *thin film* lainnya. Karena efisiensinya yang rendah, maka panel ini digunakan hanya untuk memenuhi beban yang rendah.



Gambar 2. 13 Kurva Pengaruh Suhu terhadap Efisiensi Sel Surya a-Si (Ibrahim, 2011)

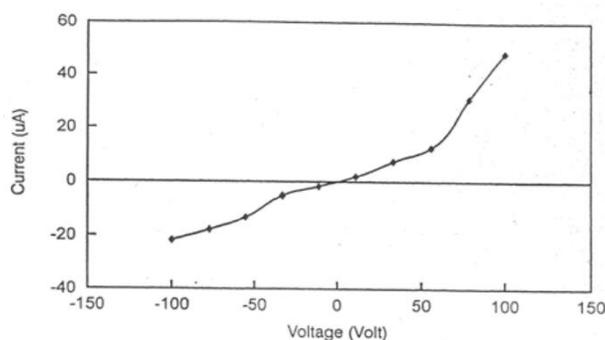
Gambar 2. 13 menunjukkan bahwa semakin tinggi suhu sel surya a-Si maka efisiensinya akan berkurang, begitu pula sebaliknya semakin rendah suhu sel surya maka efisiensinya akan bertambah.

- *Cadmium Telluride (CdTe)*



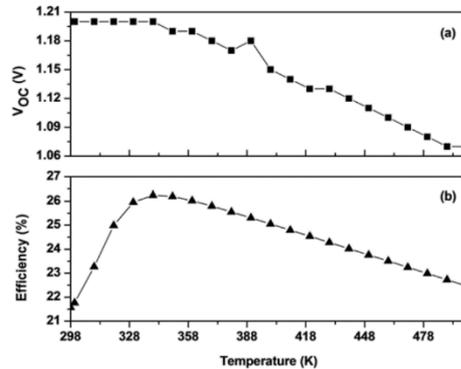
Gambar 2. 14 Struktur dan Prinsip Kerja Sel Surya *Cadmium telluride* (Moss & Redahan, 2021)

Panel ini terbuat dari senyawa kimia khusus yang disebut *Cadmium telluride*. Sel surya jenis ini paling banyak digunakan setelah sel kristal. Kelemahan panel ini yaitu dari segi materialnya. Telurium sangat jarang ditemukan dan cadmium merupakan salah satu unsur yang paling beracun di dunia.



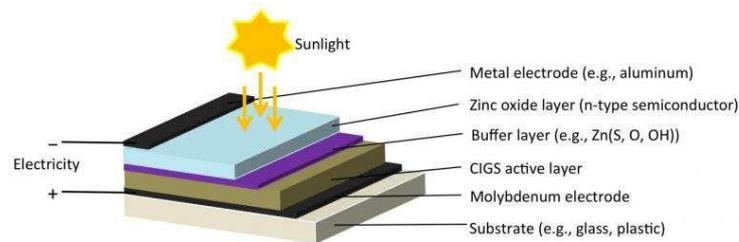
Gambar 2. 15 Kurva Karakteristik I-V pada Sel Surya CdTe (Kumar et al., 2008)

Gambar 2. 16 menunjukkan bahwa suhu berpengaruh terhadap tegangan output sel surya CdTe, semakin tinggi suhu sel maka tegangan yang dihasilkan semakin rendah. Gambar 2. 16 juga memperlihatkan bahwa suhu berpengaruh terhadap efisiensi sel surya CdTe, dimana apabila sel mencapai suhu optimal maka efisiensi sel tersebut juga optimal, namun apabila suhunya terus bertambah melebihi suhu optimal maka efisiensinya akan menurun.



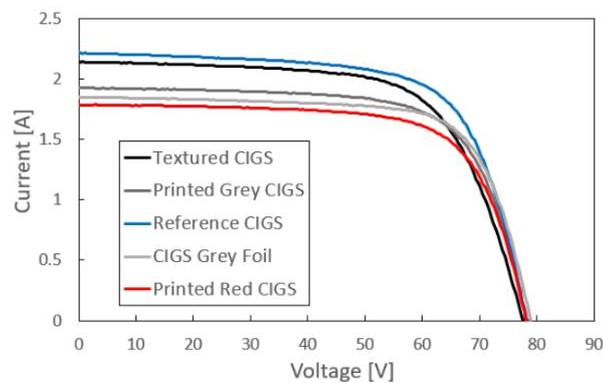
Gambar 2. 16 Kurva Pengaruh Suhu Terhadap Tegangan Output dan Efisiensi Sel Surya CdTe (Noman et al., 2017)

- *Copper Indium Gallium Selenide (CIGS)*



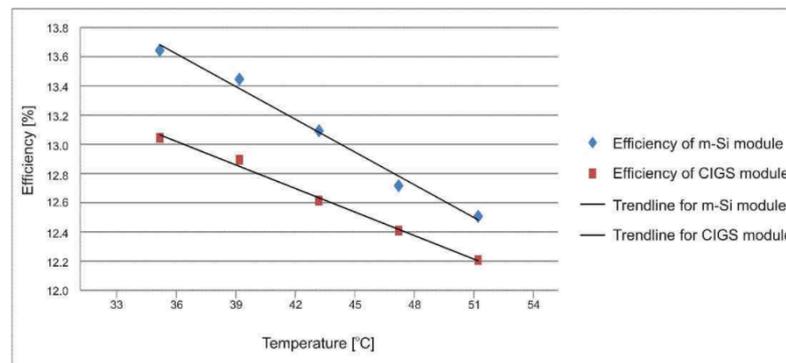
Gambar 2. 17 Struktur dan Prinsip Kerja Sel Surya CIGS (Toyohashi University of Technology, 2015)

Panel ini terbuat dari sel dengan lapisan tembaga, indium, gallium, dan selenide di atas satu sama lain. Efisiensi tertinggi yang pernah tercatat di dunia yaitu 28,9%. Panel ini biasanya digunakan pada pesawat luar angkasa.



Gambar 2. 18 Kurva Karakteristik I-V pada Sel Surya CIGS (Tzikas et al., 2018)

Gambar 2. 19 menunjukkan bahwa suhu mempengaruhi efisiensi modul surya CIGS, dimana semakin tinggi suhu modul surya maka efisiensinya akan semakin rendah.



Gambar 2. 19 Kurva Pengaruh Suhu terhadap Efisiensi Modul Surya CIGS (Luboń et al., 2017)

Output panel PV berubah-ubah akibat berbagai faktor, salah satunya yaitu *clearness index* (Hoff & Perez, 2011). *Clearness index* menunjukkan jumlah iradiasi matahari yang berkurang akibat awan dan aerosol pada atmosfer (AL-Rijabo, 2013). *Clearness index* merupakan salah satu parameter untuk mengetahui intensitas radiasi matahari yang diterima di berbagai lokasi. Nilai *clearness index* dipengaruhi salah satunya oleh awan (Soneye, 2020). Awan merupakan indikator yang paling berpengaruh dalam memprediksi intensitas iradiasi matahari karena awan merupakan faktor pelemahan terbesar dari radiasi matahari (Yakoubi et al., 2021). Selain itu, awan juga menyebabkan *partial shading* pada panel PV (Lee et al., 2018). *Partial shading* adalah kondisi dimana modul PV tidak menerima iradiasi yang sama dengan modul lainnya dalam satu panel yang sama (Varshney et al., 2015).

Output *array* panel PV dapat dihitung melalui persamaan berikut (Gilman & Lilienthal, 2006) :

$$P_{PV} = f_{PV} Y_{PV} \frac{I_T}{I_S} \quad (2.1)$$

Dimana :

P_{PV} = daya output panel PV (Watt)

f_{PV} = *derating factor*

Y_{PV} = *rated capacity* (kW)

I_T = radiasi matahari pada permukaan panel surya (kW/m^2)

I_S = nilai jumlah radiasi di bawah kondisi uji standar, 1 kW/m^2

Derating factor adalah faktor skala yang digunakan untuk menghitung dampak dari debu pada panel, rugi-rugi kabel, suhu yang tinggi, atau hal-hal lain yang menyebabkan output dari panel surya berkurang dari yang diharapkan (Haidir, 2019). Sedangkan *rated capacity* adalah jumlah daya yang akan dihasilkan panel surya di bawah kondisi uji standar dengan radiasi 1 kW/m^2 dan suhu panel 25°C (Gilman & Lilienthal, 2006). I_S adalah nilai standar jumlah radiasi yang digunakan untuk merating kapasitas panel surya.

Suhu pada lokasi penelitian sangat mempengaruhi output dari panel surya. *Temperature coefficient power* merupakan koefisien yang digunakan untuk mengetahui seberapa besar daya yang hilang setiap suhu mengalami kenaikan sebesar 1°C . Output panel PV dengan suhu di lokasi penelitian dapat diketahui sebagai berikut.

$$P_{MPP\ t=T_2} = P_{MPP} - (TCP \times P_{MPP} \times (T_2 - T_1)) \quad (2.2)$$

Dimana :

$P_{MPP\ t=T_2}$ = daya output panel PV dengan suhu di *site* (Watt)

P_{MPP} = kapasitas panel PV (Watt)

TCP = *Temperature Coefficient Power* (%/°C)

T_1 = suhu operasional panel (°C)

T_2 = suhu di *site* (°C)

Maka efisiensi panel PV dengan suhu di *site* yaitu :

$$TCF_{MPP\ t=T_2} = \frac{P_{MPP\ t=T_2}}{P_{MPP}} \quad (2.3)$$

Dimana :

$TCF_{MPP\ t=T_2}$ = *Temperature Coefficient Factor*

$P_{MPP\ t=T_2}$ = daya output panel PV dengan suhu di *site* (Watt)

P_{MPP} = kapasitas panel PV (Watt)

Luas area sistem PLTS yang dibutuhkan untuk membangkitkan daya output sesuai dengan beban dapat dihitung sebagai berikut.

$$PV_{area} = \frac{E_T}{G_{AV} \times TCF \times \eta_{PV} \times \eta_{Baterai} \times \eta_{Inverter}} \quad (2.4)$$

Dimana :

PV_{area} = total luas area panel PV (m²)

E_T = konsumsi daya total dalam satu hari (kWh)

G_{AV} = iradiasi matahari di *site* (kW/m²)

TCF = *Temperature Coefficient Factor*

η_{PV} = Efisiensi panel PV (%)

$\eta_{Baterai}$ = Efisiensi baterai (%)

$\eta_{Inverter}$ = Efisiensi inverter (%)

Daya yang dapat dibangkitkan dari luas area sistem PLTS :

$$P_{WP} = PV_{area} \times PSI \times \eta_{PV} \quad (2.5)$$

Dimana :

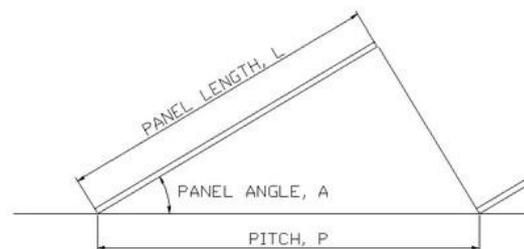
P_{WP} = daya output total (Watt)

PV_{area} = total luas area panel PV (m^2)

PSI = *Peak Solar Insulation*, $1000 \text{ kW}/m^2$

η_{PV} = efisiensi panel PV (%)

Apabila luas area yang tersedia terbatas, maka perhitungan jumlah panel yang dapat disusun pada area tersebut dapat diketahui dengan mengatur posisi panel PV. Panel PV dengan sistem *ground-mounted* dipasang dengan kemiringan menyesuaikan dengan *latitude* pada *site*. Apabila diketahui *latitude* dari *site* maka jarak antar panel PV dapat dihitung sebagai berikut.



Gambar 2. 20 Perhitungan Jarak Antar Panel PV

$$P = L \div \cos (A + 23,5) \quad (2.6)$$

Dimana :

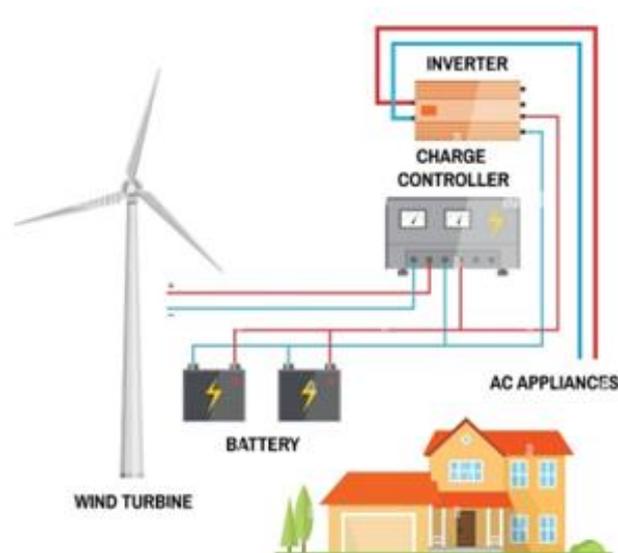
P = panjang total (m)

L = panjang panel PV (m)

A = *latitude*

2.1.2 Pembangkit Listrik Tenaga Bayu

Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB) merupakan pembangkit listrik yang menggunakan energi angin untuk menghasilkan energi listrik (Ali & Utomo, 2018). Angin akan menggerakkan turbin dan menghasilkan energi mekanik yang akan memutar generator. Generator itulah yang akan menghasilkan listrik (Rusman, 2020). Komponen utama yang membentuk sistem PLTB terdiri dari turbin angin, generator listrik, dan menara. PLTB dengan kapasitas besar biasanya membutuhkan berbagai komponen pendukung untuk sistem kontrol.



Gambar 2. 21 Sistem Skematik PLTB Off-Grid (SivVector, 2017)

Angin merupakan massa udara yang bergerak, sehingga angin memiliki energi kinetik. Energi kinetik dari angin, dengan massa angin m dan kecepatan V memiliki persamaan (A. Syukri, 2012):

$$E = \frac{1}{2} mV^2 \quad (2.7)$$

Dimana :

E = energi kinetik angin (Joule)

m = massa angin (kg)

V = kecepatan angin (m/s)

Energi kinetik untuk turbin dihitung dengan ρ_a (massa jenis udara) dan v (volume udara) yang tersedia untuk rotor. Energi per satuan waktu adalah daya, oleh karena itu persamaannya menjadi (A. Syukri, 2012):

$$P = \frac{1}{2} \rho_a A_T V^3 \quad (2. 8)$$

Dimana :

P = daya output turbin angin (Watt)

ρ_a = massa jenis angin (kg/m^3)

A_T = luas sapuan turbin (m^2)

V = kecepatan angin (m/s)

Energi elektrik yang dapat dibangkitkan oleh generator pada turbin angin dapat dihitung dengan persamaan berikut.

$$P_{generator} = C_p \times 0,5 \times \rho_{angin} \times A \times v^3 \times \eta_{generator} \quad (2. 9)$$

Dimana :

$P_{generator}$ = daya output elektrik turbin angin (Watt)

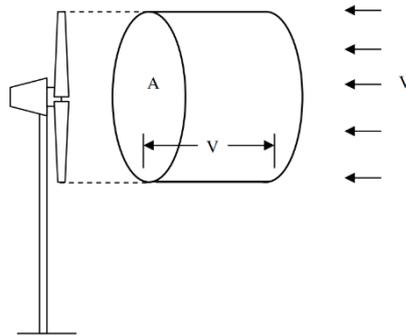
C_p = *coefficient power*

ρ_{angin} = massa jenis angin (kg/m^3)

A = luas sapuan turbin (m^2)

v = kecepatan angin (m/s)

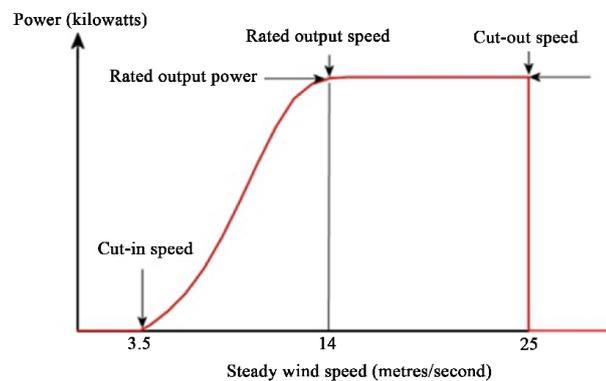
$\eta_{generator}$ = efisiensi generator (%)



Gambar 2. 22 Angin Bergerak Menuju Turbin (Mathew, 2007)

Turbin angin memiliki beberapa karakteristik, yaitu daerah operasi turbin, karakteristik hubungan daya output terhadap kecepatan angin, serta karakteristik hubungan efisiensi turbin terhadap output daya. Turbin angin memiliki daerah operasi sebagai berikut (Purnamasari, 2019):

- a. *Cut-in wind speed* : turbin angin mulai mendapatkan daya listrik pada kecepatan angin terendah.
- b. *Rated wind speed* : turbin angin memperoleh daya listrik sesuai dengan *rating* turbin.
- c. *Cut-out wind speed* : kemampuan menghentikan dan mematikan turbin angin sehingga tercegah dari kerusakan mekanik.



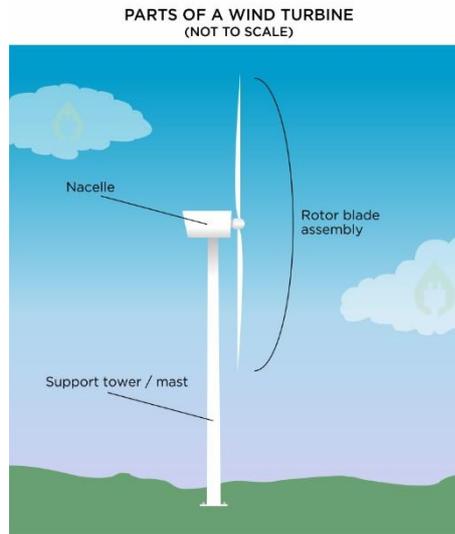
Gambar 2. 23 Kurva Daerah Operasi Turbin Angin (Monnerie et al., 2015)

Berdasarkan kurva diatas juga dapat diketahui karakteristik hubungan daya output terhadap kecepatan angin. Semakin besar kecepatan angin maka akan semakin besar daya yang dihasilkan, namun akan terjadi kejenuhan pada kecepatan angin tertentu sehingga daya yang dihasilkan tidak bertambah melainkan konstan.

Berdasarkan sumbu putarnya, turbin angin terbagi menjadi dua jenis yaitu turbin angin sumbu horizontal dan turbin angin sumbu vertikal (Henryson & Svensson, 2004).

a. Turbin Angin Sumbu Horizontal

Turbin angin sumbu horizontal memiliki poros rotor utama dan generator listrik di puncak menara dan harus diarahkan ke arah angin. Turbin berukuran kecil diarahkan oleh sebuah baling-baling angin yang sederhana, sedangkan turbin berukuran besar pada umumnya menggunakan sebuah sensor angin yang digandengkan ke sebuah servo motor (Karia, 2017). Sensor tersebut berfungsi mengarahkan sudu agar sudu selalu tegak lurus terhadap arah angin (Indriani et al., 2019). Turbin angin jenis ini umumnya menggunakan *gear box* yang berfungsi untuk menaikkan kecepatan putaran turbin. Oleh sebab itu turbin angin sumbu horizontal memiliki efisiensi yang lebih tinggi daripada turbin angin sumbu vertikal (Purnamasari, 2019). Turbin angin sumbu horizontal memiliki output daya yang lebih tinggi dibandingkan dengan turbin angin sumbu vertikal, namun turbin ini membutuhkan menara yang lebih tinggi (Ali & Utomo, 2018). Setiap 10 meter ketinggian menara berpengaruh pada peningkatan kecepatan angin sebesar 20% dan peningkatan daya sebesar 34% (Karia, 2017).



Gambar 2. 24 Bagian-Bagian Turbin Angin (Gill, 2021)

Turbin angin sumbu vertikal terdiri dari tiga bagian utama, yaitu (Gill, 2021):

1. Menara

Menara ini terbuat dari besi yang dilapisi dengan beberapa cat pelindung. Aturan praktis untuk menara turbin yaitu tingginya sama dengan diameter lingkaran bilah saat berputar. Menara didirikan di atas pondasi beton sedalam 4 – 6 m dan harus cukup kuat untuk menahan *nacelle* dan bilah rotor di segala cuaca.

2. *Nacelle*



Gambar 2. 25 Komponen pada Turbin Angin (Stavrakakis, 2012)

Nacelle adalah bagian kepala turbin angin yang dipasang di atas menara pendukung. Bilah rotor terpasang di bagian depan *nacelle*. Di dalam *nacelle* terdapat 3 komponen utama, yaitu :

a. *Gearbox*

Gearbox menerima putaran dari bilah rotor dan mempercepat putaran tersebut sehingga sesuai dengan kecepatan optimal pembangkitan generator.

b. Sistem pengereman mekanis

Sistem ini biasanya terdapat pada *gearbox* dan identik dengan rem kendaraan bermotor. Sistem pengereman mekanis tidak perlu digunakan dalam operasi normal, karena kecepatan rotasi bilah dikendalikan dengan *pitch control* saja. Rem mekanis hanya digunakan jika turbin perlu dihentikan sepenuhnya seperti untuk pemeliharaan atau menghentikan pembangkitan turbin jika ada terlalu banyak daya pada jaringan listrik.

c. Generator

Generator adalah komponen yang mengubah energi putaran dari *gearbox* menjadi arus listrik. Generator memiliki magnet yang menempel pada rotor dan kumparan kawat yang menempel pada stator. Saat poros rotor berputar, magnet berputar melewati kumparan stator, listrik akan terinduksi di dalam kumparan tersebut.

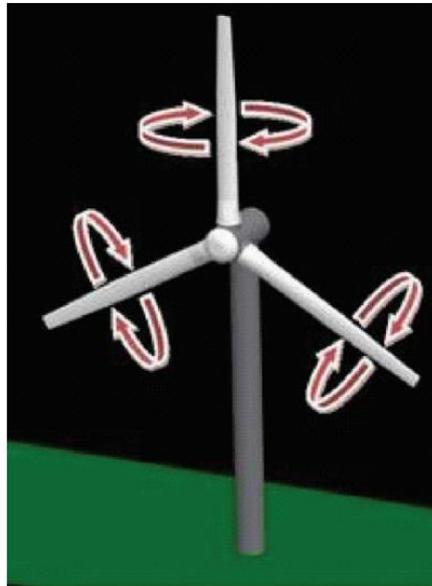
3. Bilah rotor

Biasanya bilah turbin angin berjumlah tiga dan menempel pada hub *nacelle*. Bilah yang berjumlah tiga memiliki kelebihan yaitu efisiensinya yang lebih optimal. Bilah didesain berbentuk *airfoil* (seperti sayap pesawat). Bilah ini menangkap

energi kinetik dari angin dan mengubahnya menjadi energi rotasi. Untuk menahan tekanan yang sangat tinggi, bilah turbin dibuat dari bahan komposit seperti serat karbon atau serat kaca sehingga bilah tetap kaku dengan bobot yang tidak terlalu berat. Sudu turbin angin dapat digunakan 20 – 25 tahun sebelum perlu didaur ulang dan diganti. Bilah rotor ini dikendalikan oleh beberapa sistem sebagai berikut :

- *Pitch control*

Pengereman aerodinamis atau yang biasa disebut dengan sistem *pitch control* dilakukan dengan memutar bilah rotor sehingga penampangannya lebih tipis terhadap angin yang datang. Rotor akan berputar lebih lambat karena menangkap lebih sedikit angin. Biasanya *pitch control* menggunakan sistem motor listrik dan mengontrol setiap bilah secara khusus.



Gambar 2. 26 *Pitch Control* (Stavarakakis, 2012)

- *Yaw control*

Arah bilah rotor juga dikendalikan oleh *yaw mechanism*. *Yaw mechanism* adalah komponen yang menghubungkan antara tiang penyanggah dan rangka turbin

angin. Fungsi *yaw mechanism* adalah menjaga arah turbin angin sehingga sudu rotor selalu menghadap arah datangnya angin.



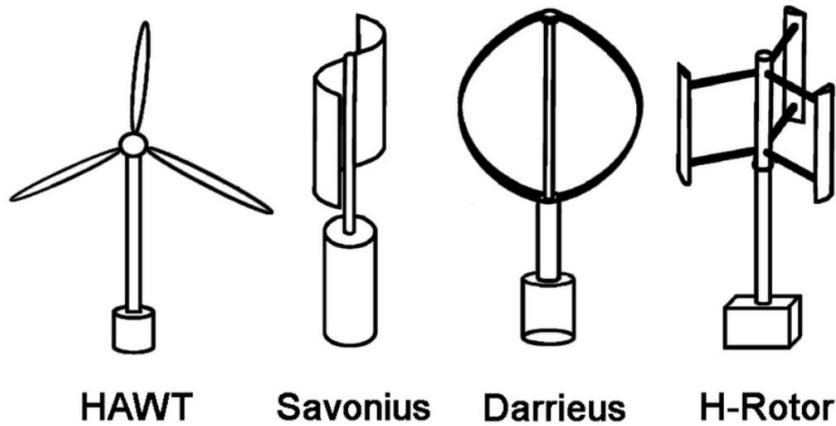
Gambar 2. 27 *Yaw Mechanism* (Eitel, 2017)

Beberapa turbin angin juga dilengkapi dengan *wind-vane* dan anemometer yang berfungsi untuk memantau arah dan kecepatan angin. Komponen ini akan membantu kerja *pitch control* dan *yaw control*.

b. Turbin Angin Sumbu Vertikal

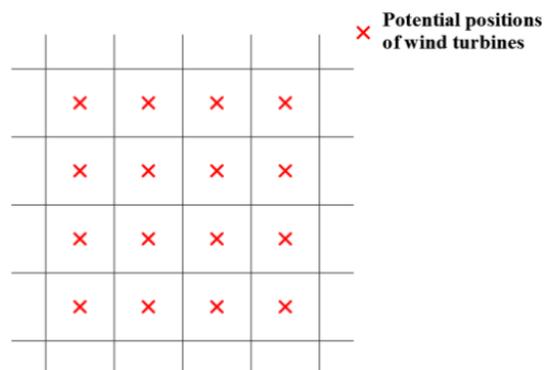
Turbin angin sumbu vertikal memiliki poros utama yang disusun tegak lurus. Kelebihan turbin angin ini yaitu tidak harus diarahkan ke arah angin agar menjadi efektif, sehingga dapat memanfaatkan angin yang datang dari berbagai arah (Afiif, 2017). Meskipun turbin ini lebih mudah perancangan dan pemeliharaannya, tetapi turbin ini memiliki kinerja yang lebih rendah daripada tipe horizontal (Ali & Utomo, 2018). Konstruksi turbin ini sederhana dan dapat didirikan dekat dengan permukaan tanah (Achsanly, 2016). Selain itu kelebihan dari turbin ini cocok untuk daerah dimana arah angin sangat variatif atau memiliki turbulensi (Adam et al., 2019). Beberapa jenis turbin angin sumbu vertikal yaitu

turbin angin savonius, turbin angin darrieus, dan turbin angin h-rotor (Alkhalidi, 2018).



Gambar 2. 28 Jenis-Jenis Turbin Angin (Kozak & Labs, 2014)

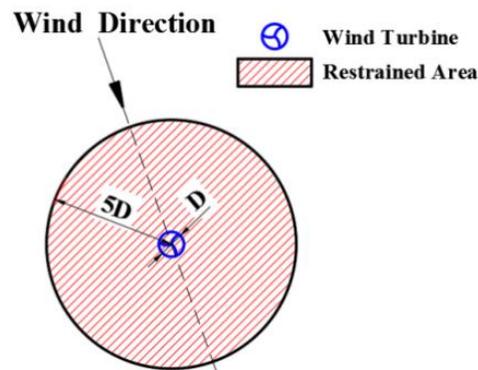
Pada PLTB, turbin angin yang dipasang harus memiliki jarak satu sama lain. Hal ini dilakukan dengan tujuan untuk mencegah defisit dan turbulensi angin yang akan mempengaruhi daya output antar turbin angin. Jarak antar turbin agar daya output yang dihasilkan optimal adalah dengan menggunakan cara grid seperti pada Gambar 2. 29 dimana setiap selnya berukuran $5D$ dan turbin angin diletakkan di tengah sel.



Gambar 2. 29 Susunan turbin angin pada PLTB (Sun et al., 2019)

Selain dengan cara diatas, jarak antar turbin juga dapat ditentukan dengan *omnidirectional restriction*, dimana daerah terlarang berbentuk lingkaran dengan

jari-jari sebesar $5D$. Daerah terlarang merupakan daerah dimana tidak boleh ada turbin angin lainnya. Apabila turbin angin lain ditempatkan di dalam daerah terlarang turbin angin yang satu, maka daya output kedua turbin tersebut dianggap nol.



Gambar 2. 30 *Omnidirectional restriction* (Sun et al., 2019)

2.1.3 Baterai

Baterai adalah perangkat yang berfungsi untuk menyimpan energi listrik dalam bentuk energi kimia. Baterai melakukan proses elektrokimia yang reversibel, yaitu mengubah energi kimia menjadi energi listrik (*discharging* atau pengosongan) dan sebaliknya mengubah energi listrik menjadi energi kimia (*charging* atau pengisian) (Syafitra, 2020). Baterai memiliki karakteristik DOD (*Depth of Discharge*), umumnya sebesar 80%. Artinya hanya 80% dari energi yang ada dapat dipakai dan 20% harus tetap ada dalam baterai itu (Usman, 2014).

Jumlah baterai yang dibutuhkan oleh sistem dapat diketahui dengan persamaan berikut.

$$n_{baterai} = \frac{P_T}{P_{baterai}} \quad (2. 10)$$

Dimana :

$n_{baterai}$ = jumlah baterai yang dibutuhkan sistem pembangkit

P_T = daya total yang dihasilkan oleh sistem pembangkit (Watt)

P_{baterai} = kapasitas baterai (Watt)

2.1.4 Inverter

Inverter adalah perangkat elektronik yang berfungsi untuk mengubah arus DC menjadi arus AC. Inverter mengkonversi arus DC 12-24 V dari perangkat seperti baterai, panel surya/*solar cell* menjadi arus AC 220 V dengan frekuensi 50/60 Hz (Usman, 2020). Berdasarkan bentuk gelombang yang dihasilkan, inverter dikelompokkan menjadi tiga yaitu inverter dengan gelombang keluaran berbentuk *square*, *modified*, dan *true sine wave*. Efisiensi inverter pada saat pengoperasian adalah sebesar 90% akan tetapi bisa berubah tergantung dari keadaan beban. Untuk penggunaan sistem pembangkit listrik yang berdiri sendiri biasanya digunakan inverter *stand-alone* (Usman, 2014).

Rentang kapasitas inverter yang digunakan oleh sistem pembangkit dihitung dengan menggunakan *Inverter Load Ratio* (ILR). Nilai ILR untuk beban komersial dan beban residensial memiliki rentang 1,15 – 1,3. Rentang kapasitas inverter yang dapat digunakan :

$$\text{Inverter min} = \frac{P_T}{1,3} \quad (2.11)$$

$$\text{Inverter max} = \frac{P_T}{1,15}$$

Dimana P_T merupakan daya output total dari sistem pembangkit yang direncanakan.

2.1.5 Aplikasi HOMER

Perangkat lunak HOMER (*Hybrid Optimization Model for Energy Renewable*) merupakan perangkat lunak yang digunakan untuk desain sistem pembangkit listrik tenaga hibrid dalam skala kecil. Perangkat lunak ini dapat mengoptimalkan sistem pembangkit listrik yang didesain *off-grid* maupun *grid-connected*, termasuk menganalisis sensitivitas setiap variabel yang digunakan seperti radiasi matahari atau kecepatan angin (Usman, 2014).

a. Perhitungan Panel Surya

HOMER dapat memodelkan panel surya sebagai perangkat yang memproduksi listrik DC maupun listrik AC. HOMER menghitung daya output dari panel surya dengan menggunakan persamaan 2. 1, namun apabila efek suhu sel surya di setiap *time-step* ikut dipertimbangkan, maka persamaan keseimbangan energi untuk *array* PV menjadi (A. Duffie & A. William, 1991) :

$$\tau\alpha G_T = \eta_c G_T + U_L(T_c - T_a) \quad (2. 12)$$

Dimana :

τ = transmitansi matahari dari setiap penutup di atas *array* PV (%)

α = absorbansi matahari pada *array* PV (%)

G_T = radiasi matahari yang mengenai permukaan *array* PV (kW/m²)

η_c = efisiensi konversi listrik dari *array* PV (%)

U_L = koefisiensi perpindahan panas ke lingkungan sekitar (kW/m²°C)

T_c = suhu sel PV (°C)

T_a = suhu lingkungan sekitar (°C)

b. Perhitungan Turbin Angin

HOMER memodelkan turbin angin sebagai perangkat yang mengubah energi kinetik dari angin menjadi listrik AC atau DC sesuai dengan kurva grafik daya output berdasarkan kecepatan angin pada ketinggian hub turbin. HOMER mengasumsikan bahwa kurva daya output berlaku pada kerapatan udara standar $1,225 \text{ kg/m}^3$, yang sesuai dengan kondisi suhu dan tekanan standar (Gilman & Lilienthal, 2006).

HOMER menghitung daya keluaran turbin angin dalam tiga langkah, yaitu :

4. Pertama, menentukan kecepatan angin pada ketinggian hub turbin berdasarkan data kecepatan angin yang telah ditentukan.

$$U_{hub} = U_{anem} \cdot \frac{\ln(z_{hub}/z_0)}{\ln(z_{anem}/z_0)} \quad (2.13)$$

U_{hub} = kecepatan angin pada ketinggian hub turbin (m/s)

U_{anem} = kecepatan angin pada ketinggian anemometer (m/s)

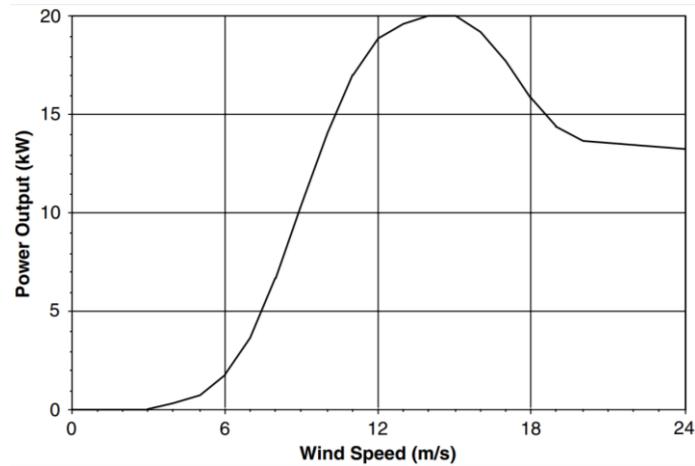
z_{hub} = ketinggian hub turbin (m)

z_{anem} = ketinggian anemometer (m)

z_0 = *roughness length* (m)

Roughness length adalah karakteristik lanskap yang digunakan untuk mengevaluasi kondisi angin pada lokasi potensial turbin angin. *Roughness length* didefinisikan sebagai ketinggian di atas tanah z_0 dalam meter di mana kecepatan angin secara teoritis sama dengan nol (Ragheb, 2018).

5. Kedua, menghitung daya output pada kecepatan angin tersebut mengacu pada kurva daya output dengan asumsi kerapatan udara standar.



Gambar 2. 31 Contoh Kurva Daya Output Turbin Angin (Gilman & Lilienthal, 2006)

6. Ketiga, mengalikan nilai output daya dengan rasio kerapatan udara, yang merupakan perbandingan kerapatan udara sebenarnya dengan kerapatan udara standar.

$$P_{WTG} = \left(\frac{\rho}{\rho_0} \right) \cdot P_{WTG,STP} \quad (2.14)$$

P_{WTG} = daya output turbin angin (kW)

$P_{WTG,STP}$ = daya output turbin angin pada suhu dan tekanan standar (kW)

ρ = densitas udara sebenarnya (kg/m^3)

ρ_0 = densitas udara pada suhu dan tekanan standar ($1,225 \text{ kg/m}^3$)

2.2 Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Hibrid

Pembangkit Listrik Tenaga Hibrid (PLTH) merupakan sistem pembangkit listrik yang mengintegrasikan beberapa jenis pembangkit listrik dengan tujuan menyatukan kelebihan dari setiap pembangkit serta melengkapi kekurangan pada

keadaan tertentu agar sistem yang lebih ekonomis dan efisien terwujud (Herlina, 2009). PLTH dapat terhubung dengan jaringan PLN maupun tidak. PLTH yang terhubung dengan jaringan PLN disebut dengan sistem *grid-tied*, sedangkan PLTH yang tidak terhubung dengan jaringan PLN disebut dengan sistem *off-grid* (Worthmann, 2022).

a. Sistem *Grid-Tied*

Sistem *grid-tied* atau *on-grid* berarti pembangkit energi baru terbarukan masih terhubung dengan jaringan layanan listrik PLN. Sistem ini dapat membantu ketika kebutuhan daya listrik lebih tinggi dibandingkan dengan daya yang dibangkitkan dari pembangkit EBT. Sistem *grid-tied* pembangkit energi baru terbarukan menyuplai daya listrik melalui inverter serta terhubung dengan jaringan listrik PLN. Komponen utama dari sistem *grid-tied* adalah inverter *grid-tied* dan *power meter*.

Sistem ini memiliki keuntungan antara lain biaya instalasi yang lebih rendah, energi listrik berlebih dapat dijual ke PLN, serta tidak khawatir jaringan listrik akan seluruhnya hilang karena terhubung langsung dengan jaringan PLN. Sistem ini juga tidak memerlukan baterai. Kekurangan sistem ini yaitu apabila jaringan dari PLN mati maka listrik dari sistem juga akan berhenti sepenuhnya. Sistem ini tidak sepenuhnya ramah lingkungan dan perawatannya memerlukan biaya yang lebih tinggi.

b. Sistem *Off-Grid*

Sistem *off-grid* berarti pembangkit energi baru terbarukan bekerja secara independen dan tidak terhubung dengan jaringan layanan listrik PLN. Kebutuhan

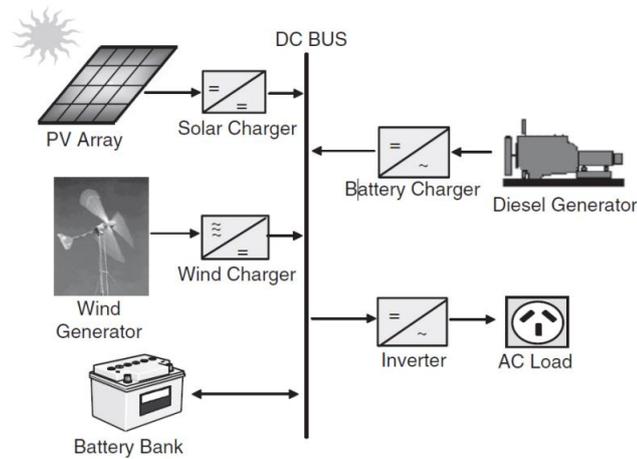
daya listrik sepenuhnya bergantung pada daya listrik yang dihasilkan oleh pembangkit energi baru terbarukan. Komponen utama dari sistem *off-grid* adalah inverter *off-grid* dan baterai.

Kelebihan sistem ini yaitu perawatannya yang memerlukan biaya rendah dan mengurangi inefisiensi distribusi listrik. Sistem ini juga cocok untuk daerah yang kurang berkembang serta menghasilkan *return* yang tinggi. Sistem ini ramah lingkungan karena mengurangi penggunaan bahan bakar fosil. Kekurangan sistem ini yaitu biaya instalasi yang mahal dan juga memerlukan banyak baterai. Selain itu sistem ini sangat bergantung pada lingkungan dan cuaca sehingga mengandalkan penggunaan *charge controller*.

Menurut Rosyid (2008), PLTH memiliki tiga jenis sistem operasi yaitu sistem serial, sistem tersaklar, dan sistem paralel (Usman, 2014).

a. Sistem Serial

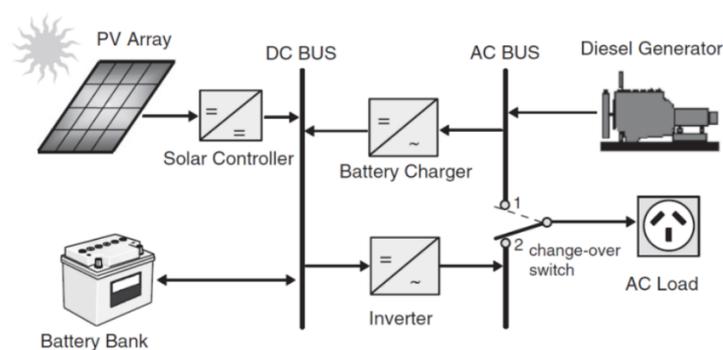
Daya DC yang dihasilkan semua pembangkit disuplai ke baterai, sehingga masing-masing pembangkit harus memiliki *charge controller* sendiri. Hal ini menyebabkan siklus baterai yang tinggi dan efisiensi sistem yang dihasilkan berkurang. Siklus baterai yang terlalu sering juga menyebabkan masa pakainya yang memendek (Prieto, 2019). Inverter yang digunakan harus dapat melayani beban puncak apabila menggunakan sistem ini (Azizah & Purbawanto, 2021). Adanya *fault* pada inverter dapat mengakibatkan hilangnya daya sepenuhnya ke beban.



Gambar 2. 32 Sistem Pembangkit Hibrid Serial (Prieto, 2019)

b. Sistem Tersaklar (*Switched*)

Inverter sebagai sumber AC, dimana masing-masing pembangkit dapat langsung mengisi (*charging*) baterai. Kelemahan sistem ini yaitu pada saat pemindahan sumber listrik, suplai daya ke beban terinterupsi (Herlina, 2009). Keuntungan utama dari sistem ini yaitu beban dapat disuplai langsung oleh generator yang meningkatkan efisiensi sistem secara keseluruhan (Prieto, 2019).

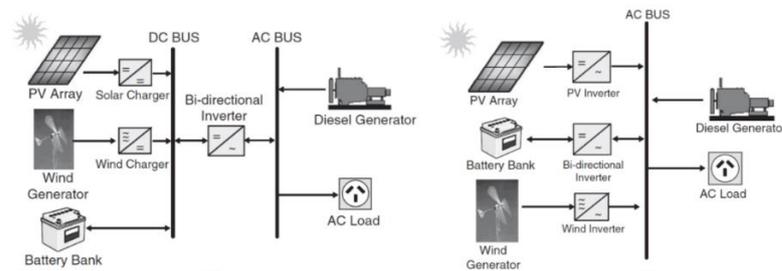


Gambar 2. 33 Sistem Pembangkit Hibrid Tersaklar (Prieto, 2019)

c. Sistem Paralel

Sistem ini memanfaatkan inverter *bi-directional* (BDI) yang berfungsi sebagai DC-AC converter, serta berfungsi untuk menghubungkan baterai dan

sumber AC. Sumber energi terbarukan dihubungkan pada sisi DC (Usman, 2014). Dengan sistem paralel, kapasitas komponen yang digunakan tidak terlalu besar namun tetap dapat menyuplai beban puncak. Kelemahan dari DC Coupling yaitu biaya sistem yang tinggi untuk pemasangan, komponen, serta biaya perawatan. Hal tersebutlah yang menyebabkan AC Coupling lebih unggul karena biaya-biaya tersebut lebih terjangkau (Prieto, 2019).



Gambar 2. 34 Sistem Pembangkit Hibrid Paralel, DC Coupling dan AC Coupling (Prieto, 2019)

Densitas energi yang dihasilkan oleh sistem pembangkit hibrid dapat dihitung menggunakan rumus berikut.

$$E_d = \frac{E_a}{A_a} \quad (2.15)$$

Dimana :

E_d = densitas energi (Wh/m²)

E_a = total energi terbangkitkan oleh sistem (Wh)

A_a = luas area sistem pembangkit (m²)

2.3 Analisis Regresi Linier Sederhana

Analisis regresi linier sederhana merupakan sebuah metode analisis yang digunakan untuk mengetahui pengaruh suatu variabel terhadap variabel lainnya.

Metode ini disebut analisis regresi linier sederhana hanya digunakan untuk menganalisis pengaruh antara satu variabel prediktor dan satu variabel respon. Metode ini juga dapat menjelaskan kausalitas (hubungan sebab-akibat) antara variabel independen dengan variabel dependen. Analisis regresi linier sederhana dapat mengetahui arah hubungan dan kuatnya pengaruh suatu variabel mempengaruhi variabel lainnya. Hasil dari analisis regresi linier yaitu berupa persamaan garis sederhana dengan bentuk $y=mx+b$ yang dapat digunakan untuk memprediksi besar suatu variabel berdasarkan besar variabel lainnya.

Nilai m dan b pada persamaan garis dihitung dengan persamaan :

$$m = \frac{N \sum(xy) - \sum x \sum y}{N \sum(x)^2 - (\sum x)^2} \quad (2. 16)$$

$$b = \frac{\sum y - m \sum x}{N}$$

Dimana :

x = variabel dependen/variabel prediktor

y = variabel independen/variabel respon

N = jumlah data

Koefisien korelasi merupakan koefisien yang menunjukkan besarnya dependensi antara dua variabel. Koefisien korelasi dapat dihitung sebagai berikut.

$$r_{xy} = \frac{\sum xy}{\sqrt{(\sum x^2 y^2)}} \quad (2. 17)$$

Dimana :

r_{xy} = koefisien korelasi

x = selisih nilai variabel dependen dengan rata-rata variabel dependen

y = selisih nilai variabel independen dengan rata-rata variabel independen

Kuantifikasi yang digunakan untuk mengukur besarnya dependensi antara dua variabel yaitu dengan tabel *Pearson correlation*.

Tabel 2. 1 Tabel Skala Koefisien Korelasi *Pearson*

Nilai koefisien korelasi (r)	Tingkat hubungan
$0 < r < 0,19$	Sangat rendah
$0,2 < r < 0,39$	Rendah
$0,4 < r < 0,59$	Sedang
$0,6 < r < 0,79$	Tinggi
$0,8 < r < 1,0$	Sangat tinggi

2.4 Penelitian Terkait dan Keterbaruan Penelitian

Penelitian mengenai perencanaan pembangkit listrik tenaga hibrid menggunakan aplikasi HOMER telah banyak dilakukan sebelumnya. Beberapa penelitian yang terkait dengan penelitian penulis terdapat pada Tabel 2. 2.

Tabel 2. 2 Penelitian Terkait

No	Judul Jurnal	Nama Peneliti	Tempat dan Tahun Penelitian	Pembahasan Jurnal
1.	Perencanaan Pembangkit Listrik Tenaga Hibrid (PV dan Mikrohidro) Terhubung Grid (Studi Kasus : Desa Merden, Kecamatan Padureso, Kebumen)	Ana Nur Azizah, Sugeng Purbawanto	Desa Merden, Kecamatan Padureso, Kebumen, 2021	Penelitian ini merencanakan sistem PLTH dengan bantuan <i>software</i> HOMER, memanfaatkan tenaga surya dan mikrohidro serta terhubung dengan grid. Meskipun energi yang dihasilkan dari sistem PLTH yang dirancang ini cukup besar, namun tidak memenuhi syarat

				kelayakan investasi karena total NPC terendah kurang dari nol.
2.	Perencanaan Pembangkit Listrik Tenaga Hibrid di Pulau Maginti Menggunakan Software HOMER	Usman, Ansar Suyuti, Ardiaty Arief	Pulau Maginti, Provinsi Sulawesi Tenggara, 2017	Penelitian ini didapat bahwa sistem pembangkit yang optimal menurut simulasi <i>software</i> HOMER yaitu dengan menggabungkan PLTD, PLTS, dan PLTB. Konfigurasi tersebut mempunyai NPC terendah dibandingkan dengan konfigurasi lainnya dan hasil analisis dari semua parameter kelayakan investasi menunjukkan bahwa sistem ini layak untuk dikembangkan.
3.	Pemodelan Sistem Pembangkit Listrik Hibrid Diesel Generator dan <i>Photovoltaic Array</i> Menggunakan Perangkat Lunak HOMER (Studi Kasus di Pulau Semujur Kabupaten Bangka Tengah)	Dedisukma, Wahri Sunanda, Rika Favoria Gusa	Pulau Semujur, Kabupaten Bangka Tengah, 2015	Penelitian yang menggabungkan diesel generator dan PV <i>array</i> sebagai pembangkit listrik ini menurut simulasi <i>software</i> HOMER dapat menghasilkan energi listrik yang cukup untuk pertumbuhan penduduk sebanyak 7 rumah di masa mendatang. Hal ini mengurangi pemakaian bahan bakar minyak solar yang digunakan untuk diesel generator sebesar 64,3% dari jumlah pemakaian

				saat diesel generator beroperasi sendiri.
4.	Analisa Pengaruh Kecepatan Angin dan Jumlah Sudu Terhadap Daya Listrik yang Dihasilkan pada Kincir Angin Tipe Horizontal	Eko Machrus Ali, Ir. Gatut Priyo Utomo, M.Sc	Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas 17 Agustus 1945 Surabaya, 2018	Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh kecepatan angin dan jumlah sudu terhadap daya listrik yang dihasilkan. Kesimpulan yang didapat yaitu semakin besar nilai kecepatan angin, maka daya listrik yang dihasilkan semakin tinggi namun efisiensi sistem semakin turun. Sudu 3 blade mampu menghasilkan daya listrik yang lebih besar bila dibandingkan dengan sudu 2 blade.
5.	<i>Analysis of Partial Shading Effects of Solar PV Module Configurations Using MATLAB/Simulink</i>	Hoe-Gil Lee, Jash N Shah, Panshul Tyagi, Vigneshwar M	New Delhi, India, 2018	Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui efek dari <i>partial shading</i> terhadap output panel surya. Panel surya dianalisis menggunakan beberapa kemungkinan <i>shading</i> dengan menggunakan aplikasi MATLAB/Simulink. Penelitian ini menyimpulkan bahwa ketika awan menutupi panel surya, iradiasi matahari akan berkurang, sehingga menyebabkan berkurangnya output

				daya yang dihasilkan oleh panel surya.
--	--	--	--	--

Berdasarkan studi tentang perencanaan pembangkit listrik tenaga hibrid menggunakan aplikasi HOMER, yang membedakan penelitian penulis dengan penelitian terkait adalah tempat penelitian, tujuan penelitian, dan konfigurasi sistem pembangkit tenaga hibrid yang akan disimulasikan. Penelitian ini bertempat di Kecamatan Cijeruk, Kabupaten Bogor. Tujuan dari penelitian ini yaitu menganalisis sistem pembangkit listrik tenaga surya dan angin yang optimal untuk diterapkan di Kecamatan Cijeruk, mengetahui berapa besar energi listrik yang dihasilkan, serta mengetahui seberapa besar energi tersebut dapat memenuhi kebutuhan konsumsi listrik. Selain itu, untuk mengetahui pengaruh *shading* iradiasi matahari dan laju angin terhadap energi listrik yang dihasilkan oleh pembangkit penulis menggunakan data dari *software* HOMER. Penelitian ini menggabungkan PLTS dan PLTB dalam sistem PLTH yang akan direncanakan dan bersifat *off-grid*. Setelah mendapatkan sistem PLTH yang optimal, selanjutnya yaitu menganalisis densitas energi yang dihasilkan dari masing-masing sistem pembangkit yang terdapat di dalamnya.