

BAB II

LANDASAN TEORI

2.1 Landasan Teori

Sumber energi terbarukan merupakan jenis energi yang tidak akan habis secara alami dan energi yang paling bersih serta ramah lingkungan. Energi ini berasal dari sumber daya alam yang melimpah, seperti matahari, tumbuhan, angin, panas bumi, dan air (PNPM, 2011).

2.1.1 Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS)

Pembangkit Listrik Tenaga Surya atau PLTS adalah sistem pembangkit listrik yang menggunakan sinar matahari sebagai sumber daya utamanya dan diubah menjadi listrik melalui modul fotovoltaik. PLTS termasuk dalam kategori energi hijau dan menjadi sumber daya terbarukan yang efisiensi. Listrik yang dihasilkan dari PLTS adalah *Direct Current* (DC) dan dapat di konversikan menjadi *Alternating Current* (AC) jika dibutuhkan (Pratama et al., 2022).

Pemodelan PV *array* untuk tegangan keluaran dari sel surya dapat menggunakan persamaan berikut:

$$P_{pv} = f_{pv} y_{pv} PSH \quad (2.1)$$

Keterangan:

P_{pv} = Daya keluaran PV (kWh/hari)

f_{pv} = *Pv derating factor*

y_{pv} = Daya PV *array* atau *rated capacity* (kW)

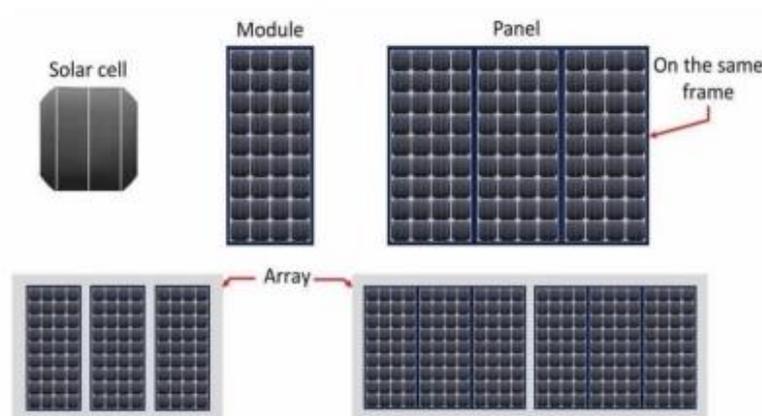
PSH = *Peak Sun Hour*

Pada sistem PLTS dibutuhkan jumlah panel surya dapat dihitung dengan persamaan sebagai berikut:

$$\text{Jumlah Panel Surya} = \frac{\text{PV area}}{\text{Luas Panel Surya}} \quad (2.2)$$

Keterangan:

PV area = Luas lahan untuk panel surya (m²)

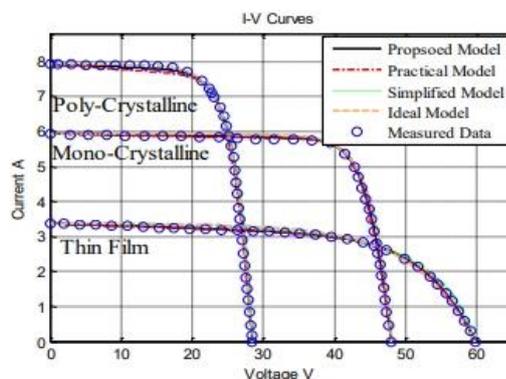


Gambar 2. 1 Perbedaan Sel Surya, Modul Surya, Panel Surya, dan Rangkaian
Sumber: (Rudiyanto et al., 2023)

Sumber energi surya berasal dari matahari yang dapat dimanfaatkan menjadi energi listrik dengan teknologi yang disebut *solar cell* atau panel surya. Sel surya adalah tempat proses konversi radiasi matahari ke listrik langsung yang berbahan semikonduktor. Umumnya, satu sel surya berbasis silikon menghasilkan tegangan listrik sekitar 0,5 Volt. Modul surya yaitu kumpulan sel surya yang terkoneksi satu sama lain. Modul surya dilapisi material yang tahan kondisi cuaca dan sinar UV untuk melindungi dan menjaga umurnya. Panel surya adalah gabungan dari beberapa modul surya yang dipasang dalam satu bingkai. Sementara itu, rangkaian PV merupakan kombinasi beberapa panel surya yang terkoneksi melalui kabel dalam suatu sistem listrik seperti pada gambar 2.1 (Rudiyanto et al., 2023).

2.1.2 Jenis-Jenis Panel Surya

Jenis-jenis panel surya terbagi menjadi beberapa macam yaitu PV monokristalin, PV polikristalin, dan PV *thin film*.



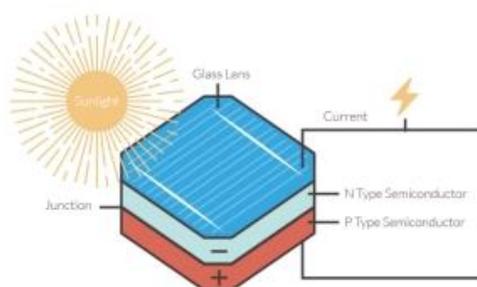
Gambar 2. 2 Kurva I-V Jenis Panel Surya
Sumber: (Mahmoud & El-Saadany, 2015)

1. Monokristalin

Menurut Rudiyanto (2023), sel surya monokristalin adalah jenis sel surya generasi pertama yang terbuat dari batangan kristal silikon yang sangat murni, biasanya disebut sebagai silikon kristal (c-Si). Dikembangkan pada 1950-an, sel surya monokristalin menggunakan kepingan batangan kristal silikon dengan ketebalan sekitar 0,3 mm yang diiris dari batangan silikon kristal. Pada suhu 1500°C, silikon mentah dilelehkan dalam wadah dengan tambahan atom pengotor untuk mendoping silikon menjadi tipe-P atau tipe-N. Setelah itu, silikon dipotong menjadi irisan kecil.

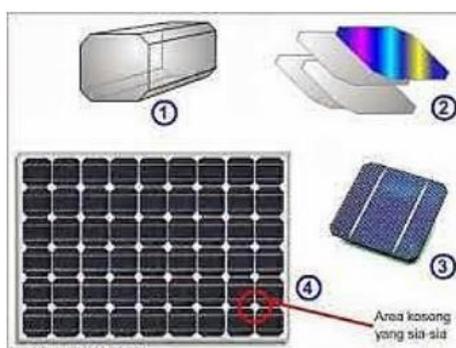
Pada tahap ekstraksi awal, silikon masih mengandung banyak pengotor yang disebut sebagai silikon kelas metalurgi. Tahap pemurnian berikutnya dimulai dengan pembuatan SiHCl₃ (triklorosilan), sebuah senyawa cair yang lebih mudah dimurnikan daripada padatan. Setelah tahap ini, diperoleh SiHCl₃ dengan kemurnian tinggi. Untuk mengembalikan silikon ke bentuk padatnya, SiHCl₃ dicampur dengan H₂ dan dipanaskan, menghasilkan polisilikon (padat) dan HCl.

Meskipun lebih murni, polisilikon ini tidak menjadi monokristal. Produksi monokristal akhir dilakukan melalui proses *czochralski*, menghasilkan batangan silikon berbentuk lingkaran yang kemudian dipotong menjadi wafer untuk produksi sel surya. Dalam proses pemotongan, sejumlah besar bahan terbuang (40%-50%).



Gambar 2. 3 Struktur Panel Monokristalin
Sumber: (Fjirin, 2022)

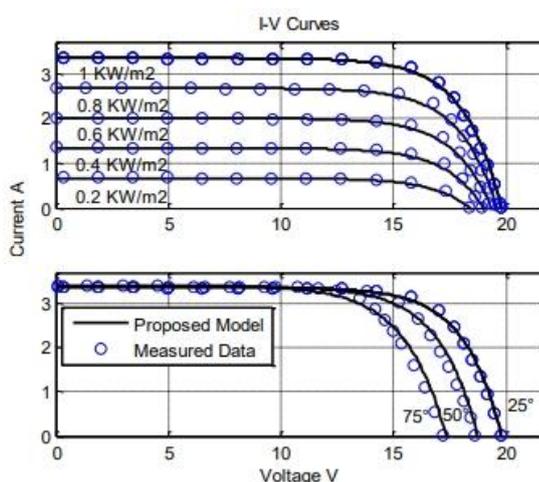
Prinsip panel ini serupa dengan sel surya silikon kristal biasa. Ketika foton dari sinar matahari mengenainya, elektron dalam atom semikonduktor terlepas dan menyebabkan terbentuknya kekosongan (*hole*) pada atom tersebut. Ketika terjadi hubungan antara semikonduktor-n (elektron yang terlepas) dan semikonduktor-p (*hole*) karena adanya beban, arus listrik akan mengalir melalui pn-junction (Fjirin, 2022).



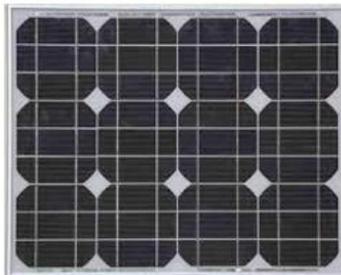
Gambar 2. 4 Proses Batangan Kristal Silikon Menjadi Modul Surya
Sumber: (Rudiyanto et al., 2023)

Bahan baku jenis ini dari silikon murni yang menghasilkan irisan sel surya presisi dan sama, sehingga menjadi sel surya dengan nilai efisien lebih tinggi

daripada yang lain yaitu sekitar 15%-20%. Kelemahan jenis ini jika disusun menjadi modul surya maka akan meninggalkan banyak ruang kosong karena mengikuti batangan kristal silikon yang biasanya memiliki bentuk segi enam atau bulat dan harga yang lebih mahal (Rudiyanto et al., 2023).



Gambar 2. 5 Kurva I-V dan Pengaruh Suhu PV Monokristalin
Sumber: (Mahmoud & El-Saadany, 2015)

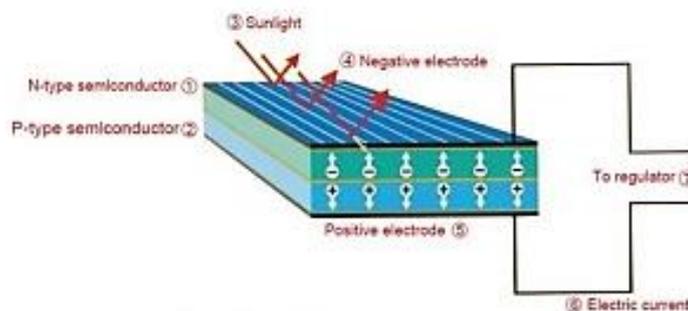


Gambar 2. 6 Modul Surya Monokristalin
Sumber: (Rudiyanto et al., 2023)

2. Polikristalin

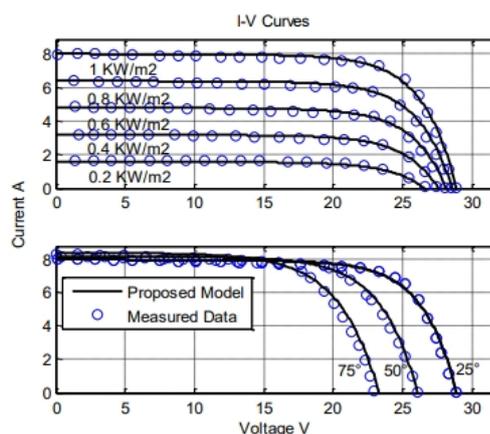
Sel surya polikristalin merupakan jenis kedua dari sel surya generasi pertama, terbuat dari potongan irisan blok silikon. Sel ini mengandung banyak kristal silikon, memudahkan produksi dalam cetakan dibandingkan dengan kristal tunggal (monokristalin), sehingga lebih ekonomis. Proses pembuatan polikristalin melibatkan penggergajian silikon berbentuk persegi yang awalnya dibuat menjadi batangan dan kemudian diubah menjadi pelat tipis. Dalam proses ini, silikon kristal

polikristalin dilelehkan ke dalam wadah cetakan besar, kemudian didinginkan dan dipadatkan dengan hati-hati (Rudiyanto et al., 2023).

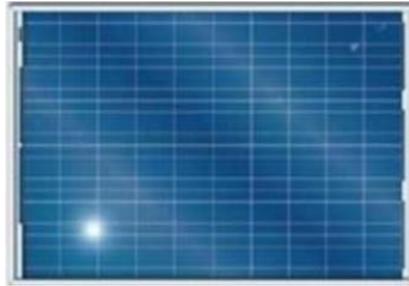


Gambar 2. 7 Struktur Panel Polikristal
Sumber: (Fjirin, 2022)

Panel polikristalin ini terbuat dari bahan serupa dengan panel monokristal, sehingga prinsip kerja juga sama. Perbedaannya terletak pada tingkat penyerapan energi matahari yang lebih rendah dan produksi listrik yang lebih sedikit dibandingkan dengan panel monokristal. Panel ini lebih terjangkau karena proses pembuatannya yang lebih sederhana. Meskipun memiliki efisiensi yang lebih rendah, berkisar antara 11,5 hingga 14%, panel ini masih dapat menghasilkan listrik bahkan saat cuaca mendung (Fjirin, 2022).



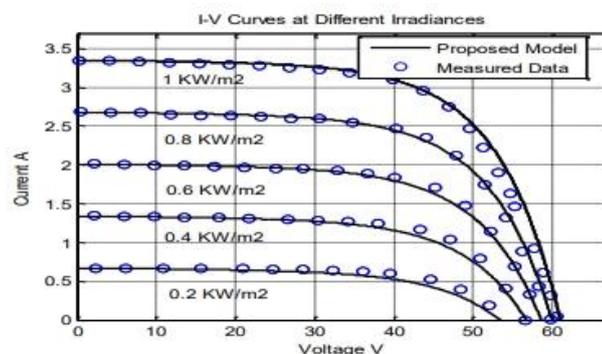
Gambar 2. 8 Kurva I-V dan Pengaruh Suhu PV Polikristalin
Sumber: (Mahmoud & El-Saadany, 2015)



Gambar 2. 9 Panel Surya Polycrystalline
Sumber: (Rudiyanto et al., 2023)

3. *Thin Film*

Thin Film sell menurut Rudiyanto (2023) adalah panel surya yang terdiri dari struktur lapisan tipis mikrokrystal-silikon dan amorphous dengan efisiensi modul mencapai 8.5%. Hal ini mengakibatkan kebutuhan luas permukaan yang lebih besar per watt daya yang dihasilkan jika dibandingkan dengan sel monokristalin dan polikristalin. Proses produksi jenis sel surya ini melibatkan penambahan satu atau beberapa lapisan bahan tipis fotovoltaik ke dalam lapisan dasar, yang mengubah energi cahaya menjadi energi listrik melalui efek fotovoltaik. Sel surya *Thin Film* ini sangat ringan dan fleksibel, terdiri dari beberapa lapisan bahan fotovoltaik tipis yang dikenal dengan *Thin Film Photovoltaic* (TFPV). Lapisan sel surya *Thin Film* jauh lebih tipis, sekitar 300 hingga 350 kali, dibandingkan dengan silikon standar yang menjadikannya ideal untuk perangkat portabel.

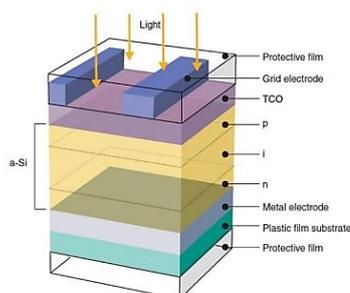


Gambar 2. 10 Kurva I-V PV *Thin Film*
Sumber: (Mahmoud & El-Saadany, 2015)

Desain ramping dan bahan produksi yang berbeda membuat sel surya *Thin Film* memiliki perbedaan signifikan dengan panel monokristalin dan polikristalin. Sel surya *Thin Film* memiliki biaya produksi yang lebih rendah dibandingkan dengan panel monokristalin dan polikristalin, yang cenderung kurang efisien dan memiliki kapasitas daya yang lebih rendah. Meskipun efisiensi sel surya *Thin Film* telah menjadi tantangan utama, namun telah mengalami peningkatan seiring waktu dan bervariasi tergantung pada jenisnya (Rudiyanto et al., 2023). *Thin Film* ini terbagi menjadi beberapa jenis lagi yaitu diantaranya:

1. *Amorphous Silicon* (a-Si)

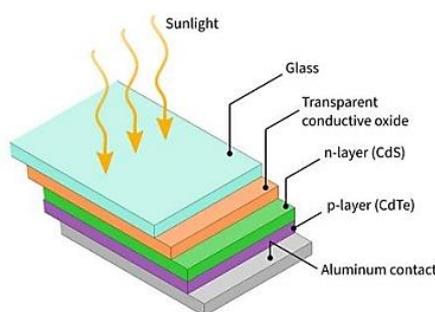
Panel yang tidak beracun ini menggunakan teknologi deposisi uap kimia untuk menerapkan lapisan tipis silikon ke dasar kaca, plastik, atau logam. Panel surya ini menggunakan silikon amorf yaitu silikon yang tidak memiliki struktur kristal. Teknik produksi yang dikenal sebagai *stacking*, di mana beberapa lapis *Amorphous Silicon* ditumpuk untuk membentuk sel surya dan dapat meningkatkan efisiensi sekitar 6%-8%. Selain itu, panel jenis ini mampu menyerap berbagai spektrum cahaya dan berfungsi baik dalam kondisi cahaya redup, serta dapat ditekuk tanpa mudah retak. Namun, kelemahannya adalah kehilangan efisiensi yang cepat seiring waktu (Rudiyanto et al., 2023).



Gambar 2. 11 Struktur *Thin Film Amorphous Silicon*
Sumber: (Fijrin, 2022)

2. Cadmium Telluride (CdTe)

Panel surya *Cadmium Telluride* (CdTe) adalah jenis modul *Thin Film* yang paling umum digunakan. Sel-sel ini menggunakan *Cadmium Telluride*, senyawa kimia yang efisien dalam menyerap dan mengonversi energi matahari menjadi listrik. Panel CdTe memiliki harga yang lebih terjangkau dibandingkan dengan sel *Thin Film* silikon standar dan memiliki periode pengembalian investasi yang lebih cepat dibandingkan lainnya yang tersedia di pasaran. Efisiensi panel surya ini berkisar antara 9% - 11%. Masalah utama panel surya ini adalah keberadaan kadmium dalam jumlah besar, yang merupakan zat beracun (Rudiyanto et al., 2023).

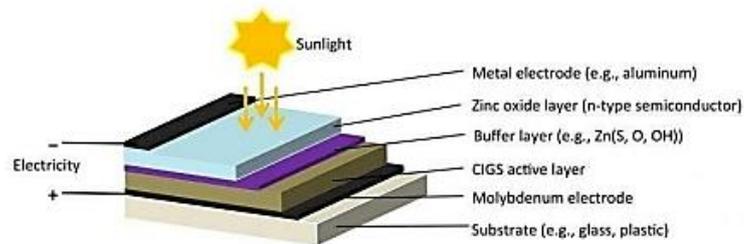


Gambar 2. 12 Struktur Cadmium Telluride
Sumber: (Bhambhani, 2023)

3. Copper Indium Gallium Selenide (CIGS)

Tantangan utama sel CIGS terkait dengan biaya tinggi dan rendahnya tingkat deposisi yang biasanya dicapai melalui teknik deposisi uap fisik yang digunakan untuk pembuatannya. Panel surya CIGS terdiri dari lapisan tembaga, indium, gallium, dan diselenide yang ditempatkan di atas satu sama lain dalam lapisan konduktif dan membentuk semikonduktor yang kuat. Teknologi CIGS memiliki efisiensi yang sangat tinggi, mencapai lebih dari 20% efisiensi dalam pengujian laboratorium. Namun, banyak panel CIGS

menggunakan cadmium bahan kimia beracun yang ditemukan di CdTe. Beberapa sel CIGS saat ini telah mengganti bahan kimia tersebut dengan oksida seng yang lebih ramah lingkungan (Rudiyanto et al., 2023).

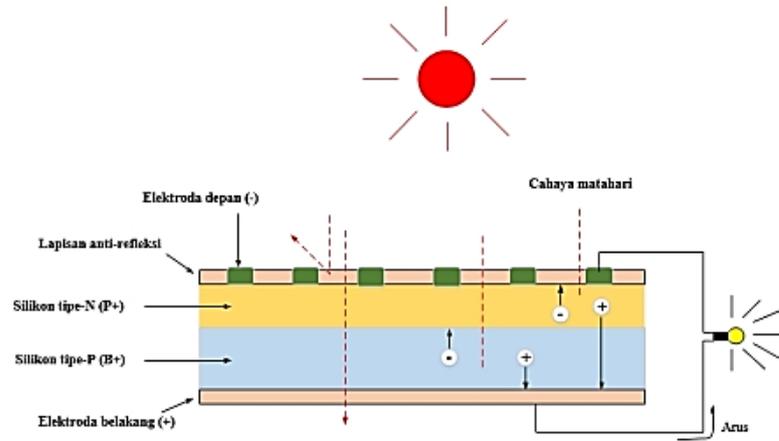


Gambar 2. 13 Struktur Thin Film CIGS
Sumber: (Fijrin, 2022)

2.1.3 Prinsip Kerja Panel Surya

Agustine (2022) menyebut bahwa saat energi matahari mencapai permukaan sel, terjadi Gaya Gerak Listrik (GGL) atau tegangan pada sel surya yang akan muncul di lapisan yang terbentuk antara dua jenis bahan semikonduktor yang berbeda. Foton adalah cahaya matahari yang terdiri banyaknya partikel sangat kecil. Foton ini akan mencapai permukaan sel surya dan menghasilkan energi yang cukup untuk memisahkan elektron dari struktur atomnya. Elektron yang terlepas dan yang muatan negatif ini bisa bergerak bebas. Ketika atom kehilangan elektron dan terjadi kekosongan disebut *hole* yang bermuatan positif.

Semikonduktor tipe-n yaitu elektron bebas yang bersifat negatif dan berperan sebagai pendonor elektron, sedangkan semikonduktor tipe-p adalah *hole* yang bersifat positif dan berperan penerima elektron. Pada persimpang antara tipe-n dan tipe-p terdapat daerah disebut *junction*, yang terjadi pembentukan energi untuk mendorong elektron bebas dan *hole* menjauhi daerahnya masing-masing ke arah yang berlawanan. Pada pn *junction* jika diberi beban seperti lampu atau alat listrik lain, maka akan menghasilkan arus listrik.

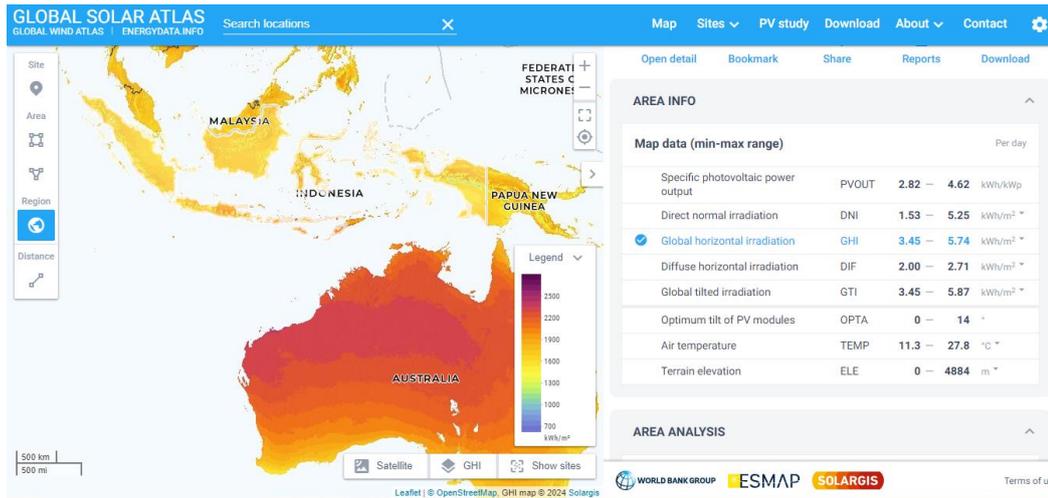


Gambar 2. 14 Prinsip Kerja Panel Surya
Sumber: (Agustine, 2022)

2.1.4 Potensi Energi Solar

Indonesia mempunyai distribusi radiasi matahari yang cukup stabil sepanjang tahun. Pemerintah telah menetapkan target di tahun 2025 bahwa kapasitas terpasang energi surya sebesar 0,87 GW. Pada tahun 2020, realisasi kapasitas PLTS mencapai 0,15 GWp dari potensi total di Indonesia sekitar 207,8 GWp. Indonesia yaitu negara tropis dan terletak di garis khatulistiwa, di mana sinar matahari akan selalu ada sepanjang tahun, dengan keadaan tersebut maka intensitas sinar matahari tinggi dan potensi energi solar di Indonesia juga dapat efisien (Afif & Martin, 2022). Pada data NASA di aplikasi HOMER, potensi energi solar GHI di Kampus Mugarsari sebesar 4.60 kWh/m²/hari.

Gambar 2.15 merupakan *website Global Solar Atlas*, menampilkan bahwa Indonesia mempunyai solar *Global Horizontal Irradiation* atau GHI sebesar 3.45-5.74 kWh/m²/hari dengan optimum kemiringan modul PV 0-40° dan suhu udara 11.3-27.8°C.



Gambar 2. 15 Potensi Energi Solar Indonesia
 Sumber: (Global Solar Atlas, 2024)

2.1.5 Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB)

Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB) atau angin adalah pembangkit listrik yang dapat konversi energi angin menjadi energi listrik. Angin merupakan udara yang bergerak dan mempunyai kecepatan, arah, serta *power* yang diakibatkan pemanasan bumi oleh radiasi matahari (Desrizal & Rosma, 2018).

Kelas	Kecepatan (m/s)	Kondisi alam
1	0.00-0.2	
2	0.3-1.5	Angin tenang, asap lurus keatas
3	1.6-3.3	Asap bergerak mengikuti arah angin
4	3.4-5.4	Wajah terasa ada angin, daun-daun bergoyang pelan, petunjuk arah angin bergerak
5	5.5-7.9	Debu jalan, kertas berterbangan, ranting pohon bergoyang
6	8.0-10.7	Ranting pohon bergoyang, bendera berkibar
7	10.8-13.8	Ranting pohon besar bergoyang, air dikolam berombak kecil
8	13.9-17.1	Ujung pohon melengkung, hembusan angin terasa ditelinga
9	17.2-20.7	Dapat mematahkan ranting pohon, jalan berat melawan arah angin
10	20.8-24.4	Dapat mematahkan ranting pohon, rumah rubuh
11	24.4-28.4	Dapat merubuhkan pohon, menimbulkan kerusakan
12	28.5-32.6	Menimbulkan kerusakan parah

Gambar 2. 16 Tingkat Kecepatan Angin (Kondisi Alam)
 Sumber: (Bachtiar & Hayyatul, 2018)

Turbin angin dikenal sebagai mesin energi angin yang memanfaatkan energi kinetik angin untuk menghasilkan energi mekanis. Bentuk sayap yang berputar pada turbin disebut bilah atau *aerofoil* turbin yang menghasilkan gerakan rotasi dengan cepat. Turbin angin ini menggunakan bilah tersebut agar adanya gerakan rotasi untuk menghasilkan listrik atau menjalankan mesin lainnya seperti pompa (PNPM, 2011).

Terdapat perhitungan kecepatan angin dengan menggunakan persamaan berikut:

$$P = \frac{1}{2} \times \rho \times V^3 \times A \times \eta \quad (2.3)$$

Keterangan:

P = Daya (watt)

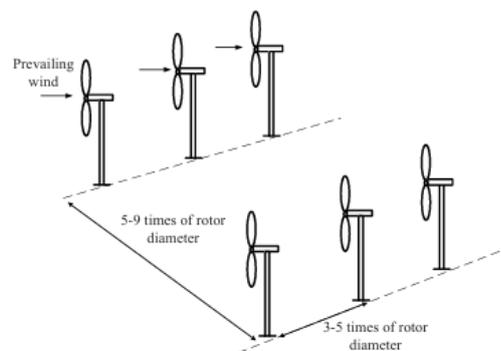
ρ = Massa jenis angin (1.225 kg/m³)

V = Kecepatan angin (m/s)

A = Luas penampang (m²)

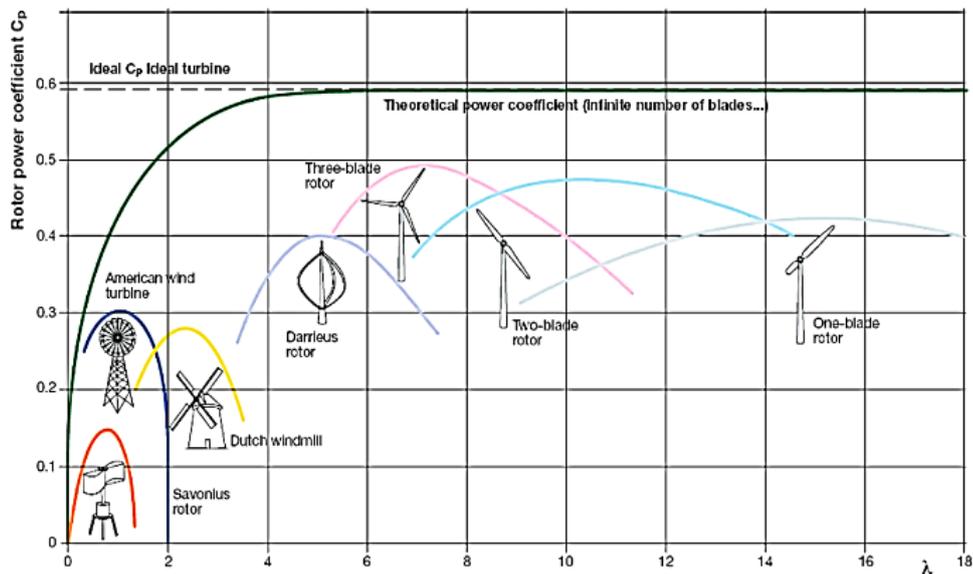
η = Efisiensi (%)

Jarak antar turbin angin harus disusun agar dapat menyerap energi listrik secara maksimal tanpa terganggu oleh hambatan atau turbulensi. Jarak yang disarankan yaitu *crosswind* 3-5 D dan *downwind* 5-9 D (Gupta, 2016).



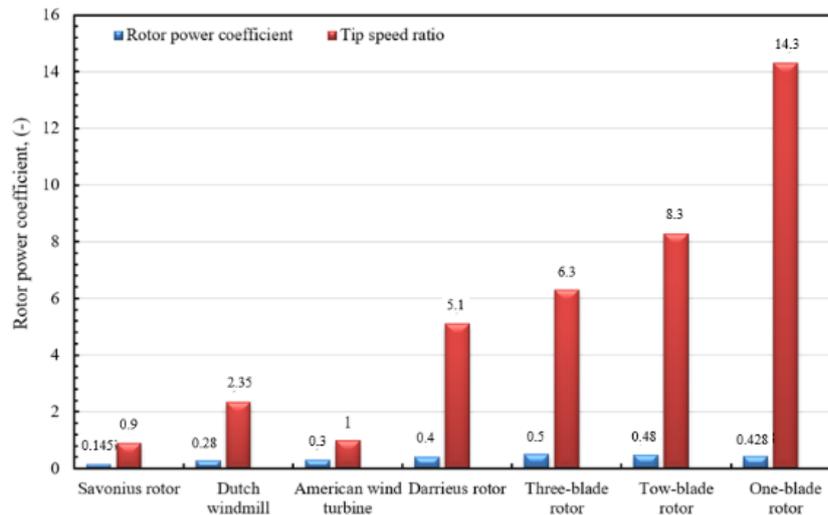
Gambar 2. 17 Jarak Turbin Angin
Sumber : (Gupta, 2016)

Gambar 2.18 adalah karakteristik dari berbagai jenis turbin angin, di mana menurut Al-Rawajreh (2023), sumbu y menunjukkan *rotor power coefficient* atau koefisiensi daya rotor, yaitu ukuran jumlah energi yang berhasil diperoleh turbin dari angin dan diubah secara efektif menjadi energi listrik. Koefisien daya dipengaruhi oleh jumlah bilah, jenis turbin, dan kapasitasnya. Terlihat bahwa HAWT umumnya lebih efektif dalam mengekstraksi energi dari angin dibandingkan VAWT. Pada sumbu x menunjukkan *Tip Speed Ratio* atau rasio kecepatan ujung, Dony Damara (2016) menyebut *Tip Speed Ratio* merupakan perbandingan antara kecepatan ujung rotor dan kecepatan angin bebas. Pada kecepatan angin nominal tertentu, rasio kecepatan ujung akan mempengaruhi kecepatan rotor. Turbin angin tipe *lift* biasanya memiliki rasio kecepatan ujung yang lebih tinggi dibandingkan dengan turbin angin tipe *drag*.



Gambar 2. 18 Karakteristik Jenis Turbin Angin
Sumber: (Al-Rawajreh & Gomaa, 2023)

Pada gambar 2.19 merupakan grafik yang menggambarkan hubungan antara nilai koefisien daya rotor dan rasio kecepatan ujung bilah, di mana terdapat perbedaan karakteristik antar jenis turbin angin (Al-Rawajreh & Gomaa, 2023).



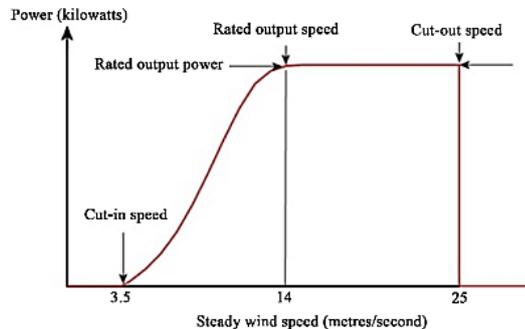
Gambar 2. 19 Koefisien Daya Rotor dan Rasio Kecepatan Ujung Berbagai Turbin Angin
Sumber: (Al-Rawajreh & Gomaa, 2023)

Fijrin (2022) menyebut turbin angin mempunyai karakteristik yaitu daerah operasi turbin, hubungan daya keluaran terhadap *wind speed*, dan hubungan efisiensi turbin terhadap daya keluaran. Daerah operasi turbin angin yaitu sebagai berikut:

1. *Cut-in wind speed* yaitu turbin angin mulai menghasilkan listrik saat mencapai kecepatan angin rendah.
2. *Rated wind speed* yaitu turbin angin menghasilkan listrik sesuai dengan kapasitas rating turbin.
3. *Cut-out wind speed* yaitu kemampuan turbin angin untuk menghentikan dan mematikan, sehingga bisa mencegah kerusakan mekanik.

Gambar 2.20 menunjukkan karakteristik hubungan daya keluaran terhadap *wind speed* yaitu semakin tinggi kecepatan angin, semakin besar juga daya yang

dihasilkan oleh turbin angin. Namun, kedepannya akan terjadi kejenuhan terhadap *wind speed* dan menghasilkan daya tetap konstan atau tidak bertambah.

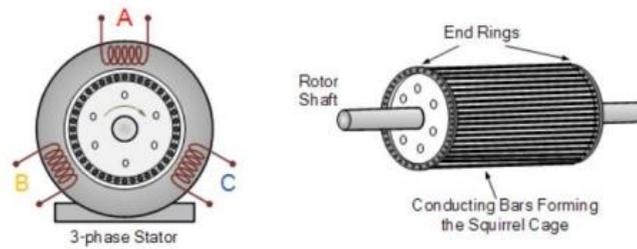


Gambar 2. 20 Kurva Daerah Operasi Turbin Angin
Sumber: (Fjirin, 2022)

Pada PLTB terdapat generator didalamnya. Generator adalah mesin yang mengubah tenaga mekanis menjadi listrik. Generator dan mesin diesel sering dipasang sebagai satu kesatuan yang disebut generator set, biasanya menghasilkan listrik dalam bentuk arus bolak-balik (AC) atau tiga phase. Generator terbagi menjadi 2 jenis yaitu generator asinkron dan generator sinkron (Jepersen, 2016).

1. Generator Asinkron

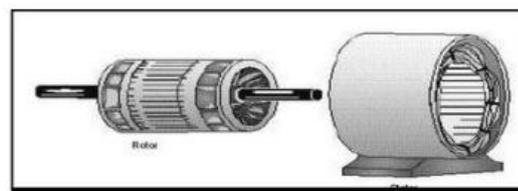
Generator asinkron merupakan generator tidak sinkron karena putaran rotornya tidak sama dengan medan magnet di stator. Generator ini disebut juga generator induksi dan salah satu jenis mesin listrik arus bolak-balik (AC) yang paling umum digunakan. Nama asinkron berasal dari fakta bahwa generator ini mengoperasikan induksi medan magnet stator ke rotor, di mana arus rotornya tidak disuplai dari sumber energi eksternal, melainkan dihasilkan secara induktif sebagai hasil dari perbedaan kecepatan relatif antara rotasi rotor dan medan putar yang dihasilkan oleh arus stator. Generator asinkron yang paling umum digunakan yaitu generator asinkron 3 phase (Jepersen, 2016).



Gambar 2. 21 Komponen Generator Asinkron
Sumber: (Jepersen, 2016)

Secara umum, struktur generator asinkron mirip dengan motor induksi. Namun, dalam penggunaannya sebagai generator, perlu ada penggerak awal untuk memutar rotor motor induksi agar dapat beroperasi. Generator ini biasanya digunakan pada pembangkit listrik tenaga mikro hidro dan angin (Jepersen, 2016). Namun, terdapat kelemahan dari generator asinkron yaitu, sistem eksitasi internak pada generator kurang efisien, tidak cocok digunakan pada kondisi daya faktor rendah atau *lagging*, dan perlu daya reaktif yang sangat besar.

Secara umum, generator asinkron terdiri dari rotor (gerak) dan stator (diam). Terdapat celah udara yang sangat kecil di antara stator dan rotor. Stator adalah bagian terluar dari generator yang mengarahkan arus listrik yang terdiri dari tumpukan laminasi inti. Sedangkan rotor terbagi dua jenis yaitu rotor sangkar (*squirrel cage rotor*) yang memiliki konduktor dengan kedua ujungnya dihubungkan secara singkat menggunakan cincin pendek dan rotor belitan (*wound rotor*) yang terdiri dari set belitan tiga phase mirip dengan belitan statornya (Jepersen, 2016).



Gambar 2. 22 Penampang Rotor dan Stator
Sumber: (Jepersen, 2016)

Prinsip kerja generator asinkron kebalikan dari saat mesin induksi beroperasi sebagai motor. Saat berfungsi sebagai motor, kumparan stator diberi tegangan tiga phase dan menciptakan medan putar dengan kecepatan sinkron. Sedangkan saat berfungsi sebagai generator, rotor motor diputar oleh sumber penggerak dengan kecepatan yang melebihi kecepatan sinkron. Saat terhubung ke beban, arus mengalir. Arus rotor ini berinteraksi dengan medan magnet pada kumparan stator, menyebabkan arus pada kumparan stator sebagai respons terhadap gaya mekanik yang diberikan. Dalam proses perubahan dari motor induksi menjadi generator asinkron, diperlukan daya reaktif atau daya magnetisasi untuk menghasilkan tegangan pada terminal keluaran. Kapasitor berperan sebagai penyedia daya reaktif yang disesuaikan dengan kebutuhan daya reaktif (Jepersen, 2016).



Gambar 2. 23 Generator Asinkron
Sumber: (Faisal, 2023)

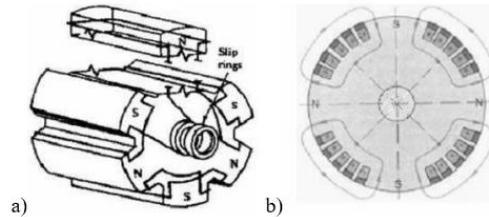
2. Generator Sinkron

Tegangan keluaran dari generator sinkron adalah arus bolak-balik, sehingga sering kali disebut juga sebagai generator AC. Dinamakan generator sinkron yaitu karena jumlah putarannya sama atau sinkron dengan jumlah frekuensi (Faisal, 2023).



Gambar 2. 24 Stator Sinkron
Sumber: (Faisal, 2023)

Stator berperan sebagai tempat menerima induksi magnet dari rotor. Arus bolak-balik yang mengalir menuju beban dialirkan melalui stator yang berbentuk kerangka silinder dengan lilitan kawat konduktor yang sangat banyak. Stator selalu tetap diam dan mesinnya terbuat dari bahan ferromagnetik yang dilaminasi sebagai pengurangan kerugian akibat arus pusar (Faisal, 2023).



Gambar 2. 25 a) Rotor Salient dan b) Rotor Non Salient
Sumber: (Jepersen, 2016)

Rotor generator berputar karena dipicu oleh penggerak utama, menghasilkan medan magnet yang berputar dalam mesin. Medan magnet yang berputar ini menghasilkan tegangan tiga fasa pada stator. Rotor sinkron pada dasarnya adalah sebuah elektromagnet yang besar dan memiliki kutub medan magnet yang *salient* (kutub sepatu) dan *non salient* (rotor silinder). Rotor silinder biasanya digunakan untuk generator dengan dua atau empat kutub, sedangkan rotor kutub sepatu untuk generator dengan empat atau lebih kutub. Pemilihan desain rotor tergantung pada kecepatan putar penggerak utama, frekuensi, dan rating daya generator. Generator yang beroperasi pada kecepatan di atas 1500 rpm dengan frekuensi 50Hz dan daya 10 MVA biasanya menggunakan rotor silinder. Sedangkan, rotor kutub sepatu digunakan untuk generator dengan daya di bawah 10 MVA dan kecepatan yang rendah (Jepersen, 2016).

Prinsip kerja generator sinkron secara umum adalah sebagai berikut (Faisal, 2023):

- a. Kumparan medan pada rotor terhubung dengan sumber eksitasi khusus yang mengalirkan arus searah melalui kumparan medan dan menyebabkan fluks magnet yang konstan seiring waktu.
- b. Penggerak primer yang terhubung dengan rotor dijalankan sehingga rotor mulai berputar pada kecepatan nominalnya.
- c. Perputaran rotor menyebabkan rotasi medan magnet yang dihasilkan oleh kumparan medan. Medan magnetik putar ini diinduksi pada kumparan jangkar dan menghasilkan fluks magnetik yang berubah-ubah seiring waktu di stator. Perubahan fluks magnetik di sekitar kumparan menghasilkan gaya gerak listrik induksi pada ujung-ujung kumparan tersebut.



Gambar 2. 26 Generator Sinkron
Sumber: (Faisal, 2023)

Terdapat jenis generator turbin angin yaitu *Permanent Magnet Synchronous Generator* (PMGS) adalah jenis generator listrik yang menggunakan magnet permanen untuk menghasilkan medan magnet yang diperlukan dalam proses konversi energi mekanik menjadi energi listrik (Welland, 2020).

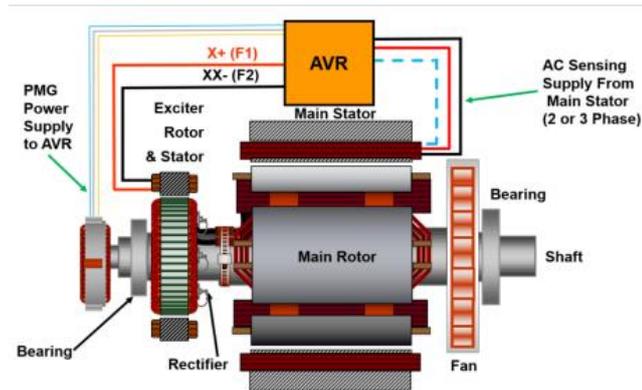
Cara kerjanya yaitu rotor utama yang berputar membawa magnet permanen bersamanya. Perputaran rotor ini menciptakan medan magnet yang berputar. Medan magnet yang berputar memotong kumparan-kumparan stator. Menurut hukum induksi elektromagnetik, perubahan fluks magnetik yang memotong konduktor

akan menimbulkan gaya gerak listrik (GGL) induksi. GGL induksi ini menyebabkan arus listrik mengalir pada kumparan stator.

Arus AC yang dihasilkan PMG merupakan arus dari *rectifier* yang diubah menjadi arus DC dan kemudian digunakan untuk mensuplai AVR yang akan mendeteksi tegangan *output* generator. Jika tegangan terlalu tinggi atau terlalu rendah, AVR akan memberikan sinyal untuk mengatur arus eksitasi pada kumparan medan PMG. Dengan mengatur arus eksitasi, kekuatan medan magnet yang dihasilkan rotor dapat diubah, sehingga tegangan *output* generator dapat dipertahankan pada nilai yang diinginkan. Berikut komponen utama dari PMGS:

1. Rotor Utama (*Main Rotor*): Bagian yang berputar pada generator dan dilengkapi dengan magnet permanen yang kuat. Fungsinya untuk menghasilkan medan magnet yang berputar saat rotor berotasi. Medan magnet inilah yang menginduksi arus listrik pada stator.
2. Stator Utama (*Main Stator*): Bagian yang diam pada generator. Terdiri dari kumparan-kumparan kawat tembaga yang tertanam dalam slot-slot stator. Fungsinya untuk ketika medan magnet dari rotor memotong kumparan stator, akan timbul GGL (Gaya Gerak Listrik) induksi yang menyebabkan arus listrik mengalir pada kumparan. Arus listrik inilah yang menjadi *output* dari generator.
3. PMG (*Permanent Magnet Generator*): Generator kecil yang berfungsi untuk menghasilkan tegangan AC yang kemudian direktifikasi menjadi tegangan DC. Tegangan DC ini digunakan untuk mensuplai AVR.
4. AVR (*Automatic Voltage Regulator*): Komponen elektronik yang berfungsi mengatur tegangan *output* generator agar tetap stabil.

5. *Rectifier*: Perangkat yang berfungsi mengubah arus AC menjadi arus DC.
6. *Bearing*: Bantalan yang berfungsi mengurangi gesekan antara poros rotor dengan rumah generator dan memungkinkan rotor berputar dengan lancar serta mengurangi keausan komponen.
7. *Fan*: Kipas pendingin yang berfungsi mendinginkan generator. Berfungsi mencegah generator mengalami *overheat* akibat panas yang dihasilkan selama proses konversi energi.
8. *Shaft*: Poros yang menghubungkan rotor dengan sumber tenaga penggerak (misalnya turbin).



Gambar 2. 27 Generator PMGS
 Sumber: (Welland, 2020)

2.1.6 Jenis-Jenis Turbin Angin

Berdasarkan sumbu putarnya, turbin angin mempunyai dua jenis yaitu *Horizontal Axis Wind Turbine* (HAWT) dan *Vertical Axis Wind Turbine* (VAWT) (Fijrin, 2022).

Design	Orientation	Use	The main acting force	Peak efficiency%
Cup	VAWT	Modern cup as Anemometer	Drag	8%
Savonius rotor	VAWT	Flettner ventilator, cooling device in vehicles	Drag	16%
Dutch windmill	HAWT	16 th century to pumping water	Lift	27%
American wind turbine	HAWT	18 th century to pumping water and electricity generation	Lift	31%
Darrieus rotor	VAWT	20 th century to electricity generation	Lift	40%
One-blade rotor	HAWT	20 th century to electricity generation	Lift	43%
Tow-blade rotor	HAWT	20 th century to electricity generation	Lift	47%
Three-blade rotor	HAWT	20 th century to electricity generation	Lift	50%

Gambar 2. 28 Perbandingan Efisiensi Jenis HAWT dan VAWT
 Sumber: (Al-Rawajreh & Gomaa, 2023)

Berdasarkan gambar 2.27, memperlihatkan berbagai karakteristik turbin angin, rotasi, penggunaan, daya utama yang dihasilkan, dan efisiensi puncaknya. Secara keseluruhan, HAWT memiliki efisiensi yang lebih tinggi dibandingkan VAWT.

1. *Horizontal Axis Wind Turbine (HAWT)*

Turbin angin sumbu horizontal mempunyai rotor utama dan generator di puncak menaranya yang harus menghadap ke arah angin. Terdapat turbin yang kecil biasanya diarahkan oleh baling-baling angin sederhana, sementara turbin yang besar umumnya terdapat sensor angin yang terhubung dengan servo motor untuk mengatur dan mengarahkan sudu supaya berada di posisi tegak lurus terhadap arah angin. Turbin jenis HAWT ini biasanya dilengkapi *gearbox* untuk meningkatkan kecepatan rotasi turbin. Oleh karena itu, turbin horizontal memiliki tingkat efisiensi dan daya keluaran lebih tinggi daripada vertikal. Kelebihan turbin horizontal yaitu memberi kinerja produksi energi lebih baik daripada vertikal. Sementara kekurangannya memerlukan kecepatan angin lebih tinggi dan memerlukan menara tinggi untuk menangkap kecepatan angin. Setiap ketinggian menara 10 meter, berdampak ke peningkatan kecepatan angin sekitar 20% dan daya 34% (Fijrin, 2022). Terdapat 4 bagian komponen yaitu sebagai berikut:



Gambar 2. 29 *Komponen Turbin Angin Sumbu Horizontal*
Sumber: (PNPM, 2011)

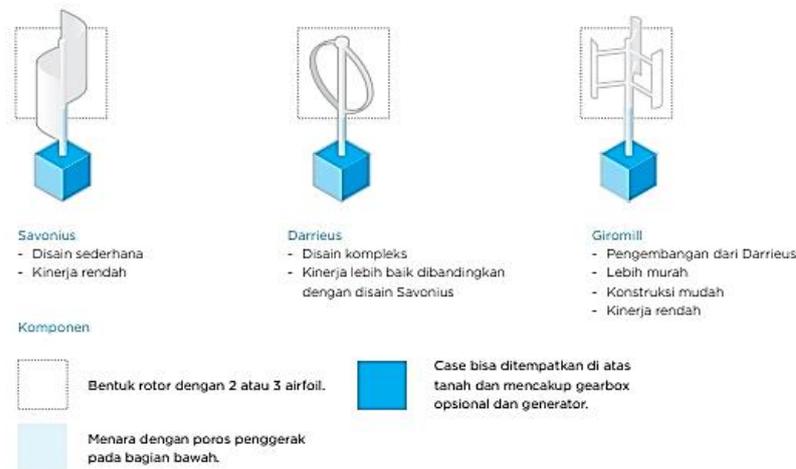
1. *Nacelle* yaitu bagian atas turbin angin yang terpasang pada menara. Terdapat 3 komponen utama pada *nacelle* yaitu:
 - a. *Gearbox*, menerima putaran dari bilah rotor dan meningkatkan kecepatan putarannya yang sesuai kecepatan optimal untuk menggerakkan generator.
 - b. Sistem Rem Mekanis, biasanya ada pada *gearbox* dan mirip dengan sistem rem kendaraan motor. Sistem ini hanya digunakan saat turbin perlu dihentikan sepenuhnya, misalnya *maintenance* atau menghentikan pembangkit turbin jika terjadi kelebihan daya.
 - c. Generator, alat konversi energi putaran dari *gearbox* yang menjadi arus listrik. Generator terdiri dari magnet menempel di rotor dan kumparan kawat di stator. Ketika poros rotor berputar, magnet juga berputar melewati kumparan stator dan mengakibatkan terinduksinya arus listrik di dalam kumparan tersebut.
2. Menara sebagai penopang rotor dan *nacelle*. Pada jalur angin, menara juga menopang turbin. Menara didirikan di atas dengan beton di kedalaman 4-6 meter dan harus bisa menopang *nacelle* dan bilah motor dalam segala kondisi cuaca.
3. Baling-baling rotor atau bilah rotor yang berotasi pada sumbu horizontal. Bilah yang berjumlah tiga mempunyai efisiensi lebih optimal dan biasanya dibentuk *airfoil* (sayap pesawat). Baling-baling ini mengubah energi gerak angin menjadi energi mekanik putaran yang dipindahkan dari poros penggerak. Bilah turbin dibuat dari komposit seperti serat karbon atau kaca untuk menahan tekanan ekstrem. Usia sudu turbin angin biasanya 20-25 tahun

yang nantinya perlu penggantian dan di daur ulang. Sistem baling rotor ini dikendalikan oleh *pick control* yaitu pengereman aerodinamis yang dilakukan dengan memutar bilah rotor hingga penampangnya menjadi lebih tipis terhadap angin yang datang. Hal ini membuat rotor berputar lambat karena menangkap sedikit angin. *Pitch control* biasanya bekerja dengan motor listrik dan mengatur setiap bilah secara terpisah.

4. *Tail vane* atau *yaw*, disebut juga ekor. Bagian ini membuat rotor turbin angin sumbu horizontal menjadi sejajar dengan arah datangnya angin.

2. *Vertical Axis Wind Turbine* (VAWT)

Terdapat 3 jenis *Vertical Axis Wind Turbine* seperti pada gambar 2.29 di bawah.



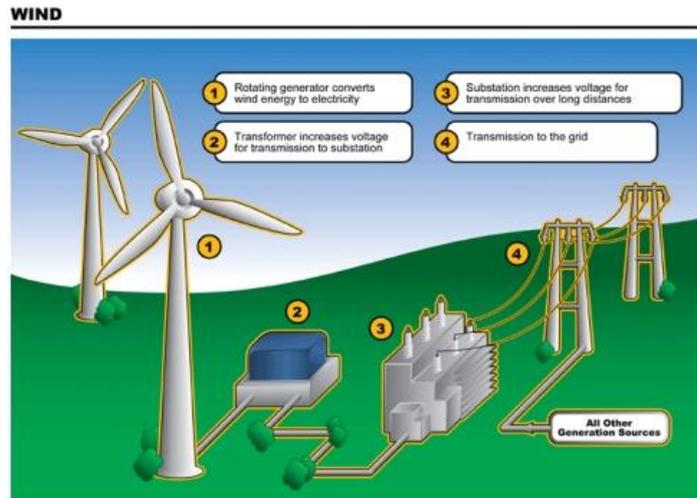
Gambar 2. 30 Jenis Turbin Sumbu Vertikal
Sumber: (PNPM, 2011)

Poros utama turbin angin vertikal disusun tegak lurus. *Maintenance* dan desain turbin ini lebih mudah, namun kinerjanya juga lebih rendah dibanding turbin horizontal. Turbin ini mempunyai struktur yang sederhana dan dapat dibangun di dekat permukaan tanah. Kelebihan turbin vertikal yaitu tidak perlu diarahkan ke arah angin, dapat dioperasikan pada kecepatan rendah, pemeliharaan yang mudah,

cocok di lingkungan arah angin yang turbulensi, dan tidak bising. VAWT ini memiliki sumbu putar vertikal dan saat pemasangan transmisi, generator bisa disimpan pada *ground*, sehingga mudah untuk perawatan dan mengurangi berat dari turbinnya. Kekurangannya yaitu kinerja lebih buruk dalam produksi energi, terkadang memerlukan motor listrik kecil untuk menghidupkannya, dan sering kegagalan baling-baling karena aus.

2.1.7 Prinsip Kerja Turbin Angin

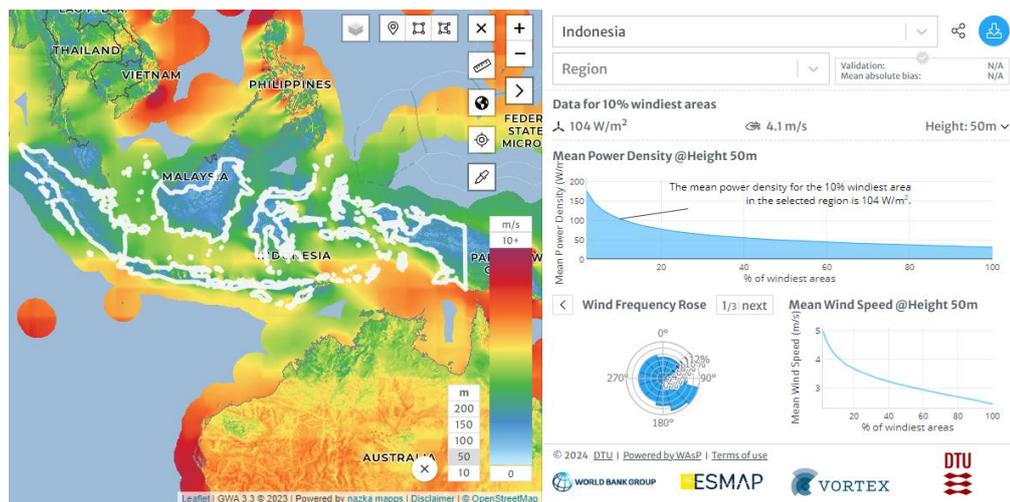
Proses kerjanya berkebalikan dengan kipas angin, di mana turbin bukan menghasilkan angin dari listrik, namun mengubah energi angin menjadi listrik. Angin akan memutar sudu-sudu turbin, kemudian meneruskan gerakan untuk memutar rotor pada generator yang terletak pada bagian belakang turbin angin. Generator itu mengubah energi putaran rotor menjadi listrik dengan memanfaatkan prinsip hukum Faraday, di mana jika terdapat penghantar dalam suatu medan magnet, maka akan dihasilkan beda potensial pada ujung penghantar tersebut. Ketika poros generator mulai berputar, maka akan terjadi perubahan fluks pada stator dan akhirnya menghasilkan tegangan dan arus listrik yang akan dialirkan melalui kabel jaringan listrik dan didistribusikan ke beban yang digunakan. Tegangan dan arus listrik yang dihasilkan generator adalah listrik AC (*Alternating Current*) yang memiliki bentuk gelombang sinusoidal. Turbin pada pemakaian umum biasanya memiliki ukuran antara 50 sampai 750 kW. Contohnya, sebuah turbin kecil dengan kapasitas 50 kW dapat digunakan untuk rumah tangga dan pompa air (Priyono & Kurniawan, 2023). Gambar 2.30 merupakan ilustrasi dari prinsip kerja turbin angin.



Gambar 2. 31 Sistem PLTB
 Sumber:(Priyono & Kurniawan, 2023)

2.1.8 Potensi Energi Angin

Potensi energi angin di Indonesia sebesar 255 MW direncanakan akan digunakan pada tahun 2025, tetapi hanya 135 MW yang terealisasi sampai 2020. Oleh karena itu, pengembangan potensi energi angin di Indonesia masih menjadi masalah nasional (Muchtar, 2022). Pada data NASA di aplikasi HOMER, potensi energi angin di Kampus Mugarsari sebesar 3.57 m/s.



Gambar 2. 32 Potensi Energi Angin di Indonesia
 Sumber: (Global Wind Atlas, 2024)

Berdasarkan pada *website Global Wind Atlas*, Indonesia keseluruhan mempunyai potensi angin rata-rata 4,1 m/s dengan ketinggian 50 meter. Terdapat

beberapa pilihan ketinggian, semakin tinggi maka potensi energi angin semakin besar.

2.1.9 Sistem Pembangkit Listrik *Hybrid*

Pembangkit listrik sistem *hybrid* adalah gabungan sumber energi yang dapat diperbarui (*renewable energy*) maupun dengan yang tidak dapat diperbarui (*unrenewable energy*) dan bertujuan untuk meningkatkan efektivitas dalam menyediakan energi. Dua faktor dapat dipertimbangkan saat menilai kinerja sistem pembangkit energi *hybrid* yaitu faktor keandalan dan faktor ekonomi (Azizah & Purbawanto, 2021).

Pada pemasangannya *hybrid* ini dapat terhubung ke PLN atau tidak. Pembangkit EBT yang terhubung ke PLN disebut *on grid* dan yang tidak disebut *off grid* (Atonergi, 2016). Berikut perbedaannya:

1. *On Grid*, sistem yang terhubung langsung ke jaringan listrik utama atau *grid*. Ketika ada energi lebih dialirkan ke PLN (*grid*) dan jika energi kurang juga dapat di suplai dari *grid*. *On grid* ini bergantung pada jaringan listrik umum dan tidak dapat beroperasi saat pemadaman listrik.
2. *Off Grid*, sistem yang tidak terhubung ke *grid*. Cocok untuk daerah terpencil atau tidak ada akses dengan jaringan listrik umum. Sistem ini memerlukan penyimpanan energi atau baterai, sehingga tidak pengaruh jika ada pemadaman listrik umum. Namun, membutuhkan investasi awal yang lebih tinggi dibandingkan *on grid*.

Komponen utama pada sistem pembangkit listrik *hybrid* ini selain PV dan turbin angin, terdapat komponen utama lainnya yaitu sebagai berikut:

1. *Rectifier*

Rectifier adalah suatu alat listrik yang berfungsi sebagai pengubah arus bolak balik (AC) menjadi arus searah (DC) untuk mengisi baterai agar kapasitasnya tetap terjaga penuh. Kapasitas *rectifier* harus sesuai dengan baterai yang dipakai, atau setidaknya kapasitas arus cukup untuk mengisi baterai (Sutrisno & Arum Setyowati, 2021). *Rectifier* dengan fasa terkendali dibagi menjadi dua tipe diantaranya:

- a. *Rectifier* satu fasa, merupakan *rectifier* yang menggunakan suplai AC satu fasa pada rangkaian inputnya. *Rectifier* ini beroperasi jika diberikan tegangan sekitar 220 VAC.
- b. *Rectifier* tiga fasa, merupakan *rectifier* yang menggunakan AC tiga fasa (380 VAC) pada rangkaian inputnya. Dilakukan penyambungan dengan konfigurasi fasa ke fasa (R-S, R-T, T-R) untuk menghasilkan tegangan 380 VAC, sehingga *rectifier* tiga fasa ini bisa beroperasi.

2. Konverter DC-DC

Konverter ini mengubah tegangan DC ke DC untuk menaikkan atau menurunkan tegangan keluaran. Terdapat 2 jenis konverter DC-DC yaitu konverter *buck* dan *boost*. *Buck* yaitu konverter yang tegangan keluarannya lebih rendah dibandingkan tegangan masukan ($V_o < V_{in}$) dengan diaturnya *duty cycle*, sedangkan *boost* kebalikannya yaitu tegangan keluaran lebih tinggi dari tegangan masuk ($V_o > V_{in}$) (Raharja et al., 2019).

Terdapat persamaan untuk menghitung kapasitas konverter dan jumlahnya yaitu sebagai berikut:

$$\text{Kapasitas konverter} = \frac{\text{Daya Puncak Beban (kW)}}{\text{Efisiensi konverter (\%)}} \quad (2.4)$$

$$\text{Jumlah Konverter} = \frac{\text{Kapasitas Konverter (kW)}}{\text{Kapasitas Konverter dipakai (kW)}} \quad (2.5)$$

3. Baterai

Baterai atau *accumulator* adalah perangkat listrik yang mampu menyimpan dan melepaskan energi listrik melalui proses kimia (elektrolisis) yang terjadi karena adanya perbedaan potensial antara katoda dan anoda. Baterai menggunakan proses elektrokimia *reversible*, di mana reaksi kimia di dalam baterai diubah menjadi listrik saat proses pengosongan terjadi. Sebaliknya, ketika energi listrik diubah menjadi kimia, proses ini disebut pengisian, yang terjadi melalui regenerasi elektroda dengan menyalurkan arus listrik dalam sel dengan polaritas berlawanan.

Baterai bisa terdiri dari satu atau beberapa sel. Setiap sel terdiri dari elektroda positif (anoda), elektroda negatif (katoda), dan larutan elektrolit. Jenis elektroda dan elektrolit tergantung pada pabrik yang memproduksinya. Baterai digunakan sebagai sumber arus searah atau DC (Lonteng et al., 2022).



Gambar 2. 33 Baterai
Sumber: (Sari, 2019)

Jumlah baterai perlu dihitung agar *software* dapat mensimulasikan skema yang telah di rancang, berikut persamaan jumlah baterai:

$$\text{Jumlah Baterai} = \frac{\text{konsumsi energi (kWh)}}{\text{kapasitas baterai (kWh)}} \quad (2.6)$$

4. Charge Controller

Terdapat 2 jenis *charge controller* yang digunakan yaitu *Solar Charge Controller* (SCC) dan *Wind Charge Controller* (WCC).

menghubungkan ke baterai yang telah diubah dari AC ke DC karena terdapat *rectifier*. Pengisian baterai oleh turbin angin bisa dikendalikan otomatis melalui sirkuit kontrol internal. WCC, akan menghentikan turbin angin ketika tegangan baterai turun dan melanjutkan pengisian lagi saat tegangan sudah pulih, sehingga dapat melindungi turbin angin dan baterai (Sari, 2019).

Charge controller secara umum memiliki 2 tipe yaitu *Pulse Width Modulation* (PWM) dan *Maximum Power Point Tracking* (MPPT). PWM lebih sederhana dan terjangkau dibandingkan MPPT. PWM mengatur aliran energi ke baterai dengan mengurangi arus secara bertahap melalui proses “modulasi lebar pulsa”. Ketika baterai sudah *full*, pengontrol PWM tetap memasok sedikit daya untuk menjaga baterai tetap penuh. PWM paling cocok di skala kecil karena sistem pembangkit dan baterai harus memiliki tegangan yang sesuai. Penggunaan PWM tidak dianjurkan untuk instalasi lebih besar (ICAsolar, 2021).

Sedangkan, MPPT memiliki efisiensi yang lebih tinggi daripada PWM dalam memaksimalkan daya dari pembangkit untuk mengisi baterai. MPPT membatasi *output* nya untuk mencegah pengisian berlebih pada baterai. Pengontrol MPPT memantau dan menyesuaikan energi yang masuk untuk mengatur arus dalam sistem pembangkit. MPPT juga dapat mengurangi tegangan serta meningkatkan arus. *Controller* ini berfungsi memaksimalkan *voltage* yang tersedia dan mengkonversinya. MPPT efektif digunakan dalam berbagai kondisi, termasuk saat tegangan turun di bawah tegangan baterai, MPPT bisa menstabilkan sistem sehingga tetap beroperasi. MPPT sangat cocok untuk investasi jangka panjang meskipun harga yang mahal (ICAsolar, 2021).

2.1.10 *Charging Station Mobil Listrik*

Mobil listrik mempunyai kelebihan yaitu 100% *low emission* yang tidak berdampak pada perubahan iklim. Perbandingan dengan mobil bahan bakar konvensional, mobil listrik ini lebih hemat energi, sehingga efisiensi keseluruhan mobil listrik mencapai 48% signifikan lebih baik daripada bahan konvensional yang hanya sekitar 25%. Mesin dari mobil listrik sangat halus, itu sebabnya hampir tidak ada polusi yang dihasilkan. Selain itu, mobil listrik sangat aman karena tidak menggunakan bahan bakar minyak, sehingga tidak akan terbakar atau meledak jika menabrak sesuatu (Sidiq, 2015).



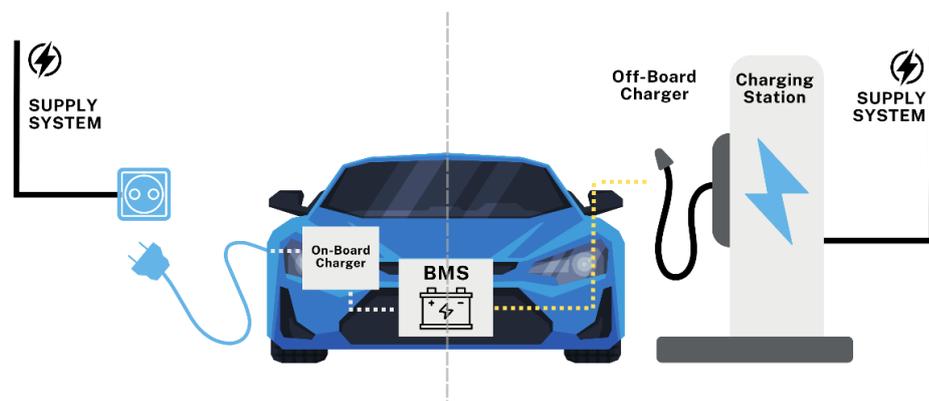
Gambar 2. 36 Charging Station PLN
Sumber: (VOI, 2023)

Charging station adalah perlengkapan listrik yang terhubung langsung ke panel distribusi listrik atau stop kontak listrik. Stasiun pengisian daya dilengkapi dengan satu atau lebih kabel dengan konektor yang mirip dengan *nozzle* pompa bensin dan digunakan untuk mengisi daya baterai kendaraan listrik dengan cara yang sama (Herdian et al., 2022). Terdapat kategori stasiun pengisian mobil listrik atau disebut *Electric Vehicle Charging Station (EVCS)* yaitu sebagai berikut

1. *Residential Charging Station* merupakan jenis stasiun pengisian di rumah. Kategori ini hanya mendukung isi daya AC 1 phase dengan tegangan 120 Volt dan 32 Ampere, tipe perumahan ini dikenal dengan *J1772 connector*.

2. *Charging Station* Komersial merupakan alat pengisian baterai untuk mobil listrik dapat dipasang instan di tempat parkir, seperti mall, kantor, dan tempat Pendidikan. Stasiun komersial ini tersedia gratis maupun berbayar. Tipe ini mendukung pengisian baterai mobil dengan tegangan 240 Volt dan arus 20-63 Ampere.
3. Stasiun Pengisian Umum merupakan stasiun yang biasanya berbayar dan terletak di tempat umum seperti stasiun pengisian BBM umum (SPBU). Secara umum, tipe ini memiliki tegangan 480 Vdc dan arus 125 A.

Topologi sistem *charging station* mobil listrik adalah sebuah cara sistem yang digambarkan secara skematis dan bagaimana hubungan pembangkit listrik *hybrid* dengan *charging station* mobil listrik. Terdapat 2 cara EVCS yaitu secara *off board* (*charger* terpisah dari mobil listrik, biasanya di tempat umum) dan *on board* (*charger* terpasang pada mobil listrik, biasanya di rumah pribadi). Berikut topologi sistem EVCS yaitu:



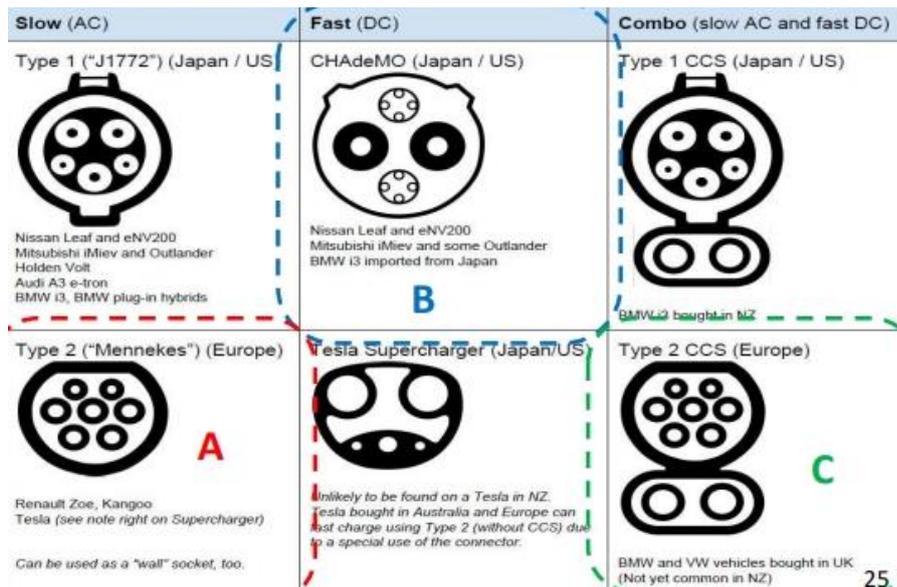
Gambar 2. 37 Topologi Sistem Charging Station

Pada gambar 2.37 menunjukkan terdapat 4 level tipe pengisian yang dimulai dari *slow* sampai *ultra* dengan spesifikasi yang berbeda.

Deskripsi	Level 1 (Pengisian Lambat/ Slow Charging)	Level 2 (Pengisian Menengah/ Medium Charging)	Level 3 (Pengisian Cepat/ Fast Charging)	Level 4 (Pengisian Sangat Cepat/ Ultra Charging)
Lokasi	Instalasi Khusus (Rumah)	Instalasi Khusus (Kantor)	SPKLU (Stasiun Pengisian)	SPKLU (Stasiun Pengisian)
Arus Keluaran Maksimum (A)	16 AC	63 AC	100 AC/250 DC	300 AC/500DC
Daya Keluaran (kW)	≤ 3,7 kW	≤ 22 kW	≤ 50 kW	≤ 150 kW
Jenis Konektor Plug-in	Tipe 1 dan 2 (IEC 62196-2)	Tipe 2 (IEC 62196-2)	Tipe Pengisian Gabungan (Combined Charging Type) CSS dan Chademo (IEC 62196-3)	Tipe Pengisian Gabungan (Combined Charging Type) CCS2 dan Chademo (IEC 62196-4)
Waktu Pengisian	8 jam	4 jam	30 menit	15 menit

Gambar 2. 38 Tipe Charging Station
Sumber: (ESDM, 2020)

Tipe *plug socket* juga dibagi menjadi 3 tipe yaitu *slow*, *fast*, dan *combo*. *Plug socket* yang sering digunakan biasanya tipe 2 (AC), Chademo (DC), dan CCS 2 (DC) seperti pada gambar 2.38.



Gambar 2. 39 Tipe Plug Socket
Sumber: (ESDM, 2020)

Menurut aplikasi PLN Mobile, *charging station* EV atau SPKLU di daerah Tasikmalaya memiliki beberapa tempat yaitu:

1. Hyundai Tasikmalaya (Khusus Kendaraan Hyundai). Alamat: Jl. HZ. Mustofa No. 349, Tugujaya, Kec. Cihideung, Kab. Tasikmalaya, Jawa Barat 46115. Terdapat satu kotak pengisian yaitu AC Mini Plus dengan konektor AC Type 2–7 kW dan harganya Rp 0/kWh.
2. (WULING) Arista Tasikmalaya. Alamat: Jl. HZ. Mustofa, Kel. Kahuripan, Kec. Tawang, Tasikmlaya, Jawa Barat 46115. Terdapat satu kotak pengisian yaitu AC 7 KW dengan konektor GBT-7 kW dan harganya Rp 0/kWh.
3. SPKLU PLN ULP Tasikmlaya Kota. Alamat: Jl. Mayor Utarya No. 28, Empangsari, Kec. Tawang, Kab Tasikmalaya, Jawa Barat 46113. Terdapat tiga kotak pengisian, dua dengan jenis AC dan satu kotak pengisian jenis DC, diantaranya yaitu Delta AC Max dengan konektor AC Type 2-22 kW Rp 2.466,78/kWh dan Delta DC Wallbox dengan konektor CCS2-25kW DC Rp 2.466,78/kWh.
4. SPKLU PLN UP3 Tasikmalaya. Alamat: Jl. Ahmad Yani No. 180-154, Sukamanah, Kec. Cipedes, Kab. Tasikmalaya, Jawa Barat 46131. Terdapat dua kotak pengisian yaitu AC Mini Plus dengan konektor AC Type 2-7 kW Rp 2.466,78/kWh dan Delta AC Max dengan konektor AC Type 2-22 kW Rp 2.466,78/kWh.
5. SPKLU PLN ULP Singaparna. Alamt: Jalan Raya Cikeleng, Singaparna, Kec. Singaparna, Kabupaten Tasikmalaya, Jawa Barat 46411. Terdapat satu kontak pengisian yaitu Delta AC Max dengan konektor AC Type 2-22 kW dan harganya Rp 2.466,78/kWh.
6. SPKLU PLN ULP Rajapolah. Alamat: Manggungjaya, Kec. Rajapolah, Kab. Tasikmalaya, Jawa Barat 46155. Terdapat satu kontak pengisian yaitu

Delta AC Max dengan konektor AC Type 2-22 kW dan harganya Rp 2.466,78/kWh.

7. SPKLU PLN ULP Karangnunggal. Alamat: Jl. Raya Karangnunggal, Ranca Bakung, Karangnunggal, Kab. Tasikmalaya, Jawa Barat 46186. Terdapat satu kontak pengisian yaitu Delta AC Max dengan konektor AC Type 2-22 kW dan harganya Rp 2.466,78/kWh.
8. SPKLU PLN Horison Tasikmalaya. Alamat: Jl Yudanegara No. 63, Yudanegara, Kec. Cihideung, Kab. Tasikmalaya, Jawa Barat 46121. Terdapat satu kontak pengisian yaitu Delta AC Max dengan konektor AC Type 2-22 kW dan harganya Rp 2.466,78/kWh.

2.1.11 HOMER

HOMER atau *Hybrid Optimization Model for Electric Renewables* merupakan salah satu *software* yang populer digunakan untuk merancang sistem Pembangkit Listrik *Hybrid* yang menggunakan energi terbarukan. HOMER mampu mensimulasikan dan mengoptimalkan sistem pembangkit listrik, baik yang berdiri sendiri (*off grid*) maupun yang terhubung ke jaringan (*grid-connected*), yang terdiri dari berbagai kombinasi pembangkit listrik seperti turbin angin, panel fotovoltaik, mikrohidro, biomassa, generator (diesel/bensin), mikroturbine, baterai, dan penyimpanan hidrogen. Perangkat lunak ini dapat melayani berbagai jenis beban listrik maupun termal (Desrizal & Rosma, 2018).

Muchtar (2022) menyatakan bahwa setiap 8760 jam dalam setahun, aplikasi HOMER mensimulasikan operasi sistem dengan menyediakan perhitungan *energy balance*. Jika sistem melibatkan baterai dan generator diesel atau bensin, *software* ini dapat memutuskan untuk setiap jam, apakah generator diesel atau bensin harus

dioperasikan dan apakah baterai perlu diisi atau dikosongkan. Setelah itu, HOMER menentukan konfigurasi terbaiknya dan memperkirakan biaya instalasi serta operasi sistem selama masa operasinya, termasuk biaya awal, biaya penggantian komponen, biaya bahan bakar, dan lainnya.

Ketika melakukan simulasi, HOMER memperhitungkan ekonomi dari rancangan yang dibuat diantaranya *Net Present Cost* (NPC) yaitu semua biaya yang digunakan dalam proyek pembangunan komponen, baik pemasangan maupun pengoperasian dan *Cost of Energy* (COE) adalah biaya yang dikeluarkan untuk menghasilkan energi per 1 kWh serta bisa dihitung dengan membagi biaya tahunan dengan jumlah energi yang dihasilkan oleh pembangkit *hybrid* setiap tahun (Akbar et al., 2019). Jika diperlukan analisis sensitivitas, HOMER akan mengulangi proses simulasi untuk setiap variabel sensitivitas.

Prinsip kerja aplikasi HOMER yaitu simulasi, optimasi, dan analisa sensitivitas.

1. Simulasi

HOMER mampu mensimulasikan sistem pembangkit listrik *off grid* maupun *grid-connected* dan terdiri dari berbagai kombinasi pembangkit listrik seperti turbin angin, panel fotovoltaik, mikrohidro, biomassa, generator (diesel/bensin), mikroturbine, sel bahan bakar, baterai, dan penyimpanan hidrogen. Perangkat lunak ini dapat melayani berbagai jenis beban listrik maupun termal.

2. Optimasi

Optimasi dilakukan ketika simulasi sudah selesai untuk menentukan konfigurasi sistem terbaik. HOMER menampilkan daftar hasil optimasi dengan mengurutkan nilai NPC dari terendah hingga tertinggi. Sistem dianggap optimal jika salah satu konfigurasi sistem menunjukkan NPC terendah untuk jangka waktu tertentu. Jika konfigurasi sistem tidak layak, HOMER akan mensimulasikan konfigurasi yang berbeda-beda, dan hasil optimasi sistem tidak ditampilkan. Selama proses optimasi, terdapat alat kelayakan investasi yaitu ROI (*Return on Investment*) atau laba investasi, dalam penghitungannya nilai yang dicari yaitu persentase keuntungan dari investasi berdasarkan laba keseluruhan dan biaya yang dikeluarkan. IRR atau *Internal Rate of Return* adalah ukuran tingkat efisiensi investasi. Suatu proyek atau investasi dapat dilaksanakan jika laju pengembalian (*rate of return*) lebih besar dibanding laju pengembalian investasi di tempat lain seperti bunga deposito bank, reksadana, dan lainnya.

3. Analisa Sensitivitas

Analisa sensitivitas akan menunjukkan hasil konfigurasi sistem terbaik dalam situasi di mana nilai parameter masukan berbeda-beda. Sensitivitas dapat ditunjukkan oleh pengguna dengan memasukkan beberapa nilai variabel sensitivitas. HOMER dapat memasukkan berbagai nilai untuk variabel sensitivitas (variabel tunggal dan variabel ganda), seperti harga bahan bakar, suku bunga tahunan, dan harga listrik jaringan transmisi. Semua variabel sensitivitas berbeda-beda, masing-masing menentukan sejumlah kasus sensitivitas. Jika pengguna menentukan 6 nilai untuk harga listrik dan 4 nilai untuk suku bunga bank, maka akan terjadi 23 kasus sensitivitas, dan hasilnya ditampilkan dalam tabel grafik (Fathurrachman et al., 2022).

2.1.12 Densitas Energi

Densitas energi merupakan jumlah besaran energi yang dapat disimpan dengan satuan luas. Biasanya diukur dalam satuan energi per volume atau joule per kubik ataupun energi per massa (Fathurrachman et al., 2022). Rumus densitas energi yaitu sebagai berikut:

$$DE = \frac{\text{Energi}}{\text{Luas}} \quad (2.7)$$

Keterangan:

DE = Densitas Energi (kWh/m²)

E = Energi (kWh)

L = Luas lahan (m²)

2.2 Penelitian Terkait

Pada beberapa penelitian terkait yang membahas tentang pembangkit listrik sistem *hybrid* untuk *charging station* mobil listrik, terdapat perbedaan dengan penelitian penulis dari segi sistem *hybrid*, aplikasi yang dipakai, analisis ekonomi, jenis pembangkit, dan topologi sistem. Penelitian terkait dengan penelitian yang dilakukan diantaranya sebagai berikut.

Tabel 2. 1 Penelitian Terkait

No	Judul Penelitian	Penulis, Tahun	Pembahasan Jurnal
1	Model Integrasi PV dan <i>Wind</i> Turbin Sebagai Pembangkit Energi Listrik Baru Terbarukan Pada Peternakan Tambak Udang di PT. Mod Vaname Indonesia	(Muchtari, 2022)	Penelitian ini mengidentifikasi potensi energi baru terbarukan di wilayah pesisir Tasikmalaya, khususnya di Kecamatan Cikalong dengan sistem <i>hybrid</i> menggunakan <i>software</i> HOMER Pro. Metode yang digunakan yaitu pengumpulan data, perencanaan dan simulasi, pengujian, pemodelan, dan analisis. Penelitian ini menyimpulkan bahwa sistem

			pembangkit listrik <i>hybrid on grid</i> memiliki potensi energi yang dapat dimanfaatkan untuk sumber energi listrik EBT yang berasal dari PLTS dan PLTB, serta memiliki dampak lingkungan yang lebih rendah.
2	Analisis Ketersediaan Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Angin (PLTB) dan Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS)	(Desrizal & Rosma, 2018)	Jurnal ini membahas analisis ketersediaan sistem pembangkit berbasis energi angin (PLTB) dan surya (PLTS) di Kota Pekanbaru menggunakan HOMER. Metode penelitiannya meliputi studi pustaka, penentuan parameter hibrida, pengambilan data, perancangan model, pengujian, analisis data, dan kesimpulan. Hasil simulasi menunjukkan bahwa penggunaan energi surya tertinggi terjadi pada pukul 12.00 sebesar 3.86 kW, sedangkan energi angin tertinggi terjadi pada pukul 16.00 sebesar 3.79 kW. Semakin besar kapasitas energi terbarukan yang terpasang, semakin rendah penggunaan bahan bakar dan biaya yang dikeluarkan.
3	Studi Perancangan Pembangkit Listrik Hibrid (PLTS-PLTD) untuk Suplai <i>Charging Station</i> Fakultas Teknik UNS	(Ramelan et al., 2023)	Penelitian ini bertujuan untuk mewujudkan ekosistem energi bersih yang utuh dengan menggunakan PLTS sebagai sumber energi utama untuk mengisi daya kendaraan listrik dan PLTD sebagai backup energi saat terjadi kekurangan suplai dari PLTS. Penelitian ini menggunakan software PVsyst dan Homer untuk melakukan simulasi dan optimasi sistem PLTS-PLTD berdasarkan data iradiasi matahari, profil beban, dan spesifikasi komponen. Sistem ini dapat menghasilkan energi sebesar 240.36 kWh per

			hari dan menyuplai beban sebesar 390.36 kWh per hari.
4	Analisis Manajemen Energi <i>Charging Station</i> dengan Pemanfaatan PLTS 0.5 Mwp <i>On Grid</i> di ITN Malang	(Herdian et al., 2022)	Penelitian ini membahas manajemen energi pada <i>charging station</i> yang terhubung dengan panel surya secara <i>on grid</i> di ITN Malang dengan pemanfaatan PLTS <i>on grid</i> berkapasitas 0.5 MWp dan dilakukan simulasi untuk merencanakan pengisian baterai mobil listrik dengan kapasitas 22 kW, arus listrik yang digunakan arus AC dengan tegangan 120V. Metode yang digunakan yaitu kajian literatur, perancangan sistem PV, perancangan sistem stasiun pengisian daya, pengumpulan data, dan simulasi menggunakan MATLAB. Hasilnya yaitu bahwa PLTS di ITN Malang dapat menghasilkan energi yang cukup untuk mengisi baterai mobil listrik.
5	<i>Modeling and Simulation of Wireless Electric Vehicle Charging Using Solar and Wind Energy</i>	(Nethra et al., 2022)	Penelitian ini menjelaskan bahwa EV merupakan solusi untuk mengurangi polusi udara dan konsumsi bahan bakar fosil dari kendaraan konvensional. Namun, EV memiliki keterbatasan dalam hal jarak tempuh dan waktu pengisian baterai. Komponen sistem WPT (<i>Wireless power transformation</i>) terdiri dari sistem tenaga surya, sistem tenaga angin, dan sistem transfer daya induktif. Aplikasi yang digunakan yaitu MATLAB Simulink untuk melakukan simulasi dan analisis sistem WPT. Hasil menunjukkan bahwa sistem WPT mampu menghasilkan daya yang cukup untuk mengisi

			baterai EV dengan efisiensi sekitar 80%.
6	<i>Solar, Wind and Battery Storage Energy Management and Control for Electric Car Charging Load</i>	(Prajapati & Vyas, 2022)	Penelitian ini tentang manajemen dan kontrol energi untuk stasiun pengisian mobil listrik yang didukung oleh energi matahari, angin, dan penyimpanan baterai. Aplikasi MATLAB digunakan untuk mengimplementasikan strategi manajemen energi yang diusulkan. Strategi manajemen energi dan kontrol yang diusulkan dapat digunakan untuk sistem skala besar. Hasil simulasi menunjukkan bahwa sistem manajemen energi yang diusulkan memenuhi kebutuhan beban bahkan ketika ada daya RES intermiten, kapasitas grid terbatas, dan kendala pengisian dan pengosongan pada unit penyimpanan energi.
7	<i>Analysis of Solar and Wind Energy Installations at Electric Vehicle Charging Stations in a Region in Brazil and Their Impact on Pricing Using an Optimized Sale Price Model</i>	(Dos Santos et al., 2021)	Jurnal ini membahas analisis instalasi energi matahari dan angin di stasiun pengisian kendaraan listrik di sebuah wilayah di Brasil dan dampaknya terhadap penetapan harga menggunakan model harga jual yang dioptimalkan. Metodologi yang digunakan yaitu tarot di mana model teoritis untuk mengoptimalkan tarif berdasarkan pedoman regulasi sektor listrik Brasil. Hasilnya yaitu penggunaan sistem energi alternatif dapat mengurangi tarif untuk penjualan energi ke kendaraan listrik, dan membuatnya lebih fleksibel dan sesuai dengan variasi sumber daya alam. Pada jurnal ini juga membandingkan tarif yang diperoleh dengan biaya bahan bakar lain yang tersedia di pasar, seperti bensin dan etanol, hasilnya

			menunjukkan bahwa kendaraan listrik memiliki keunggulan ekonomis.
8	<i>PV-Wind-Battery based Bidirectional DC-DC Converter for Grid Connected Systems</i>	(Thaveedu et al., 2020)	Penelitian membahas tentang konverter DC-DC bidirectional berbasis <i>PV-Wind-Battery</i> untuk sistem terhubung grid. Metode yang diusulkan mengurangi jumlah komponen sakelar dan kerugian dalam konversi daya. Hasil simulasi MATLAB menunjukkan kinerja sistem dalam berbagai kondisi, seperti variasi iradiasi matahari, kecepatan angin, dan beban AC. Jurnal ini membahas manfaat dan keunggulan dari sistem yang diusulkan, seperti efisiensi tinggi, jumlah komponen yang sedikit, dan fleksibilitas dalam mengelola aliran daya. Kesimpulannya bahwa sistem <i>hybrid grid connected PV-Wind-Battery</i> dengan konverter DC-DC bidirectional dan inverter <i>single phase full bridge</i> dapat beroperasi dengan baik dan stabil dalam memenuhi kebutuhan beban AC, mengisi baterai, dan menyuplai kelebihan daya ke <i>grid</i> .

Kebaruan penelitian yang akan dilakukan adalah membuat sistem pembangkit listrik *hybrid* PLTS dan PLTB *off grid* untuk bebannya yaitu *charging station* mobil listrik yang menggunakan aplikasi simulasi HOMER.