

BAB II

LANDASAN TEORI

2.1 Pembangkit Listrik Tenaga Surya

Pembangkit listrik dari energi terbarukan seperti sinar matahari (*solar energy*) melimpah dan tersebar hampir merata di seluruh Indonesia. Perangkat yang mampu mengubah energi matahari menjadi energi listrik secara langsung disebut sel surya. Sel surya sering juga disebut dengan pembangkit listrik tenaga surya (PLTS) atau sel fotovoltaik (PV). Energi surya merupakan sumber energi yang ramah lingkungan karena tidak menimbulkan polusi dalam proses konversi energinya dan juga merupakan sumber energi yang tersedia secara luas di alam (Widianto et al., 2019)

Sel surya merupakan semikonduktor yang mengubah energi matahari menjadi energi listrik. Silikon kristal adalah bahan yang paling banyak digunakan untuk sel surya. Menggunakan persamaan 2.1 , HOMER *Energy* mensimulasikan susunan (*array*) PV sebagai *output* dari sel surya:

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

Dimana:

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

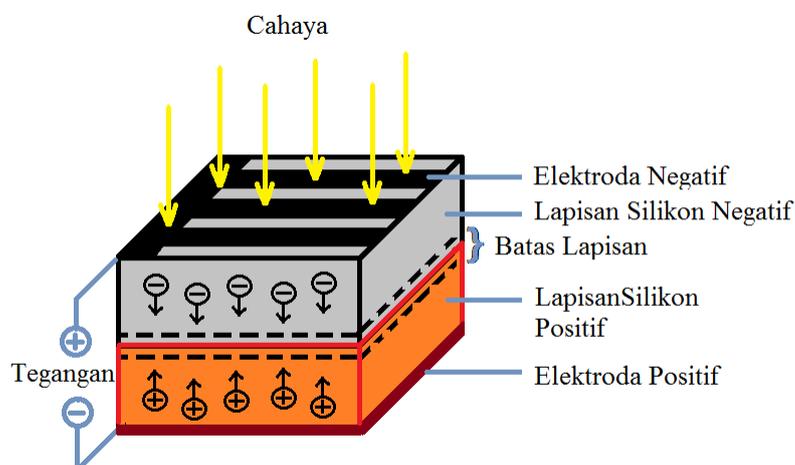
f_{pv} = *Pv derating factor*

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

PSH = *Peak Sun Hour*

2.1.1 Prinsip Kerja Panel Surya

Transfer elektron bebas dalam atom adalah metode mengubah energi cahaya (foton) menjadi sumber elektron bebas. Bahan semikonduktor banyak digunakan dalam sel surya. Bahan semikonduktor adalah bahan padat seperti logam yang elektron valensinya menentukan konduktivitas listriknya. Ketika foton dari sumber cahaya menghasilkan elektron valensi dalam atom semikonduktor, konduktivitas material meningkat secara dramatis, membuatnya cukup besar untuk memisahkan elektron, apapun strukturnya.



Gambar 2. 1 Prinsip Kerja Sel Surya (Jalil, 2016)

Elektron yang dilepaskan membawa muatan negatif, memungkinkannya bergerak bebas melintasi bidang kristal dan masuk ke wilayah konduksi bahan semikonduktor. Hilangnya elektron ini menyebabkan kondisi kekosongan yang mengakibatkan wilayah bermuatan positif dalam struktur kristal yang disebut *hole*. Elektron bebas dan bermuatan negatif di daerah semikonduktor bertindak sebagai donor elektron tipe negatif adalah nama yang diberikan untuk posisi ini (tipe-n). Sedangkan daerah semikonduktor padat mempunyai *hole* positif yang berfungsi

sebagai akseptor elektron wilayah ini disebut tipe positif (tipe-p). Ikatan anoda dan katoda menghasilkan energi listrik internal yang akan menyebabkan elektron bebas dan hole bergerak berlawanan arah. Elektron akan menjauh dari sisi negatif, sedangkan *hole* akan menjauh dari sisi positif kondisi ini disebut *p-n junction*. Ketika titik *p-n junction* secara seri dengan beban, maka akan timbul arus listrik (Jalil, 2016)

Panel surya mudah dirawat karena tidak memiliki bagian yang bergerak tetapi hal yang perlu diperhatikan adalah memastikan untuk menghilangkan apapun yang mungkin menghalangi sinar matahari mencapainya, sehingga mengakibatkan biaya pemeliharaan rendah tetapi biaya awal dan penggantian komponen yang tinggi dengan umur sel surya umumnya sekitar 25 tahun serta kelemahan sel surya sendiri terletak pada tingkat efisiensinya yang berkisar antara 12 hingga 18%. (Septiadi et al., 2009)

Satuan watt-peak adalah satuan daya (W_p) yang dapat dihasilkan oleh modul fotovoltaik pada kondisi pengujian standar (STC) atau jumlah energi yang dihasilkan pada kondisi emisi standar 1 kW/m^2 dan suhu panel 25°C di HOMER *Energy*, ukuran susunan fotovoltaik ditentukan oleh daya yang ingin dihasilkan.

2.1.2 Potensi Tenaga Surya

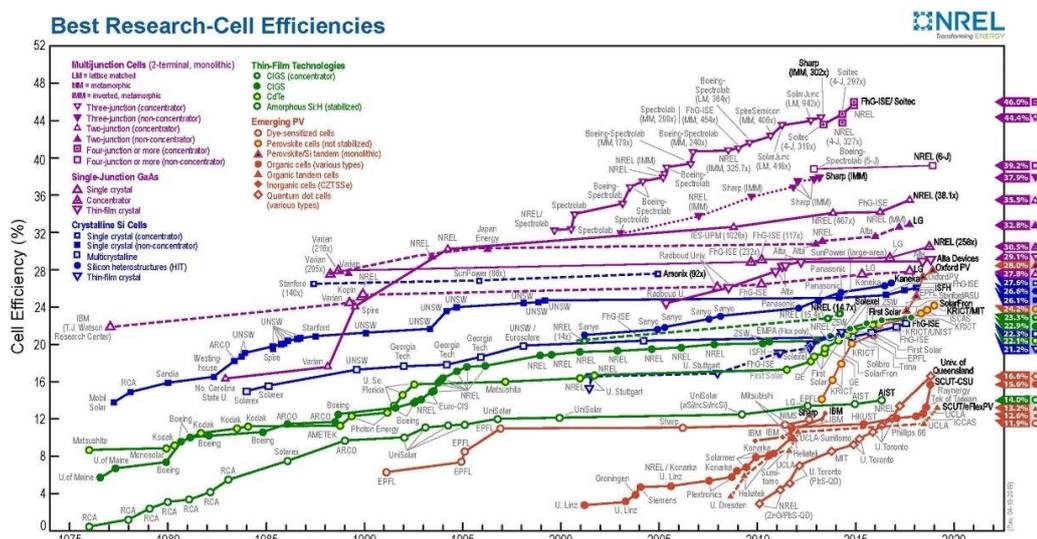


Gambar 2. 2 Potensi Energi Matahari di Indonesia (Solargis)

Potensi tenaga surya di Indonesia sangat besar karena negara ini terletak di kawasan tropis dengan sinar matahari sepanjang tahun. Dengan intensitas sinar matahari yang tinggi, Indonesia memiliki potensi untuk menghasilkan energi listrik melalui panel surya secara efisien. Penggunaan tenaga surya dapat membantu mengurangi ketergantungan pada sumber energi fosil dan mengurangi emisi gas rumah kaca yang menyebabkan perubahan iklim. Selain itu, PLTS memungkinkan akses energi yang lebih baik di daerah terpencil.

2.1.3 Kualitas dan Efisiensi PV

Kualitas dan efisiensi panel surya (PV) merujuk pada kemampuannya dalam mengubah energi matahari menjadi Listrik, efisiensi diukur sebagai rasio antara energi listrik yang dihasilkan oleh panel surya dengan energi matahari yang diterimanya.



Gambar 2. 3 Perkembangan Efisiensi PV dari Tahun 1975 sampai 2020 (Hiron et al., 2021)

Jenis sel surya yang digunakan memainkan peran kunci dalam menentukan efisiensi. Sel surya monokristalin, misalnya, cenderung memiliki efisiensi lebih tinggi dibandingkan dengan sel polikristalin atau film tipis. Sel surya baru yang terus dikembangkan, seperti sel surya perovskite.

Efisiensi dipengaruhi oleh desain dan teknologi produksi panel surya, inovasi dalam peningkatan konduktivitas listrik, pengurangan refleksi cahaya matahari yang hilang, dan pengurangan resistansi internal dapat meningkatkan performa secara keseluruhan, faktor lain yang penting adalah manajemen panas karena jika panel surya panas berlebih dapat mengalami penurunan efisiensi. Gambar 2.3 menunjukkan perkembangan penelitian panel surya atau fotovoltaik dari tahun 1975 hingga 2020 oleh *National Renewable Energy Laboratory* (NREL). Perkembangan modul surya telah mengalami kemajuan besar sejak tahun 1975. Dimulai dengan tipe film tipis dengan efisiensi kurang dari 10%, diikuti oleh tipe sel kristal Si dengan efisiensi 15% (1977), tipe PV *multi-junction* dengan efisiensi lebih dari 16% (1977, 1983), dan PV dengan efisiensi 5% (1991). Pada tahun 2015, seluruh efisiensi PV meningkat. PV sel *multijunction* tipe khusus (*trijunction concentrator*) mencapai 46%.

2.1.4 Konfigurasi PV Array

Konfigurasi susunan PV mengacu pada cara modul fotovoltaik (PV) dihubungkan untuk membentuk susunan surya. Konfigurasi ini dapat berdampak signifikan terhadap kinerja array dalam berbagai kondisi pengoperasian, khususnya dalam kondisi naungan parsial (PSC). Berikut adalah jenis konfigurasi array PV:

1. Konfigurasi Seri:

Dalam konfigurasi ini, beberapa modul PV dihubungkan secara seri untuk membentuk sebuah string. Tegangan keluaran adalah jumlah tegangan masing-masing modul, sedangkan arus keluaran sama dengan arus satu modul. Keuntungan dari konfigurasi ini Sederhana untuk diterapkan, tidak ada koneksi yang berlebihan, dan mudah dirawat. Kekurangan dari konfigurasi ini Jika satu modul diarsir, seluruh rangkaian akan terpengaruh, menyebabkan *output* daya berkurang.

2. Konfigurasi Seri-Paralel:

Konfigurasi ini melibatkan menghubungkan beberapa string secara seri dan kemudian menghubungkan string tersebut secara paralel. Pengaturan ini memungkinkan koneksi seri dan paralel, sehingga memberikan lebih banyak fleksibilitas. Keuntungan dari konfigurasi ini Toleransi yang lebih baik terhadap naungan, *output* daya lebih tinggi, dan perawatan lebih mudah. Kekurangan dari konfigurasi ini Lebih rumit untuk diterapkan dan dipelihara dibandingkan dengan konfigurasi seri.

3. Konfigurasi *Honeycomb* (HC):

Dalam konfigurasi ini, modul PV disusun dalam pola sarang lebah, dengan setiap modul dihubungkan ke tetangganya secara seri dan paralel. Keuntungan dari konfigurasi ini *output* daya tinggi, toleransi yang baik terhadap bayangan, dan penggunaan ruang yang efisien. Kekurangan dari konfigurasi ini Lebih rumit untuk diterapkan dan dipelihara dibandingkan dengan konfigurasi seri.

4. Konfigurasi *Total Cross-Tied* (TCT):

Konfigurasi ini melibatkan modul PV yang diikat silang untuk memastikan bahwa setiap baris dan kolom memiliki tegangan dan arus yang sama. Keuntungan dari konfigurasi ini *output* daya tinggi, toleransi yang baik terhadap bayangan, dan penggunaan ruang yang efisien. Kekurangan dari konfigurasi ini Lebih rumit untuk diterapkan dan dipelihara dibandingkan dengan konfigurasi seri.

Konfigurasi susunan panel surya memainkan peran penting dalam memitigasi dampak naungan parsial pada susunan panel surya. Performa berbagai konfigurasi dalam berbagai kondisi naungan sangat penting dalam menentukan konfigurasi terbaik untuk keluaran daya optimal. Penelitian telah berfokus pada pemodelan dan simulasi kinerja konfigurasi yang berbeda dalam kondisi naungan yang berbeda, seperti kondisi naungan pendek dan sempit, pendek dan lebar, panjang dan sempit, serta panjang dan lebar (Triyanto et al., 2023). Perhitungan luas fotovoltaik array akan dihitung menggunakan persamaan 2.2

$$PV\ Area = \frac{EL}{G_{av} \times \eta_{PV} \times \eta_{out}} \quad (2.2)$$

Di mana:

EL = Konsumsi Energi (kWh/hari).

G_{av} = Rata-rata Insolasi Matahari Harian (kWh/m²/hari).

η_{PV} = Efisiensi Panel Surya

η_{out} = Efisiensi Inverter

Di mana Perhitungan jumlah panel surya yang dibutuhkan adalah dihitung dengan rumus berikut.

$$\text{Number of Solar Panels} = \frac{EL}{P_{pv}} \quad (2.3)$$

Di mana:

$P_{Watt\ peak}$ = Tenaga yang dihasilkan

$PMPP$ = Daya keluaran maksimum panel surya (W)

Perhitungan jumlah modul yang disusun seri atau paralel menggunakan persamaan berikut.

$$R. \text{ Seri Minimum} = \frac{V_{\text{Min Inverter}}}{V_{\text{oc Modul}}} \quad (2.4)$$

$$R. \text{ Seri Maximum} = \frac{V_{\text{Max Inverter}}}{V_{\text{mp Modul}}} \quad (2.5)$$

$$R. \text{ Paralel} = \frac{I_{\text{Max Inverter}}}{I_{\text{mp Modul}}} \quad (2.6)$$

Pemilihan konfigurasi rangkaian PV sangat penting dalam memastikan keluaran daya optimal dari rangkaian surya, terutama dalam kondisi naungan parsial. Dengan memahami kelebihan dan kekurangan konfigurasi yang berbeda dan menganalisis kinerjanya dalam berbagai kondisi bayangan, konfigurasi terbaik dapat dipilih untuk aplikasi tertentu. Pengetahuan ini penting untuk desain dan implementasi sistem tenaga surya yang efisien

2.1.5 Peak Sun Hour

Puncak jam matahari, atau *peak sun hour* (PSH), merujuk pada periode waktu dalam sehari ketika sinar matahari mencapai intensitas maksimumnya di suatu lokasi tertentu. PSH merupakan parameter penting dalam perencanaan sistem pembangkit energi surya, karena PSH menunjukkan lama waktu kinerja panel surya dapat menghasilkan daya maksimum. Berdasarkan HOMER *energy peak sun hour* dapat dihitung dengan pendekatan rumus berikut :

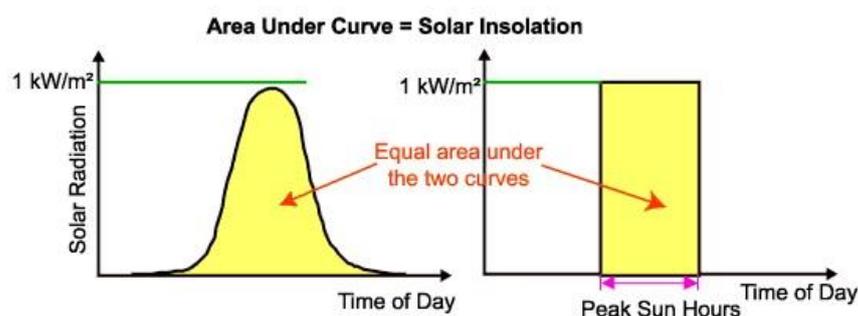
$$PSH = \frac{Gr}{Gr, stc} \quad (2.7)$$

Dimana

PSH = Peak Sun Hour (Jam)

Gr = Radiasi Matahari pada PV dalam satu hari (kW/m²)

Gr, stc = Radiasi Pada kondisi standar (1 Kw/m², T = 25°C)



Gambar 2. 4 Ilustrasi *Peak Sun Hours* (Megantoro et al., 2022)

Sinar matahari tidak selalu konstan sepanjang hari. Oleh karena itu, PSH memberikan gambaran tentang waktu yang optimal untuk mengumpulkan energi matahari. Di daerah dengan cuaca yang bersahabat terhadap energi surya, PSH

biasanya lebih tinggi, yang berarti periode waktu dengan intensitas sinar matahari yang kuat lebih lama.



Gambar 2. 5 Kemiringan Optimal PV di Indonesia (Solargis)

Perhitungan PSH melibatkan faktor-faktor seperti lokasi geografis, elevasi, dan keadaan cuaca. Informasi ini sangat penting dalam merancang sistem energi surya yang efisien dan dapat memberikan perkiraan yang akurat tentang seberapa banyak energi yang dapat dihasilkan oleh panel surya selama periode tertentu. Dengan memahami PSH dapat mengoptimalkan kinerja sistem energi surya untuk meningkatkan efisiensi dan produktivitasnya (Megantoro et al., 2022).

2.1.6 Kebijakan Pemerintah Tentang PLTS

Kebijakan pemerintah tentang PLTS yang masih berlaku :

1. Peraturan Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral Nomor 26 Tahun 2021 Tentang Pembangkit Listrik Tenaga Surya Atap yang Terhubung Pada Jaringan Tenaga Listrik Pemegang Izin Usaha Penyediaan Tenaga Listrik untuk Kepentingan Umum.

2. Peraturan Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral Nomor 16 Tahun 2019 Tentang Perubahan Kedua Atas Peraturan Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral Nomor 49 Tahun 2018 Tentang Penggunaan Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya Atap Oleh Konsumen Pt Perusahaan Listrik Negara (persero).
3. Peraturan Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral Nomor 13 Tahun 2019 Tentang Perubahan Atas Peraturan Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral Nomor 49 Tahun 2018 Tentang Penggunaan Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya Atap Oleh Konsumen Pt Perusahaan Listrik Negara (persero).
4. Peraturan Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral Nomor 49 Tahun 2018 Tentang Penggunaan Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya Atap Oleh Konsumen Pt Perusahaan Listrik Negara (persero).
5. Peraturan Menteri Perindustrian Nomor 04/m-ind/per/2/2017 Tahun 2017 Tentang Ketentuan dan Tata Cara Penilaian Tingkat Komponen dalam Negeri untuk Pembangkit Listrik Tenaga Surya.
6. Peraturan Menteri Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat Nomor 09/prt/m/2017 Tahun 2017 Tentang Tata Cara Pemilihan Badan Usaha Sebagai Mitra Pemanfaatan Barang Milik Negara dalam Rangka Penyediaan Infrastruktur untuk Pembangkit Listrik Tenaga Air/pembangkit Listrik Tenaga Minihidro/pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro/pembangkit Listrik Tenaga Surya dengan Mekanisme Sewa.

2.2 Pembangkit Listrik Tenaga Angin atau Bayu (PLTB)

Pembangkit listrik tenaga bayu atau angin merupakan pembangkit energi listrik yang mengubah energi kinetik angin menjadi energi mekanik melalui turbin dan diubah kembali menjadi energi listrik oleh generator dengan kecepatan angin yang memutar turbin. Dengan bentuk ini diharapkan energi angin yang ditangkap bisa maksimal sehingga bobotnya lebih ringan. Baling-baling ini biasanya terbuat dari bahan *fiberglass* atau komposit. HOMER *Energy* menghitung kecepatan angin menggunakan persamaan 2.2 :

$$(P) = \frac{1}{2} \times \rho \times V^3 \times A \times \eta \quad (2.8)$$

Dimana :

P = Daya (watt)

ρ = Massa jenis angin (1.225 kg/m³)

V = Kecepatan angin (m/s)

A = Luas penampang

η = Efisiensi (%)

Sistem PLTB (Pembangkit Listrik Tenaga Bayu) terdiri dari penggabungan beberapa turbin angin di suatu area yang biasa disebut ladang angin dan kemudian menghasilkan listrik untuk unit distribusi listrik. Listrik disalurkan melalui kabel transmisi dan didistribusikan ke beban. Turbin angin memiliki 2 hingga 5 bilah, Mekanisme pembangkitan tenaga listrik secara berurutan yang pertama pada turbin angin adalah angin akan memutar sudu-sudu, dan sudu-sudu tersebut akan memutar poros yang terhubung dengan generator sehingga menghasilkan listrik, kemudian energi listrik tersebut akan dialirkan ke generator. Tegangan kemudian

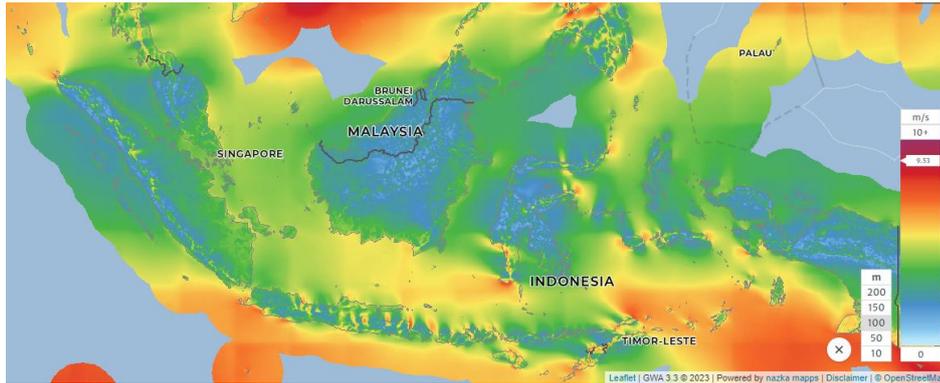
didistribusikan ke beban. Umur operasional PLTB biasanya diperkirakan berkisar antara 20 hingga 25 tahun dengan biaya pemeliharaan PLTB lebih tinggi daripada PLTS karena turbin angin memiliki baling-baling yang berputar dan sistem mekanis yang dapat mengalami keausan (Yuaniarti N, 2019).

2.2.1 Prinsip Kerja Turbin

Sistem PLTB (Pembangkit Listrik Tenaga Bayu/Angin) terdiri dari penggabungan beberapa turbin angin di suatu area yang biasa disebut kebun PLTB dan kemudian menghasilkan listrik untuk unit distribusi listrik. Listrik disalurkan melalui kabel transmisi dan didistribusikan ke beban. Turbin angin memiliki 2 hingga 5 bilah, jenis ini umum digunakan di banyak negara yang menggunakan energi angin. Mekanisme pembangkitan tenaga listrik secara berurutan yang pertama pada turbin angin adalah angin akan memutar sudu-sudu, dan sudu-sudu tersebut akan memutar poros yang terhubung dengan generator sehingga menghasilkan listrik. (Yuaniarti N, 2019)

2.2.2 Potensi Tenaga Angin atau Bayu

Potensi Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB) di Indonesia sangat besar karena dengan iklim tropis dan topografi yang beragam, Indonesia memiliki sejumlah wilayah yang memiliki kecepatan angin yang cukup tinggi, terutama di daerah pesisir dan pegunungan. Keberagaman ini menciptakan peluang besar untuk mengembangkan PLTB yang efisien dan berkelanjutan.



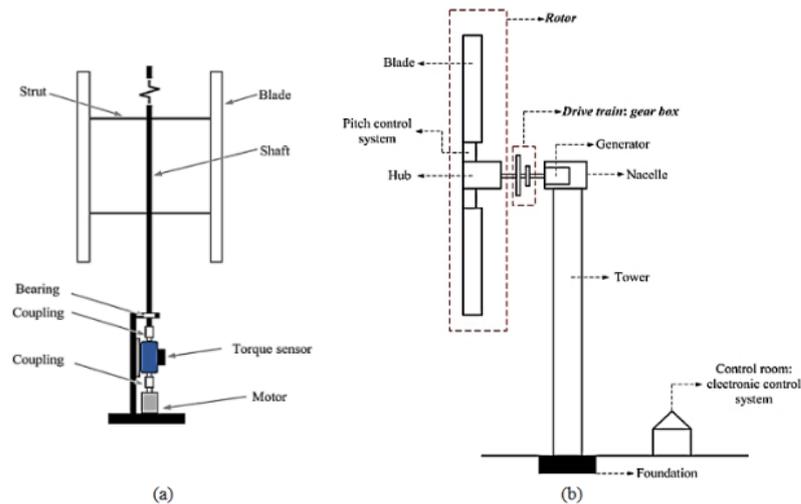
Gambar 2. 6 Potensi Kecepatan Angin di Indonesia (DTU)

Pengembangan PLTB di Indonesia dapat menjadi solusi yang strategis untuk meningkatkan kapasitas energi terbarukan dan mengurangi ketergantungan pada sumber energi fosil. Dengan pemanfaatan teknologi terkini dalam bidang turbin angin dan sistem penyimpanan energi. Indonesia memiliki potensi maritim yang besar dengan ribuan pulau, dan PLTB lepas pantai menjadi pilihan yang layak untuk dipertimbangkan pemanfaatannya.

2.2.3 Jenis Turbin Angin

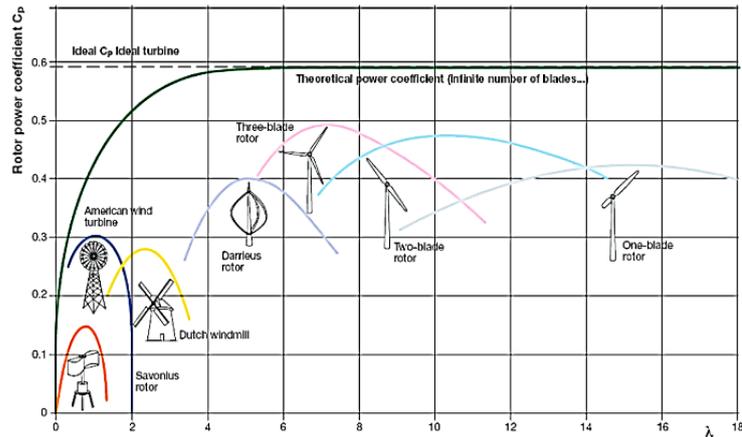
Berdasarkan jenis porosnya turbin angin dibedakan menjadi dua jenis yaitu Turbin Angin Horizontal (*Horizontal Axis Wind Turbine/HAWT*) dan Turbin Angin Sumbu Vertikal (*vertical Axis Wind Turbine/VAWT*). HAWT merupakan jenis turbin angin yang poros utamanya berputar searah dengan arah angin. Agar rotor dapat berputar dengan benar maka arah angin harus sejajar dengan sumbu turbin dan tegak lurus dengan arah putaran rotor. Biasanya turbin jenis ini memiliki bilah berbentuk *airfoil*, mirip dengan bentuk sayap pesawat terbang. Secara umum semakin banyak jumlah sudu maka putaran turbin akan semakin besar. Setiap desain rotor memiliki kelebihan dan kekurangan. Keunggulan turbin jenis HAWT adalah efisiensinya yang tinggi dan kecepatan start angin yang rendah.

Kekurangannya adalah turbin angin jenis ini memiliki desain yang lebih kompleks karena rotornya hanya mampu mengumpulkan angin dalam satu arah sehingga diperlukan pengontrol angin.



Gambar 2. 7 Struktur Turbin Jenis HAWT dan VAWT (Al-Rawajfeh & Gomaa, 2023)

VAWT merupakan turbin angin sumbu vertikal yang pergerakan poros dan sudunya sejajar dengan arah angin sehingga rotor dapat berputar ke segala arah angin. VAWT juga memiliki beberapa keunggulan dan kekurangan. Keunggulannya adalah memiliki torsi yang tinggi sehingga dapat berputar pada kecepatan angin rendah. Generator dapat ditempatkan di bagian bawah turbin, sehingga memudahkan perawatan dan memungkinkan turbin beroperasi tanpa terpengaruh oleh arah angin. Kekurangannya adalah kecepatan angin di bagian bawah sangat rendah sehingga jika tower tidak digunakan akan menghasilkan putaran yang rendah dan efisiensi yang lebih rendah dibandingkan HAWT. (Paraschivoiu et al., 2018)



Gambar 2. 8 Koefisien Rotor Turbin Terhadap Rasio Kecepatan Ujung Sudu (Al-Rawajfeh & Gomaa, 2023)

Sumbu Y menunjukkan daya, atau jumlah energi yang diambil turbin dari angin dan secara efektif mengubahnya menjadi energi listrik. Pada kondisi terbaik, persentasenya tidak melebihi 60%, dan nilai tertinggi diberikan sebagai batasnya, yaitu 0,59. Faktor kinerja juga bergantung pada jumlah sudu, jenis turbin, dan keluaran daya. Gambar tersebut juga menunjukkan bahwa HAWT secara umum lebih baik dalam menghasilkan energi dari angin dibandingkan dengan VAWT.

Sumbu X menunjukkan rasio kecepatan ujung adalah kecepatan putaran ujung sudu relatif terhadap kecepatan angin non-turbulen yang mengalir melalui turbin ini sesuai dengan geometri turbin HAWT modern dengan rasio kecepatan yang besar, sehingga memudahkan pemilihan lokasi pembangunan turbin angin dan mengurangi jumlah bilah. Dalam penentuan turbin juga harus memperhatikan kecepatan minimal dan maksimal yang dapat dikonversi menjadi energi listrik yang sesuai dengan potensi kecepatan angin yang terdapat pada lokasi pembangunan.

2.2.4 Komponen Turbin

Ada beberapa komponen penting penyusun turbin angin yaitu sebagai berikut:

1. *Bearing*

Bearing atau bantalan adalah komponen mekanik yang digunakan untuk mengurangi gesekan antara dua permukaan yang bergerak satu sama lain. Fungsi utama bearing adalah mendukung beban dan memungkinkan gerakan relatif antara dua komponen. Bantalan dapat ditemukan dalam berbagai aplikasi mesin dan peralatan, termasuk mesin industri, kendaraan, dan peralatan rumah tangga.

2. *Coupling*

Kopling digunakan sebagai koneksi atau penghubung antara berbagai komponen dalam sistem turbin angin. Kopling ini penting untuk mentransfer energi dari rotor atau bilah turbin ke generator atau sistem transmisi.

3. *Blade*

Blade pada Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB) adalah bagian penting yang berperan dalam menangkap energi angin dan mengubahnya menjadi energi mekanis. *Blade* ini biasanya terpasang pada rotor turbin angin dan memiliki desain aerodinamis untuk memaksimalkan penangkapan angin.

4. *Shaft*

Shaft Pada Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB) adalah poros yang berfungsi sebagai penghubung antara rotor atau hub turbin angin dengan generator atau *gearbox*. *Shaft* berperan dalam menghantarkan energi mekanis

yang dihasilkan oleh turbin angin menjadi energi listrik atau energi mekanis lainnya

5. *Torque sensor*

Torque sensor pada Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB) adalah perangkat yang digunakan untuk mengukur torsi atau momen putar yang dihasilkan oleh rotor atau bilah-bilah turbin angin. Pengukuran torsi sangat penting dalam monitoring dan kontrol operasional PLTB karena memberikan informasi tentang kinerja turbin angin.

6. *Pitch control system*

Pitch control system atau sistem kendali sudut *pitch* pada Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB) merujuk pada teknologi yang digunakan untuk mengatur sudut atau kemiringan bilah-bilah turbin angin terhadap arah angin. Sistem ini memungkinkan penyesuaian otomatis terhadap sudut bilah-bilah untuk mengoptimalkan kinerja turbin angin dalam berbagai kondisi angin.

7. *Hub*

Hub pada Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB) adalah bagian pusat dari turbin angin dimana bilah-bilah turbin terhubung dan dihubungkan dengan poros rotor. *Hub* berfungsi sebagai struktur penghubung yang mendukung dan mengintegrasikan bilah-bilah turbin, memungkinkan gerakan rotasi dari turbin angin diubah menjadi energi mekanis yang kemudian dapat diubah menjadi energi listrik oleh generator.

8. Rotor

Rotor pada Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB) merujuk pada bagian turbin angin yang berputar dan menangkap energi kinetik dari angin

untuk menghasilkan gerakan rotasi. Rotor biasanya terdiri dari bilah-bilah yang dipasang pada hub dan dirancang secara aerodinamis untuk menangkap sebanyak mungkin energi dari aliran angin.

9. *Gearbox*

Gearbox atau kotak gigi pada Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB) adalah komponen penting yang terletak di antara rotor turbin angin dan generator. Fungsi utama *gearbox* adalah mengubah kecepatan rotasi yang dihasilkan oleh rotor (yang berputar dengan kecepatan rendah) menjadi kecepatan yang sesuai untuk menghasilkan daya listrik dengan efisien di generator (yang membutuhkan kecepatan tinggi).

10. Generator

Generator pada Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB) adalah perangkat yang mengubah energi mekanis dari rotor turbin angin menjadi energi listrik. Fungsi utama generator adalah menghasilkan arus listrik yang dapat digunakan untuk pasokan daya listrik ke jaringan atau sistem penyimpanan energi.

11. *Nacelle*

Nacelle pada Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB) adalah struktur yang terletak di puncak menara turbin angin dan berfungsi sebagai tempat untuk menempatkan berbagai komponen kritis yang terlibat dalam menghasilkan energi listrik. *Nacelle* biasanya dirancang untuk melindungi dan menahan berbagai peralatan, termasuk rotor, gearbox, generator, dan sistem kendali.

12. Tower

Menara pada Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB) adalah struktur yang mendukung turbin angin dan biasanya berfungsi sebagai tempat tinggal bagi komponen kunci seperti rotor dan bilah-bilah turbin. Menara turbin angin memiliki peran penting dalam mengangkat turbin ke ketinggian yang optimal untuk menangkap energi angin dengan efisien.

13. *Foundation*

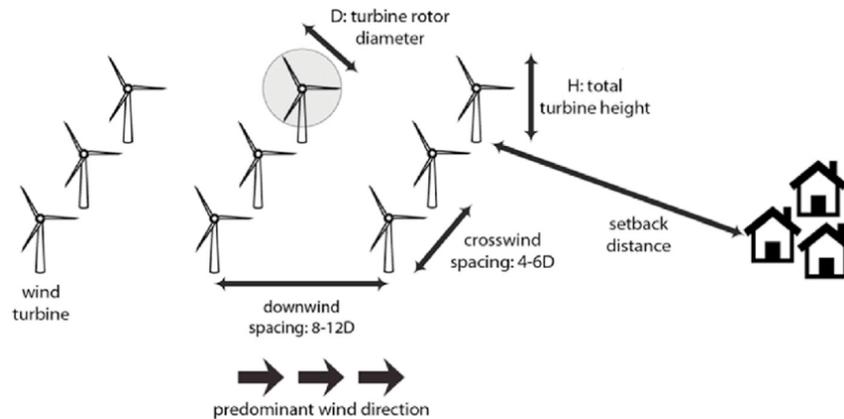
Foundation atau pondasi pada Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB) adalah struktur yang menopang dan menjaga kestabilan menara turbin angin. Pondasi ini memainkan peran kunci dalam mendistribusikan beban dari menara dan turbin angin ke tanah, sehingga harus dirancang dengan cermat untuk memastikan kekuatan dan stabilitas yang memadai.

14. *Electro control system*

Sistem kontrol elektronik pada Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB) atau *electro control system* adalah bagian integral dari sistem keseluruhan yang mengendalikan dan mengelola operasi turbin angin. Sistem ini menggunakan teknologi elektronik untuk memantau, mengoptimalkan, dan mengatur kinerja turbin angin.

2.2.5 Jarak dan Layout Turbin

Pengaturan jarak dan layout turbin angin sangat penting untuk memaksimalkan efisiensi dan kinerja dari pembangkit listrik tenaga angin.



Gambar 2. 9 Skema Jarak Turbin (McKenna et al., 2022)

Beberapa faktor perlu dipertimbangkan dalam merancang layout turbin angin yaitu :

5. Jarak Antar Turbin

Jarak antar turbin harus mencakup aspek aerodinamika dan efek bayangan. Turbin yang terlalu dekat dapat mengurangi kinerja karena saling mempengaruhi aliran udara. Jarak antar turbin disesuaikan dengan tinggi turbin tersebut. Sebagai pedoman umum, jarak antar turbin sebaiknya setidaknya 4 hingga 12 kali diameter rotor turbin.

6. Arah dan Kecepatan Angin

Layout harus mempertimbangkan arah dan kecepatan angin di lokasi tersebut. Turbin harus diatur agar menghadap arah angin yang paling dominan. Kecepatan angin yang bervariasi di sepanjang area pembangkit juga perlu dipertimbangkan untuk mendapatkan distribusi daya yang seimbang.

7. Topografi dan Penghalang

Topografi lahan seperti bukit, lembah, atau vegetasi dapat mempengaruhi pola angin. Ini perlu diperhitungkan dalam merencanakan penempatan turbin. Hindari

penghalang seperti gedung atau pohon tinggi yang bisa mengganggu aliran udara ke turbin.

8. Ketersediaan Lahan

Layout juga perlu mempertimbangkan ketersediaan lahan dan batasan-batasan lokal, seperti peraturan tata ruang dan lingkungan.

9. Kondisi Tanah

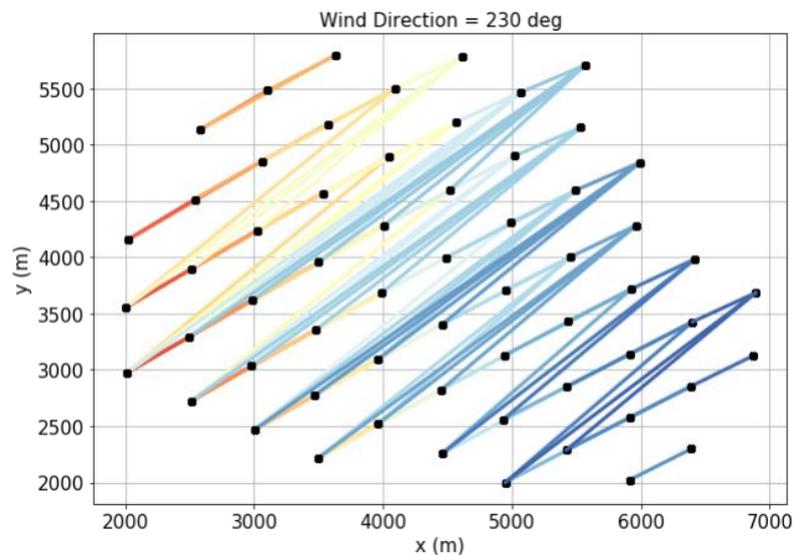
Kondisi tanah, seperti jenis tanah dan kemiringan, dapat mempengaruhi instalasi dan stabilitas turbin.

10. Manajemen Bayangan

Hindari penempatan turbin di sepanjang jalur bayangan, yang dapat mengurangi kinerja turbin-turbin di belakangnya.

11. Kepadatan Daya yang Diinginkan

Tentukan kepadatan daya yang diinginkan untuk mendapatkan *output* energi yang optimal. Ini melibatkan penyesuaian jumlah turbin dalam suatu area.



Gambar 2. 10 Optimasi Layout Turbin Angin (Annoni et al., 2019)

2.3 Perbandingan PLTS dan PLTB

PLTS (Pembangkit Listrik Tenaga Surya) dan PLTB (Pembangkit Listrik Tenaga Bayu) memiliki perbedaan dalam komponen dan prinsip kerja. Berikut adalah perbandingan (Komrit & Zabihian, 2023):

1. Konversi Energi

PLTS Proses konversi energi dari matahari ke listrik melalui efek fotovoltaiik tanpa perlu pergerakan mekanis. Sedangkan PLTB Memerlukan konversi energi dari gerakan angin menjadi energi mekanik melalui turbin, baru kemudian diubah menjadi energi listrik.

2. Ketersediaan Energi

Ketersediaan energi tergantung pada sinar matahari, sehingga performanya dapat dipengaruhi oleh cuaca dan waktu sedangkan PLTB Bergantung pada kecepatan dan konsistensi angin, sehingga performanya dipengaruhi oleh kondisi angin di lokasi tersebut.

3. Kapasitas dan Skalabilitas

PLTS Lebih cocok untuk aplikasi skala kecil hingga menengah, tetapi dapat diintegrasikan dan di-skalakan sesuai kebutuhan. Sedangkan PLTB Dapat mencapai kapasitas yang lebih besar dan cocok untuk pembangkitan listrik skala besar.

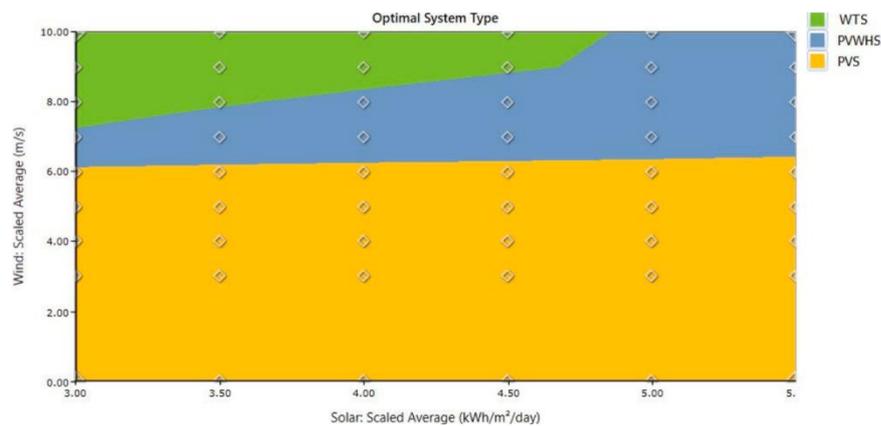
4. Penempatan dan Desain Struktur

PLTS Bisa dipasang di atap bangunan, lahan terbuka, atau struktur tanah. Desain struktur harus mendukung panel surya untuk mendapatkan paparan matahari

optimal. sedangkan PLTB Memerlukan desain struktur khusus untuk menempatkan turbin angin pada ketinggian yang optimal, biasanya di daerah terbuka atau di perairan lepas pantai.

5. Biaya Investasi dan Operasional dan Modal

PLTS Umumnya memiliki biaya investasi yang lebih rendah dibandingkan PLTB. Biaya operasional dan pemeliharaan (O&M) biasanya lebih terkendali. Sedangkan PLTB Memiliki biaya investasi yang lebih tinggi, terutama karena turbin angin dan struktur pendukungnya. Biaya O&M dapat bervariasi tergantung pada lokasi dan perawatan yang diperlukan.

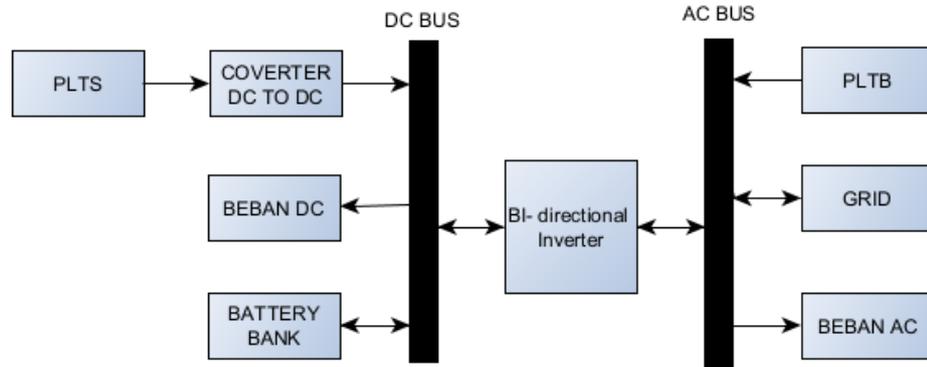


Gambar 2. 11 Optimalisasi Sistem PLTS dan PLTB Berdasarkan Potensi (Komrit & Zabihian, 2023)

2.4 Metode Integrasi Pembangkit Listrik

Sistem pembangkit listrik metode integrasi PLTS dan PLTB adalah sistem yang menggabungkan dua sumber energi berbeda untuk menghasilkan listrik. Tujuan dari sistem ini adalah untuk meningkatkan keandalan pasokan listrik dan memaksimalkan efisiensi energi dengan memanfaatkan berbagai sumber energi yang tersedia, dalam konfigurasi ini penting juga menentukan karakteristik beban.

Berikut konfigurasi pembangkit Listrik metode integrasi PLTS dan PLTB (Nur Azizah Ana, 2021)



Gambar 2. 12 Metode Integrasi PLTS dan PLTB

2.5 Stasiun Pengisian Mobil listrik

Stasiun pengisian mobil listrik adalah sistem instalasi yang dirancang khusus untuk mengisi baterai mobil listrik. Fungsinya mirip dengan stasiun pengisian bahan bakar fosil konvensional, namun fokus pada penyediaan tenaga listrik untuk mobil bertenaga baterai (Hidayat et al., 2021).

2.5.1 Konsep Pengisian Baterai

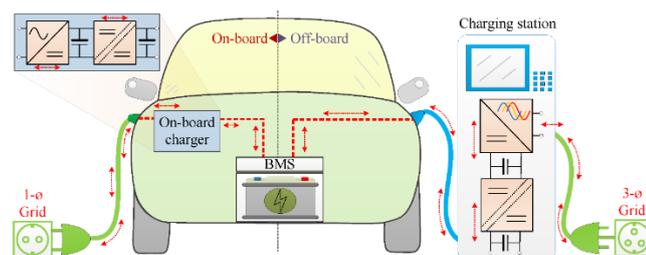
Satu siklus pengisian penuh (*Cycle Charge*) yaitu pengisian daya baterai dari 0% - 100%, ada dua istilah untuk pengisian baterai yaitu pengisian arus konstan dan pengisian tegangan konstan. Pengisian arus konstan adalah suatu kondisi di mana pengisi daya memberikan arus pengisian yang konstan selama jangka waktu tertentu hingga baterai mencapai nilai tegangan tertentu. Sebaliknya pengisian tegangan konstan berarti tegangan baterai telah mencapai batas tegangan tertentu ketika arus konstan dihasilkan, dan dalam keadaan ini tegangan baterai

dipertahankan hingga baterai terisi hampir nol. Saat mengisi baterai dengan tegangan konstan, ada empat tahap:

1. Pengisian massal (arus konstan meningkatkan tegangan baterai) adalah fase di mana tegangan baterai meningkat ketika arus konstan diterapkan.
2. Penyerapan (tegangan baterai konstan dan arus pengisian menurun) adalah tahap ketika baterai hampir penuh (75% hingga 80%). Selama tahap ini, baterai diisi dengan arus yang lebih rendah hingga hampir terisi penuh.
3. Penyeimbangan (arus pengisian konstan, tegangan baterai meningkat) adalah fase yang biasanya dilakukan untuk menyamakan tegangan antar sel baterai.

Pengisian, penyerapan, tegangan pemerataan, dan tegangan pemacu bervariasi berdasarkan jenis baterai dan biasanya ditentukan dalam spesifikasi baterai.

2.5.2 Metode *Charging* Mobil Listrik



Gambar 2. 13 Topologi Sistem *Charging* Mobil Listrik (Anekan J, 2022)

Metode *charging* mobil Listrik adalah cara atau tindakan sistematis yang digunakan untuk mengisi daya mobil listrik yang dapat dibedakan menjadi dua metode yaitu *on board* dan *off board*, berikut adalah penjelasan dari dua metode pengisian mobil listrik (Savio et al., 2019) :

1. *Charging On-board*

Metode pengisian daya mobil listrik di mana komponen yang diperlukan untuk mengubah listrik menjadi energi yang dapat digunakan oleh mobil berada di dalam mobil itu sendiri. Ini berarti mobil listrik memiliki baterai dan peralatan pengisian daya yang terintegrasi di dalamnya. Proses pengisian *on-board* ini terjadi ketika mobil terhubung ke sumber daya listrik eksternal, seperti stasiun pengisian listrik atau bisa langsung ke stopkontak rumah. Mobil listrik akan mengonversi listrik yang diterima dari sumber tersebut menjadi energi yang tersimpan di dalam baterai mobil. Dengan kata lain, mobil listrik memiliki perangkat yang memungkinkannya mengisi ulang baterai saat terhubung ke berbagai variasi kondisi sumber daya listrik eksternal.

Keuntungan dari pengisian *on-board* adalah kemudahan dan fleksibilitas, pengguna dapat mengisi ulang baterai mobil di berbagai tempat dengan fasilitas pengisian daya yang sesuai. Mereka tidak perlu bergantung pada stasiun pengisian khusus, karena mobil itu sendiri memiliki peralatan yang dibutuhkan. Ini membuat mobil listrik lebih mudah diintegrasikan ke dalam kehidupan sehari-hari dan mengurangi ketergantungan pada infrastruktur pengisian khusus. Pada metode pengisian mobil listrik ada dua jenis *on board* yaitu *wired charging* dan *wireless charging*.

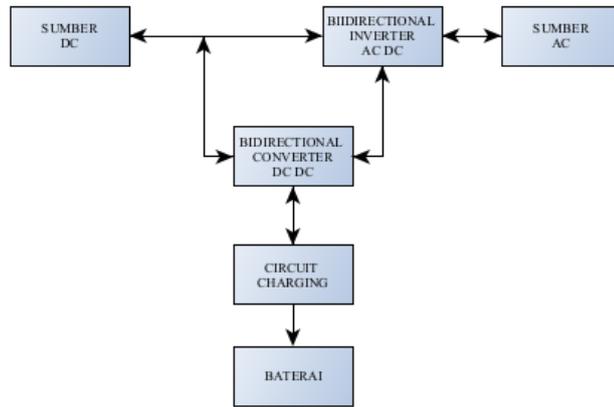
2. *Charging Off-board*

Pengisian mobil listrik *off-board* adalah metode pengisian daya mobil listrik di mana peralatan yang diperlukan untuk mengubah listrik menjadi energi yang dapat digunakan oleh mobil berada di luar mobil, bukan di dalam mobil itu sendiri. Ini berarti mobil listrik mengandalkan sumber daya eksternal untuk mengisi daya

baterainya. Proses pengisian *off-board* ini terjadi ketika mobil listrik terhubung ke stasiun pengisian khusus atau sumber daya listrik eksternal lainnya, dan peralatan di luar mobil yang mengkonversi listrik menjadi energi yang dapat digunakan oleh mobil.

Keuntungan dari pengisian *off-board* adalah kemampuan untuk memberikan pengisian daya yang lebih cepat dan efisien karena peralatan pengisian daya di luar mobil dapat dirancang dengan daya yang lebih tinggi dan teknologi yang lebih canggih. Hal ini juga memungkinkan penggunaan berbagai sumber daya, termasuk sumber daya listrik yang ramah lingkungan seperti panel surya. Namun, pengisian *off-board* memerlukan infrastruktur pengisian yang lebih lengkap dan stasiun pengisian khusus, yang mungkin belum tersedia di semua lokasi. Selain itu, ketergantungan pada sumber daya eksternal dapat menjadi tantangan saat mobilitas yang lebih besar diperlukan.

Dari perbedaan kedua metode bisa dikatakan Perbedaan utama metode *on board* dan *off board* komponen regulator yang didalamnya terdapat alat konversi daya yang berfungsi sebagai pengatur penerimaan arus dari sumber ke beban berikut skema dari komponen regulator pengisian mobil listrik :

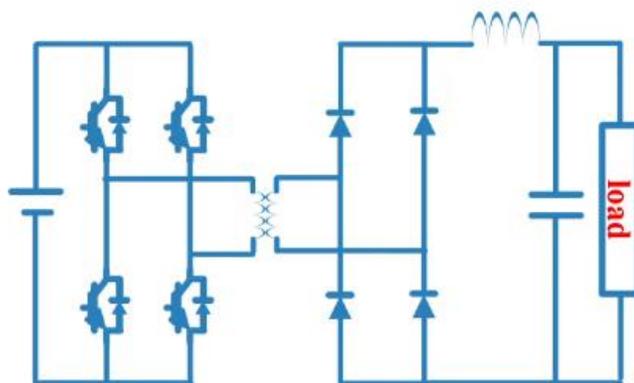


Gambar 2. 14 Skema Regulator Pengisian Baterai

2.5.3 Topologi Pengisian Mobil Listrik DC/DC

Terdapat beberapa struktur atau konfigurasi fisik dan fungsional dari sistem pengisian daya untuk listrik tergantung pada kebutuhan dan lingkungan penggunaannya. Berikut adalah topologi umum pengisian mobil Listrik (Tech Simulator, 2023) :

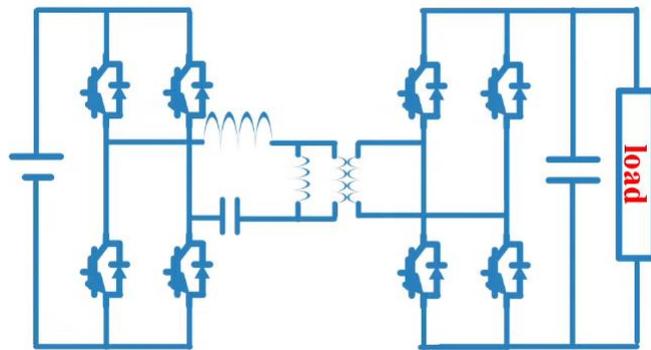
1. *Phase shifted full bridge dc/dc*



Gambar 2. 15 *Phase-Shifted Full-Bridge DC - DC*

Phase-Shifted Full-Bridge (PSFB) DC-DC Converter adalah jenis konverter daya yang memanfaatkan konfigurasi jembatan penuh (*full-bridge*) dan mengatur pergeseran fase antara pulsa-pulsa untuk mengendalikan tegangan keluaran dan meningkatkan efisiensi konversi daya. Kelebihan dari topologi ini adalah tercapainya *Zero Voltage Switched (ZVS)* satu kaki dan penyalan dengan tegangan rendah di kaki lainnya yang mengurangi *losses*.

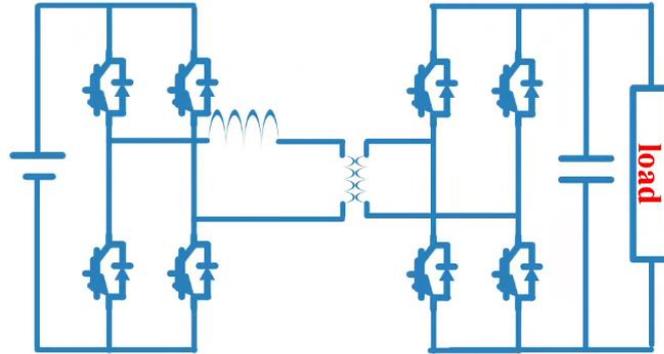
2. *LLC resonant converter*



Gambar 2. 16 LLC Resonant Converter

LLC resonant converter adalah jenis konverter daya yang menggabungkan elemen resonant dengan komponen induktif, kapasitif, dan resistif untuk mencapai efisiensi tinggi dan kinerja yang baik. Nama LLC mengacu pada tiga elemen utama dalam konfigurasi induktor (L), kapasitor (C), dan resonant. Kelebihan dari topologi ini adalah tercapainya *ZVS* saat hidup dan *ZCS (Zero Current Switched)* yang mengakibatkan efisiensi lebih baik daripada topologi PSFB kelemahan dari topologi ini adalah tidak bisa bekerja dengan dua arah.

3. *Dual active bridge*



Gambar 2. 17 *Dual Active Bridge*

Konverter daya yang memanfaatkan dua jembatan aktif (*active bridge*) untuk mengubah tegangan dari satu tingkat ke tingkat yang berbeda. Konverter ini dirancang untuk menyediakan solusi konversi daya yang efisien dan fleksibel, sering digunakan dalam aplikasi yang membutuhkan kontrol yang tinggi dan efisiensi konversi tinggi.

2.5.4 Tipe Pengisian dan Kebutuhan Mobil Listrik

Tipe pengisian ini menentukan kompatibilitas antara kendaraan listrik dan stasiun pengisian. Sebagian besar kendaraan listrik modern memiliki konektor yang bisa diubah-ubah untuk mendukung berbagai jenis stasiun pengisian beberapa tipe pengisian mobil listrik bisa dilihat pada tabel 2.1

Tabel 2. 1 Tipe Pengisian Kendaraan Bermotor Listrik (ESDM, 2020)

Deskripsi	Level 1	Level 2	Level 3	Level 4
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

Deskripsi	Level 1	Level 2	Level 3	Level 4
Daya Keluaran (kW)	3,7	22	50	150
Jenis Konektor	Tipe 1 dan 2 (IEC 62196-2)	Tipe 2 (IEC 62196-2)	Tipe Pengisian Gabungan (<i>Combined Charging type</i>) CSS dan Chademo (IEC 62196-3)	Tipe Pengisian Gabungan (<i>Combined Charging Type</i>) CSS2 dan Chademo (IEC 62196-4)
Waktu Pengisian	8 jam	4 jam	30 - 60 menit	15 - 30 menit

Kebutuhan daya mobil listrik dapat bervariasi tergantung pada preferensi konsumen, jenis kendaraan, dan penggunaannya namun ada 2 faktor utama yang menjadi pertimbangan penting yaitu kapasitas pengisian dan keandalan mesin berikut tabel mobil listrik dengan kapasitas pengisian :

Tabel 2. 2 Kapasitas dan Keandalan Mobil Listrik

Jenis	Kapasitas Baterai (kWh)	Jarak Tempuh (km)	Tegangan (Volt)	Kapasitas Baterai (Ah)
Hyundai IONIQ 5	58	384	800	72,5
Wuling Air EV Long Range	26,5	300	115	230,43
BMW iX	76,6	390	400	191,5
Lexus UX300e	54,3	300	400	135,75
Nissan Leaf	40	311	350	114,28
DFSK Gelora E	42	300	375	112
MINI Electric	32,6	232	360	90,5
Rata Rata	47,14	316,71	400	117,85

2.5.5 Lama Waktu *Charging*

Pengisian baterai merupakan proses yang penting dalam pemakaian kendaraan listrik. Mengetahui lama pengisian baterai bisa membantu mengatur

waktu dan memastikan perangkat siap digunakan saat dibutuhkan. Berikut adalah persamaan untuk menentukan lama pengisian baterai (Scherz & Monk, 2016):

$$h = \frac{Ca}{V \times I} \quad (2.9)$$

Dimana :

h = Lama Pengisian (Jam)

Ca = Kapasitas Baterai (kWh)

V = Tegangan Pengisian (Volt)

I = Arus Pengisian (Ampere)

2.6 Konverter

Konverter daya elektronik modern melayani berbagai aplikasi, termasuk catu daya mode aktif, filter daya aktif, II-33onvert gerak elektromekanik, sistem konversi energi terbarukan, pembangkit II-33onvert terdistribusi, sistem transmisi AC fleksibel, II-33onver otomotif. Konverter daya elektronik dapat ditemukan di mana saja yang memerlukan konversi bentuk energi II-33onvert. Jika elektronik klasik menggunakan arus dan tegangan untuk mentransfer informasi, elektronika daya mentransfer energi (Ali, 2018).

2.6.1 Rectifier

Rectifier dalam II-33onver Indonesia disebut penyearah atau penyearah gelombang, adalah suatu bagian rangkaian yang berfungsi sebagai II-33onverter untuk mengubah sinyal AC (arus bolak-balik) menjadi sinyal DC (arus searah).

Rangkaian penyearah atau penyearah gelombang ini biasanya menggunakan II-34onve sebagai komponen utamanya. Hal ini dikarenakan II-34onve mempunyai karakteristik yang memungkinkan arus mengalir hanya dalam satu arah dan menghalangi arus dalam arah yang berlawanan. Ketika arus bolak-balik (AC) dialirkan hanya melewati separuh gelombang dan menghalangi separuh gelombang lainnya.

2.6.2 Buck-Boost Converter

Buck-boost converter atau dikenal juga sebagai konverter *buck-boost*, adalah jenis perangkat elektronik yang digunakan untuk mengatur tegangan II-34onvert. Konverter ini memiliki kemampuan untuk menurunkan (*buck*) atau meningkatkan (*boost*) tegangan masukan, tergantung pada kebutuhan sistem

Konverter *buck-boost* biasanya digunakan dalam berbagai aplikasi, termasuk pengisian baterai, sistem daya II-34onverte, dan peralatan elektronik yang memerlukan tegangan stabil. Prinsip kerjanya melibatkan siklus kerja transistor atau switch yang dikontrol untuk mengatur rasio tegangan keluaran terhadap tegangan masukan.

Ketika tegangan masukan lebih tinggi dari yang diinginkan, II-34onverter *buck-boost* dapat mengurangi (*buck*) tegangan tersebut. Sebaliknya, jika tegangan masukan lebih rendah dari yang diperlukan, II-34onverter ini dapat menaikkan (*boost*) tegangan tersebut. Ini membuat *buck-boost converter* sangat berguna dalam situasi di mana tegangan masukan dapat bervariasi atau tidak stabil.

Keuntungan lain dari *buck-boost converter* adalah kemampuannya untuk menyediakan tegangan keluaran yang lebih tinggi atau lebih rendah daripada tegangan masukan, meningkatkan fleksibilitas dalam desain sistem daya. Namun,

perlu diingat bahwa konverter ini tidak efisien secara konversi, dan ada kehilangan daya selama proses konversi. Kapasitas konverter harus sama dengan atau lebih dari daya yang dikonversi (Srikanth et al., 2020).

2.7 Baterai

Baterai, adalah perangkat yang menyimpan energi dalam bentuk kimia dan mampu melepaskannya sebagai energi listrik saat diperlukan. Desain dan fungsi baterai melibatkan prinsip kimia elektrokimia, di mana reaksi-reaksi antara dua elektroda dan elektrolit memungkinkan aliran elektron, menghasilkan arus listrik. (Pan et al., 2022)

Penyimpanan energi minimum yang aman dalam baterai biasanya ditetapkan untuk menghindari pengosongan yang berlebihan, yang dapat menyebabkan kerusakan permanen pada baterai. Untuk sebagian besar baterai yang dapat diisi ulang, status pengisian daya minimum diatur antara 20-50% untuk mencegah pengosongan yang berlebihan, sedangkan penyimpanan energi maksimum yang aman dalam baterai biasanya ditetapkan untuk menghindari pengisian daya yang berlebihan, yang juga dapat menyebabkan kerusakan permanen pada baterai. Pengisian daya yang berlebihan terjadi ketika baterai terus diisi melebihi kapasitas penuhnya, sehingga menimbulkan berbagai efek negatif pada kinerja dan keamanannya. Mari kita selidiki apa yang terjadi pada tegangan, arus, dan daya yang disimpan dalam kondisi pengisian berlebih. Jika baterai diisi dayanya secara berlebihan, tegangannya dapat meningkat melebihi tegangan maksimum yang disarankan. Misalnya, aki mobil 12 volt tidak boleh melebihi 14,5 volt saat pengisian. Jika tegangan terus meningkat dapat menyebabkan peningkatan tekanan internal, berpotensi menyebabkan deformasi, kebocoran cairan, dan

fenomena yang tidak diinginkan lainnya. Pengisian daya yang berlebihan sering kali mengakibatkan aliran arus yang berlebihan ke baterai. Hal ini dapat menyebabkan baterai menjadi panas, sehingga menimbulkan bahaya keselamatan seperti panas berlebih, kebakaran, atau bahkan ledakan. Aliran arus tinggi yang terus menerus juga dapat mempercepat degradasi komponen internal baterai sehingga mengurangi masa pakainya.

Daya adalah hasil kali tegangan dan arus. Selama pengisian daya yang berlebihan, peningkatan tegangan dan arus menghasilkan daya yang lebih tinggi yang disimpan dalam baterai. Namun, kelebihan daya ini tidak bermanfaat dan dapat menyebabkan pelarian termal, yaitu suhu internal baterai meningkat secara tidak terkendali, sehingga menyebabkan kerusakan pada baterai dan berpotensi menyebabkan kebakaran atau ledakan. SoC maksimum biasanya diatur antara 80-90% untuk mencegah pengisian daya yang berlebihan dan memastikan masa pakai yang lama (HOMER *Energy*).

Pentingnya kapasitas, tegangan, dan siklus hidup merupakan faktor-faktor kunci dalam desain baterai. Pengembangan baterai dengan kepadatan energi yang lebih tinggi, umur pakai yang lebih panjang, dan waktu pengisian yang lebih cepat, kapasitas baterai harus lebih besar dari jumlah daya yang akan di simpan.

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

HOMER *Energy* adalah perangkat lunak pemodelan *microgrid*. Perangkat lunak *microgrid* HOMER (*Hybrid Optimization Model for Electric Renewables*). Salah satu alat yang paling populer untuk merancang sistem pembangkit Listrik metode integrasi PLTS dan PLTB. HOMER *Energy* mensimulasikan dan mengoptimalkan sistem pembangkit listrik *off-grid* atau yang terhubung ke

jaringan, yang dapat mencakup kombinasi turbin angin konvensional, *fotovoltaik*, *mikrohidro*, biomassa, dan generator turbin *mikro*, bahan bakar, baterai, baterai dan penyimpanan hidrogen, melayani beban listrik dan termal.

HOMER *Energy* mensimulasikan pengoperasian sistem dengan memberikan perhitungan keseimbangan energi setiap 8.760 jam per tahun. Jika sistem berisi baterai dan generator diesel atau bensin, HOMER *Energy* juga dapat memutuskan, setiap jam, apakah generator diesel atau bensin bekerja dan apakah baterai diisi atau dikosongkan. Selain itu, HOMER *Energy* menentukan konfigurasi sistem terbaik dan kemudian memperkirakan biaya pemasangan dan pengoperasian sistem selama masa pakainya (*lifetime cost*), seperti biaya awal, biaya penggantian, dan sebagainya, penggantian suku cadang, biaya bahan bakar, dan lain lain.

HOMER *Energy* mengidentifikasi semua kemungkinan konfigurasi sistem dan kemudian menampilkannya secara berurutan berdasarkan NPC (*net presents costs*). Jika analisis sensitivitas diperlukan, HOMER *Energy* akan mengulangi prosedur simulasi untuk setiap variabel sensitivitas yang diidentifikasi. (Sheriff et al., 2003)

2.9.1 Prinsip Kerja HOMER *Energy*

HOMER *energy* bekerja berdasarkan 3 tahap yaitu simulasi, optimasi dan analisis sensitivitas. Ketiganya bekerja secara berurutan dan memiliki fungsinya masing-masing untuk mencapai hasil yang optimal.

2.9.2 Simulasi

HOMER *energy* dapat mensimulasikan konfigurasi perencanaan pembangkit listrik dengan berbagai perpaduan *on-grid* dan *off-grid* dengan

komponen termasuk fotovoltaik, angin, *hidro*, *mikro hidro*, *fuel* generator, konverter hidrogen, baterai, dan lain lain. Digunakan untuk melayani beban AC dan DC serta beban termal.

2.9.3 Optimasi

Optimasi dilakukan setelah simulasi. Proses simulasi secara khusus memodelkan dan mendesain konfigurasi sistem, kemudian dilakukan proses optimasi untuk mengetahui kemampuan optimal pada konfigurasi sistem. Pada daftar hasil optimasi, HOMER *energy* mengurutkan nilai NPC dari yang terendah hingga yang tertinggi. Sistem dikatakan optimal, jika salah satu konfigurasi sistem menunjukkan NPC terendah selama jangka waktu yang telah ditentukan, HOMER *energy* melakukan simulasi konfigurasi yang berbeda, jika konfigurasi sistem tidak layak, HOMER *energy* tidak menampilkan NPC terendah. hasil. Didalam proses optimasi juga terdapat sistem konfigurasi komponen apa saja yang akan digunakan, jumlah dan kapasitas komponen, dan strategi pengisian baterai yang digunakan, seperti:

1. Kapasitas daya PV
2. Jumlah turbin angin yang digunakan
3. Kapasitas daya turbin
4. Kapasitas daya generator
5. Jumlah baterai yang digunakan
6. Kapasitas daya konverter AC-DC
7. Strategi pengisian baterai

2.9.4 Analisis Sensitivitas

Analisis sensitivitas akan menunjukkan seberapa optimal hasil konfigurasi sistem jika nilai parameter beberapa masukan berbeda. Pengguna dapat menentukan sensitivitas dengan memasukkan beberapa nilai variabel sensitivitas. Pada titik ini, pengguna dapat memasukkan rentang nilai untuk satu atau lebih variabel, yang disebut variabel sensitivitas. Misalnya harga listrik pada jaringan transmisi, harga bahan bakar, suku bunga tahunan, dan lain-lain.

Setiap kombinasi nilai variabel sensitivitas akan menentukan kasus sensitivitas yang berbeda-beda, misalnya jika pengguna menentukan 6 nilai harga listrik dan 4 nilai suku bunga bank, maka akan terdapat 23 kasus sensitivitas. dan akan menampilkan hasilnya sebagai tabel grafis.

1. Analisis sensitivitas dalam kasus yang tidak pasti

Analisis sensitivitas dilakukan untuk mengatasi situasi yang berubah dan tidak pasti. Contoh desain mengasumsikan harga solar \$0,50/L, kecepatan angin tahunan 4 m/s, dan umur proyek 25 tahun. Keadaan ini dikatakan tidak menentu karena harga solar tidak stabil, berubah dari tahun ke tahun sesuai kebijakan pemerintah, dan kecepatan angin juga berubah setiap tahunnya. Analisis ini digunakan untuk mengetahui dampak variasi masukan terhadap kemungkinan konfigurasi sistem dan untuk menentukan seberapa optimal sistem ketika masukan berubah.

2. Analisis sensitivitas berdasarkan kumpulan data per jam

Berdasarkan data per jam, seperti beban listrik, sumber daya angin, air atau biomassa. Data masukan ditentukan oleh perancang, nilainya dapat diatur di atas atau di bawah nilai kunci, tergantung rentang skala yang diinginkan.

2.11 Net Present Cost (NPC)

Net present cost (NPC) adalah semua biaya yang digunakan dalam proyek pembangunan komponen baik pemasangan maupun dalam pengoprasian suatu proyek (Suandi et al., 2018). *Net present cost* dapat diketahui dengan persamaan 2.6.

$$\text{NPC} = \text{Capital Cost} + \text{Replacement Cost} + \text{O\&M Cost} - \text{Salvage} \quad (2.10)$$

Dimana:

Capital Cost = biaya komponen

Replacement Cost = biaya ganti komponen

O&M Cost = biaya operasional dan perawatan

Salvage = biaya yang tersisa dari komponen

Dimana cara menghitung Salvage :

$$S = C_{rep} \times \frac{R_{rem}}{R_{comp}} \quad (2.11)$$

Dimana :

C_{rep} = Biaya ganti komponen

R_{comp} = Masa pakai komponen

R_{rem} = Sisa masa pakai

2.11 Densitas Energi

Densitas energi adalah satuan besaran energi dalam satuan luas seperti meter persegi (He et al., 2020) . Rumus densitas energi adalah:

$$\text{DE} = \frac{E}{S} \quad (2.12)$$

Dimana :

DE : Densitas Energi (kWh/m²)

E :Energi (kWh)

S :luas (m^2)

2.11.1 Klasifikasi Densitas Energi Pembangkit Listrik

Klasifikasi kepadatan energi untuk pembangkit listrik tenaga surya biasanya dikategorikan berdasarkan radiasi matahari dan efisiensi panel surya. Berikut ini adalah kategori yang umum (Nøland et al., 2022):

1. Kepadatan Energi Rendah (0,5-2,0 kWh/m²)

Kategori ini mencakup area dengan pancaran sinar matahari yang rendah, seperti daerah lintang tinggi atau daerah yang sering tertutup awan. Daerah-daerah ini kurang cocok untuk pembangkit listrik tenaga surya karena hasil energi yang lebih rendah.

2. Kepadatan Energi Sedang (2,0-4,0 kWh/m²)

Kategori ini mencakup area dengan penyinaran matahari sedang, seperti daerah beriklim sedang dengan tutupan awan rata-rata. Area ini cocok untuk pembangkit listrik tenaga surya, tetapi hasil energinya tidak setinggi di area dengan kepadatan energi surya yang lebih tinggi.

3. Kepadatan Energi Tinggi (4,0-6,0 kWh/m²)

Kategori ini mencakup area dengan penyinaran matahari yang tinggi, seperti daerah tropis atau area dengan langit yang cerah. Daerah-daerah ini sangat cocok untuk pembangkit listrik tenaga surya, dan hasil energinya tinggi.

4. Kepadatan Energi Sangat Tinggi (Di atas 6,0 kWh/m²)

Kategori ini mencakup area dengan penyinaran matahari yang sangat tinggi, seperti area dekat khatulistiwa atau area dengan langit yang sangat cerah.

Daerah-daerah ini sangat cocok untuk pembangkit listrik tenaga surya, dan hasil energinya sangat tinggi.

2.12 *Levelized Cost Of Electricity (LCOE)*

Biaya Tersamar Listrik, atau disingkat sebagai LCOE (*Levelized Cost of Electricity*) adalah sebuah metode untuk mengukur biaya rata-rata yang diperlukan untuk menghasilkan satu unit listrik dalam suatu proyek pembangkitan energi. LCOE digunakan untuk membandingkan berbagai sumber energi dan proyek pembangkit listrik, sehingga kita dapat menentukan sumber energi yang paling ekonomis (López et al., 2022)

Tingkat diskonto di Indonesia pada tahun 2024 mengalami beberapa perubahan. Rapat Dewan Gubernur Bank Indonesia pada April 2024 memutuskan untuk menaikkan suku bunga acuan (BI Rate) sebesar 25 basis poin menjadi 6,25%, Laju inflasi tahunan di Indonesia turun menjadi 2,51% pada Juni 2024 dari 2,84% pada Mei, dibandingkan dengan ekspektasi pasar sebesar 2,70% maka Tingkat diskonto riil sebesar 3,65% (tradingeconomics.com., 2024). LCOE memperhitungkan semua biaya yang terkait dengan pembangkitan listrik selama masa hidup proyek, termasuk biaya investasi awal, biaya operasional dan pemeliharaan, serta biaya bahan bakar atau bahan baku jika ada. Kemudian, biaya-biaya ini dibagi dengan total energi yang dihasilkan selama masa hidup proyek, biasanya dalam satuan tahun. Rumus LCOE adalah :

$$\text{LCOE} = \frac{C_{ann,tot}}{E_{served}} \quad (2.13)$$

Dimana :

$C_{ann,tot}$ = total biaya sistem pertahun

E_{served} = total energi yang diserap pertahun

Dimana rumus $C_{\text{ann,tot}}$:

$$C_{\text{ann,tot}} = \text{CRF}(iR_{\text{proj}}).C_{\text{npc,tot}} \tag{2. 14}$$

Dimana :

$C_{\text{npc,tot}}$ = Total NPC (NPC)

i = tingkat diskonto riil tahunan (%)

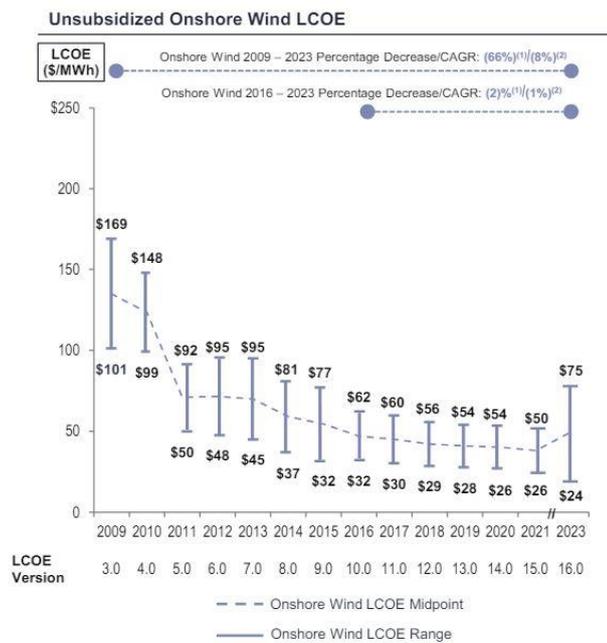
R_{proj} = Lama projek (tahun)

CRF = faktor pemulihan modal

Dimana rumus CRF :

$$\text{CRF} = \frac{i(1+i)^{R_{\text{project}}}}{(1+i)^{R_{\text{project}}} - 1} \tag{2. 15}$$

2.12.1 Perkembangan LCOE PLTB per tahun



Gambar 2. 18 LCOE PLTB (Lazard, 2023)

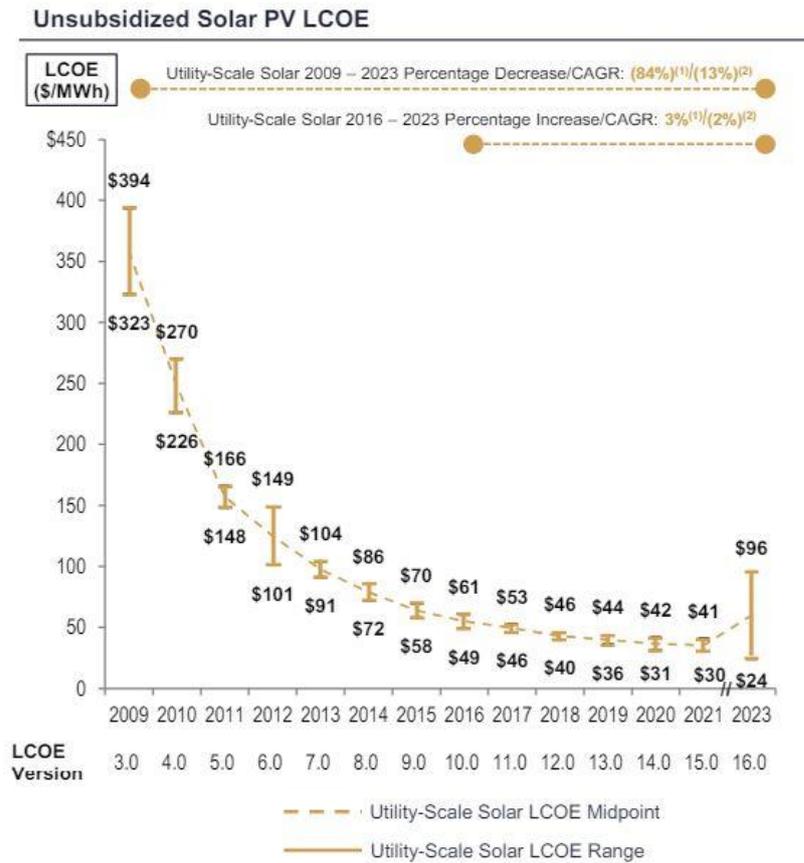
Gambar 2.18 menunjukkan perubahan *Levelized Cost of Energy* (LCOE) untuk energi angin darat (onshore wind) dari tahun 2009 hingga 2023. LCOE adalah biaya rata-rata per unit energi yang dihasilkan oleh suatu proyek energi selama masa pakainya, termasuk biaya investasi awal, operasi, dan pemeliharaan. Sumbu Y (Vertikal) Menunjukkan LCOE dalam dolar AS per megawatt-jam (\$/MWh). Rentangnya dari 0 hingga 250 \$/MWh. Sumbu X (Horizontal) Menunjukkan tahun dari 2009 hingga 2023. Setiap tahun disertai dengan nomor versi LCOE. Garis Putus-putus Menunjukkan midpoint (titik tengah) LCOE untuk energi angin darat setiap tahun. Garis Solid dengan Garis Vertikal (Range) Menunjukkan rentang LCOE untuk energi angin darat setiap tahun, dengan garis vertikal menunjukkan variasi biaya dari minimum ke maksimum. Penurunan Persentase dan CAGR (Compound Annual Growth Rate) Untuk periode 2009 hingga 2023, LCOE energi angin darat mengalami penurunan sebesar 66%, dengan CAGR sekitar 8%. Untuk periode 2016 hingga 2023, penurunan LCOE lebih kecil yaitu sebesar 2%, dengan CAGR sekitar 1%.

Perubahan LCOE dari Tahun 2009 LCOE midpoint sebesar \$101/MWh, dengan rentang dari sekitar \$75 hingga \$169/MWh. Tahun 2010 hingga 2011: LCOE menurun drastis ke \$99/MWh dan \$50/MWh. Tahun 2012 hingga 2016: Penurunan LCOE berlanjut dengan nilai midpoint bervariasi antara \$45/MWh hingga \$37/MWh. Tahun 2017 hingga 2021: LCOE berkisar antara \$32/MWh hingga \$26/MWh. Tahun 2023: LCOE naik sedikit menjadi \$24/MWh dengan rentang antara \$24 hingga \$75/MWh.

Secara keseluruhan, LCOE untuk energi angin darat telah mengalami penurunan yang signifikan sejak 2009. Penurunan ini menunjukkan efisiensi yang

meningkat dan penurunan biaya dalam teknologi energi angin darat selama periode tersebut. Meskipun ada sedikit kenaikan di tahun 2023, tren keseluruhan masih menunjukkan penurunan yang substansial dalam biaya energi angin darat.

2.12.2 Perkembangan LCOE PLTS per tahun



Gambar 2. 19 LCOE PLTS (Lazard, 2023)

Gambar 2.19 menunjukkan perubahan *Levelized Cost of Energy* (LCOE) untuk energi surya skala utilitas (utility-scale solar PV) dari tahun 2009 hingga 2023. LCOE adalah biaya rata-rata per unit energi yang dihasilkan oleh suatu proyek energi selama masa pakainya, termasuk biaya investasi awal, operasi, dan pemeliharaan. Sumbu Y (Vertikal) Menunjukkan LCOE dalam dolar AS per megawatt-jam (\$/MWh). Rentangnya dari 0 hingga 450 \$/MWh. Sumbu X

(Horizontal) Menunjukkan tahun dari 2009 hingga 2023. Setiap tahun disertai dengan nomor versi LCOE. Garis Putus-putus Menunjukkan midpoint (titik tengah) LCOE untuk energi surya skala utilitas setiap tahun. Garis Solid dengan Garis Vertikal (Range) Menunjukkan rentang LCOE untuk energi surya skala utilitas setiap tahun, dengan garis vertikal menunjukkan variasi biaya dari minimum ke maksimum. Penurunan Persentase dan CAGR (Compound Annual Growth Rate) Untuk periode 2009 hingga 2023, LCOE energi surya skala utilitas mengalami penurunan sebesar 84%, dengan CAGR sekitar 13%. Untuk periode 2016 hingga 2023, ada peningkatan kecil dalam LCOE sebesar 3%, dengan CAGR sekitar 2%.

Perubahan LCOE dari Tahun 2009: LCOE midpoint sebesar \$394/MWh, dengan rentang dari sekitar \$300 hingga \$450/MWh. Tahun 2010 hingga 2011: LCOE menurun drastis ke \$323/MWh dan \$270/MWh. Tahun 2012 hingga 2014: Penurunan LCOE berlanjut dengan nilai midpoint bervariasi antara \$226/MWh hingga \$104/MWh. Tahun 2015 hingga 2019: LCOE berkisar antara \$86/MWh hingga \$36/MWh. Tahun 2020 hingga 2023: LCOE stabil di sekitar \$30/MWh hingga \$24/MWh, dengan peningkatan kecil di tahun 2023 menjadi \$24/MWh dengan rentang antara \$24 hingga \$96/MWh.

Secara keseluruhan, LCOE untuk energi surya skala utilitas telah mengalami penurunan yang signifikan sejak 2009. Penurunan ini menunjukkan efisiensi yang meningkat dan penurunan biaya dalam teknologi energi surya selama periode tersebut. Meskipun ada sedikit kenaikan di tahun 2023, tren keseluruhan masih menunjukkan penurunan yang substansial dalam biaya energi surya skala utilitas.

2.12.3 Harga Listrik per kWh di Indonesia



**PENETAPAN
PENYESUAIAN TARIF TENAGA LISTRIK (TARIFF ADJUSTMENT)
APRIL - JUNI 2024**

NO.	GOL. TARIF	BATAS DAYA	REGULER		PRA BAYAR (Rp/kWh)
			BIAYA BEBAN (Rp/kVA/bulan)	BIAYA PEMAKAIAN (Rp/kWh) DAN BIAYA kVArh (Rp/kVArh)	
1.	R-1/TR	900 VA-RTM	*)	1.352,00	1.352,00
2.	R-1/TR	1.300 VA	*)	1.444,70	1.444,70
3.	R-1/TR	2.200 VA	*)	1.444,70	1.444,70
4.	R-2/TR	3.500 VA s.d. 5.500 VA	*)	1.699,53	1.699,53
5.	R-3/TR	6.600 VA ke atas	*)	1.699,53	1.699,53
6.	B-2/TR	6.600 VA s.d. 200 kVA	*)	1.444,70	1.444,70
7.	B-3/TM	di atas 200 kVA	**)	Blok WBP = K x 1.035,78 Blok LWBP = 1.035,78 kVArh = 1.114,74 ****)	-
8.	I-3/TM	di atas 200 kVA	**)	Blok WBP = K x 1.035,78 Blok LWBP = 1.035,78 kVArh = 1.114,74 ****)	-
9.	I-4/TT	30.000 kVA ke atas	***)	Blok WBP dan Blok LWBP = 996,74 kVArh = 996,74 ****)	-
10.	P-1/TR	6.600 VA s.d. 200 kVA	*)	1.699,53	1.699,53
11.	P-2/TM	di atas 200 kVA	**)	Blok WBP = K x 1.415,01 Blok LWBP = 1.415,01 kVArh = 1.522,88 ****)	-
12.	P-3/TR		*)	1.699,53	1.699,53
13.	L/TR, TM, TT		-	1.644,52	-

Catatan :
 *) Diterapkan Rekening Minimum (RM):
 $RM1 = 40 \text{ (Jam Nyala)} \times \text{Daya tersambung (kVA)} \times \text{Biaya Pemakaian.}$
 **) Diterapkan Rekening Minimum (RM):
 $RM2 = 40 \text{ (Jam Nyala)} \times \text{Daya tersambung (kVA)} \times \text{Biaya Pemakaian LWBP.}$
 Jam nyala : kWh per bulan dibagi dengan kVA tersambung.
 ***) Diterapkan Rekening Minimum (RM):
 $RM3 = 40 \text{ (Jam Nyala)} \times \text{Daya tersambung (kVA)} \times \text{Biaya Pemakaian WBP dan LWBP.}$
 Jam nyala : kWh per bulan dibagi dengan kVA tersambung.
 ****) Biaya kelebihan pemakaian daya reaktif (kVArh) dikenakan dalam hal faktor daya rata-rata setiap bulan kurang dari 0,85 (delapan puluh lima per seratus).
 K : Faktor perbandingan antara harga WBP dan LWBP sesuai dengan karakteristik beban sistem kelistrikan setempat ($1,4 \leq K \leq 2$), ditetapkan oleh Direksi Perusahaan Perseroan (Persero) PT Perusahaan Listrik Negara.
 WBP : Waktu Beban Puncak.
 LWBP : Luar Waktu Beban Puncak.

Gambar 2. 20 TTL PLN

Gambar 2.20 adalah dokumen penetapan penyesuaian tarif tenaga listrik (Tariff Adjustment) dari PLN untuk periode April - Juni 2024. Periode: April - Juni 2024. Golongan Tarif R-1/TR (900 VA-RTM, 1.300 VA, 2.200 VA), Biaya pemakaian: Rp 1.352,00/kWh untuk 900 VA-RTM dan Rp 1.444,70/kWh untuk 1.300 VA dan 2.200 VA. Tidak ada biaya beban bulanan, Tarif prabayar sama dengan biaya pemakaian. Golongan Tarif R-2/TR (3.500 VA s.d. 5.500 VA) Biaya pemakaian: Rp 1.699,53/kWh. Tidak ada biaya beban bulanan. Tarif prabayar sama dengan biaya pemakaian. Golongan Tarif R-3/TR (6.600 VA ke atas) Biaya

pemakaian: Rp 1.699,53/kWh. Tidak ada biaya beban bulanan. Tarif prabayar sama dengan biaya pemakaian. Golongan Tarif B-2/TR (6.600 VA s.d. 200 kVA) Biaya pemakaian: Rp 1.444,70/kWh. Tidak ada biaya beban bulanan. Golongan Tarif B-3/TM (di atas 200 kVA) Blok WBP: $K \times \text{Rp } 1.035,78/\text{kWh}$. Blok LWBP: Rp 1.035,78/kWh. kVArh: Rp 1.114,74/kVArh. Biaya beban dikenakan sesuai keterangan pada catatan. Golongan Tarif I-3/TM (di atas 200 kVA) Blok WBP: $K \times \text{Rp } 1.035,78/\text{kWh}$. Blok LWBP: Rp 1.035,78/kWh. kVArh: Rp 1.114,74/kVArh. Biaya beban dikenakan sesuai keterangan pada catatan. Golongan Tarif I-4/TT (30.000 kVA ke atas) Blok WBP: Rp 996,74/kWh. Blok LWBP: Rp 996,74/kWh. kVArh: Rp 1.522,88/kVArh. Biaya beban dikenakan sesuai keterangan pada catatan. Golongan Tarif P-1/TR (6.600 VA s.d. 200 kVA) Blok WBP: Rp 1.415,01/kWh. Blok LWBP: Rp 1.415,01/kWh. kVArh: Rp 1.522,88/kVArh. Biaya beban dikenakan sesuai keterangan pada catatan. Golongan Tarif P-2/TR (di atas 200 kVA) Blok WBP: Rp 1.415,01/kWh. Blok LWBP: Rp 1.415,01/kWh. kVArh: Rp 1.522,88/kVArh. Biaya beban dikenakan sesuai keterangan pada catatan. Golongan Tarif P-3/TR: Biaya pemakaian: Rp 1.699,53/kWh Tidak ada biaya beban bulanan. Tarif prabayar sama dengan biaya pemakaian. Golongan Tarif L/TR, TM, TT: Biaya pemakaian: Rp 1.644,52/kWh. Tidak ada biaya beban bulanan. Tarif prabayar tidak ditetapkan.

Penjelasan mengenai biaya beban minimum (Rekening Minimum, RM) untuk berbagai kategori tarif. Faktor pengali (K) untuk perbandingan antara harga WBP dan LWBP sesuai dengan karakteristik beban sistem kelistrikan setempat. Biaya kVArh dihitung berdasarkan daya reaktif dengan faktor daya rata-rata bulanan 0.85.