

## **BAB II**

### **TINJAUAN PUSTAKA**

#### **2.1 Penelitian Terkait**

Referensi yang digunakan terkait dengan judul penelitian “ Analisis Uji Potensi Energi Terbarukan PLTS Dan PLTB Pada Gedung Bertingkat Dikota Probolinggo “ adalah dapat dilihat dari beberapa penelitian berikut :

“ Efektifitas Daya Pada Pembangkit Listrik Tenaga Angin Dengan Pembangkit Listrik Tenaga Surya “, Dalam penelitian ini, data pengukuran yang melibatkan arus dan tegangan keluaran dari sistem tenaga surya (PLTS) dan turbin angin (PLTB) diambil setiap jam selama satu minggu penuh. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penggunaan PLTS dengan kapasitas 100WP jauh lebih efisien dalam memenuhi kebutuhan total daya listrik yang dibutuhkan oleh Mesjid di Desa Sei Litur Tasik, Kecamatan Sawit Seberang, Kabupaten Langkat jika dibandingkan dengan penggunaan PLTB (Zambak, Suriyanto, dan Faisal 2022).

“ Penerapan Sistem Hybrid Pembangkit Listrik Tenaga Angin (PLTB) Dan Tenaga Surya (PLTS) di Desa Pataan, Kecamatan Sambeng, Kab.Lamongan “, penelitian ini pada PLTS yang terdiri dari panel surya berdaya 300 WP dan PLTB yang berdaya 800 W, kombinasi PLTS dan PLTB ini akan menghasilkan daya listrik yang cukup untuk digunakan sebagai penerangan 50 buah lampu warna-warni LED 3 W dan 6 W selama 6 jam di lokasi taman airlangga dan tenaga pendukung UMKM yang ada di sekitar tempat taman wisata airlangga desa pataan, kec.Sambeng, kab.Lamongan (Nawafilah, Agustapraja, dan Purnomo 2022).

“ Analisa Pemanfaatan Energi Terbarukan Di Universitas Pertahanan Sebagai Pendukung Keamanan Pasokan Energi (Studi Kasus: Energi Surya Dan Angin) ”, penelitian ini bertujuan untuk mencari potensi energi surya dan energi angin di area UNHAN. Fokus utama adalah menganalisis penggunaan PLTS dengan kapasitas panel surya 30 kWp yang terletak di gedung Auditorium UNHAN. Hasil analisis menunjukkan bahwa PLTS hanya dapat memenuhi sekitar 44% kebutuhan energi listrik pada hari Senin hingga Jumat, namun dapat mencukupi 100% kebutuhan energi pada hari Sabtu dan Minggu. Meskipun begitu, potensi angin di kawasan UNHAN hanya mencapai kecepatan 1,3 m/s yang belum mencukupi untuk menggerakkan turbin listrik karena kecepatannya belum mencapai ambang batas minimum yang diperlukan, yaitu 3 m/s (Panunggul, Boedoyo, dan Sasongko t.t.).

“ Analisis Efisiensi Panel Surya Sebagai Energi Alternatif “, Dalam penelitian ini, menggunakan alat ukur multimeter untuk mengukur arus dan tegangan keluaran dari panel surya dengan melakukan dua metode pengukuran, yaitu kondisi dengan beban sebesar 1,2 Watt dan tanpa beban. Eksperimen ini dilakukan selama tujuh hari dengan melakukan pengukuran arus dan tegangan dilakukan pada pukul 11:00, 12:00, 13:00, 14:00, dan 15:00. Hasil pengukuran menunjukkan bahwa rata-rata total daya keluaran panel surya dalam kondisi berbeban dan tanpa beban adalah sekitar 0,0431 Watt dan 0,0474 Watt. Efisiensi dari modul PLTS ini juga dihitung mencapai sekitar 16,42% (Hasrul 2021).

Penelitian – penelitian sebelumnya terkait potensi energi baru dan terbarukan menggunakan PLTS dan PLTB diatas membahas cara pemanfaatan energi cahaya matahari dan energi laju kecepatan angin sehingga dapat digunakan sebagai suplai energi listrik alternatif. Berdasarkan penelitian terdahulu dibutuhkan penelitian

lebih lanjut untuk melihat potensi PLTS dan PLTB di daerah Probolinggo. Dan dengan adanya penelitian – penelitian sebelumnya menjadi penunjang penelitian analisis uji potensi energi terbarukan PLTS dan PLTB di kota Probolinggo khususnya di Gedung bertingkat, sebagai tenaga listrik alternatif yang lebih efektif untuk digunakan sesuai kebutuhan.

## **2.2 Landasan Teori**

### **2.2.1 Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya**

Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya merupakan sistem pembangkit listrik yang menghasilkan energi listrik dari cahaya matahari melalui konversi sel surya atau fotovoltaik. Semakin tinggi tingkat cahaya matahari yang diterima, semakin besar kapasitas produksi energi listriknya. Indonesia yang terletak di wilayah khatulistiwa, mendapatkan sinar matahari cukup sepanjang tahun, membuka peluang besar untuk pemanfaatan dan pengembangan energi surya, baik sebagai sumber pembangkit listrik maupun untuk kebutuhan lainnya. Berdasarkan informasi yang tercantum dalam RUEN, dimana potensi energi surya totalnya di Indonesia mencapai 207.898 MWp yang tersebar di 38 Provinsi (Panduan Pengelolaan Lingkungan PLTS-Grafis ttd Dirjen (1)).

Dalam aplikasi PLTS, kelebihan energi listrik yang dihasilkan selama siang hari bisa disimpan dalam baterai, yang memungkinkan penggunaan energi tersebut kapan saja dibutuhkan untuk berbagai keperluan.

### **2.2.2 Jenis - jenis PLTS**

Pada Panduan Pengelolaan Lingkungan PLTS 2020 Kementerian ESDM, Jenis

PLTS Umumnya dapat dibagi berdasarkan :

1. Mode Pengoperasian

- a. PLTS On Grid ialah sistem pembangkit tenaga listrik yang memanfaatkan energi dari cahaya matahari melalui proses konversi sel surya, dengan karakteristik di mana sistem kelistrikan terhubung langsung ke jaringan listrik publik. Umumnya, sistem ini tidak menggunakan baterai sebagai komponen pendukung.
- b. PLTS Off Grid ialah sistem pembangkit tenaga listrik yang memanfaatkan energi dari cahaya matahari melalui proses konversi sel surya, tetapi jaringan kelistrikannya tidak terhubung dengan jaringan listrik milik umum. Dan pada umumnya, PLTS jenis ini dilengkapi komponen penting berupa baterai.

2. Posisi Pemasangan

- a. PLTS Ground Mounted (Panel surya dipasang diatas permukaan tanah)



**Gambar 2.1 PLTS Ground Mounted**

- b. PLTS Rooftop (Panel surya dipasang diatas atap)



**Gambar 2.2 PLTS Rooftop**

c. PLTS Terapung



**Gambar 2.3 PLTS Terapung**

3. Desain sistem

a. PLTS Terpusat

PLTS dengan modul sel surya yang dirancang secara terpusat, di mana seluruh modul ini terletak dalam satu wilayah yang sama, dan memiliki sistem jaringan distribusi untuk mengalirkan energi listrik ke berbagai beban.

b. PLTS Tersebar / Terdistribusi

PLTS dengan modul sel surya yang biasanya didesain secara tersebar tidak memiliki sistem jaringan distribusi, sehingga mengharuskan setiap pelanggan memiliki sistem PLTS independen yang melayani kebutuhan energi mereka.

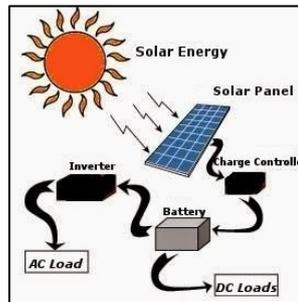
### 2.2.3 Prinsip Kerja PLTS

Konsep sederhana dari Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) adalah suatu sistem pembangkit listrik yang mengkonversi energi dari cahaya matahari menjadi energi listrik dengan menggunakan teknologi sel surya atau fotovoltaik. Prinsip kerja fotovoltaik adalah mengubah cahaya sinar matahari langsung menjadi energi listrik. Daya listrik yang dihasilkan oleh PLTS sangat tergantung pada intensitas cahaya matahari yang diterimanya. Dalam konteks aplikasi PLTS off-grid, kelebihan daya listrik yang diproduksi pada siang hari akan disimpan didalam

baterai sehingga dapat digunakan nanti untuk keperluan energi kapan saja (Panduan Pengelolaan Lingkungan Plts-Grafis ttd Dirjen 1).

Biasanya sistem PLTS terdiri dari beberapa komponen, antara lain panel sel surya, rangkaian kontrol pengisian (*charge controller*), dan baterai dengan tegangan 12 volt yang memerlukan perawatan minimum. Panel sel surya adalah gabungan beberapa sel surya yang dirangkai secara seri atau paralel, tergantung kapasitas yang dibutuhkan. Cara kerja panel sel surya sebenarnya mirip dengan dioda semikonduktor. Dimana ketika cahaya matahari jatuh pada sel surya akan diserap oleh bahan semikonduktor dan menyebabkan pelepasan elektron. Jika elektron tersebut mampu bergerak ke lapisan semikonduktor yang berbeda, maka akan terjadi perubahan dalam gaya-gaya yang ada di dalam bahan tersebut. Gaya tolakan antara bahan semikonduktor ini pada akhirnya menghasilkan medan magnetolistrik. Tegangan yang dihasilkan oleh sel surya akan dialirkan ke aki melalui sebuah rangkaian kontroler. Rangkaian kontroler pengisian baterai dalam sistem sel surya berperan sebagai perangkat elektronik yang mengatur proses pengisian aki. Kontroler ini bertugas mengendalikan tegangan baterai agar tetap berada dalam kisaran tegangan yang aman, biasanya sekitar 12 volt. Ketika tegangan turun di bawah 12 volt, misalnya mencapai 10.8 volt, kontroler akan memulai proses pengisian aki menggunakan tenaga dari panel surya, asalkan terdapat paparan cahaya sinar matahari. Namun, jika terjadi penurunan tegangan saat cuaca gelap atau malam hari, kontroler akan memutus pasokan energi listrik dari sel surya untuk melindungi aki dari kelebihan penggunaan. Setelah berjalan selama beberapa jam, proses pengisian akan meningkatkan tegangan aki hingga mencapai 12 volt, dan ketika ini terjadi, kontroler akan menghentikan pengisian

baterai secara otomatis. Meskipun rangkaian kontroler pengisian baterai dalam sistem PLTS dapat dirangkai secara mandiri dengan relatif mudah, namun biasanya sudah tersedia dalam bentuk yang siap pakai di pasaran.



**Gambar 2.4 Sistem Instalasi Sel Surya**

#### 2.2.4 Komponen utama sistem PLTS

##### 1. Panel Surya

Panel Surya merupakan perangkat yang terdiri dari beberapa sel surya, yang mampu mengkonversi cahaya sinar matahari menjadi listrik. Sel surya, juga dikenal sebagai sel fotovoltaik (Photovoltaic cell – disingkat PV), memiliki kemampuan mengubah energi sinar matahari menjadi energi listrik melalui proses efek fotovoltaik. Tegangan keluaran dari setiap sel surya adalah sangat rendah, yakni sekitar 0,6 Volt tanpa beban atau 0,45 Volt dengan beban. Sehingga untuk mendapatkan tegangan yang lebih tinggi sesuai kebutuhan, beberapa sel surya dihubungkan secara seri. Contohnya, jika menghubungkan 36 sel surya secara seri, akan menghasilkan tegangan sekitar 16Volt. Tegangan ini dapat untuk mengisi baterai dengan tegangan 12Volt. Namun, jika membutuhkan tegangan keluaran yang lebih tinggi lagi, maka perlu menggunakan lebih banyak sel surya. Rangkaian sel surya ini disebut sebagai modul surya atau panel surya. Biasanya, menggabungkan sekitar 10 sel surya hingga 20 sel surya atau bahkan lebih banyak

Panel Surya akan menghasilkan arus dan tegangan yang lebih tinggi, cukup untuk memenuhi kebutuhan (Purwoto dkk. 2018).

Pada panduan studi kelayakan PLTS terpusat 2018, jenis- jenis panel sel surya :

a. *Type Polycrystalline*

Panel *polycrystalline* adalah jenis panel surya dengan susunan kristal yang acak. Panel surya *polycrystalline* memerlukan area permukaan yang lebih luas dibandingkan dengan panel *monocrystalline* untuk menghasilkan listrik yang setara. Namun, kelebihanannya adalah kemampuannya untuk menghasilkan listrik bahkan ketika cuaca mendung/berawan.



**Gambar 2.5 Panel Surya *Type Polycrystalline***

b. *Monocrystalline*

Panel surya *monocrystalline* adalah yang paling efisien, dalam menghasilkan listrik tertinggi per unit luas permukaan. Mereka bisa mencapai efisiensi hingga 24%. Namun, kelemahannya adalah kinerjanya akan menurun secara signifikan dalam kondisi cahaya matahari yang kurang, seperti saat cuaca berawan atau di tempat yang teduh.



**Gambar 2.6 Panel Surya Type *Monocrystalline***

c. *Thin Film Photovoltaic*

Panel surya ini terdiri dari dua lapisan struktur *mikrokristal-silikon* dan *amorphous*.



**Gambar 2.7 Panel Surya Type *Thin Film***

2. *Solar Charge Controller (MPPT)*

*Solar Charge Controller* merupakan salah satu komponen penting dalam sistem pembangkit listrik tenaga surya, yang memiliki fungsi mengatur arus listrik baik yang datang dari panel surya maupun yang diteruskan ke beban. Tugas utamanya adalah menjaga agar baterai tidak diisi terus menerus untuk menghindari pengisian berlebihan yang dapat merusaknya. *Solar Charge Controller* mengontrol tegangan dan arus dari Panel Surya ke baterai. Umumnya panel surya 12volt

menghasilkan tegangan keluaran sekitar 16 volt hingga 20 volt DC. Oleh karena itu, tanpa pengontrol, baterai dapat mengalami kerusakan akibat pengisian dengan tegangan yang terlalu tinggi. Umumnya, baterai berkapasitas 12 Volt membutuhkan tegangan pengisian sekitar 13-14,8 volt, tergantung pada jenis baterai, untuk mencapai kondisi penuh (Purwoto dkk. 2018).

Beberapa fungsi dari *solar charge controller* adalah sebagai berikut :

- a. Mengontrol arus pengisian ke baterai, menghindari pengisian lebih/*overcharging*, dan *overvoltage*.
- b. Mengontrol arus yang dilepaskan/diambil dari baterai agar baterai tidak '*full discharge*', dan *overloading*.
- c. Memonitor temperatur baterai

*Solar Charge Controller* umumnya memiliki tiga bagian utama: memiliki satu input yang terhubung ke output panel surya atau sel surya, memiliki satu output yang terhubung ke baterai, dan memiliki satu output yang terhubung ke beban (beban). Ini dirancang demikian sehingga arus listrik DC yang mengalir dari baterai tidak dapat kembali ke panel sel surya. Hal ini dicapai dengan menggunakan 'diode protection' yang mana arus listrik DC hanya mengalir dari panel surya ke baterai, dan tidak sebaliknya.

*Solar Charge Controller* juga ada yang memiliki lebih dari satu sumber daya, selain dari cahaya matahari, tetapi juga dari laju kecepatan angin atau mikro hidro. Di pasaran juga dapat ditemukan pengontrol pengisian 'tandem' yang memiliki dua input, yang menerima energi dari cahaya matahari dan angin. Dengan pendekatan ini, produksi energi dapat menjadi berlipat ganda karena angin dapat bergerak sepanjang hari. Ini membantu mengatasi keterbatasan waktu ketika matahari tidak

menyuplai sepanjang hari, karena tenaga angin dapat menggantikannya. Dengan kecepatan angin yang mencukupi, produksi energi listrik bisa jauh lebih besar daripada hanya mengandalkan energi cahaya matahari saja.



**Gambar 2.8 Solar Charge Controller**

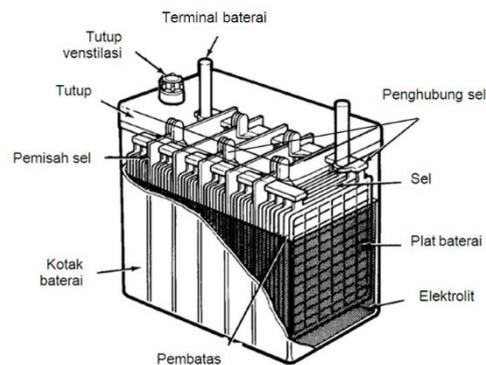
### 3. Baterai

Baterai merupakan perangkat berfungsi menyimpan energi yang diperoleh dari aliran listrik DC yang berasal dari panel surya. Selain fungsi penyimpanan energi DC, baterai juga mampu mengubah energi kimia yang tersimpan di dalamnya menjadi aliran listrik. Baterai umumnya terdiri dari dua atau lebih sel elektrokimia yang melakukan transformasi energi kimia menjadi energi listrik. Setiap sel baterai memiliki dua kutub, yaitu kutub positif (katoda) dan kutub negatif (anoda). Kutub positif baterai memiliki energi potensial yang lebih tinggi daripada kutub negatif.

Kutub yang bertanda positif menandakan adanya potensial energi yang lebih tinggi, dan ketika kutub ini terhubung dengan rangkaian luar, elektron akan mengalir melalui rangkaian eksternal dan melepaskan energi kepada peralatan luar. Ketika baterai terhubung dengan rangkaian luar, ion dalam elektrolit baterai berpindah dari satu kutub ke kutub lainnya, sehingga menyebabkan reaksi kimia terjadi di kedua kutub. Perpindahan ion ini dalam baterai menghasilkan aliran arus listrik keluar/terlepas dari baterai, yang menghasilkan daya yang dapat

digunakan untuk menggerakkan peralatan eksternal.

Baterai di sini memiliki fungsi ganda. Pertama, baterai berfungsi sebagai tempat penyimpanan sementara energi listrik yang dihasilkan oleh sel surya. Selain itu, berfungsi baterai juga sebagai penyedia energi cadangan untuk semua sistem kontrol dalam rangkaian sistem PLTS dan sebagai sumber energi cadangan untuk peralatan yang akan digunakan (Cahyadi dan No 2020).



**Gambar 2.9 Baterai**

#### 4. Inverter

Inverter adalah komponen penting dalam PLTS yang berfungsi untuk mengubah aliran arus listrik DC yang dihasilkan oleh panel surya atau fotovoltaik menjadi aliran arus listrik AC atau sebaliknya. Hal ini memungkinkan energi listrik yang dihasilkan dapat digunakan sesuai dengan kebutuhan dan sesuai dengan peralatan rumah tangga atau sistem listrik yang umumnya menggunakan arus listrik AC (Purwoto dkk. 2018).

Inverter berguna ketika peralatan yang Anda gunakan membutuhkan pasokan daya AC. Fungsi inverter adalah mengonversi arus DC menjadi gelombang segi empat, yang kemudian difilter menjadi gelombang sinus yang dapat disesuaikan

sesuai kebutuhan. Selain itu, inverter juga mampu menghilangkan komponen harmonik yang tidak diinginkan dari sinyal listrik.



**Gambar 2.10 Inverter**

Inverter umumnya dibagi berdasarkan gelombang keluaran yang dihasilkan menjadi 3 macam, yaitu *square wave*, *modified sine wave*, dan *pure sine wave*

a. *Type Square Wave*

Inverter tipe ini adalah yang paling sederhana. Meskipun mampu menghasilkan tegangan AC 220V dengan frekuensi 50 Hz, kualitasnya tergolong rendah. Oleh karena itu, hanya cocok digunakan untuk beberapa alat listrik tertentu. Kualitas yang buruk ini disebabkan oleh tingginya tingkat distorsi harmonik total pada keluaran inverter jenis ini.

b. *Type Modified Sine Wave*

*Modified Sine Wave*, juga dikenal sebagai *Modified Square Wave* atau *Quasy Sine Wave*, menghasilkan gelombang yang serupa dengan *square wave*, tetapi dengan perbedaan bahwa pada *modified sine wave*, keluarannya melintasi titik nol untuk beberapa saat sebelum bergerak ke nilai positif atau negatif. *Modified sine wave* juga memiliki tingkat distorsi harmonik yang lebih rendah dibandingkan dengan *square wave*, sehingga cocok untuk digunakan dengan beberapa peralatan listrik seperti komputer, TV, dan lampu. Namun, tidak cocok digunakan untuk peralatan yang lebih sensitif.

c. *Type Pure Sine Wave*

*Pure Sine Wave*, atau sering disebut sebagai *true sine wave*, adalah jenis inverter yang menghasilkan gelombang yang hampir identik dengan gelombang sinusoidal sempurna. Dengan tingkat distorsi harmonik total (THD) kurang dari 3%, inverter ini cocok untuk digunakan dengan semua jenis perangkat elektronik. Oleh karena itu, inverter jenis ini juga sering disebut sebagai *clean power supply*. Teknologi yang digunakan dalam inverter ini biasanya disebut *pulse width modulation (PWM)*, yang mengubah tegangan DC menjadi AC dengan bentuk gelombang yang sangat mendekati gelombang sinusoidal.

### 1.2.5 Perhitungan Daya PLTS

Daya merupakan ukuran energi yang digunakan untuk melakukan kerja atau usaha. Dalam konteks tenaga listrik, daya adalah total energi yang digunakan untuk melakukan suatu pekerjaan. Dalam teori yang diperkenalkan oleh *James Watt*, daya listrik biasanya diukur dalam satuan *Watt* atau *Horsepower (HP)*. *Horsepower* adalah satuan daya yang setara dengan 746 *Watt* atau *lbft/second*. Sementara itu, *Watt* adalah satuan daya listrik yang setara dengan daya yang dihasilkan ketika arus listrik sebesar 1 *Ampere* mengalir melalui tegangan sebesar 1 *Volt*. Daya dinyatakan dalam P, Tegangan dinyatakan dalam V dan Arus dinyatakan dalam I, sehingga besarnya daya dinyatakan.

$$P = V \times I \quad (2.1)$$

$$P_{rata-rata} = \frac{\text{Jumlah Daya}}{\text{Jumlah Data}} \quad (2.2)$$

$$P_{TOTAL} = P_{rata-rata} \times \text{lama penyinaran} \quad (2.3)$$

$$P_{(hemat)} = (P_{sebelum sinkron} - P_{sinkron}) \quad (2.4)$$

Keterangan :

**P** : Daya (Watt)

**V** : Tegangan (Volt)

**I** : Arus (Ampere)

*P<sub>rata-rata</sub>* : Daya rata-rata (Watt)

*P<sub>TOTAL</sub>* : Daya total(Watt)

*P<sub>(hemat)</sub>* : Selisih Daya sebelum sinkron dan sesudah sinkron

### 2.2.6 Sistem Pembangkit Tenaga Bayu (Angin)

Pembangkit Listrik Tenaga Angin (PLTB) adalah sistem pembangkit listrik menggunakan satu atau lebih turbin angin. Di Indonesia, ini merupakan upaya pengembangan sumber energi terbarukan untuk mendukung program pemerintah dalam penyediaan listrik yang ramah lingkungan. Hal terkait dengan Perpres No. 22 tahun 2007 mengenai Rencana Umum Energi Nasional, yang mencakup Energi Baru dan Terbarukan (EBT). Potensi energi angin di Indonesia diperkirakan sangat besar, mencapai 60.647 MW, tetapi hingga saat ini belum dimanfaatkan sepenuhnya. Kapasitas terpasang PLTB di Indonesia masih terbatas, dengan hanya mencapai 7,1 MW saat ini (Panduan Pengoperasian dan Pemeliharaan PLTB Off grid.).

Pembangkit Listrik Tenaga Angin (PLTB) merupakan sistem pembangkit listrik yang terdiri dari turbin angin yang dilengkapi dengan berbagai komponen pendukung seperti sistem transmisi, distribusi, dan fasilitas lainnya. Turbin angin

merupakan alat yang mengubah energi laju kecepatan angin menjadi energi listrik, dan komponen utamanya terdiri dari sudu dan hub/naf rotor, roda gigi atau gearbox (jika digunakan), drive train yang mencakup shaft, kopling, unit pengereman, rumah turbin atau nasek, sistem pengarah, generator, serta menara atau tower.

### 2.2.7 Klasifikasi Turbin Angin

Berdasarkan Panduan Pengoperasian dan Pemeliharaan PLTB Off grid 2019 Kementerian ESDM, berdasarkan tipe porosnya, umumnya turbin angin dibagi menjadi dua jenis yaitu :

1. Turbin angin dengan poros horizontal (*Horizontal Axis Wind Turbine*/HAWT)

Turbin angin ini porosnya sejajar dengan arah angin dan berputar karena adanya gaya dorong dan gaya angkat. Rotor turbin angin poros horizontal terbagi menjadi dua jenis yaitu :

- a. *Upwind*

Sudu turbin angin ini langsung berhadapan dengan arah angin atau angin datang dari depan rotor.

- b. *Downwind*

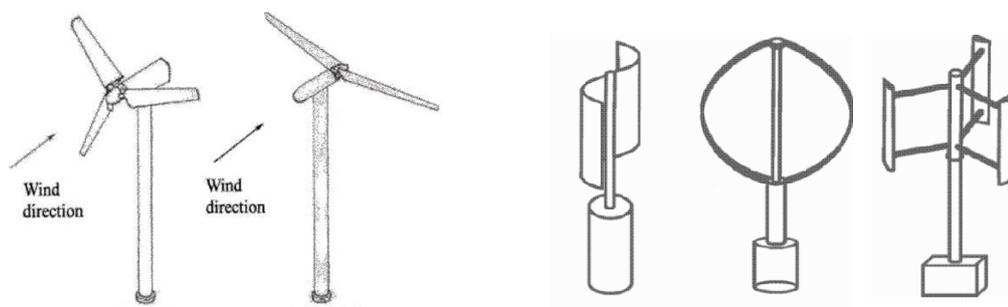
Rotor turbin membelakangi arah angin.

2. Turbin angin poros vertikal (*vertical axis wind turbine*/VWAT)

Turbin angin jenis ini mempunyai poros tegak lurus terhadap arah angin. Cara kerja turbin angin poros vertikal ini didasarkan pada gaya dorong yang dihasilkan oleh angin pada sudu-sudunya, yang menyebabkan rotor berputar

secara otomatis. Turbin angin dengan poros vertikal dibagi dalam tiga tipe, yakni *Savonius*, *Darrieus* dan *Giromill* (H-rotor). Turunan dari tiga tipe tersebut juga muncul belakangan seperti *Twisted Savonius rotor*, *Cantilevered Darrieus rotor*, *Helical H-rotor*, dll.

Meskipun sempat berkembang menjadi beberapa jenis turbin angin, namun pada akhirnya teknologi turbin angin lebih mengarah/konvergen ke satu tipe, yakni turbin angin HAWT UpWind dengan tiga sudu.



**Gambar 2.11 HAWT dan VAWT**

Berdasarkan konfigurasi turbin angin, PLTB terbagi menjadi dua jenis yaitu :

1. Off-grid
  - a. PLTB Standalone

Pada sistem standalone, turbin angin dipasangkan dengan baterai, charge controller, dumb load serta inverter sebelum dihubungkan ke beban. Baterai digunakan sebagai penyimpan sekaligus sebagai buffer agar keluaran inverter bisa dipertahankan stabil. Dibutuhkan kajian untuk menetapkan besarnya kapasitas turbin angin, kapasitas baterai agar dapat memasok kebutuhan beban listrik tanpa pemadaman. Meskipun demikian, kehandalan sistem ini relatif rendah terhadap perubahan

pasokan energi angin setiap harinya

b. Hibrida (Hibrida)

Guna meningkatkan kehandalan pasokan energi, turbin angin dipasangkan dengan satu pembangkit lain atau lebih, baik itu pembangkit terbarukan maupun pembangkit konvensional (diesel).

Kerjasama tersebut bisa dilakukan pada level keluaran DC maupun keluaran AC atau di keduanya

2. On-grid

Sistem *On-grid* adalah turbin angin yang tersambung langsung dengan jaringan listrik tanpa penyimpanan baterai seperti terlihat pada topologi

### 2.2.8 Komponen utama sistem PLTB

Dalam buku Panduan Studi Kelayakan Pembangunan Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (SNI 8398:2017), komponen utama PLTB terdiri dari :

1. Komponen Mekanikal

a. Rotor

Rotor berfungsi untuk mengubah energi dorong angin menjadi energi putaran pada rotor yang selanjutnya digunakan untuk memutar generator baik melalui unit transmisi maupun sambungan langsung. Rotor terdiri dari sudu dengan bentuk tertentu dengan permukaan aerodinamis. Bahan rotor umumnya adalah *Glass Fibre Reinforced* (GFR) atau epoxy. Diameter rotor menentukan besarnya daya yang dihasilkan oleh sistem. Sedangkan jumlah sudu, umumnya 3 sudu karena pertimbangan stabilitas dan biaya dibandingkan dengan 2 atau 4 sudu.

b. Nasel

Nasel merupakan bagian dari turbin angin yang berfungsi untuk penempatan/housing beberapa komponen turbin angin antara lain unit transmisi, poros, generator, kopling mekanik, rem mekanik, agar terlindung dari pengaruh lingkungan yang membahayakan. Pada umumnya bahan nasel terbuat dari bahan aluminium, besi cor, atau komposit.

c. Drive train

Drive train berfungsi untuk menyalurkan energi mekanis yang dihasilkan oleh rotor melalui poros ke generator untuk menghasilkan energi listrik. Secara umum drive train terdiri dari komponen yang berputar seperti: rotor, poros utama, kopling, *gearbox*, rem, dan generator.

d. Unit transmisi mekanik (roda gigi atau sabuk)

Unit transmisi berfungsi untuk menyalurkan daya putar dari rotor ke generator dan mengubah kecepatan putaran dari lambat dan torsi yang besar menjadi putaran cepat dan torsi yang rendah.

e. Poros utama

Poros utama berfungsi menyalurkan daya putar rotor ke generator secara langsung atau melalui *gearbox*. Poros utama menyalurkan daya dengan torsi tinggi pada kecepatan putar yang rendah yang dihasilkan oleh rotor. Besarnya dimensi poros tergantung besarnya daya/torsi yang disalurkan dan kekuatan bahan. Bahan utama poros rotor adalah baja keras yang dibuat khusus untuk keperluan ini.

f. Rem dan kopling

Pada turbin angin skala kecil, umumnya tidak dilengkapi dengan rem dan

kopling mekanik. Namun untuk keamanan dan perawatan, turbin angin kecil menggunakan rem elektrik, yaitu dengan menghubungkan kabel output generator secara berulang, sampai rotor berhenti berputar.

Pada turbin angin skala kecil, rem sangat diperlukan karena pengeraman elektrik tidak lagi dapat digunakan. Rem mekanik ini dapat berupa rem drum atau disk, bergantung pada konstruksi yang diinginkan dan tempat pemasangan serta besarnya torsi yang dilakukan pengereman. Rem mekanik dapat dipasang pada torsi tinggi (poros utama) atau pada poros torsi rendah (putaran tinggi).

#### g. Sistem geleng

Sistem geleng (*yawing system*) merupakan salah satu komponen penting turbin angin baik skala kecil maupun skala besar yang berfungsi sebagai pengarah turbin angin agar sesuai dengan arah angin aktual. Pada turbin angin skala kecil, sistem geleng dikendalikan oleh ekor dan lebih dikenal sistem orientasi.



**Gambar 2.12 Turbin angin sumbu horizontal**

## 2. Komponen Elektrikal

a. Generator listrik

Generator listrik merupakan mesin listrik yang dapat mengubah energi putar menjadi energi listrik dengan menggunakan prinsip kerja induksi elektromagnetik. Umumnya turbin angin skala kecil menggunakan generator magnet permanen atau generator sinkron yang menghasilkan arus bolak balik dengan frekuensi yang berubah-ubah. Oleh konverter, arus bolak balik tersebut diserahkan dan disimpan kedalam baterai atau diubah kembali menjadi arus bolak balik oleh Inverter dengan frekuensi 50Hz yang siap dikonsumsi oleh beban.

Untuk PLTB skala kecil modus *offgrid*, generator yang umum digunakan adalah :

- i. Generator magnet permanen yang menghasilkan tegangan ac yang dalam sistem kontrol diserahkan menjadi dc dan untuk menghasilkan listrik ac dapat menggunakan inverter; atau
- ii. Generator sinkron yang menghasilkan tegangan listrik ac 3 fasa dan dilengkapi dengan rangkaian penyearah untuk menghasilkan tegangan dc, umumnya 12 Vdc atau 24 Vdc dan biasanya digunakan untuk memasok daya ke pengguna yang dilengkapi dengan baterai penyimpan. Selanjutnya, tegangan AC dapat diperoleh dengan melengkapi dengan inverter yakni untuk menjadikan tegangan DC menjadi tegangan AC 50 Hz sesuai dengan kebutuhan pelanggan. Untuk turbin angin yang menggunakan generator sinkron ac dan dihubungkan ke grid (*On-grid*) diperlukan sinkronisasi antara output PLTB (tegangan dan frekuensi) dan tegangan dan frekuensi jaringan.

b. Sistem penyimpanan

Sistem penyimpanan berupa baterai yang berfungsi untuk menyimpan energi listrik yang dihasilkan oleh PLTB dengan mempertimbangkan spesifikasi sebagai berikut:

Jenis: Flooded/Gel Lead-Acid atau Lithium Ion.

Tipe: *Deep cycle*

*Depth of Discharge* (DOD): 80%

Umur pakai: 2000 *cycle @80% DOD*

Temperatur: Max. 50°C

c. *Charge controller* dan Inverter

*Charge controller* berfungsi untuk mengontrol arus pengisian ke baterai dan mengatur/membatasi arus pemakaian beban serta membuang arus keluaran turbin angin ke dump load saat baterai dalam kondisi penuh. Sedangkan Inverter berfungsi untuk mengubah listrik searah (DC) menjadi listrik bolak balik (AC) 24V/50Hz. Subsistem kontrol berfungsi untuk mengontrol daya listrik ke pemakai/pengguna/konsumen dengan kondisi operasi tertentu yakni tegangan, arus, dan frekuensi serta pasokan energi yang telah ditetapkan. Subsistem kontrol yang dilengkapi pada panel kontrol pada umumnya adalah kontrol elektronik untuk pengaturan tegangan dan frekuensi, dan penggunaan *dumload* berupa beban resistif untuk pengontrolan pasokan lebih ke pemakai. Fungsi sistem kontrol pada sistem *Off-grid* yang digunakan untuk mengisi baterai adalah mencegah pengisian-lebih pada baterai, dan sistem ini umumnya adalah dari jenis elektronik

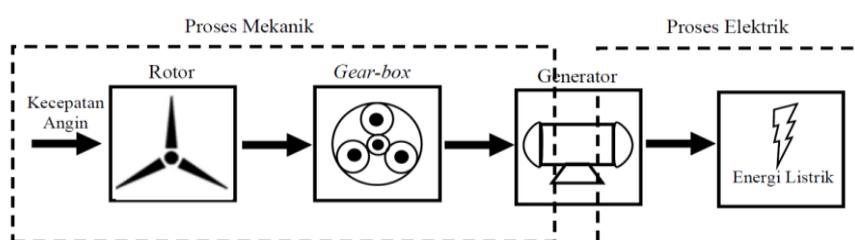


**Gambar 2.13 WindController**

### 2.2.9 Prinsip Kerja PLTB

Prinsip kerja kincir angin baik yang tipe vertikal maupun horizontal, sama dalam hal mengubah energi angin menjadi energi mekanik. Perbedaan utama terletak pada desain *blade* atau sudu yang digunakan untuk menangkap hembusan arah angin. Kincir angin horizontal dapat menangkap hembusan angin dari berbagai arah karena dirancang tegak lurus terhadap penyangga. Namun, umumnya kincir angin vertikal didesainnya ditujukan untuk memaksimalkan putaran dengan mengarahkan blade ke satu arah tertentu. Ini dicapai dengan menggunakan sirip pada kincir angin, yang membantu mengidentifikasi arah angin yang dominan. Dengan cara ini, putaran blade dapat dioptimalkan untuk mengikuti arah angin yang paling kuat, sehingga efisiensi penggunaan energi angin dapat ditingkatkan. Jenis kincir angin ini memiliki kemampuan untuk berputar hingga 360°, sehingga dapat dengan optimal menyesuaikan diri dengan arah angin yang diperlukan. Saat blade kincir angin berputar, gerakan ini menggerakkan generator yang terhubung dengan kincir angin. Rotor pada generator ikut berputar seiring dengan perputaran blade kincir angin. Dengan adanya perputaran rotor ini, medan-medan listrik akan terbentuk di dalam generator. Hal ini akan menghasilkan listrik dari generator, mengubah energi mekanik dari putaran kincir angin menjadi energi listrik. Listrik

yang dihasilkan oleh generator keluar dari perangkat tersebut dan dihubungkan ke komponen berikutnya melalui kabel. Setelah itu, listrik ini mengalami proses pengolahan oleh konverter kemudian disimpan dalam baterai. Pada perangkat konverter, listrik diatur dan diolah sehingga keluarannya sesuai dengan kebutuhan baterai. Baterai memiliki peran penting sebagai tempat penyimpanan sementara listrik sebelum disalurkan lebih lanjut. Penggunaan baterai ini diperlukan karena tegangan keluaran oleh generator bisa tidak stabil. Karena angin sebagai sumber energi tidak selalu dapat diprediksi dan ketersediaannya fluktuatif, maka konverter digunakan untuk menjaga stabilitas tegangan, sementara baterai berfungsi sebagai wadah penyimpanan energi listrik. Dari baterai, listrik kemudian dialirkan ke inverter untuk diubah menjadi listrik AC (Alternating Current) yang bisa dimanfaatkan untuk kebutuhan seperti penerangan, pengairan, dan lainnya. Pada unit inverter ini, tegangan listrik dinaikkan menjadi 220Vac agar sesuai dengan kebutuhan konsumen. Proses ini akan berlangsung terus-menerus selama blade kincir angin masih berputar dan menghasilkan energi..



**Gambar 2.14 Sistem kerja PLTB secara umum**

### 2.2.10 Potensi Energi Angin

Energi angin merupakan salah satu jenis energi alternatif yang menjanjikan karena sumbernya selalu tersedia secara alami dan merupakan sumber energi yang

ramah lingkungan serta dapat diperbaharui. Dalam penggunaannya, terdapat dua tahap konversi energi yang dapat dijelaskan sebagai berikut :

1. Aliran angin akan menggerakkan baling-baling (rotor), mengakibatkan putaran rotor yang sejalan dengan arah angin yang mengalir.
2. Rotor berputar seporos dengan generator sehingga menghasilkan listrik.

Energi kinetik angin merupakan sumber daya yang berasal dari gerakan angin dan dapat digunakan untuk menggerakkan kincir angin. Untuk mengubah energi ini menjadi energi listrik, langkah awal adalah melakukan perhitungan energi kinetik angin dengan menggunakan rumus yang berikut :

$$E_k = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 \dots\dots\dots(2.5)$$

Keterangan :

m = massa angin yang mengalir (Kg)

v = kecepatan angin (m/s)

Energi mekanis yang terkandung dalam angin bisa dimanfaatkan melalui perangkat turbin angin. Cara untuk menghitung potensi energi kinetik yang ada pada aliran udara pada suatu area penampang A dengan kecepatan v dapat dijabarkan menggunakan rumus yang didasarkan pada prinsip Hukum Kekekalan Energi, seperti yang tertera berikut ini :

$$P_k = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v^3 \dots\dots\dots(2.6)$$

(Diana H, dkk, 2019:5)

Keterangan :

Pk = daya kinetik, (W)

$\rho$  = massa jenis udara, ( $Kg/m^3$ )

A = luas sapuan blade turbin, ( $m^2$ )

v = kecepatan angin, ( $m/s$ )

Pembangkit listrik tenaga angin menghasilkan tegangan dalam bentuk arus searah (DC), dan untuk menghitung daya keluarannya, kita dapat menggunakan rumus Hukum Kekekalan Energi berikut :

$$P_{out \text{ angin}} = V_a \cdot I_a \dots \dots \dots (2.7)$$

(Diana H, dkk, 2019:5)

Keterangan :

P out angin = daya keluaran generator DC (W)

Va = tegangan keluaran generator DC (V)

Ia = arus keluaran generator DC (A)