

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Definisi Energi Angin

Energi angin adalah salah satu jenis sumber energi terbarukan yang potensial untuk menghasilkan energi listrik maupun mekanik melalui proses konversi ke mekanik dan selanjutnya ke listrik. Energi kinetik yang terdapat pada angin dapat diubah menjadi energi mekanik untuk memutar peralatan (pompa piston, penggilingan, dan lain-lain). Sementara itu, pengolahan selanjutnya dari energi mekanik yaitu untuk memutar generator yang dapat menghasilkan listrik. Kedua proses perubahan ini disebut konversi energi angin; sedangkan sistem atau alat yang melakukannya disebut Sistem Konversi Energi Angin. Selanjutnya, untuk menghasilkan listrik disebut turbin angin; dan untuk komponen mekaniknya disebut kincir angin. Sekarang ini, pemanfaatan energi angin yang lebih umum yakni dalam bentuk energi listrik, sementara bentuk energi mekanik atau yang lebih dikenal sebagai pemanfaatan langsung mulai berkurang.



Gambar 2. 1 Energi Angin

Sementara itu untuk syarat dan kondisi angin yang dapat digunakan untuk menghasilkan energi listrik dapat dilihat pada tabel 2.1. Angin kelas 3 adalah batas minimum dan angin kelas 8 adalah batas maksimum energi angin yang dapat dimanfaatkan untuk menghasilkan energi listrik. Sumber: <http://puslitbang.bmkg.go.id>.

Tabel 2.1 Klasifikasi Kecepatan Angin Menurut Skala Beaufort

Skala Beaufort	Kategori	Satuan km/jam	Satuan Knots
0	Udara tenang	0	0
1-3	Angin Lemah	<19	<10
4	Angin Sedang	20-29	11-16
5	Angin Segar	30-39	17-21
6	Angin Kuat	40-50	22-27
7	Angin Ribut	51-62	28-33
8	Angin Ribut Sedang	63-75	34-40
9	Angin Ribut Kuat	76-87	41-47
10	Badai	88-102	48-55
11	Badai Kuat	103-117	56-63
12+	Topan	>118	>64

2.2 Geografis dan Kondisi Angin Kota Palembang

Palembang merupakan salah satu kota metropolitan di Indonesia dan secara geografis terletak antara $2^{\circ} 52'$ sampai $3^{\circ} 5'$ Lintang Selatan dan $104^{\circ} 37'$ sampai $104^{\circ} 52'$ Bujur Timur dengan ketinggian rata-rata 8 meter dari permukaan air laut. Luas wilayah Kota Palembang sebesar $400,61 \text{ km}^2$ yang secara administrasi terbagi atas 16 kecamatan dan 107 kelurahan. Kota Palembang merupakan ibukota Sumatera Selatan dengan batas wilayah yaitu di sebelah utara, timur dan barat dengan Kabupaten Banyuasin; sedangkan sebelah selatan berbatasan dengan Kabupaten Muara Enim.

Pada tahun 2003 suhu udara rata-rata berkisar antara $23,9^{\circ}$ - 32° Celsius, $24,04^{\circ}$ - $32,60^{\circ}$ Celsius (2004), $22,44^{\circ}$ - $33,65^{\circ}$ Celsius (2005), $26,4^{\circ}$ - $28,9^{\circ}$ Celsius (2006) dan $21,2^{\circ}$ - $35,5^{\circ}$ Celsius (2007). Pada tahun 2007, curah hujan terbesar jatuh pada bulan April dengan jumlah curah hujan 540 mm^3 . Sedangkan kelembaban udara tahun 2007 rata-rata 80%, kecepatan angin rata-rata 20 km/jam dengan arah terbesar dari arah barat laut, serta tekanan udara rata-rata di permukaan laut sebesar 1009 mbar dan di daratan sebesar 1007,5 mbar.

Pada bulan November 2020, arah angin dominan bertiup dari arah barat laut dengan kecepatan rata-rata berkisar antara 1–11 knots. Rata-rata arah angin ditunjukkan oleh vektor resultan yaitu dari arah barat laut (298°) sebesar 7%.

Kecepatan angin maksimum didominasi dari arah barat laut. Kecepatan angin maksimum tertinggi sebesar 22.93 knot berhembus dari arah timur laut pada tanggal 15 November 2020. Rata-rata arah angin maksimum ditunjukkan oleh vektor resultan dari arah barat laut (291°) sebesar 5%. Sumber: <https://staklimpalembang.wordpress.com>.



Gambar 2. 2 Letak Geografis Kota Palembang, Sumatera Selatan

2.3 Karakteristik Low Wind Speed

Karakteristik angin diukur dari kecepatan rata-ratanya yang dihasilkannya. Dari berbagai macam variasi kecepatan rata-rata angin, karakteristik angin diklasifikasikan menjadi kelas-kelas yang mencakup kelas 1 sampai kelas 4 yang ditunjukkan pada Tabel 3. Klasifikasi berikut disadur dari *International Standard: Wind Turbine* yang diterbitkan oleh *International Electrotechnical Commission* (IEC).

Tabel 2.2 Klasifikasi Turbin Angin

Parameters (M/S)	Class I	Class II	Class III	Class IV
Average wind speed	10	8,5	7,5	6
50 Years return gust speed	70	59,5	52,5	42

Dari pendefinisian masing-masing kelas untuk kecepatan rata-rata angin, kategori angin dengan kecepatan rendah atau Low Wind Speed (LWS) berada pada klasifikasi kelas III dan kelas IV. Pada kelas III kecepatan rata-rata angin mencapai 7,5 m/s dan untuk kelas IV kecepatan angin adalah 6 m/s.

2.4 Turbin Angin

Turbin angin dapat menghasilkan listrik dengan tenaga angin untuk menggerakkan generator. Energi angin merupakan energi alternative yang memiliki prospek yang baik karena selalu tersedia dialam dan sebagai sumber energi bersih yang terbarukan kembali. Karena bergerak angin memiliki energi kinetik. Energi angin dapat dikonversi atau ditransfer ke dalam bentuk energi lain seperti listrik atau mekanik dengan menggunakan kincir atau turbin angin. Energi dari turbin angin tersebut digunakan sebagai pembangkit energi utama dalam menyuplai kebutuhan energi primer konsumen dan apabila ada kelebihan pasokan energi oleh turbin angin, maka energi tersebut akan disimpan oleh baterai dalam bentuk arus DC.

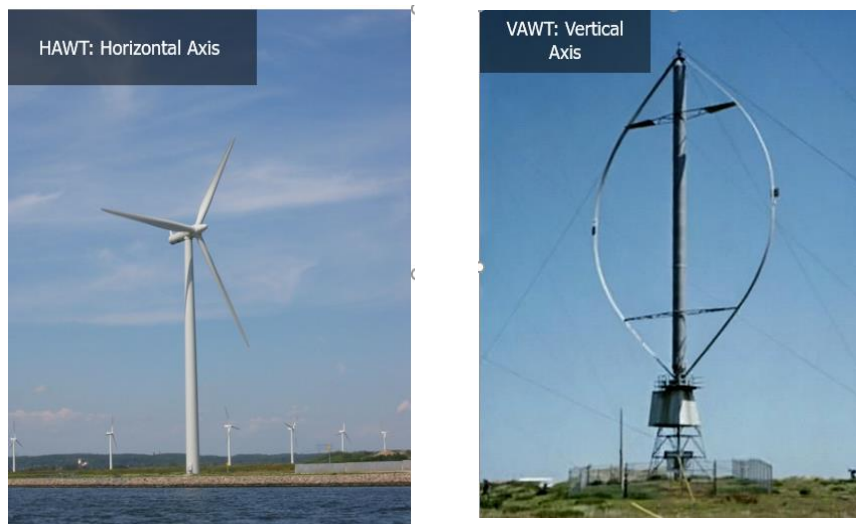
Turbin angin atau yang sering disebut kincir angin merupakan salah satu mesin konversi energi yang menghasilkan energi listrik, dari pemanfaatan perubahan energi kinetik angin menjadi energi mekanik untuk memutar generator dan mengeluarkan listrik, sehingga dapat membangkitkan energi listrik. Kincir angin secara umum dapat dikatakan sebagai suatu alat yang digerakkan oleh udara untuk menghasilkan gaya mekanis dan dilanjutkan sesuai kebutuhan. Penggunaan desain berbagai kombinasi yang berbeda-beda, yang meliputi bentuk sudu, jumlah sudu, dan tentunya sudu tersebut ditetapkan sebagai variable untuk menetapkan perbandingan perlengkapan pada transmisi untuk menghasilkan efisiensi lebih tinggi, keandalan yang lebih besar atau untuk mengurangi biaya. Model yang paling sederhana didasarkan pada suatu teori daya gerak yang dikembangkan selama seabad yang lalu untuk meramalkan bentuk baling-baling kapal. Adaptasi dari teori awal ini untuk memutar turbin telah dikerjakan oleh Bilau pada tahun 1925 dan Betz pada tahun 1927. Selama ini telah dipahami selama bertahun-tahun kincir angin yang utama adalah horizontal-axis (poros datar) dan vertical-axis (poros tegak).

Pada umumnya ada dua jenis turbin angin yaitu turbin angin yang dibangun untuk menghasilkan listrik dari angin dengan kecepatan tinggi dan ada jenis angin yang dibangun untuk daerah yang kecepatan anginnya rendah. Orang-orang dulu menggunakan

kincir angin untuk keperluan tradisional antara lain seperti penggerindaan, menggiling jagung. Multi-blade memutar pompa dan baling-baling yang modern seperti jenis kincir yang belakangan sering disebut cross wind-axis turbin yang mungkin mempunyai asal lebih awal dan meliputi suatu bentuk wujud dari Cina masa lampau dan Afganistan.

2.4.1 Jenis Turbin Angin

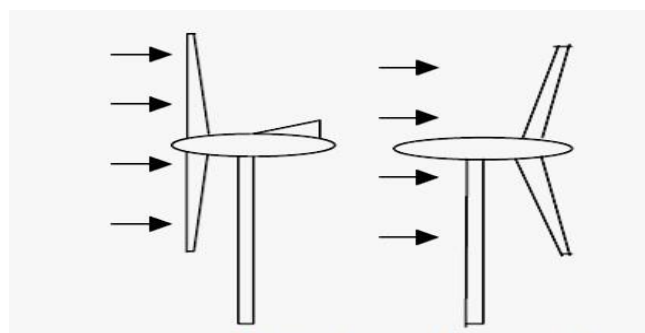
Turbin angin (*wind turbines*) di klasifikasikan menjadi dua jenis umum yaitu sumbu horizontal (HAWT) dan sumbu vertikal (VAWT). Secara umum pada mesin sumbu horizontal sudunya berotasi pada sumbu yang paralel ke tanah sedangkan sumbu vertikal memiliki sudu yang berotasi sejajar ke tanah.



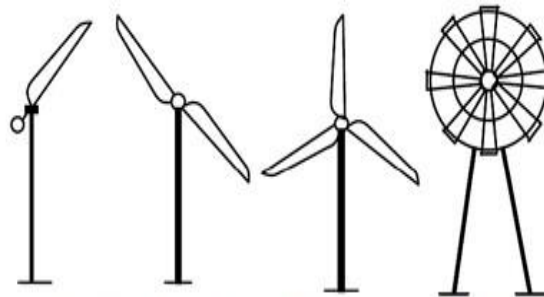
Gambar 2. 3 Jenis Turbin Angin

2.4.2 Turbin Angin Sumbu Horizontal

Turbin angin sumbu horizontal mempunyai sumbu putar yang terletak sejajar dengan permukaan tanah dan sumbu putar rotor yang searah dengan arah angin. Komponen utama turbin angin sumbu horizontal terdiri dari, Sudu (*blade*), ekor (*tail*), tiang penyangga (*tower*), dan alternator. Berdasarkan letak rotor terhadap arah angin, turbin angin sumbu horizontal dibedakan menjadi dua macam yaitu : *Upwind* dan *Downwind*.



Gambar 2. 4 Jenis turbin angin sumbu horizontal
 Turbin angin jenis *upwind* memiliki rotor yang menghadap arah datangnya angin sedangkan turbin angin jenis *downwind* memiliki rotor yang membelakangi arah datang angin.



Single bladed, two bladed, three bladed and multi bladed turbines

Gambar 2. 5 Jenis Turbin Angin berdasarkan jumlah sudu

2.4.3 Turbin Angin Sumbu Vertikal

Turbin angin sumbu vertikal adalah jenis turbin angin yang pertama dibuat manusia. Pada awalnya, putaran rotornya hanya memanfaatkan efek *magnus* yaitu karena adanya selisih gaya *drag* pada kedua sisi rotor atau sudu sehingga menghasilkan momen gaya terhadap sumbu putar rotor. Turbin angin poros vertical atau yang lebih dikenal memiliki ciri utama yaitu keberadaan poros tegak



Gambar 2.6 Jenis-Jenis Turbin Angin Sumbu Vertikal

lurus terhadap arah aliran angin atau tegak lurus terhadap permukaan tanah.

2.4.4 Elemen Turbin Angin

Prinsip dasar kerja dari turbin angin adalah mengubah energi mekanis dari angin menjadi energi putar pada kincir, selanjutnya putaran kincir digunakan untuk memutar generator, yang akhirnya akan menghasilkan listrik. Elemen-elemen turbin angin sumbu horizontal secara umum terdiri dari sudu-sudu (*blade*), hub, Gearbox, generator, ekor, mekanisme yaw, menara (*tower*).



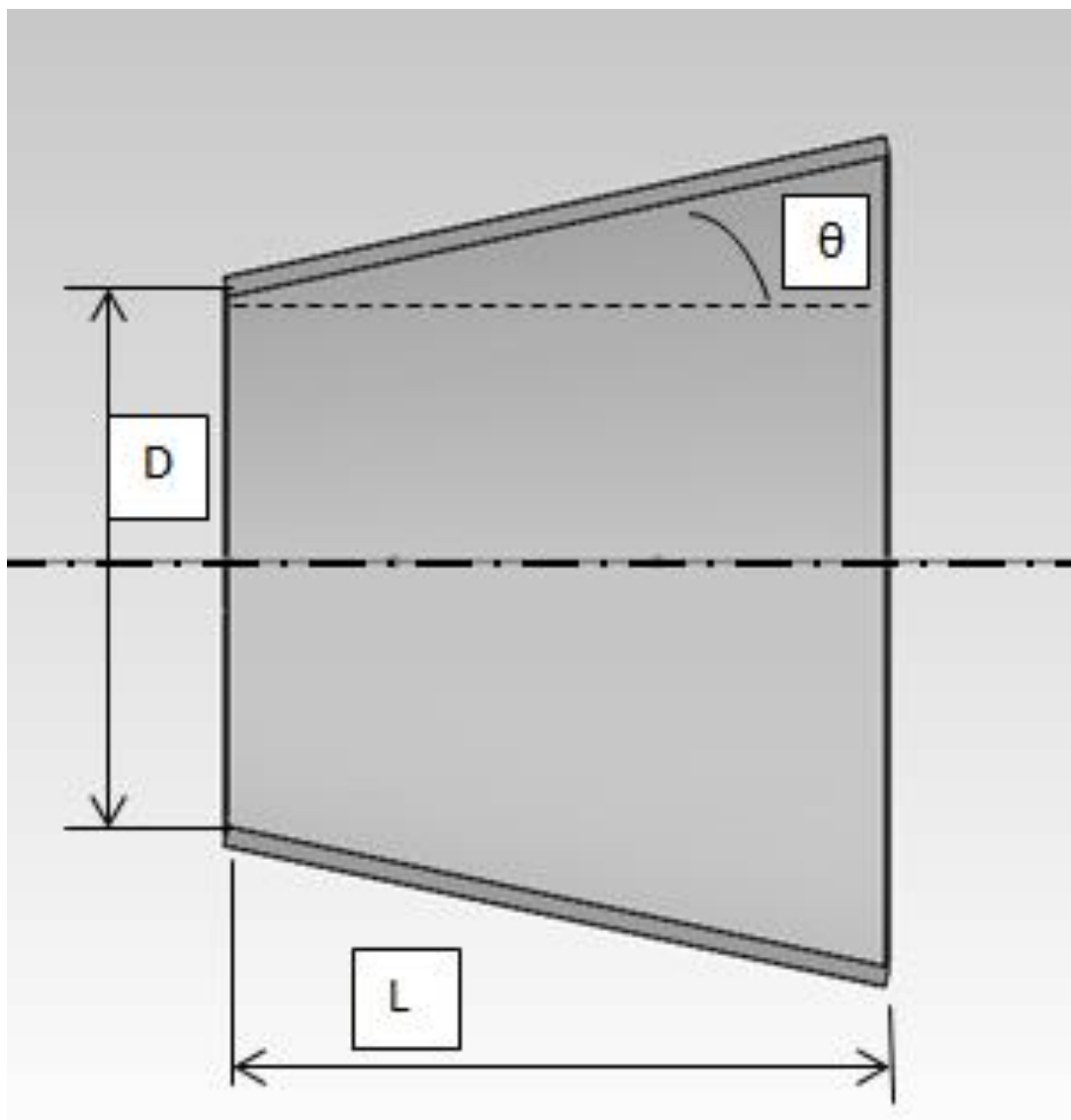
Gambar 2. 7 Komponen *Wind Turbine* Angin

Nacelles: *nacelle* merupakan rumah komponen utama dari turbin angin, seperti pengontrol, gearbox, generator, dan poros. *Generator* : untuk menghasilkan energi listrik dari putaran turbin, perangkat turbin angin harus menggunakan generator.

Generator adalah alat yang digunakan untuk menghasilkan energi listrik. Prinsip kerja generator adalah menjadikan medan magnet yang ada disekitar konduktor mengalami fluktuasi atau perubahan, sehingga timbul tegangan listrik. Magnet yang berputar disebut rotor dan konduktor yang diam disebut stator.

2.5 Diffuser Augmented Wind Turbine (DAWT)

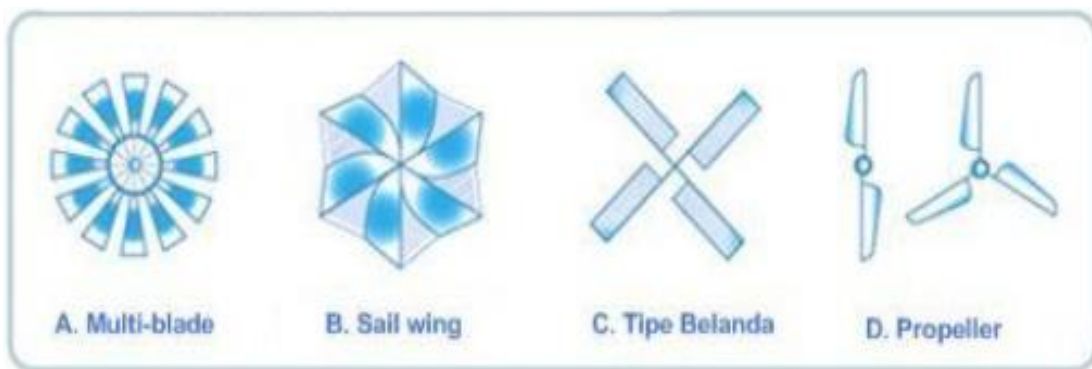
DAWT merupakan pengembangan dari *Horizontal Axis Wind turbine* (HAWT) yang dilengkapi dengan selubung yang berfungsi untuk mempercepat aliran angin. Penggunaan selubung pada DAWT berbentuk kerucut terpancung dengan penampang keluaran yang lebih besar seperti pada Gambar 2.8. DAWT dikembangkan untuk negara yang mempunyai kecepatan angin yang relatif rendah.



Gambar 2. 8 Sketsa Diffuser

2.6 Sudu (*Blade*)

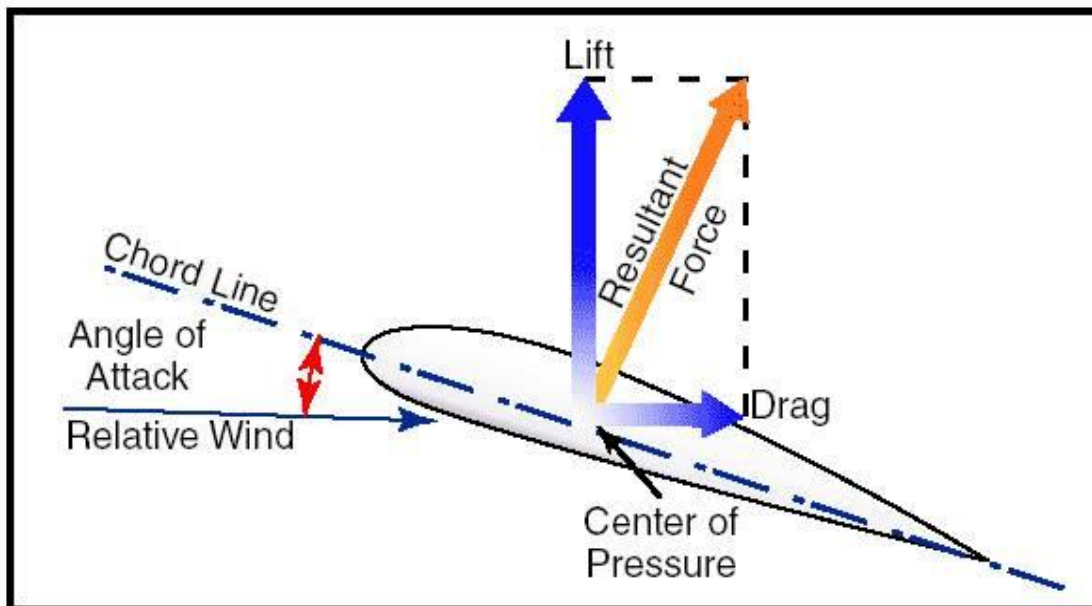
Sudu *Blade* merupakan bagian penting dalam suatu sistem pembangkit listrik tenaga bayu (PLTB), yaitu komponen yang berinteraksi langsung dengan angin. *Blade* berfungsi untuk mengubah gerak angin menjadi gerak mekanik. *Blade* turbin angin ini sendiri dapat dibuat dengan berbagai bahan, tergantung dari segi perancangannya. Pada laporan tugas akhir ini penulis merancang blade Tipe Jenis Multi- blade, sail wing, tipe belanda dengan jumlah masing-masing blade 3 per tipe blade.



Gambar 2. 9 Tipe Blade yg berputar secara Horizontal axis

2.7 Sudut *Blade*

Sudut serang atau angle of attack adalah sudut yang terbentuk oleh chord line terhadap aliran udara. Semakin besar sudut maka daya aerodinamik akan semakin besar. Untuk airfoil simetris pada sudut serang 00, gaya angkat yang dihasilkan akan 0, berbeda dengan airfoil asimetris sekalipun sudut serang 00 tetapi gaya sudah terjadi (Herlambang, 2022). Pada semua unit sudu, variasi sudut pitch memberikan pengaruh terhadap daya listrik yang dihasilkan.



Gambar 2.10 Gaya Aerodinamik Airfoil

Pada penelitian Ahmed, dkk 2021 yang berjudul *Performance enhancement of Savonius wind turbine by blade shape and twisted angle modifications* diuji dengan 4 variasi sudut 0, 12,5, 25 and 35 dengan 2 model berbeda dengan kecepatan angin 9 m/s kinerja terbaik dihasilkan pada sudut 35 untuk kedua model desain. Dan koefisien daya maksimum terjadi pada $k \approx 0,8$. Peningkatan persentase koefisien daya model kedua model tersebut dengan sudut 35 adalah 5,66% dan 5,69%. Dan koefisien daya masing-masing adalah 0,212 dan 0,217. Pada semua unit sudu, variasi sudut pitch memberikan pengaruh terhadap daya listrik yang dihasilkan.

2.8 Perhitungan Daya

Energi kinetik yang terkandung dalam angin inilah yang ditangkap oleh turbin angin untuk memutar rotor. Dengan menganggap suatu penampang melintang A , dimana udara dengan kecepatan v mengalami pemindahan volume untuk setiap satuan waktu, yang disebut dengan aliran volume V sebagai persamaan:

$$V = vA \quad (2)$$

Dimana : V = Laju volume (m^3/s)

v = Kecepatan angin (m/s)

A = Luas Area sapuan rotor (m^2)

Sedangkan aliran massa dengan kecepatan udara p sebagai :

$$m = \rho Av \quad (3)$$

Persamaan-persamaan diatas menunjukkan energi kinetik dan aliran massa yang melewati suatu penampang melintang A sebagai energi P yang ditunjukkan dengan mensubstitusi persamaan (3) ke persamaan (1) menjadi:

$$P = \frac{1}{2} \rho Av^2 \quad (4)$$

Dimana :

P : Daya Mekanik (W)

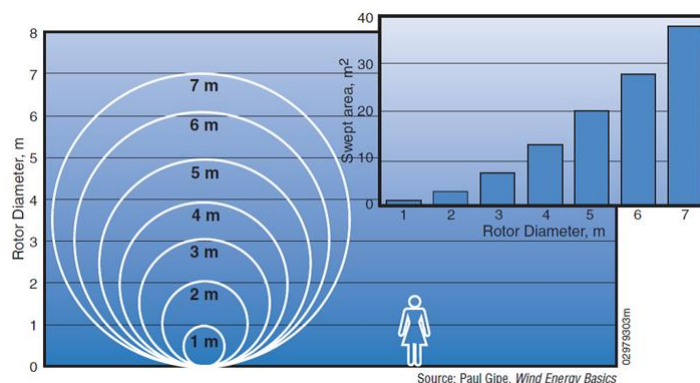
v : Kecepatan angin (m/s)

ρ : densitas udara (ρ rata-rata : $1,2 \text{ kg/m}^3$)

Daya angin maksimum yang dapat diekstrak oleh turbin angin dengan luas sapuan rotor A adalah:

$$P_T = \frac{16}{27} \frac{1}{2} \rho Av^3 \quad (5)$$

Angka $16/27$ (= 59.3%) ini disebut batas Betz (Betz limit, diambil dari ilmuwan Jerman Albert Betz). Angka ini secara teori menunjukkan efisiensi maksimum yang dapat dicapai oleh rotor turbin angin tipe sumbu horisontal. Pada kenyataannya karena ada rugi-rugi gesekan dan kerugian di ujung sudu, efisiensi aerodinamik dari rotor (η), η rotor ini akan lebih kecil lagi yaitu berkisar pada harga maksimum 0.45 untuk sudu yang dirancang dengan sangat baik (Daryanto, 2007).



Gambar 2.11 Relative Size of Small Wind Turbines

2.9 Tip Speed Ratio (TSR)

Tip speed ratio merupakan salah satu parameter penting dalam perancangan suatu turbin angin. *Tip Speed Ratio* dilambangkan sebagai λ merupakan perbandingan antara kecepatan tangensial maksimum dari turbin dengan kecepatan *free stream* yang melintasi turbin. sehingga secara matematis dapat dinyatakan sebagai

$$\lambda = \text{TSRP} = \frac{\omega D}{V} \quad (6)$$

dimana :

$\lambda = \text{Tip speed ratio}$

$\omega = \text{Kecepatan putar turbin (rad/s)}$

$D = \text{Diameter turbin terluar}$

$V = \text{Kecepatan angin (m/s)}$

Contoh :

Pada suatu turbin angin memiliki kecepatan putaran turbin yaitu 582 rpm saat kecepatan angin yang berlangsung yaitu 3.5 m/s, jika diameter turbin keluar berukuran 380 mm maka *tip speed ratio* dapat dihitung yaitu :

Diketahui :

$\omega = 582 \text{ rpm}$, dikonversikan :

$$\omega = 582 \text{ rpm} \times \frac{2\pi}{60 \text{ s}} = 60,70 \text{ rad/s}$$

$D = 0,38 \text{ m}$

$V = 3,5 \text{ m/s}$

Sehingga,

$$\lambda = \text{TSRP} = \frac{60,7 \frac{\text{rad}}{\text{s}} \times 0,38 \text{ m}}{3,5 \text{ m/s}} = 6,59 \text{ rad}$$

Maka, *tip speed ratio* yang didapatkan yaitu 6,59 rad

Mengetahui *tip speed ratio*, maka dapat diketahui performa dari suatu turbin angin. Performa tersebut menyangkut seberapa besar torsi hasilan dari turbin dapat bekerja untuk kecepatan angin tertentu. Karakteristik dari masing-masing turbin tentunya berbeda-beda. Beberapa turbin mampu bekerja pada *tip speed ratio* yang rendah, ada pula yang baru dapat bekerja pada *tip speed ratio* yang tinggi. Selain itu suatu jenis turbin angin, tidak serta merta dapat bekerja maksimal pada setiap *tip speed ratio*.

2.10 SolidWorks

Solidworks dikembangkan oleh lulusan MIT Jon Hirschtick dan dibeli oleh Dassault Systems pada tahun 1997. Perangkat lunak ini sekarang mencakup sejumlah program yang dapat digunakan untuk desain 2D dan 3D.

Solidworks digunakan untuk mengembangkan sistem mekatronik dari awal hingga akhir. Pada tahap awal, perangkat lunak digunakan untuk perencanaan, ide visual, pemodelan, penilaian kelayakan, pembuatan prototipe, dan manajemen proyek. Perangkat lunak ini kemudian digunakan untuk merancang dan membangun elemen mekanik, listrik, dan perangkat lunak. Akhirnya, perangkat lunak dapat digunakan untuk manajemen, termasuk manajemen perangkat, analitik, otomatisasi data, dan layanan cloud.

Solusi perangkat lunak *Solidworks* digunakan oleh insinyur mekanik, listrik, dan elektronik untuk membentuk desain yang terhubung. Rangkaian program ditujukan untuk menjaga agar semua engineer tetap berkomunikasi dan mampu menanggapi kebutuhan atau perubahan desain.

Solidworks terus mengadaptasi solusi mereka untuk memasukkan kemampuan baru berdasarkan umpan balik pengguna. *Solidworks* 2020 menampilkan sejumlah peningkatan, seperti peningkatan kinerja, alur kerja yang disederhanakan, dan 3DExperience, platform berbasis cloud. Sumber : <https://seacadtech.co.id>.

2.10.1 Solidworks Simulation

Simulasi *Solidworks* menawarkan alat yang kuat dan intuitif di mana engineer produk dapat memvalidasi ide desain baru mereka secara virtual, mengevaluasi kinerja, dan meningkatkan kualitas dengan cepat dan efisien. Solusi Simulasi Struktural yang tersedia untuk pengguna *Solidworks* menyediakan serangkaian kemampuan analisis struktural yang komprehensif untuk memandu keputusan desain dan meningkatkan kinerja dan kualitas produk.

- Solusi analisis struktural tertanam CAD menggunakan Analisis Elemen Hingga (FEA) untuk memprediksi kinerja kehidupan nyata.
- Kemampuan komprehensif yang mudah digunakan menyelesaikan semuanya, mulai dari analisis linier sederhana komponen tunggal hingga simulasi rakitan lengkap lengkap dengan kontak dan non-linier.
- Solusi yang mendukung cloud memberikan akses ke teknologi Abaqus yang kuat, terbukti, dan skalabel.
- Pahami performa produk di awal proses desain untuk lebih berinovasi dan menghindari pengerjaan ulang.

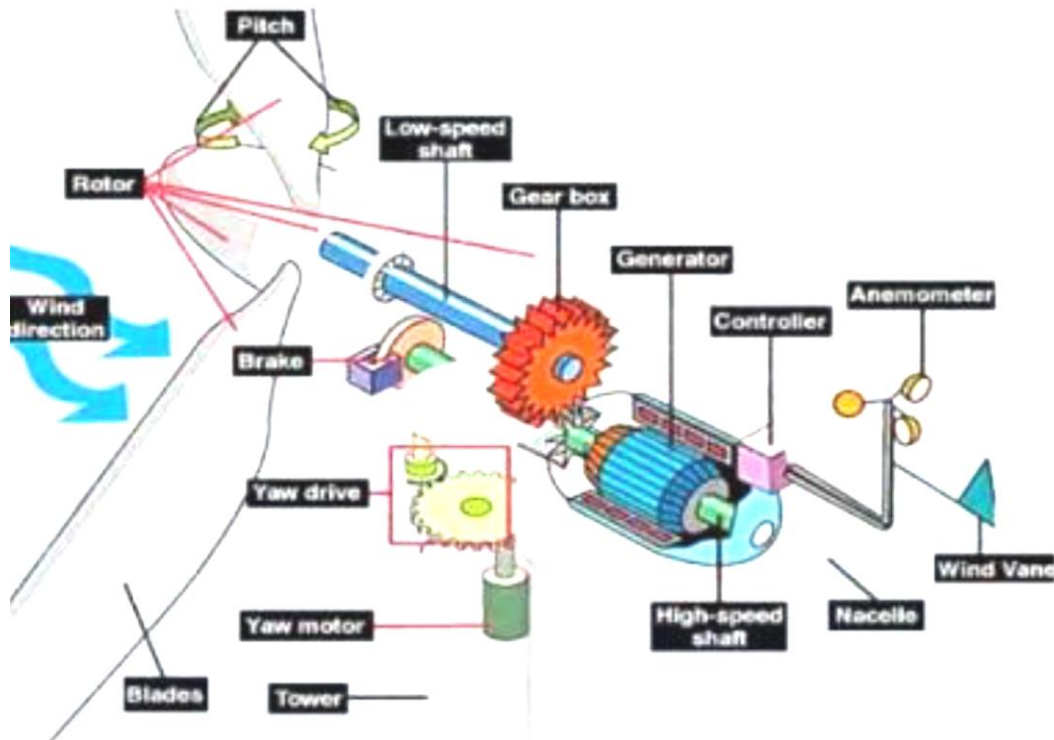
2.11 Komponen Turbin Angin

Adapun komponen dari turbin angin adalah sebagai berikut :

1. *Blade* (baling – baling/sudu), blade turbin angin berfungsi untuk menerima energi dari angin (energi kinetik) dan merubahnya menjadi energi putar untuk kemudian diteruskan ke generator melalui gearbox.
2. *Hub*, fungsi utama dari hub yaitu menghubungkan blade atau sudu dengan poros input turbin angin.
3. *Pitch* (kontrol pitch sudu), pitch berfungsi untuk mengatur posisi sudut pada blade saat angin bertiup mengenai turbin angin tersebut.
4. *Brake*, berfungsi untuk mengatur kecepatan blade agar tetap stabil saat kondisi kecepatan angin terlalu tinggi atau terlalu rendah.
5. Poros,poros turbin angin memiliki fungsi utama yaitu meneruskan putaran dari Blade menuju ke generator. Poros ini terdapat di dalam gear box.
6. *Gear box*, berfungsi sebagai tempat atau wadah untuk poros input dan output, gear input dan output, serta bantalan input dan input. Di dalam gear box putaran dari sudu di ubah agar sesuai dengan spesifikasi rpm generator yang dipakai dengan menggunakan roda gigi pembanding.
7. Generator, generator adalah komponen yang penting di dalam turbin angin. Komponen ini berfungsi untuk merubah energi gerak menjadi energi listrik. Generator menggunakan prinsip induksi elektromagnetis untuk menghasilkan arus listrik. Generator terdiri atas dua bagian utama yaitu kumparan jangkar dan

kumparan medan yang ditempatkan pada stator dan rotor. Stator merupakan bagian yang diam sedangkan rotor merupakan bagian yang bergerak.

8. *Tower*, berfungsi sebagai penyangga komponen – komponen dari turbin angin seperti Blade, Generator, dan Tail. Untuk turbin angin jenis horizontal, Semakin tinggi tower maka daya yang akan dihasilkan juga akan semakin meningkat.



Gambar 2.12 Komponen Turbin Angin

2.12 Prinsip Kerja Generator DC

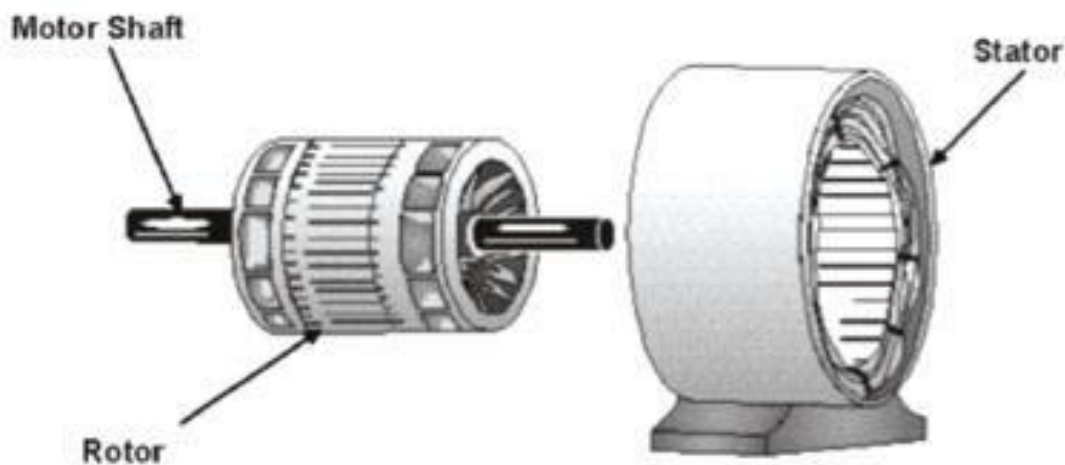
Generator adalah sebuah mesin yang berfungsi untuk mengubah energi mekanis menjadi energi listrik. Listrik yang dihasilkan oleh generator dapat berupa AC ataupun DC, bergantung dari tipe generator. Generator DC adalah generator yang menghasilkan arus DC/ arus searah. Generator tidak memproduksi listrik hanya mengubah satu bentuk energi menjadi suatu bentuk lain dalam hal ini energi mekanik diubah menjadi energi listrik.

Generator bekerja berdasarkan prinsip induksi elektromagnetik yang diciptakan oleh Michael Faraday pada tahun 1831 – 1832. Faraday menyatakan bahwa aliran muatan listrik dapat diinduksi dengan cara menggerakkan konduktor listrik (kawat yang berisi muatan listrik) di sebuah medan magnet. Gerakan inilah

yang menciptakan perbedaan tegangan antara dua ujung kawat atau konduktor listrik yang menyebabkan muatan listrik mengalir dan menghasilkan arus listrik sehingga dapat disimpulkan untuk menciptakan energi listrik, maka perlu ada sebuah medan magnet yang berputar di sekitar kumparan atau kawat. Medan magnet yang dimaksud disini ialah sebuah komponen yang memiliki garis gaya magnet seperti magnet permanen atau coil.

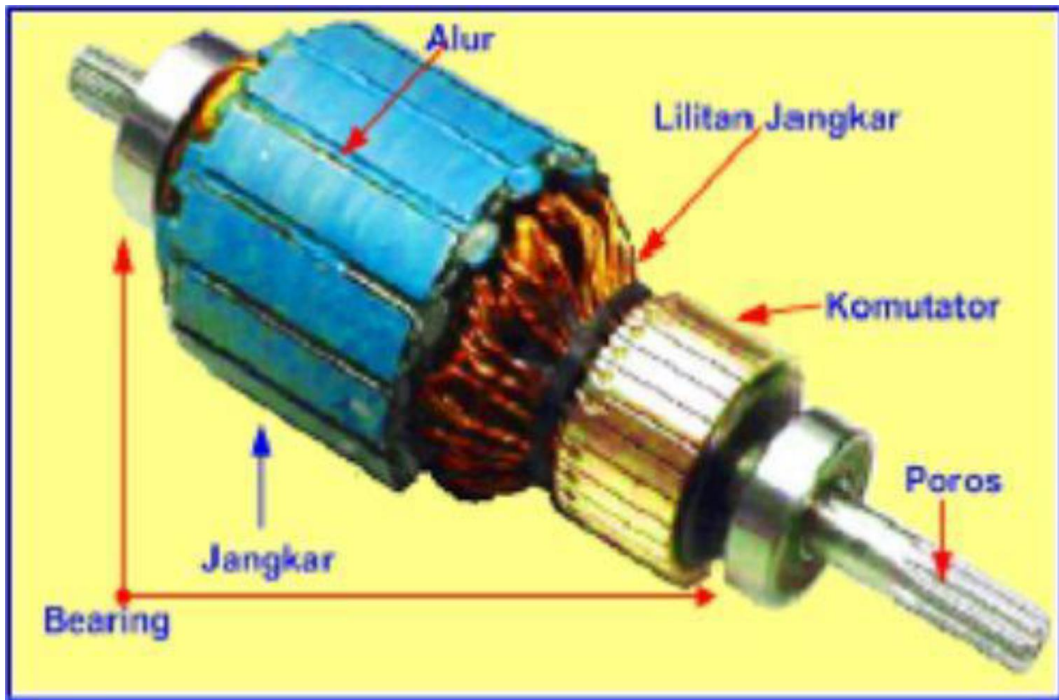
Secara umum, Generator DC terdiri dari 3 bagian utama, yaitu:

1. Stator, adalah bagian yang diam, di mana terdapat lilitan medan (field) atau lebih dikenal dengan nama eksitasi. Berfungsi sebagai tempat pembangkitan medan magnet.
2. Rotor, adalah bagian yang berputar, di mana terdapat lilitan jangkar (armature) atau angker, Berfungsi sebagai tempat pembangkitan tegangan induksi GGL.
3. Komutator, adalah alat yang mengubah tegangan arus bolak-balik menjadi arus searah.



Gambar 2.13 Rotor dan Stator pada Generator DC

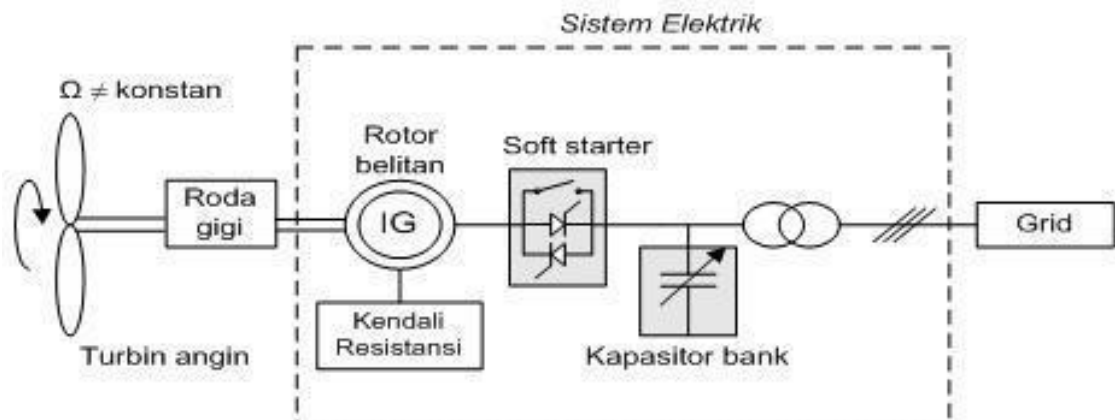
Belitan jangkar terdiri dari beberapa kumparan yang dipasang di dalam alur jangkar. Tiap-tiap kumparan terdiri dari lilitan kawat atau lilitan batang.



Gambar 2.14 Jangkar Generator DC

2.13 Sistem Elektrik PLTB

Secara umum sistem kelistrikan dari PLTB dapat dibagi menjadi 2 yaitu kecepatan konstan dan kecepatan berubah. Keuntungan dari sistem kecepatan konstan (fixed-speed) adalah murah, sistemnya sederhana dan kokoh (robast). Sistem ini beroperasi pada kecepatan putar turbin yang konstan dan menghasilkan daya maksimum pada satu nilai kecepatan angin. Sistem ini biasanya menggunakan generator tak-serempak (unsynchronous generator), dan cocok diterapkan pada daerah yang memiliki potensi kecepatan angin yang besar.



Gambar 2.15 Sistem PLTB Kecepatan Konstan (*Fixed-Speed*)

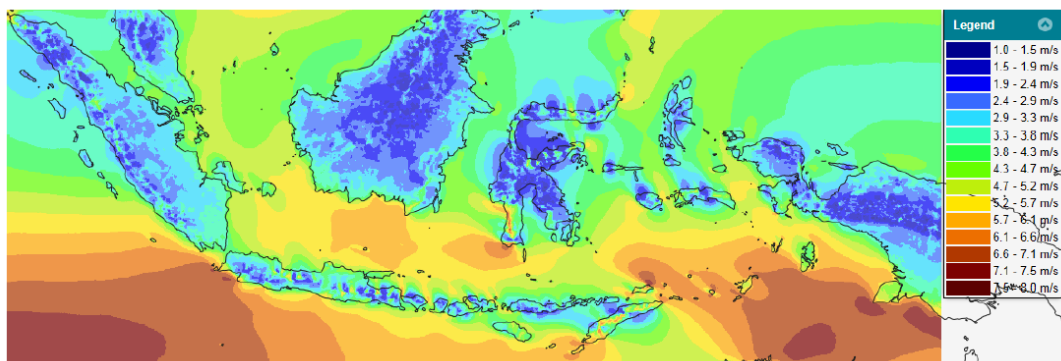
Kelemahan dari sistem ini adalah generator memerlukan daya reaktif untuk bisa menghasilkan listrik sehingga harus dipasang kapasitor bank atau dihubungkan dengan grid. Sistem ini rentan terhadap pulsating power menuju grid dan rentan terhadap perubahan mekanis secara tiba-tiba. Selain kecepatan konstan, ada juga sistem turbin angin yang menggunakan sistem kecepatan berubah (*variable speed*), artinya sistem didesain agar dapat mengekstrak daya maksimum pada berbagai macam kecepatan. Sistem *variable speed* dapat menghilangkan pulsating torque yang umumnya timbul pada sistem *fixed speed*. Secara umum sistem *variable speed* mengaplikasikan elektronika daya untuk mengkondisikan daya, seperti penyearah (*rectifier*), Konverter DC-DC, ataupun Inverter.

2.14 Potensi Energi Angin di Indonesia

Angin adalah udara yang bergerak yang diakibatkan oleh rotasi bumi dan juga karena adanya perbedaan tekanan udara disekitarnya. Angin bergerak dari tempat bertekanan udara tinggi ke bertekanan udara rendah. Apabila dipanaskan, udara memuai. Udara yang telah memuai menjadi lebih ringan sehingga naik. Apabila hal ini terjadi, tekanan udara turun karena udaranya berkurang. Udara dingin disekitarnya mengalir ke tempat yang bertekanan rendah tadi. Udara menyusut menjadi lebih berat dan turun ke tanah. Di atas tanah udara menjadi panas dan udara akan naik kembali (Saputra dan Pribadyo, 2015). Aliran naiknya udara panas dan turunnya udara dingin ini dikarenakan adanya penerimaan radiasi surya yang tidak merata di permukaan bumi, sehingga mengakibatkan perbedaan suhu udara (Habibie dkk, 2011). Daerah yang menerima lebih banyak penyinaran matahari, akan memiliki suhu yang lebih tinggi dibandingkan dengan daerah lainnya. Pada daerah ini, udara bergerak mengembang atau memuai sehingga tekanan udaranya rendah. Pada daerah yang suhu udaranya lebih rendah, tekanan udaranya lebih tinggi. Perbedaan tekanan udara ini akan mengakibatkan terjadinya gerakan udara dari daerah yang tekanan udaranya lebih tinggi ke daerah yang tekanan udaranya lebih rendah yang menimbulkan gerakan udara.

Pada dasarnya, angin terdiri dari banyak gas di atmosfer bumi. Rotasi bumi, pemanasan yang tidak merata pada atmosfer serta kondisi permukaan bumi yang tidak rata, merupakan faktor utama yang menyebabkan angin. Energi pada angin oleh manusia

dimanfaatkan untuk berbagai keperluan seperti pompa air, sumber pembangkit listrik, dan sebagainya. Angin merupakan sumber energi berkelanjutan karena bersifat terbarukan, didistribusikan secara luas dan melimpah. Energi angin sebagai kontribusi dalam mengurangi emisi rumah kaca, karena digunakan sebagai bahan energi alternatif pengganti fosil dalam sistem pembangkit energi listrik. Turbin angin menerima energi kinetik yang dihasilkan oleh angin, dan melalui baling-baling yang terhubung dengan generator, energi angin tersebut dirubah menjadi energi listrik. Angin dapat diklasifikasikan sebagai angin global dan angin lokal. Angin global disebabkan oleh pemanasan matahari dengan intensitas yang besar pada permukaan bumi dekat khatulistiwa. Hal ini menyebabkan peningkatan suhu udara pada daerah tropis yang kemudian mengalir melalui atmosfer atas ke arah kutub, udara dingin dari kutub mengalir kembali ke khatulistiwa. Sementara itu, angin lokal disebabkan oleh perbedaan tekanan lokal dan juga dipengaruhi topografi, gesekan permukaan disebabkan gunung, lembah dan lain-lain.



Gambar 2.16 Peta Angin di Indonesia
 Sumber: LAPAN di dalam Embassy of Denmark (2017)

Secara keseluruhan, kecepatan angin di Indonesia umumnya rendah, sebagaimana diperlihatkan pada Gambar 2. Namun, sebagaimana studi yang dilakukan oleh LAPAN menunjukkan sejumlah lokasi angin dengan potensi bagus di Indonesia untuk proyek energi angin. Rata-rata, kecepatan angin sekitar 3-7 m/s dan KESDM memperkirakan potensi kapasitas terpasang menjadi 9,29 GW. Saat ini, sekitar 3 MW pembangkit listrik tenaga angin terpasang, dan terdapat potensi besar untuk meningkatkan kapasitas tenaga angin di Indonesia.

Sumber daya angin di Indonesia umumnya sesuai dengan desain turbin angin kecepatan rendah. Dalam beberapa tahun terakhir, produsen turbin angin telah berfokus pada pengembangan portofolio turbin yang sesuai untuk kecepatan angin rendah situs. Pengembangan menuju turbin angin berkecepatan rendah sebagian didorong oleh lokasi yang terbatas dengan potensi kecepatan angin yang tinggi, dan sebagian lagi karena kemajuan teknologi angin. Untuk membuat biaya turbin efektif di lokasi dengan kecepatan angin rendah, pembuatan turbin terutama berfokus pada peningkatan kapasitas faktor dengan mengurangi daya spesifik rotor, sehingga meningkatkan diameter rotor untuk peringkat turbin yang sama. Dengan demikian, turbin menghasilkan lebih banyak daya pada kecepatan angin yang lebih rendah.

Peningkatan faktor kapasitas turbin yang didirikan di lokasi angin berkecepatan rendah seringkali melebihi biaya modal tambahan yang terkait dengan peningkatan diameter rotor dan tinggi menara, dan karenanya membuatnya tenaga angin layak secara ekonomi di lokasi kecepatan angin rendah. Dengan perkembangan teknologi turbin yang pesat maka sangat mungkin untuk memanfaatkan potensi angin di berbagai lokasi di Indonesia.

Pengukuran karakteristik angin dipengaruhi oleh kecepatan rata-rata yang dihasilkan. Dari berbagai variasi kecepatan rata-rata angin, karakteristik angin diklasifikasikan menjadi kelas-kelas sebagaimana pada Tabel 2. (Oh dkk, 2012). Klasifikasi ini diberikan pada ketinggian 10 m dan 50 m karena turbin angin kecil biasa digunakan pada range ketinggian ini.

khatulistiwa. Hal ini menyebabkan peningkatan suhu udara pada daerah tropis yang kemudian mengalir melalui atmosfer atas ke arah kutub, udara dingin dari kutub mengalir kembali ke khatulistiwa. Sementara itu, angin lokal disebabkan oleh perbedaan tekanan lokal dan juga dipengaruhi topography, gesekan permukaan disebabkan gunung, lembah dan lain-lain.