

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitian Terdahulu

Berikut ini merupakan penelitian tentang Turbin Angin yang telah dilakukan oleh beberapa peneliti terdahulu, salah satunya penelitian dilakukan oleh Hidayat & Fitroh (2008) dengan judul simulasi dan analisis beberapa merk Turbin Angin kapasitas 600 kW di Lebak Banten menggunakan *WindPro 2.5* modul *Meteo*. Hasil penelitian yang dilakukan dengan membandingkan diameter rotor dan kecepatan *cut-in*, daya *Rated* dan kecepatan angin *Rated* untuk setiap Turbin Angin. Berikut merupakan tabel dari hasil perhitungan dari daya *Rated* dan kecepatan angin *Rated* beberapa Turbin Angin.

Tabel 2. 1 Daya dan Kecepatan Angin *Rated*

| Turbin Angin | Daya <i>Rated</i> (kW) | Kec. Angin <i>Rated</i> (m/s) |
|------------------------------|------------------------|-------------------------------|
| <i>Enercon 600 kW</i> | 600 | 13 |
| <i>Furhlander 600 kW</i> | 600 | 12 |
| <i>GE Wind Energy 600 kW</i> | 600 | 15 |
| <i>Vestas 600 kW</i> | 600 | 15 |

(Sumber : Hidayat & Fitroh, 2008)

Dari data tabel 2.1 menunjukkan bahwa untuk daya *Rated* 600 kW, Turbin Angin *Furhlander* mempunyai prestasi yang paling baik. Hal tersebut bisa dilihat dari kecepatan *rated* nya yang paling kecil. Salah satu parameter terpenting untuk menggambarkan prestasi Turbin Angin adalah koefisien daya (C_p).

Selain menggunakan perangkat lunak *WindPro 2.5* Modul *Meteo*, pemilihan Turbin Angin yang menghasilkan energi listrik paling besar juga dapat dilihat dari hasil daya paling besar dengan kecepatan angin 5,2 m/s. Biasanya akan menghasilkan energi tahunan yang paling besar juga. Seperti contoh tabel dibawah dengan daya keluaran 5,2 m/s.

Tabel 2. 2 Daya pada 5,2 m/s

| Turbin Angin | Daya Mean (kW) |
|------------------------------|----------------|
| <i>Enercon 600 kW</i> | 45 |
| <i>Furhlander 600 kW</i> | 60 |
| <i>GE Wind Energy 600 kW</i> | 50 |
| <i>Vestas 600 kW</i> | 45 |

(Sumber : Hidayat & Fitroh, 2008)

Dari data tabel 2.2 menunjukkan bahwa turbin *Furhlander* menghasilkan daya *mean* paling tinggi dibandingkan dengan turbin lainnya. Turbin Angin dengan hasil rata-rata paling besar biasanya menghasilkan energi yang paling besar juga.

Wiranti Janindri, *dkk* (2013) Analisa potensi angin di Bangka Belitung menggunakan perumusan korelasi antara ketinggian 33 meter dan 80 meter, sedangkan untuk kecepatan angin dengan referensi dari BMKG. Selanjutnya untuk pembahasan difokuskan tentang pemilihan Turbin Angin sesuai dengan nilai *Capacity Factor* (CF). Dari data yang ada akan dilakukan analisa terhadap beberapa parameter angin antara lain parameter *c*, *Weibull k*, serta rapat daya angin sebagai berikut :

Tabel 2. 3 Data Angin pada tahun 2011

| Ketinggian (m) | Kecepatan Angin rata2 | Standart Deviasi | Parameter c (m/s) | Weibull k | Rapat Daya W/m ² |
|-------------------|--------------------------|---------------------|----------------------|-----------|--------------------------------|
| 33 | 3.3 | 1.54 | 3.65 | 2.26 | 40.35 |
| 80 | 4.4 | 2.07 | 4.90 | 2.26 | 97.48 |

(Sumber : Wiranti Janindri, *dkk*, 2013)

Capacity Factor merupakan suatu ukuran kinerja Turbin Angin. Dari beberapa Turbin Angin dengan kapasitas tertentu maka akan didapatkan nilai *Capacity Factor* yang dipengaruhi oleh potensi angin pada ketinggian tertentu. berikut adalah hasilnya :

Tabel 2. 4 Data *Capacity Factor*

| No | Kapasitas (kW) | Rotor (m) | Tinggi Hub (m) | AEP Nom (Mwh) | AEP Net (MWh) | CF (%) |
|----|----------------|-----------|----------------|---------------|---------------|--------|
| 1 | 500 | 33.2 | 30 | 4380 | 449.64 | 10.27 |
| 2 | 500 | 39 | 40.5 | 4380 | 698.08 | 15.94 |
| 3 | 600 | 44 | 40 | 5256 | 884.22 | 16.82 |
| 4 | 600 | 43 | 45 | 5256 | 884.46 | 16.83 |
| 5 | 600 | 48 | 50 | 5256 | 1148.67 | 21.85 |
| 6 | 600 | 39 | 40.5 | 5256 | 698.08 | 13.28 |
| 7 | 600 | 42 | 40.5 | 5256 | 809.60 | 15.40 |
| 8 | 600 | 44 | 40.5 | 5256 | 888.54 | 16.91 |
| 9 | 600 | 48 | 50 | 5256 | 1148.67 | 21.85 |
| 10 | 750 | 44 | 50 | 6570 | 965.20 | 14.69 |
| 11 | 750 | 48.2 | 50 | 6570 | 1158.26 | 17.63 |
| 12 | 750 | 48.4 | 65 | 6570 | 1294.65 | 19.71 |
| 13 | 750 | 54 | 60 | 6570 | 1561.70 | 23.77 |
| 14 | 750 | 50 | 50 | 6570 | 1246.39 | 18.97 |
| 15 | 750 | 57 | 68 | 6570 | 1827.71 | 27.82 |

(Sumber : Wiranti Janindri, dkk, 2013)

Pada uraian tabel 2.4 telah melalui perhitungan kinerja pada titik lokasi yang sama yaitu $02^{\circ} 10'$ Lintang Selatan – $106^{\circ} 08'$ Bujur Timur. Dapat dilihat bahwa turbin dengan kapasitas 500 kW untuk nilai *Capacity Factor* tertinggi adalah 15.94%, untuk kelompok Turbin Angin dengan kapasitas 600 kW nilai *Capacity Factor* tertinggi adalah 21.85%, sedangkan untuk Turbin Angin dengan kapasitas 750 kW nilai *Capacity Factor* tertinggi adalah 27.82%.

Titanio, dkk (2015) Unjuk kerja Turbin Angin sumbu horizontal menggunakan *Airfoil N-10*. Penentuan profil ini dinyatakan beberapa variable diantaranya: panjang profil *airfoil* (*chord*) ketebalan (*thickness*) dan kelengkungan (*chamber*). Umumnya bentuk *airfoil* cembung di bagian atas dan datar atau cekung di bagian bawah. Bentuk ini dibuat agar kecepatan udaya di atas *airfoil*

lebih cepat dari pada bagian bawah sehingga menimbulkan tekanan kecil di bagian atas yang nanti akan menyebabkan gaya angkat atau *lift force*. Penentuan parameter ini juga dipengaruhi oleh faktor keterbuatan, karena perancangan ini menggunakan mesin tradisional atau dengan tenaga manusia. Didapatkan nilai *cut in speed* sebesar 2 m/s. Nilai ini cukup baik karena pada kecepatan angin rendah turbin sudah dapat berputar. Nilai kecepatan putar setelah melewati nilai *cut in speed* mencapai 150 rpm pada kecepatan angin 3,2 m/s.

Tabel 2. 5 Data Hasil Pengujian Turbin Angin

| No | Kecepatan Angin (m/s) | Kecepatan Putar (rpm) |
|----|-----------------------|-----------------------|
| 1 | 2 | 30 |
| 2 | 2.2 | 46 |
| 3 | 2.4 | 67 |
| 4 | 2.6 | 93 |
| 5 | 2.8 | 113 |
| 6 | 3 | 140 |
| 7 | 3.2 | 150 |

(Sumber : Titanio, dkk, 2015)

Berdasarkan penelitian yang ada, maka penelitian ini dengan mengambil data di Karimunjawa dengan menganalisa perbandingan penerapan beberapa model Turbin Angin skala menengah dengan kapasitas output daya 150kW-300kW dengan ketinggian 50 meter dan rata-rata kecepatan potensi angin 5.0 m/s dengan data angin yang didapat dari *Indonesia Wind Prosecting*, sehingga diperoleh data yang sesuai untuk diterapkan di pulau Karimunjawa dengan kondisi saat ini.

2.2 Landasan Teori

Sebagai Negara yang mempunyai potensi angin yang sangat besar dan banyak pembangkit yang menggunakan bahan bakar dari energi fosil, maka dari itu muncullah gagasan untuk membuat energi baru dan terbarukan. Salah satunya

berupa energi terbarukan yang menggunakan energi angin sebagai sumber utama untuk menggerakkan generator pada Turbin Angin yang akan menghasilkan energi listrik.

2.2.1 Konversi Energi Angin

Dalam proses pemanfaatan energi angin terdapat dua tahapan konversi energi seperti gambar dibawah ini :



Gambar 2. 1 Diagram Konversi Energi Angin

Dari gambar 2.1 potensi angin menggerakkan rotor berputar kemudian dari putaran rotor dihubungkan dengan generator, dan generator akan menghasilkan arus listrik. Besarnya energi listrik dipengaruhi oleh beberapa faktor diantaranya sebagai berikut:

1. Rotor
Terdapat beberapa variasi, diameter rotor akan berbanding lurus dengan daya listrik. Semakin besar diameter rotor maka semakin besar listrik yang akan dihasilkan.
2. Kecepatan angin
Kecepatan putaran rotor yang menggerakkan generator dipengaruhi oleh kecepatan angin.
3. Generator
Generator yang dipakai pada biasanya yang dapat menghasilkan listrik pada putaran rendah.

Angin sendiri mempunyai kecepatan dinamik yang dirumuskan sebagai berikut:

$$q = \frac{1}{2} * \rho * V^2 \dots\dots\dots(2.1)$$

dimana :

q = Tekanan dinamik angin

p = Kecepatan udaya (m/s)

V = Kecepatan angin (m/s)

Gaya angin didapat dari perkalian antara tekanan angin dinamik dan luas sapuan sebagai berikut:

$$F = q * A \dots\dots\dots(2.2)$$

dimana :

F = Gaya angin

A = Luas daerah sapuan angin (m²)

Dalam hal ini luas sapuan adalah luas rotor, yaitu :

$$A = \frac{1}{2} * \pi * r^2 \dots\dots\dots(2.3)$$

dimana :

r = Jari-jari rotor (m)

Secara definisi perkalian antara gaya angin dan kecepatan angin akan menghasilkan daya angin, yaitu :

$$P_{\text{angin}} = F * V \dots\dots\dots(2.4)$$

Dimana:

P_{angin} = Daya angin (Watt)

F = Gaya Angin

V = Kecepatan Angin (m/s)

Besarnya daya angin yang diserap rotor tergantung pada prestasi rotor, yang dinyatakan dengan persamaan berikut :

$$P_{\text{rotor}} = C_p * P_{\text{angin}} \dots\dots\dots(2.5)$$

Dimana:

C_p = Koefisien Daya

P_{angin} = Daya angin (Watt)

2.2.2 Statistik Pengolahan Data *Time-Series* Kecepatan dan Arah Angin

Metode statistik yang digunakan untuk mengetahui karakteristik angin yaitu dengan menggunakan metode *Weibull*. Metode distribusi *Weibull* terdapat 2 parameter yang digunakan yaitu parameter k (tanpa dimensi) dan parameter skala c (m/s). Nilai parameter k diperoleh dengan nilai yang berdasarkan data-data kecepatan angin yang aktual di lapangan sehingga cukup *representative* untuk mengetahui distribusi dari sejumlah data kecepatan angin yang bervariasi. Untuk mengetahui nilai parameter k , jika nilai tengah dan variannya telah diketahui dapat menggunakan persamaan. (Dr. Gary L. Johnson dalam Wiranti, *dkk*, 2013).

Adapun untuk mencari frekuensi potensi kecepatan angin bisa menggunakan rumus sebagai berikut :

$$W_p = \left(\frac{n_{ws}}{n_h} \right) * 100\% \dots\dots\dots (2.6)$$

Dimana :

W_p = *Weibull Probability* (%)

n_{ws} = Jumlah kecepatan angin dalam periode jam (jam)

n_h = Jam dalam periode waktu (jam)

Dari perhitungan *Weibull Probablity* sesuai persamaan diatas selanjutnya untuk mencari nilai energi listrik yang diproduksi turbin angin per tahunnya dapat diperoleh dengan rumus :

$$AEP = P_{\text{curve}} * n_h \dots\dots\dots (2.7)$$

Dimana :

AEP = *Annual Energy Production* (KWh)

P_{curve} = *Power curve* (kW)

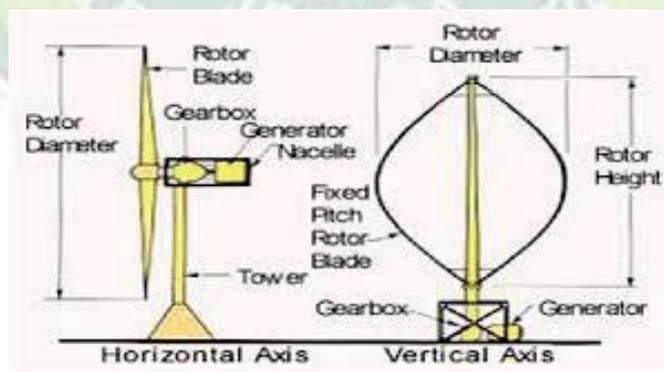
2.2.3 Pengaruh Kecepatan Angin

Kecepatan angin merupakan jarak tempuh angin per satuan waktu (m/s). Guna mengetahui potensi kecepatan angin pada lokasi tertentu dipengaruhi oleh ketinggian saat pengukuran. Terdapat dua pertimbangan untuk menyesuaikan kecepatan angin yaitu :

1. Pengukuran kecepatan angin diambil tidak pada ketinggian pemasangan alat ukur.
2. Turbin Angin yang ada biasanya sudah ditentukan kapasitas ketinggiannya dan ketinggian itu berbeda-beda antara Turbin Angin yang satu dengan yang lainnya.

2.2.4 Turbin Angin

Prasetya, *dkk* (2015) Turbin Angin merupakan alat yang digunakan untuk merubah energi angin menjadi energi putar menggunakan bilah-bilah sudu yang kemudian diteruskan ke generator sebagai penghasil listrik. Dari beberapa pengertian diatas bahwa Turbin Angin merupakan suatu alat yang mampu dan berfungsi untuk merubah energi angin menjadi energi mekanik untuk menggerakkan bilah-bilah sudu kemudian diteruskan ke generator guna sebagai penghasil listrik.



Gambar 2. 2 Jenis Turbin Angin

Sesuai pada gambar 2.2 bahwa Turbin Angin memiliki dua dasar desain, yaitu Turbin Angin sumbu Horizontal dan Turbin Angin sumbu vertical, yaitu :

1. Turbin Angin Sumbu Horizontal

Turbin Angin sumbu horizontal memiliki poros rotor utama dan generator listrik di puncak menara. Sebagian besar turbin angin ini memiliki sebuah *gearbox* yang mengubah baling-baling agar berputar lebih cepat. Sebuah menara menghasilkan *turbulensi* di belakangnya, turbin biasanya diarahkan melawan arah angin dari menara. Bilah-bilah turbin dibuat kaku agar tidak terdorong menuju menara oleh angin berkecepatan tinggi. Sebagai tambahan, baling-baling itu diletakkan di depan menara pada jarak tertentu dan sedikit dimiringkan

Adapun Turbin Angin sumbu horizontal memiliki kelebihan dan kekurangan sebagai berikut:

A. Kelebihan Turbin Angin Sumbu Horizontal

Dasar menara yang tinggi untuk akses ke angin yang lebih kuat di tempat-tempat yang memiliki potensi angin antara dua titik yang jaraknya relatif dekat di dalam atmosfer bumi. Di beberapa lokasi potensi angin, kecepatan angin akan meningkat sebesar 20%, setiap sepuluh meter ke atas.

B. Kekurangan Turbin Angin Sumbu Horizontal

- a) Menara yang tinggi dan besar serta bilah yang panjang sulit diangkut dan juga memerlukan biaya besar untuk pemasangannya.
- b) Turbin Angin sumbu horizontal yang tinggi sulit dipasang, membutuhkan derek yang sangat tinggi dan mahal serta para operator yang terampil.
- c) Konstruksi menara yang besar membutuhkan penyangga bilah-bilah yang berat.
- d) Ukurannya yang tinggi mengganggu pemandangan alam sekitar.

2. Turbin Angin Sumbu Vertikal

Turbin Angin sumbu vertical memiliki poros atau sumbu rotor utama yang disusun tegak lurus dan mampu mendayagunakan angin dari berbagai arah. Turbin Angin ini juga mempunyai efisiensi lebih kecil dibandingkan Turbin Angin sumbu horizontal.

Adapun kelebihan dan kekurangan Turbin Angin sumbu vertikal sebagai berikut:

Pada gambar 2.3 menunjukkan sketsa turbin angin sumbu horizontal dengan beberapa sub-sistem sebagai berikut : 1. Penutup bagian depan, 2. Sirip kincir angin, 3. Dudukan sirip kincir angin, 4. Body dan Generator, 5. Tiang penyangga sirip ekor, 6. Sirip ekor , 7. Pipa penyangga, 8. Kawat pengikat, 9. Fondasi kincir angin, 10. Fondasi, 11. Bahut pengeras kawat pengikat, 12. Inverter, 13. Controler system, 14. Batery / accu.

Dari beberapa sub-sistem diatas, ada beberapa bagian pada turbin angin sumbu Horizontal yang mempunyai kinerja sangat penting yaitu :

1. *Gearbox*

Alat ini mempunyai fungsi mengubah putaran rendah pada baling-baling menjadi putaran dengan kecepatan tinggi. *Gearbox* yang biasa digunakan mempunyai perbandingan kisaran 1: 60. seperti pada gambar dibawah merupakan contoh bagian-bagian dalam sebuah Turbin Angin sumbu horizontal.

2. *Brake System*

Berguna untuk menjaga putaran yang terdapat pada poros setelah *gearbox* alat ini sebagai pengaman jika terjadi angin sangat besar. Alat ini sangat berguna untuk menjaga keamanan generator, karena dalam kinerjanya dapat menghasilkan energi yang maksimal. Jika terjadi angin yang tidak terduga maka akan mengakibatkan putaran poros cukup cepat dan mengakibatkan kerusakan pada generator, diantaranya seperti : *overheat*, *rotor breakdown*, kawat yang ada pada generator putus karena arus yang dikeluarkan sangat besar.

3. *Generator*

Alat ini merupakan salah satu komponen yang sangat utama dan terpenting dalam pembuatan sistem Turbin Angin. Generator ini dapat mengubah energi gerak menjadi energi listrik. Setelah terjadinya energi listrik maka tegangan dan arus listrik akan disalurkan melalui kabel jaringan listrik yang akan digunakan oleh masyarakat.

4. Penyimpanan Energi

Tidak setiap menit adanya energi angin, maka dengan ini digunakanlah alat penyimpanan energi yang berfungsi sebagai *back-up* energi listrik ketika

beban penggunaan daya listrik masyarakat meningkat dan energi angin atau kecepatan angin suatu daerah sedang menurun, sehingga kebutuhan daya listrik masyarakat tidak terpenuhi. Maka dari itu alat yang dijadikan penyimpan energi listrik ialah berupa aki / baterai.

5. *Rectifier-inverter*

Rectifier atau disebut juga penyearah berfungsi untuk menyearahkan gelombang sinusoidal (*Alternatif Current*) yang dihasilkan dari generator menjadi gelombang *Direct Control*. Sedangkan *Inverter* itu sendiri berarti pembalik, Ketika dibutuhkan daya dari penyimpanan energi (aki/lainnya) maka catu daya yang dihasilkan oleh aki akan berbentuk gelombang *Direct Control*. Daya kinetik rotor disalurkan ke sistem transmisi (*gearbox*) dan generator untuk diubah menjadi daya listrik. Daya yang dihasilkan oleh turbin adalah sebagai berikut:

$$Cp_{\text{rotor}} = \frac{P_{\text{rotor}}}{\frac{1}{8} * \rho * \pi * D^2 * V^3} \dots\dots\dots (2.8)$$

$$Cp_{\text{turbin}} = \frac{P_{\text{turbin}}}{\frac{1}{8} * \rho * \pi * D^2 * V^3} \dots\dots\dots (2.9)$$

Dimana :

Cp_{rotor} = Koefisien daya rotor

Cp_{turbin} = Koefisien daya turbin

P_{rotor} = Daya rotor (*Watt*)

P_{turbin} = Daya turbin (*Watt*)

ρ = Massa jenis angin/udaya (1.225 kg/m^3)

D = Diameter rotor (m)

V = Kecepatan angin (m/s)

Energi kinetik (gerak) merupakan energi yang dimiliki sebuah benda yang bergerak (kincir angin). Persamaan energi kinetik adalah sebagai berikut:

$$EK = \frac{1}{2} * m * V^2 \dots\dots\dots(2.10)$$

Dimana:

EK = Energi Kinetik (*Joule*)

m = Massa (Kg)

V = Kecepatan (m/s)

Energi kinetik dari angin terbentuk karena angin melewati bidang turbin dengan luas penampang dan ketebalan penampang. berdasarkan luas penampang turbin, terdapat persamaan volume Turbin Angin sebagai berikut:

$$Vol = A * D \dots\dots\dots (2.11)$$

$$\rho = m / Vol \dots\dots\dots(2.12)$$

$$m = \rho * Vol \dots\dots\dots (2.13)$$

Dimana:

Vol = Volume turbin (m³)

A = Luas penampang (m²)

D = Diameter penampang (m)

ρ = Massa jenis angin (1.225 kg/m³)

m = Massa udara (kg)

t = Waktu (detik)

Maka didapat persamaan energi sebagai berikut:

$$m = \frac{1}{2} * \rho * V^3 * A * t \dots\dots\dots (2.14)$$

Faktor kapasitas Turbin Angin (*Capacity Factor*) merupakan ukuran kinerja Turbin Angin, bukan merupakan suatu ukuran untuk menentukan energi listrik yang dihasilkan dalam satu tahun. Nilai *Capacity Factor* biasanya berkisar 20% - 40%, berdasarkan definisi tersebut dalam mendapatkan nilai perkiraan energi listrik dengan persamaan:

$$P_{\max \text{ out}} = \text{Total jam/tahun} * \text{Max. Power output turbin angin} \dots \dots \dots (2.15)$$

Sehingga ;

$$CF = \frac{P_{\text{bruto}}}{P_{\max \text{ out}}} * 100\% \dots \dots \dots (2.16)$$

Dimana:

CF = *Capacity Factor* (%)

P_{Bruto} = Energi total turbin angin (KWh)

$P_{\text{Max Out}}$ = Energi maximal output turbin angin (KWh)

Power atau disebut juga dengan Daya (*Watt*), merupakan besarnya energi yang dihasilkan per satuan waktu, maka didapatkan persamaan sebagai berikut:

$$\text{Power (P)} = \frac{1}{2} * \rho * V^3 * A \dots \dots \dots (2.17)$$

Dimana:

P = Power daya (*Watt*)

ρ = Massa jenis angin (1.225 kg/m³)

V = Kecepatan (m/s)

A = Luas penampang (m²)

D = Diameter penampang (m)

2.2.5 Model –Model Turbin Angin

Dari beberapa Turbin Angin yang penulis teliti adalah sebagai berikut :

1. Nordtank NTK 150 kW

Turbin Angin ini mempunyai daya output sebesar 150 kW dengan *Cut-in wind speed* 4,0 m/s dan *Rated wind speed* 13,5 m/s, sedangkan untuk *Cut-out wind speed* 25,0 m/s. Berikut adalah spesifikasi Turbin Angin Nordtank NTK 150 kW :

Tabel 2. 6 Spesifikasi Turbin Angin Nordtank NTK 150 kW

| Power | | Generator | |
|-------------------------|------------------------|-----------------------|-----------------------------|
| Rated power: | 150.0 kW | Type: | Asynchronous |
| Flexible power ratings: | - | Number: | 1.0 |
| Cut-in wind speed: | 4.0 m/s | Speed, max: | 1,520.0 U/min |
| Rated wind speed: | 13.5 m/s | Voltage: | 400.0 V |
| Cut-out wind speed: | 25.0 m/s | Grid connection: | Thyristor |
| Survival wind speed: | 60.0 m/s | Grid frequency: | 50.0 Hz |
| Wind zone (DIBt): | - | Hersteller: | ABB |
| Wind class (IEC): | - | Tower | |
| Rotor | | Hub height: | 32.5 m |
| Diameter: | 24,6 m | Type: | Steel tube |
| Swept area: | 475.0 m ² | Shape: | Corical |
| Number of blades: | 3 | Corrosion protection: | epoxy painted or galvanized |
| Rotor speed, max: | 37.0 U/min | Manufacturer: | Nordtank |
| Tipspeed: | 48 m/s | Weight | |
| Type: | LM 12 HHT | Single blade: | 0.8 t |
| Material: | GFK | Hub: | - |
| Manufacturer: | LM Glasfieber | Rotor: | - |
| Power density 1: | 315.8 W/m ² | Nacelle: | 6.0 t |

| | | | |
|------------------|------------------------|----------------------|--------|
| Power density 2: | 3.2 m ² /kW | Tower, max: | 11.0 t |
| Gear box | | Total weight: | 23.0 t |
| Type: | Spur | Miscellaneous | |
| Stages: | 2.0 | Installation: | - |
| Ratio: | 1:40 | Offshore: | No |
| Manufacturer: | Flender | Onshore: | Yes |

(Sumber : <https://en.wind-turbine-models.com/>)

2. Nordex N27/150 kW

Turbin Angin ini mempunyai daya output sebesar 150 kW dengan *Cut-in wind speed* 3,0 m/s dan *Rated wind speed* 15,5 m/s, sedangkan untuk *Cut-out wind speed* 25,0 m/s. Berikut adalah spesifikasi Turbin Angin Nordex N27/150 kW :

Tabel 2. 7 Spesifikasi Turbin Angin Nordex N27/150 kW

| Power | | Generator | |
|-------------------------|----------------------|-----------------------|-----------------------------|
| Rated power: | 150.0 kW | Type: | Asynchronous |
| Flexible power ratings: | - | Number: | 1.0 |
| Cut-in wind speed: | 3.0 m/s | Speed, max: | 1,000.0 U/min |
| Rated wind speed: | 15.5 m/s | Voltage: | 400.0 V |
| Cut-out wind speed: | 25.0 m/s | Grid connection: | Thyristor |
| Survival wind speed: | 60.0 m/s | Grid frequency: | 50.0 Hz |
| Wind zone (DIBt): | - | Hersteller: | Brook |
| Wind class (IEC): | - | Tower | |
| Rotor | | Hub height: | 30/36/40/50 m |
| Diameter: | 27.0 m | Type: | Steel tube |
| Swept area: | 572.0 m ² | Shape: | Corical |
| Number of blades: | 3 | Corrosion protection: | epoxy painted or galvanized |
| Rotor speed, max: | 40.0 U/min | Manufacturer: | Nordex |

| | | | |
|------------------|------------------------|----------------------|--------|
| Tipspeed: | 57 m/s | Weight | |
| Type: | LM 12.8 | Single blade: | 1.4 t |
| Material: | GFK | Hub: | - |
| Manufacturer: | LM Glasfieber | Rotor: | 5.4 t |
| Power density 1: | 262.2 W/m ² | Nacelle: | 13.0 t |
| Power density 2: | 3.8 m ² /kW | Tower, max: | 32.0 t |
| Gear box | | Total weight: | 51.0 t |
| Type: | Spur | Miscellaneous | |
| Stages: | 3.0 | Installation: | - |
| Ratio: | 0,059027778 | Offshore: | No |
| Manufacturer: | Flender | Onshore: | Yes |

(Sumber : <https://en.wind-turbine-models.com/>)

3. Nordex N27/250 kW

Turbin Angin ini mempunyai daya output sebesar 250 kW dengan *Cut-in wind speed* 3,0 m/s dan *Rated wind speed* 15,5 m/s, sedangkan untuk *Cut-out wind speed* 25,0 m/s. Berikut adalah spesifikasi Turbin Angin Nordex N27/150 kW :

Tabel 2. 8 Spesifikasi Turbin Angin Nordex N27/250 kW

| Power | | Generator | |
|-------------------------|----------|------------------|---------------|
| Rated power: | 250.0 kW | Type: | Induction |
| Flexible power ratings: | - | Number: | 1.0 |
| Cut-in wind speed: | 3.0 m/s | Speed, max: | 1,000.0 U/min |
| Rated wind speed: | 15.5 m/s | Voltage: | 400.0 V |
| Cut-out wind speed: | 25.0 m/s | Grid connection: | Thyristor |
| Survival wind speed: | - | Grid frequency: | 50.0 Hz |
| Wind zone (DIBt): | - | Hersteller: | Brook |

| | | | |
|-------------------|------------------------|-----------------------|--------------------|
| Wind class (IEC): | - | Tower | |
| Rotor | | Hub height: | 30/36/41.5/50 m |
| Diameter: | 27.0 m | Type: | Steel tube/Lattice |
| Swept area: | 572.0 m ² | Shape: | - |
| Number of blades: | 3 | Corrosion protection: | - |
| Rotor speed, max: | 40.0 U/min | Manufacturer: | - |
| Tipspeed: | 57 m/s | Weight | |
| Type: | LM 12.8 | Single blade: | 1.4 t |
| Material: | GFRP | Hub: | - |
| Manufacturer: | LM Glasfieber A/S | Rotor: | - |
| Power density 1: | 437.1 W/m ² | Nacelle: | 14.7 t |
| Power density 2: | 2.3 m ² /kW | Tower, max: | 20.7 t |
| Gear box | | Total weight: | 43.0 t |
| Type: | Spur | Miscellaneous | |
| Stages: | 3.0 | Installation: | - |
| Ratio: | 1:25 | Offshore: | No |
| Manufacturer: | Flender | Onshore: | Yes |

(Sumber : <https://en.wind-turbine-models.com/>)

4. b. Ventus 250 kW

Turbin Angin ini mempunyai daya output sebesar 250 kW dengan *Cut-in wind speed* 2,5 m/s dan *Rated wind speed* 9.0 m/s, sedangkan untuk *Cut-out wind speed* 32,0 m/s. Berikut adalah spesifikasi Turbin Angin Nordex N27/150 kW :

Tabel 2. 9 Spesifikasi Turbin Angin b. Ventus 250 kW

| | | | |
|--------------|----------|------------------|-----------------------|
| Power | | Generator | |
| Rated power: | 250.0 kW | Type: | synchronous permanent |

| Power | | Generator | |
|-------------------------|------------------------|-----------------------|------------|
| Flexible power ratings: | - | Number: | 1 |
| Cut-in wind speed: | 2.5 m/s | Speed, max: | 32.0 U/min |
| Rated wind speed: | 9.0 m/s | Voltage: | 400.0 V |
| Cut-out wind speed: | 32.0 m/s | Grid connection: | 4Q-IGBT |
| Survival wind speed: | - | Grid frequency: | 50/60 Hz |
| Wind zone (DIBt): | - | Hersteller: | - |
| Wind class (IEC): | s | Tower | |
| Rotor | | Hub height: | 28 m |
| Diameter: | 42.5 m | Type: | Steel tube |
| Swept area: | 1,421.0 m ² | Shape: | Conical |
| Number of blades: | 3 | Corrosion protection: | Painted |
| Rotor speed, max: | 32.0 U/min | Manufacturer: | - |
| Tipspeed: | 71 m/s | Weight | |
| Type: | - | Single blade: | - |
| Material: | EP-GFK | Hub: | - |
| Manufacturer: | - | Rotor: | - |
| Power density 1: | 175.9 W/m ² | Nacelle: | - |
| Power density 2: | 5.7 m ² /kW | Tower, max: | - |
| Gear box | | Total weight: | - |
| Type: | Without Gearbox | Miscellaneous | |
| Stages: | - | Installation: | - |
| Ratio: | - | Offshore: | No |
| Manufacturer: | - | Onshore: | Yes |

(Sumber : <https://en.wind-turbine-models.com/>)

5. Enercon E30/300 kW

Turbin Angin ini mempunyai daya output sebesar 300 kW dengan *Cut-in wind speed* 3.0 m/s dan *Rated wind speed* 11,5 m/s, sedangkan untuk *Cut-out*

wind speed 25,0 m/s. Berikut adalah spesifikasi Turbin Angin Nordex N27/150 kW :

Tabel 2. 10 Spesifikasi Turbin Angin Enercon E33/300 kW

| Power | | Generator | |
|-------------------------|------------------------|-----------------------|------------|
| Rated power: | 300.0 kW | Type: | synchronus |
| Flexible power ratings: | - | Number: | 1 |
| Cut-in wind speed: | 3.0 m/s | Speed, max: | - |
| Rated wind speed: | 11.5 m/s | Voltage: | - |
| Cut-out wind speed: | 25.0 m/s | Grid connection: | - |
| Survival wind speed: | - | Grid frequency: | 50.0 Hz |
| Wind zone (DIBt): | - | Hersteller: | Piller |
| Wind class (IEC): | - | Tower | |
| Rotor | | Hub height: | 35/41/47 m |
| Diameter: | 33.0 m | Type: | Croncete |
| Swept area: | 855.3 m ² | Shape: | - |
| Number of blades: | 3 | Corrosion protection: | - |
| Rotor speed, max: | 39.0 U/min | Manufacturer: | Pfleiderer |
| Tipspeed: | 67 m/s | Weight | |
| Type: | 33 WPX | Single blade: | - |
| Material: | GFK | Hub: | - |
| Manufacturer: | Aerpac | Rotor: | - |
| Power density 1: | 350.8 W/m ² | Nacelle: | - |
| Power density 2: | 2.9 m ² /kW | Tower, max: | - |
| Gear box | | Total weight: | - |
| Type: | Planetary | Miscellaneous | |
| Stages: | 2.0 | Installation: | - |
| Ratio: | - | Offshore: | No |
| Manufacturer: | Lohmann & Stolterfoth | Onshore: | Yes |

(Sumber : <https://en.wind-turbine-models.com/>)

6. Enercon E30/300 kW

Turbin Angin ini mempunyai daya output sebesar 300 kW dengan *Cut-in wind speed* 2,5 m/s dan *Rated wind speed* 13,5 m/s, sedangkan untuk *Cut-out wind speed* 25,0 m/s. Berikut adalah spesifikasi Turbin Angin Nordex N27/150 kW :

Tabel 2. 11 Spesifikasi Turbin Angin Enercon E30/300 kW

| Power | | Generator | |
|-------------------------|---------------------------|-----------------------|------------|
| Rated power: | 300.0 kW | Type: | synchronus |
| Flexible power ratings: | - | Number: | 1.0 |
| Cut-in wind speed: | 2,5 m/s | Speed, max: | 48.0 U/min |
| Rated wind speed: | 13.5 m/s | Voltage: | 440.0 V |
| Cut-out wind speed: | 25.0 m/s | Grid connection: | WR |
| Survival wind speed: | 70.0 m/s | Grid frequency: | 50.0 Hz |
| Wind zone (DIBt): | - | Hersteller: | Enercon |
| Wind class (IEC): | - | Tower | |
| Rotor | | Hub height: | 50.0 m |
| Diameter: | 29.6 m | Type: | Steel tube |
| Swept area: | 707.3 m ² | Shape: | Corical |
| Number of blades: | 3 | Corrosion protection: | Painted |
| Rotor speed, max: | 48.0 U/min | Manufacturer: | CAL/SAM |
| Tipspeed: | 74 m/s | Weight | |
| Type: | AERO E-30 | Single blade: | 0.3 t |
| Material: | GFK/Epoxy | Hub: | - |
| Manufacturer: | Enercon | Rotor: | 3.8 t |
| Power density 1: | 424.3 W/m ² | Nacelle: | 12.6 t |
| Power density 2: | 2.4 m ² /kW | Tower, max: | 27.3 t |
| Gear box | | Total weight: | 44.0 t |
| Type: | With Out. Direct Drive | | |

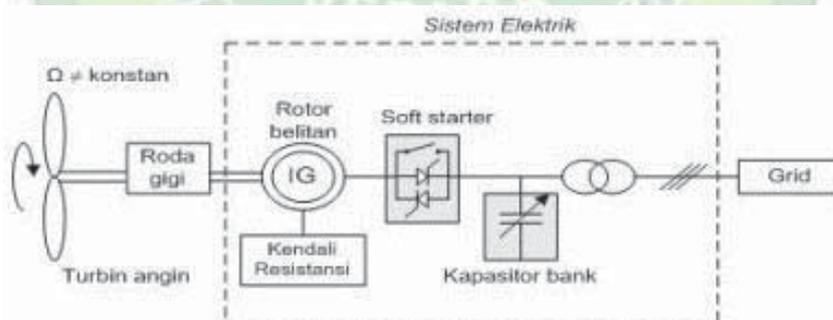
| Gear box | | Miscellaneous | |
|---------------|---|---------------|-----|
| Stages: | - | Installation: | - |
| Ratio: | - | Offshore: | No |
| Manufacturer: | - | Onshore: | Yes |

(Sumber : <https://en.wind-turbine-models.com/>)

2.2.6 Sistem Kelistrikan Pembangkit Listrik Tenaga Angin

Secara umum Pembangkit Listrik Tenaga Angin sistem kelistrikannya dibagi menjadi 2 ialah : kecepatan konstan dan kecepatan berubah. Kecepatan konstan (*fixed-speed*) memiliki keuntungan yaitu murah, sistemnya sederhana dan kokoh. Sistem ini beroperasi pada saat kecepatan putar turbin yang konstan dan menghasilkan daya maksimum pada satu nilai kecepatan angin. Pada sistem ini biasanya menggunakan generator tak-serempak (*unsynchronous generator*, dan cocok diterapkan pada daerah yang mempunyai kecepatan angin sangat besar. Tetapi generator ini terdapat kelemahan yaitu memerlukan daya reaktif untuk bisa menghasilkan listrik. Sistem ini sebenarnya rentan terhadap *pulsating power* menuju *grid* dan rentan terhadap perubahan mekanis secara tiba-tiba.

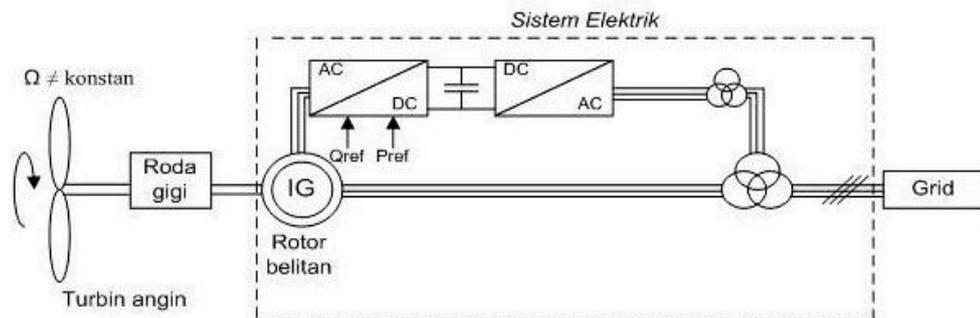
Berikut merupakan gambar yang menunjukkan diagram skematik dari sistem diatas.



Gambar 2. 4 Sistem PLTB kecepatan konstan (*fixed-speed*)

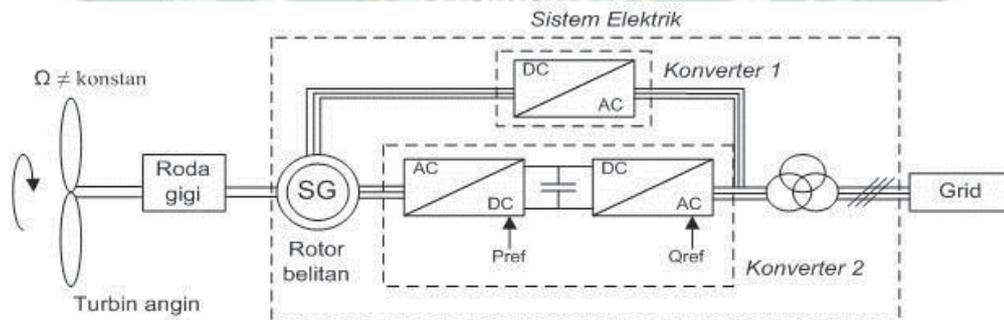
Pada gambar 2.4 PLTB Sistem kecepatan berubah (*variable speed*), sistem ini didesain agar dapat mengekstrak daya maksimum pada berbagai macam

kecepatan. Berikut adalah beberapa gambar jenis-jenis sistem Pembangkit Listrik Tenaga Angin kecepatan berubah.



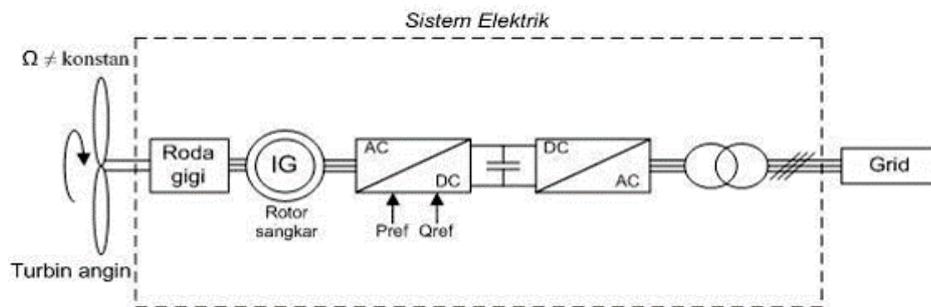
Gambar 2. 5 Sistem PLTB kecepatan berubah (*Variabel-speed*) rotor belitan

Pada gambar 2.5 PLTB menggunakan generator induksi rotor belitan. Karakteristik kerja generator induksi diatur dengan mengubah nilai resistansi rotor, sehingga torsi maksimum akan selalu didapatkan berapapun kecepatan turbin. Akan tetapi generator ini biasanya jangkauan kecepatan yang bisa dikendalikan masih terbatas.

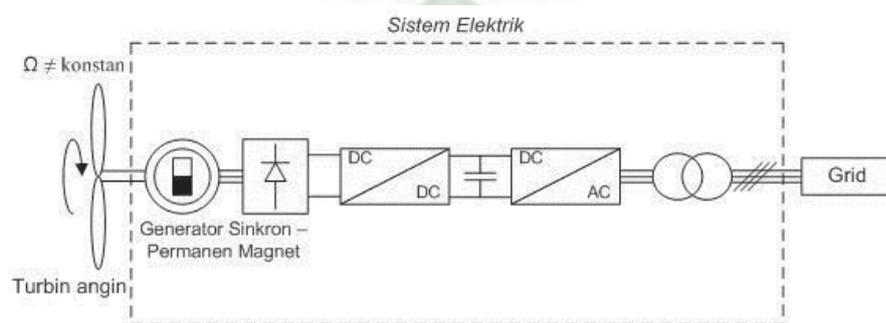


Gambar 2.6 Sistem PLTB kecepatan berubah (*variable-speed back to back converter*)

Pada gambar 2.6 PLTB menggunakan rangkaian elektronika daya untuk mengatur nilai resistansi rotor.



Gambar 2. 7 Sistem PLTB kecepatan berubah (*variable-speed*) (rotor sangkar)



Gambar 2. 8 Sistem PLTB kecepatan berubah (*variable-speed*)

Pada gambar 2.7 dan 2.8 PLTB merupakan sistem Pembangkit Listrik Tenaga Angin yang mempunyai *ampere* sama, bedanya pada generator yang dipakai.

Untuk Turbin Angin sendiri memiliki 3 potensi energi angin yaitu : Potensi rendah (skala kecil), potensi menengah (skala menengah), potensi tinggi (skala besar). Sesuai data yang ada bahwa untuk potensi rendah (skala kecil) batas kecepatan angin adalah 3,0 m/s – 4,0 m/s, sedangkan untuk potensi menengah (skala menengah) batas kecepatan angin adalah 4,1 m/s – 5,0 m/s, dan untuk potensi tinggi (skala besar) batas kecepatan angin adalah > 5,0 m/s. Dari data tersebut untuk daerah Karimunjawa menggunakan Turbin Angin potensi menengah (skala rendah) dikarenakan kecepatan angin di daerah tersebut untuk *cut-in* nya adalah 5,0 m/s sesuai dengan data *Indonesia Wind Prosecting*. Turbin Angin yang digunakan pada skala menengah yang sesuai dengan kapasitas outputnya yaitu dari 150kW-300kW dengan perbandingan beberapa model Turbin Angin. Berikut adalah kelebihan dan kekurangan Pembangkit Listrik Tenaga Angin :

A. Kelebihan Pembangkit Listrik Tenaga Angin

1. Pembangkit listrik tenaga angin menghasilkan sulfur dioksida, nitrogen oksida, polutan atmosfer yang lebih sedikit jika dibandingkan dengan pembangkit listrik dengan menggunakan batubara ataupun gas.
2. Mengurangi emisi gas yang dihasilkan Turbin Angin dibandingkan menggunakan energi fosil.
3. Turbin Angin lebih ramah lingkungan dan tidak bakal habis jika dipakai terus menerus.

B. Kekurangan Pembangkit Listrik Tenaga Angin

1. Membutuhkan tempat yang sangat luas.
2. Pembangunan Turbin Angin dapat mengurangi lahan pertanian dan pemukiman.
3. Derau suara yang di hasilkan Turbin Angin dapat mengganggu penduduk sekitar.

