

BAB II

DASAR TEORI

2.1 Energi Angin

Energi angin adalah salah satu jenis sumber energi terbarukan yang berpotensi untuk menghasilkan energi listrik melalui proses energi kinetik yang dikonversi menjadi energi mekanik dan energi mekanik dikonversi menjadi energi listrik. Kondisi angin di Indonesia sendiri memiliki kecepatan angin yang cukup tinggi, terutama untuk wilayah Indonesia bagian timur seperti NTT, NTB, Sulawesi selatan dan wilayah pantai selatan Jawa yang mempunyai kecepatan angin rata-rata sebesar 5 m/s, sementara Indonesia bagian barat cenderung lebih rendah dari nilai tersebut.

Tabel 2.1 Syarat dan kondisi angin yang dapat digunakan untuk menghasilkan energi listrik

Tingkat kecepatan angin 10 meter di atas permukaan tanah		
Kelas Angin	Kecepatan Angin m/s	Kondisi alam di daratan
1	0 ~ 0,2	-
2	0,3 ~ 1,5	Angin tenang, asap lurus ke atas
3	1,6 ~ 3,3	Asap bergerak mengikuti arah angin
4	3,4 ~ 5,4	Wajah terasa ada angin, daun-daun bergoyang pelan
5	5,5 ~ 7,9	Debu jalan, kertas berterbangan
6	8 ~ 10,7	Ranting pohon bergoyang, bendera berkibar
7	10,8 ~ 13,8	Ranting pohon besar bergoyang
8	13,9 ~ 17,1	Ujung pohon melengkung, hembusan angin terasa di telinga
9	17,2 ~ 20,7	Dapat mematahkan ranting pohon
10	20,8 ~ 24,4	Dapat mematahkan ranting pohon, jalan berat melawan angin
11	24,5 ~ 28,4	Dapat merobohkan pohon, menimbulkan kerusakan
12	28,5 ~ 32,6	Menimbulkan kerusakan parah
13	32,7 ~ 36,9	Tornado

Pada tabel diatas menunjukkan bahwa angin kelas 3 adalah batas minimum dan angin kelas 8 adalah batas maksimum energi angin yang bisa dimanfaatkan untuk menghasilkan energi listrik.

Bab II Dasar Teori

2.2 Turbin Angin

Turbin angin (*wind turbin*) adalah salah satu mesin fluida yang dapat merubah energi kinetik angin menjadi energi mekanik putaran poros. Turbin angin ini pada awalnya dibuat untuk mengakomodasi kebutuhan para petani dalam melakukan penggilingan padi, keperluan irigasi, dll. Turbin angin terdahulu banyak dibangun di Denmark, Belanda dan negara-negara Eropa lainnya dan lebih dikenal dengan *windmill*. Kini turbin angin lebih banyak digunakan untuk mengakomodasi kebutuhan listrik masyarakat, dengan menggunakan prinsip konversi energi dan menggunakan sumber daya alam yang dapat diperbaharui yaitu angin.



Gambar 2.1 Turbin angin

Saat ini pengembangan turbin angin masih belum dapat menyaingi pembangkit listrik konvensional, seperti PLTD dan PLTU. Namun saat ini turbin angin terus dikembangkan oleh para peneliti, karena dalam waktu dekat manusia akan dihadapkan dengan masalah kekurangan sumber daya alam tak dapat diperbaharui, seperti batubara, minyak bumi sebagai bahan dasar untuk membangkitkan tenaga listrik.

2.3 Prinsip Kerja dan Spesifikasi Turbin Angin

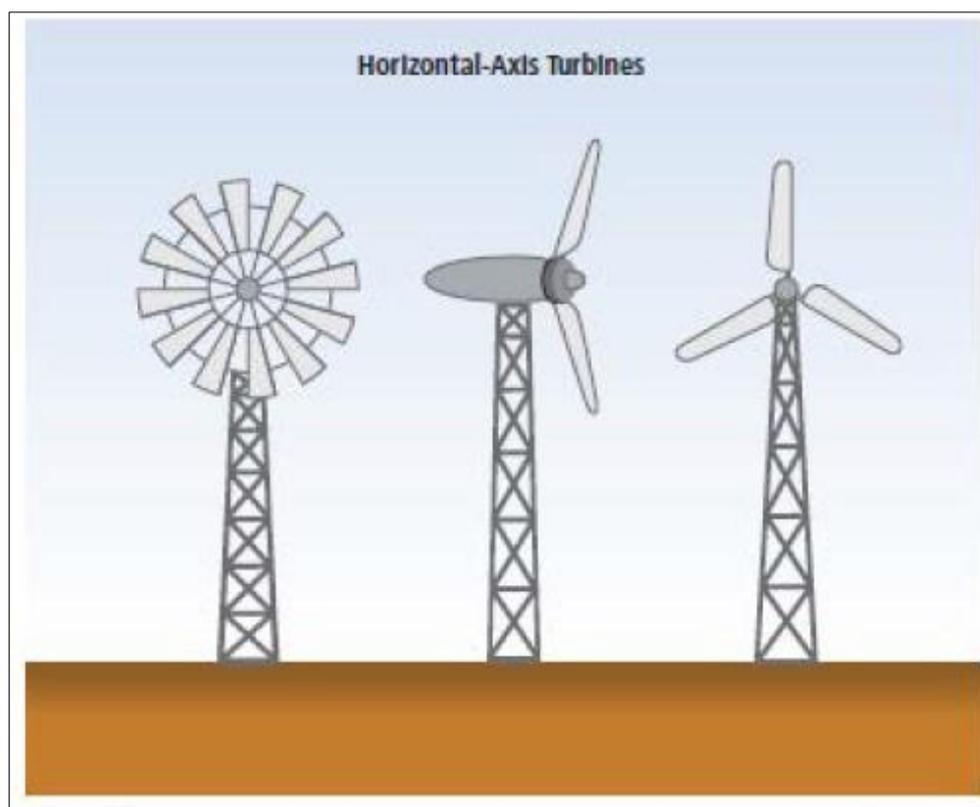
Prinsip kerja dari turbin angin adalah mengubah energi gerak angin menjadi energi mekanik putaran poros yang kemudian dikonversi menjadi energi listrik melalui generator. Energi putaran poros ini dapat dimanfaatkan secara langsung seperti pada tambak garam yaitu untuk memompa air laut ke tambak. Adapun saat ini pemanfaatan energi putaran poros lebih banyak digunakan untuk pembangkit tenaga listrik.

Turbin angin dapat dibedakan menjadi dua jenis turbin, yaitu:

1. Turbin angin poros horizontal.
2. Turbin angin poros vertikal.

2.3.1 Turbin Angin Poros Horizontal

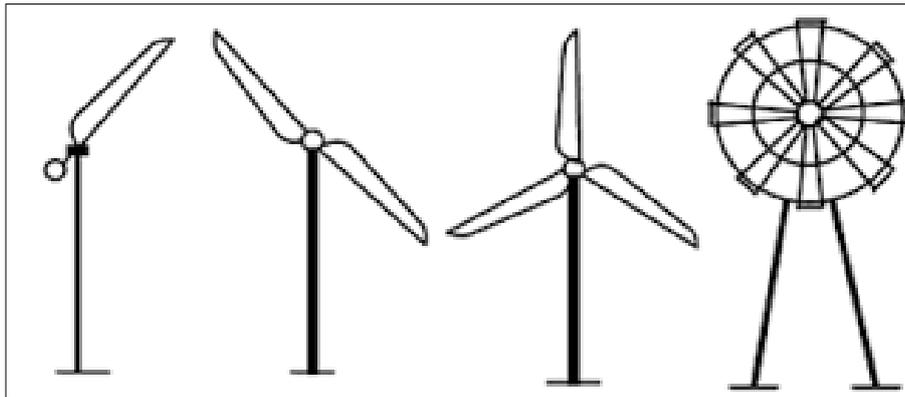
Turbin angin poros horizontal merupakan turbin angin yang putaran rotasi rotornya paralel terhadap permukaan tanah. Turbin angin sumbu horizontal memiliki poros rotor utama dan generator listrik di puncak menara dan diarahkan menuju dari arah datangnya angin untuk dapat memanfaatkan energi angin. Rotor turbin angin kecil diarahkan menuju dari arah datangnya angin dengan pengaturan baling-baling angin sederhana sedangkan turbin angin besar umumnya menggunakan sensor angin dan motor yang mengubah rotor turbin mengarah pada angin. Berdasarkan prinsip aerodinamis, rotor turbin angin sumbu horizontal mengalami gaya *lift* dan gaya *drag*, namun gaya *lift* jauh lebih besar dari gaya *drag* sehingga rotor turbin ini lebih dikenal dengan rotor turbin tipe *lift*.



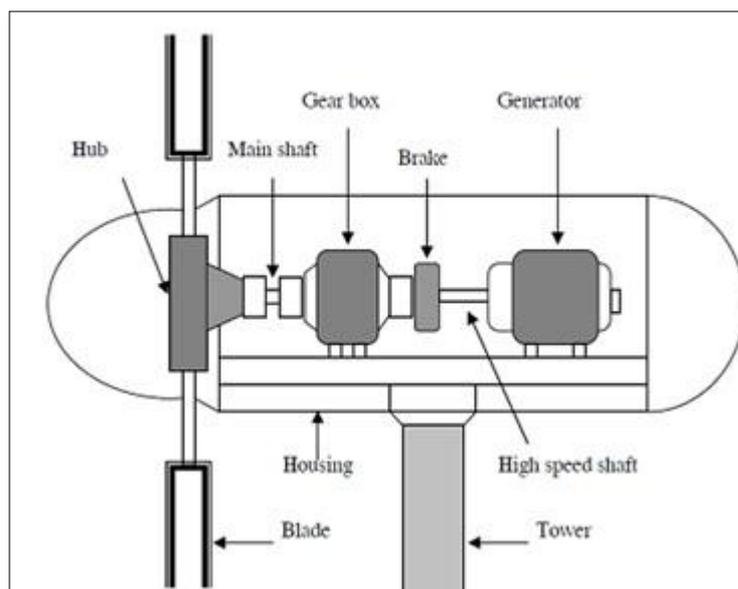
Gambar 2.2 Turbin angin poros horizontal.

Dilihat dari jumlah sudu, turbin angin sumbu horizontal terbagi menjadi:

1. Turbin angin satu sudu (*single blade*)
2. Turbin angin dua sudu (*double blade*)
3. Turbin angin tiga sudu (*three blade*)
4. Turbin angin banyak sudu (*multi blade*)



Gambar 2.3 Jenis turbin angin berdasarkan jumlah sudu.



Gambar 2.4 Komponen utama turbin angin sumbu horizontal

Turbin angin poros horizontal memiliki keunggulan dan keterbatasan, yaitu :

A. Keunggulan

- Memiliki efisiensi yang tinggi, karena *blade* selalu bergerak tegak lurus terhadap angin.
- Tównya yang tinggi memungkinkan untuk mendapatkan angin dengan kekuatan yang lebih besar.

B. Keterbatasan

- Dibutuhkan konstruksi tower yang besar untuk mensupport beban *blade*, gearbox dan generator.
- Komponen-komponen dari turbin angin horizontal (*blade*, gearbox dan generator) harus diangkat ke posisinya pada saat pemasangan.

Bab II Dasar Teori

Berdasarkan letak rotor terhadap arah angin, turbin angin sumbu horizontal dibedakan menjadi dua macam yaitu:

- 1) *Upwind*
- 2) *Downwind*

Turbin angin jenis *upwind* memiliki rotor yang menghadap arah datangnya angin sedangkan turbin angin jenis *downwind* memiliki rotor yang membelakangi arah angin. Rotor pada turbin *upwind* terletak di depan turbin, posisinya mirip dengan pesawat terbang yang didorong baling-baling. Untuk menjaga turbin tetap menghadap arah angin, diperlukan mekanisme yaw seperti ekor turbin. Keuntungannya adalah udara akan mulai menekuk di sekitar menara sebelum berlalu, sehingga jika kehilangan daya dari gangguan yang terjadi, tidak sama dengan daya yang dihasilkan turbin jenis *downwind*.



Gambar 2.5 Turbin angin jenis *upwind* dan *downwind*

Turbin angin *downwind* memiliki rotor di sisi bagian belakang turbin. Bentuk *nacelle* didesain untuk menyesuaikan dengan arah angin. Keunggulannya yaitu sudu rotor dapat lebih fleksibel karena tidak ada bahaya tabrakan dengan menara. Sudu fleksibel memiliki keuntungan, biaya pembuatan sudu lebih murah dan mengurangi tegangan pada tower selama keadaan angin dengan kecepatan tinggi karena melentur memberikan beban angin didistribusikan secara langsung ke sudu daripada ke menara. Sudu yang fleksibel dapat juga sebagai kekurangan dimana kelenturannya menyebabkan keletihan sudu. Dibelakang menara merupakan masalah dengan mesin *downwind* karena menyebabkan turbulensi aliran dan meningkatkan kelelahan pada turbin.

2.3.2 Turbin Angin Poros Vertikal

Turbin angin poros vertikal merupakan turbin angin yang poros rotasi rotornya tegak lurus terhadap permukaan tanah. Jika dilihat dari efisiensi turbin, turbin angin sumbu horizontal lebih efektif dalam mengekstrak energi angin dibanding dengan turbin angin poros vertikal. Meskipun demikian, turbin angin memiliki keunggulan dan keterbatasan, yaitu :

A. Keunggulan

- Turbin angin tidak harus diubah posisinya jika arah angin berubah, tidak seperti turbin angin horizontal yang memerlukan mekanisme tambahan untuk menyesuaikan rotor turbin dengan arah angin.
- Tidak membutuhkan struktur menara yang besar dan konstruksi turbin sederhana.

B. Keterbatasan

- Kebanyakan turbin angin memiliki penurunan efisiensi dibanding turbin horizontal, terutama karena hambatan yang mengurangi *drag* menghasilkan lebih banyak angin, terutama yang menyalurkan angin ke daerah kolektor.
- Memiliki rotor terletak dekat dengan tanah dimana kecepatan angin lebih rendah dan tidak mengambil keuntungan dari kecepatan angin tinggi di atas.

Jika dilihat dari prinsip aerodinamis rotor yang digunakan, turbin angin sumbu vertikal dibagi menjadi dua bagian, yaitu:

1) Turbin Angin Darrieus

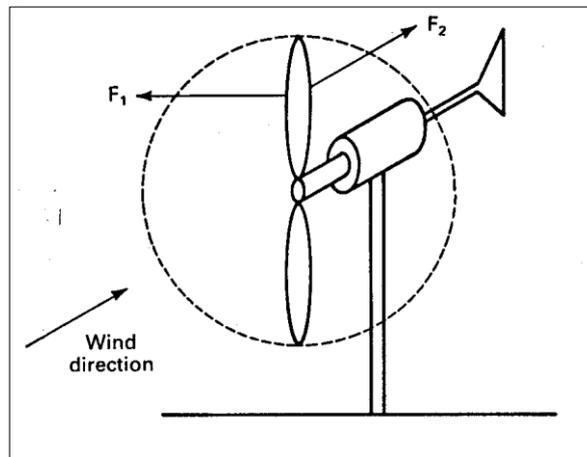
Turbin angin Darrieus pada umumnya dikenal sebagai turbin *eggbeater*. Turbin angin Darrieus pertama kali ditemukan oleh Georges Darrieus pada tahun 1931. Turbin angin Darrieus merupakan turbin angin yang menggunakan prinsip aerodinamis dengan memanfaatkan gaya *lift* pada *airfoil* dalam mengekstrak energi angin.



Gambar 2.6 Turbin angin Darrieus tipe-H

Bab II Dasar Teori

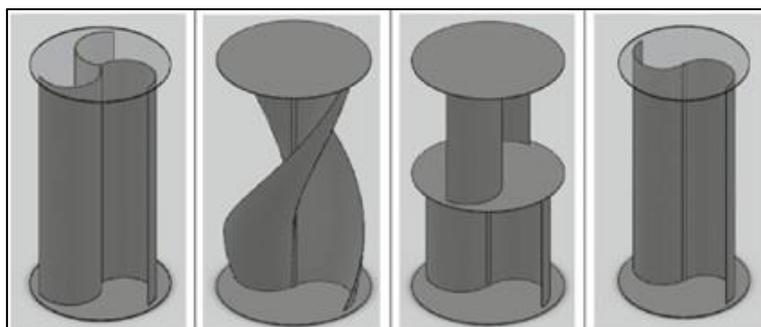
Turbin Darrieus memiliki torsi rotor yang rendah tetapi putarannya lebih tinggi dibanding dengan turbin angin Savonius sehingga lebih diutamakan untuk menghasilkan energi listrik. Namun turbin ini membutuhkan energi awal untuk mulai berputar. Rotor turbin angin Darrieus pada umumnya memiliki variasi sudu yaitu dua atau tiga sudu. Modifikasi rotor turbin angin Darrieus disebut dengan turbin angin H.



Gambar 2.7 Arah angin pada sudu turbin

2) Turbin Angin Savonius

Turbin Angin Savonius pertama kali diperkenalkan oleh insinyur Finlandia Sigurd J. Savonius pada tahun 1922. Turbin Angin sumbu Angin yang terdiri dari dua sudu berbentuk setengah silinder yang dirangkai sehingga membentuk 'S', satu sisi setengah silinder berbentuk cembung dan sisi lain berbentuk cekung yang dilalui Angin. Berdasarkan prinsip aerodinamis, rotor turbin ini memanfaatkan gaya hambat (*drag*) saat mengekstrak Angin Angin dari aliran Angin yang melalui sudu turbin. Koefisien hambat permukaan cekung lebih besar daripada permukaan cembung. Oleh sebab itu, sisi permukaan cekung setengah silinder yang dilalui Angin akan memberikan gaya hambat yang lebih besar daripada sisi lain sehingga rotor berputar. Setiap turbin Angin yang memanfaatkan potensi Angin dengan gaya hambat memiliki efisiensi yang terbatas karena kecepatan sudu tidak dapat melebihi kecepatan Angin yang melaluinya.



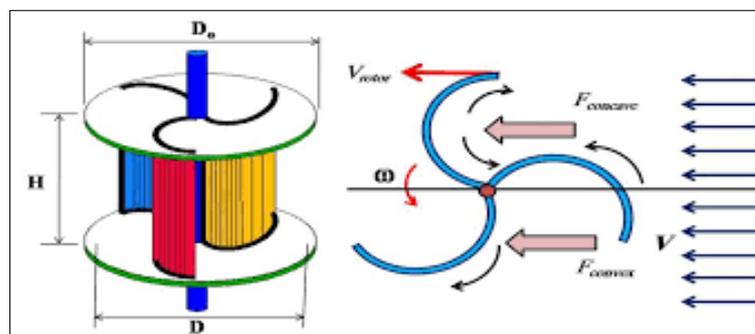
Gambar 2.8 Model sudu turbin Savonius

Bab II Dasar Teori

Dengan memanfaatkan gaya hambat, turbin angin Savonius memiliki putaran dan daya yang rendah dibandingkan dengan turbin angin Darrieus. Meskipun demikian turbin Savonius tidak memerlukan energi awal untuk memulai rotor berputar yang merupakan keunggulan turbin ini dibanding turbin Darrieus. Daya dan putaran yang dihasilkan turbin Savonius relatif rendah, sehingga pada penerapannya digunakan untuk keperluan yang membutuhkan daya kecil dan sederhana seperti memompa air. Turbin ini kurang sesuai digunakan untuk pembangkit listrik dikarenakan *tip speed ratio* dan daya yang relatif rendah. Dibawah ini beberapa tipe sudu savonius yaitu:

a) Savonius tipe U.

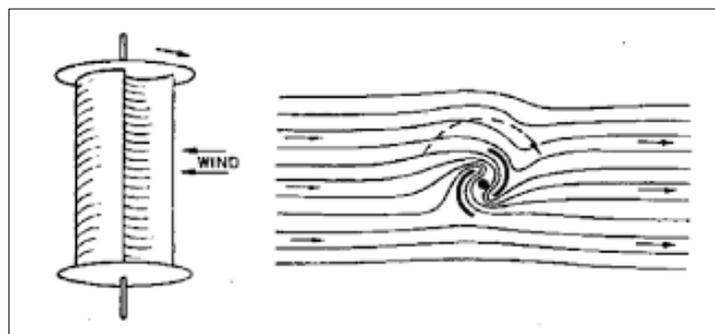
Savonius tipe U sangat kuat, karena berpusat di tengah atau pusat batang, tetapi sedikit kurang efisien dibandingkan dengan dua tipe Savonius lainnya.



Gambar 2.9 Savonius tipe U.

b) Savonius tipe S.

Rancangan Savonius tipe S ini juga sangat sederhana dan juga dapat dilakukan dengan mudah dari logam pipa atau drum. Desain yang sedikit lebih efisien daripada tipe Savonius di atas karena beberapa udara dibelokkan oleh kedua baling lalu keluar pada salah satu sisinya.



Gambar 2.10 Savonius tipe S.

2.4 Komponen-Komponen Turbin Angin

2.4.1 Komponen Turbin Angin Horizontal

Secara umum, komponen utama mesin turbin angin poros horizontal terdiri dari sudu (*blade*), rotor, rem dan kopling, poros putaran rendah, poros putaran tinggi, generator, yaw sistem kontrol, tower dan pondasi, Sebagai contoh, gambar di bawah ini merupakan bagian-bagian utama dan fungsinya dari turbin angin bersumbu horizontal:

a). Sudu (*blade*)

Sudu (*blade*) berfungsi mengubah hembusan angin menjadi energi kinetik untuk memutar generator listrik. Semakin panjang baling-baling maka akan semakin banyak menerima terpaan angin sehingga akan semakin besar energi putaran mekanik yang dihasilkan untuk memutar generator. Adakalanya sebelum poros baling-baling disambung ke generator listrik, ditambahkan gearbox untuk menambah atau mengurangi kecepatan putar generator listrik sesuai kebutuhan.



Gambar 2.11 Sudu turbin angin poros horizontal

b).Rotor Hub

Hub merupakan bagian dari rotor yang berfungsi menghubungkan sudu dengan *shaft* (poros) utama



Gambar 2.12 Rotor hub turbin angin poros horizontal

Bab II Dasar Teori

c). Rem dan Kopling

Rem berfungsi untuk menghentikan putaran poros rotor yang bertujuan untuk keamanan atau pada saat dilakukan perbaikan. Sedangkan kopling berfungsi untuk memindahkan daya poros ke transmisi gearbox atau langsung ke generator, dengan meredam getaran dari poros rotor serta sebagai salah satu sarana meluruskan sambungan (*alignment*).



Gambar 2.13 Rem dan kopling turbin angin poros horizontal

d). Poros Rotor Putaran Rendah

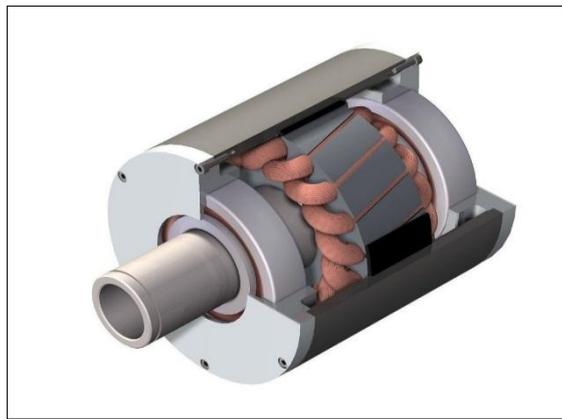
Poros rotor berfungsi untuk memindahkan daya dari rotor ke generator, dapat secara langsung maupun melalui mekanisme transmisi gearbox.



Gambar 2.14 Poros putaran rendah turbin angin poros horizontal

e). Generator

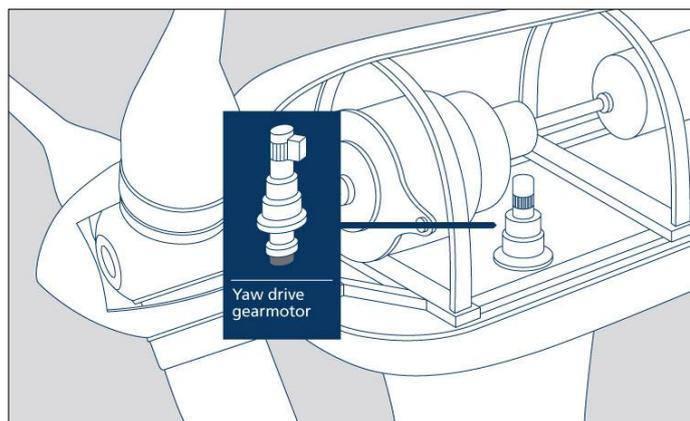
Generator merupakan komponen terpenting dalam sistem turbin angin, dimana fungsinya adalah merubah energi gerak (mekanik) putar pada poros penggerak menjadi energi listrik. Tegangan dan arus listrik yang dihasilkan oleh generator dapat berupa *alternating current* (AC) maupun *direct current* (DC) dan tegangan *outputnya* didapat dari tegangan rendah (12 volt) atau sampai tegangan (680 volt) atau lebih.



Gambar 2.15 Generator turbin angin horizontal

f). Yawing kontrol

Pada turbin angin yang relatif besar, umumnya sudah menggunakan sistem geleng aktif (*active yawing system*), yang digerakkan oleh motor servo. Kontrol yawing disini berfungsi menerima *input* dari sensor anemometer (mendeteksi kecepatan angin) dan *wind direction* (mendeteksi perubahan arah angin), dan memberikan komando kepada motor servo untuk membelokkan arah *shaft* turbin angin dan juga memberikan *input* kepada kontrol *pitch*.



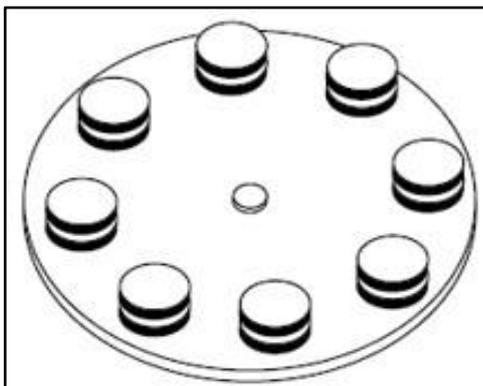
Gambar 2.16 Yawing kontrol

2.4.2 Komponen Turbin Angin Vertikal

Secara umum komponen turbin angin vertikal terdiri dari beberapa komponen diantaranya rotor, sudu, stator.

a) Rotor

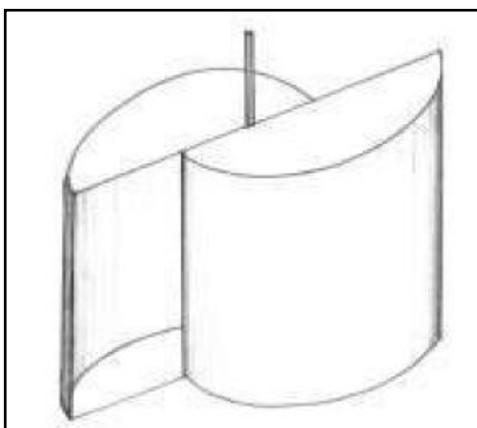
Rotor berfungsi mengubah energi kinetik angin menjadi energi gerak berupa putaran poros. Pada perancangan rotor tersebut dibuat dengan menggunakan 16 buah magnet yang dipasang pada setiap permukaan. Tetapi di dalam penempatan dari 16 buah magnet tersebut dibagi 2 yang masing-masing menjadi 8 buah, kemudian magnet tersebut digabung sehingga magnet menjadi 2 tingkat.



Gambar 2.17 Rotor

b) Sudu

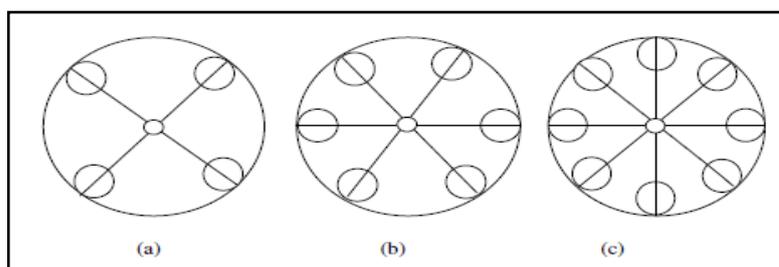
Sudu merupakan bagian penting dari sebuah turbin. Geometri dan posisi sudu yang tepat akan meningkatkan daya angkat yang dapat dihasilkan, yang pada akhirnya dapat meningkatkan efisiensi turbin. Sudu dikatakan baik apabila bahan yang digunakan ringan tetapi kuat, sehingga mampu menahan beban atau tegangan yang terjadi karena putaran rotor. Saat ini banyak dikembangkan sudu yang menggunakan material serat karbon.



Gambar 2.18 Sudu turbin angin vertikal

c) Stator

Stator terdiri dari beberapa *coil* atau kumparan dari kawat tembaga yang dilapisi oleh bahan isolator. Jumlah kumparan menentukan tegangan yang bisa dikeluarkan oleh generator tersebut. Stator yang telah dibuat terdiri dari 4 kumparan, 6 kumparan, dan 8 kumparan yang masing-masing kumparan terdiri atas 1000 lilitan dan setiap kumparan digabung secara seri sehingga didapat 1 fasa tegangan. Seperti yang terlihat pada gambar di bawah ini.

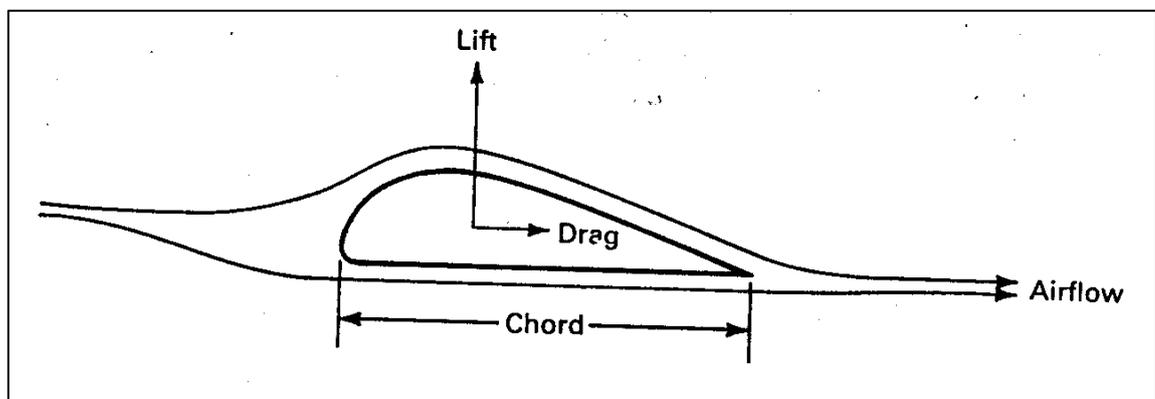


Gambar 2.19 Stator

Bab II Dasar Teori

2.5 Aerodinamik Sudu Turbin

Gaya aerodinamik yang bekerja pada sudu turbin biasanya dibagi menjadi dua yaitu, gaya angkat tegak lurus terhadap aliran udara dibagian atas airfoil (*lift*) dan gaya geser yang arahnya berlawanan dengan aliran udara (*drag*). Seperti pada gambar 2.2 adanya gaya angkat (*lift*) tergantung pada aliran laminar yang berada di atas airfoil yang berarti udara mengalir tanpa hambatan di kedua sisi airfoil. Karena udara dibagian atas airfoil mengalir lebih cepat dibanding udara yang mengalir bagian bawah, maka terjadilah perbedaan tekanan dibagian atas dan dibagian bawah airfoil. Perbedaan kecepatan dikarenakan jarak yang ditempuh angin dibagian atas airfoil lebih jauh daripada jarak yang ditempuh angin dibagian bawah airfoil. Dikarenakan udara dibagian atas mengalir lebih cepat, maka menyebabkan penurunan tekanan, dan perbedaan tekanan inilah yang menyebabkan terjadinya gaya angkat (*lift*) pada airfoil.



Gambar 2.20 Gaya *lift* dan *drag* yang terjadi pada airfoil.

Udara yang bergerak di antara airfoil juga menghasilkan gaya geser (*drag*) yang arahnya berlawanan dengan arah gerak, gaya geser bisa juga disebut dengan istilah rugi karena gaya yang dihasilkan oleh fluida (angin) menghambat gerakan.

Bab II Dasar Teori

2.6 Perhitungan turbin angin

- Untuk menghitung daya angin yang dihasilkan yaitu menggunakan persamaan:

$$P_w = \frac{1}{2} \rho A U^3 \quad (2.1)$$

Ket:

P_w : Daya angin (W)

ρ : Massa jenis angin (kg/m^3)

A : Luas span area (m^2)

U : Kecepatan angin (m/s)

- Span area adalah luas area sapuan turbin angin, yang dihitung dengan persamaan :

$$A = hD \quad (2.2)$$

Ket:

A : Luas span area (m^2)

h : Tinggi sudu rotor (m)

D : Diameter turbin (m)

- Menentukan daya turbin angin dapat dihitung dengan persamaan:

$$P_t = C_p \frac{1}{2} \rho A U^3 \quad (2.3)$$

Ket:

P_t : Daya turbin angin (W)

C_p : Koefisien daya turbin

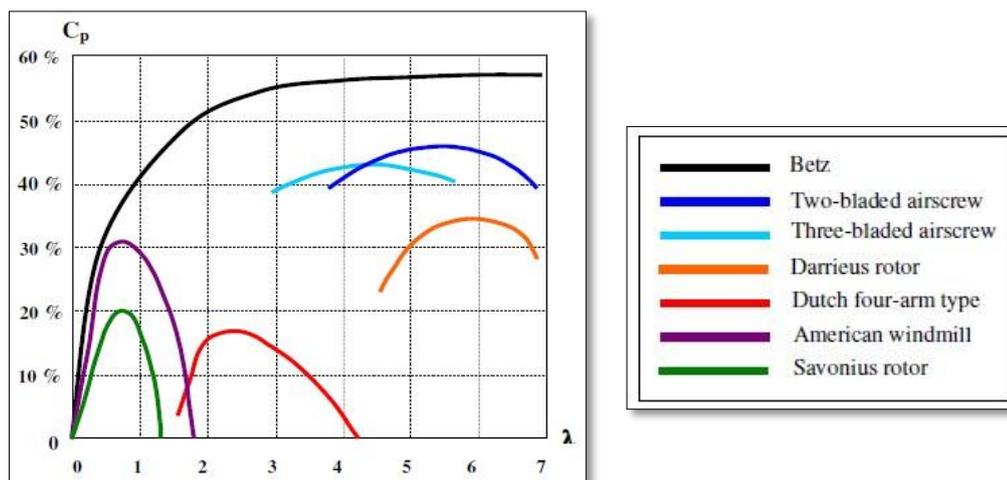
ρ : Massa jenis angin (kg/m^3)

A : Luas span area (m^2)

U : Kecepatan angin (m/s)

Bab II Dasar Teori

Perhitungan koefisien daya (C_p) didapat dari grafik antara C_p dan TSR (*Tip speed ratio*)



Gambar 2.21 Grafik koefisien daya turbin terhadap *Tip speed ratio* (TSR)

- TSR (*Tip Speed Ratio*) adalah perbandingan antara kecepatan sudu rotor turbin dengan kecepatan angin, dapat dihitung dengan menggunakan persamaan:

$$\lambda = \frac{\omega r}{U} \quad (2.4)$$

Ket:

λ : Tip speed ratio

ω : Kecepatan angular (rad/s)

r : Jari-jari (m)

U : Kecepatan angin (m/s)

- Untuk menentukan kecepatan angular dapat dihitung dengan menggunakan persamaan:

$$\omega = \frac{2\pi n}{60} \quad (2.5)$$

Ket:

ω : Kecepatan angular (rad/s)

n : Putaran poros (rpm)

- Untuk menentukan torsi poros rotor dapat dihitung dengan menggunakan persamaan

$$T = \alpha I \quad (2.6)$$

Bab II Dasar Teori

Ket:

T : Torsi (Nm)

α : Kecepatan sudut (rad/s)

I : Momen inerti poros (kgm^2)

- Untuk menentukan kecepatan sudut dapat dihitung dengan menggunakan persamaan:

$$\alpha = \frac{\omega_t - \omega_o}{t} \quad (2.7)$$

Ket:

ω_t : Kecepatan tinggi poros (rad/s)

ω_o : Kecepatan rendah poros (rad/s)

t : Waktu satu kali putar poros (s)

- Untuk menentukan momen inerti poros dapat dihitung dengan menggunakan persamaan:

$$I = mr^2 \quad (2.8)$$

Ket:

I : Momen inerti poros (kgm^2)

m : Massa turbin angin (kg)

r : Jari-jari turbin angin (m)

- Untuk menentukan keluaran daya turbin dapat dihitung dengan persamaan:

$$P_t = T\omega \quad (2.9)$$

Ket:

P_t : Keluaran daya (W)

T : Torsi (Nm)

ω : Kecepatan sudut (rad/s)

Bab II Dasar Teori

- Blade solidity didefinisikan sebagai area blade total dibagi dengan area rotor, dan merupakan parameter utama dalam menentukan kinerja rotor :

$$\sigma = \frac{Nc}{2\pi r} \quad (2.10)$$

Ket:

σ = Soliditas sudu

N = Jumlah banyak sudu

c = Chord sudu (m)

r = Jari-jari turbin angin (m)