

## **BAB II**

### **TINJAUAN PUSTAKA**

#### **2.1 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.

#### **2.2 Potensi Energi Angin di Indonesia**

Semua energi yang dapat diperbaharui dan bahkan energi pada bahan bakar fosil, kecuali energi pasang surut dan panas bumi berasal dari matahari. Matahari meradiasi  $1,74 \times 1.014$  kW jam energi ke Bumi setiap jam. dengan kata lain, bumi

ini menerima daya  $1,74 \times 1.017$  Watt.<sup>1</sup> Sekitar 1-2% dari energi tersebut diubah menjadi energi angin. Jadi, energi angin berjumlah 50-100 kali lebih banyak daripada energi yang diubah menjadi biomassa oleh seluruh tumbuhan yang ada di muka bumi.

Tabel 2.1. Energi angin yang tersedia pada berbagai wilayah di Indonesia

No	Provinsi	Tahun	Potensi ( MW )
1	NTT	2017	10.188
2	Jawa Timur	2017	7.907
3	Jawa Barat	2017	7.036
4	Jawa Tengah	2017	5.213
5	Sulawesi Selatan	2017	4.193
6	Maluku	2017	3.188
7	NTB	2017	2.605
8	Bangka Belitung	2017	1.787
9	Banten	2017	1.753
10	Bengkulu	2017	1.513
11	Sulteng	2017	1.414
12	Papua	2017	1.411
13	Sulawesi Utara	2017	1.214
14	Lampung	2017	1.137
15	D.I.Yogyakarta	2017	1.079
16	Bali	2017	1.019
17	Kalimantan Selatan	2017	1.006
18	Kepulauan Riau	2017	922

<sup>1</sup> <http://www.ristek.go.id/>

19	Sulawesi Tengah	2017	908
20	Aceh	2017	894
21	Kalimantan Tengah	2017	681
22	Kalimantan Barat	2017	554
23	Sulawesi Barat	2017	514
24	Maluku Utara	2017	504
25	Papua Barat	2017	437
26	Sumatra Barat	2017	428
27	Sumatra Utara	2017	356
28	Sumatra Selatan	2017	301
29	Kalimantan Timur	2017	212
30	Gorontalo	2017	137
31	Kalimantan Utara	2017	73
32	Jambi	2017	37
33	Riau	2017	22
34	Jakarta	2017	4

*Sumber :setkab.go.idpotensi-pengembangan-pltb-di-indonesia*

Berdasarkan tabel 2.1 pemilihan energi angin tersedia dalam satu tahun yang paling tepat adalah provinsi NTT dikarenakan potensi angin yang paling besar. energi angin yang tersedia di provinsi sebesar 10.188 MW.

### **2.3 Turbin Angin**

Turbin angin adalah kincir angin yang digunakan untuk menggerakkan generator sebagai pembangkit tenaga listrik. Turbin angin lebih banyak digunakan untuk mengakomodasi kebutuhan listrik masyarakat, dengan adanya prinsip

konversi energi dan menggunakan sumber daya alam yang dapat dipengaruhi oleh angin.

Prinsip dasar bahwa sebuah turbin angin dapat berputar pada porosnya adalah karena adanya vektor dari gaya *lift* dan gaya *drag* yang dihasilkan akibat bentuk aerodinamis dari penampang *blade* tersebut. Ketika sebuah *airfoil* terkena angin dari arah depan, maka akan menghasilkan vektor gaya *lift* (L) dan *drag* (D). Gaya *lift* dan gaya *drag* ini perubahannya dipengaruhi langsung oleh bentuk geometri *blade*, kecepatan dan arah angin terhadap garis utama *blade*. Akibat dari perubahan gaya *lift* dan *drag*.<sup>2</sup>

Kecepatan sudut dan torsi poros akan berubah pula. *Blade Pitch Angle Control System* adalah salah satu mekanisme kontrol pada turbin angin yang bekerja dengan mengontrol aerodinamis dari *blade* melalui kontrol kemiringan sudut *blade* terhadap arah tiupan angin (*angle of attack*). Perubahan sudut *blade* ini akan mempengaruhi kecepatan sudut (RPM) dari poros karena adanya perubahan jumlah daya tiup angin yang diterima oleh *blade* yang dikonversi menjadi kecepatan putar poros.

Daya dari angin yang dapat ditangkap oleh sebuah *Horizontal Axis Wind Turbine* (HAWT) dapat diturunkan dari persamaan energi kinetik angin yang bergerak dengan kecepatan tertentu ke arah x. adapun persamaan energi yang

---

<sup>2</sup> Denny Putra Pratama, "Rancang Bangun Sistem Pengendalian Blade Pitch Angle Pada Prototipe Turbin Angin Berbasis euro-Fuzzy", hal. 2.

mengenai sudu turbin angin dituliskan sesuai dengan persamaan (1) adalah sebagai berikut:

$$U = \frac{1}{2} m v_w^2 = \frac{1}{2} (\rho_{air} A_r x) v_w^2 \quad (1)^3$$

Diketahui bahwa daya adalah turunan dari energi terhadap waktu, maka dituliskan dengan persamaan (2) adalah sebagai berikut:

$$P = \frac{dU}{dt} = \frac{1}{2} \rho_{air} A_r v_w^2 \frac{dx}{dt} = \frac{1}{2} \rho_{air} v_w^3 \quad (2)^3$$

Selain pada kecepatan angin, power juga tergantung pada  $C_p$  (*Coeffisien Power*). Semakin besar nilai  $C_p$  maka akan semakin besar tenaga yang dapat ditangkap oleh turbin angin.  $C_p$  sendiri adalah merupakan fungsi dari  $\lambda$  (*tip speed ratio*) dan  $\theta$  (*pitch angle*). Jadi persamaan (2) dapat ditulis kembali kedalam bentuk yang lebih sederhana seperti ditunjukkan pada persamaaan (3):

$$P = \frac{1}{2} \rho_{air} C_p (\lambda, \theta) A_r v_w^3 \quad (3)^3$$

Sedangkan  $\lambda$  sendiri dirumuskan sbagai berikut :

$$\lambda = \frac{\omega R}{v} \quad (4)^3$$

Dimana :

$\lambda$  = tip speed ratio

$\omega$  = kecepatan sudut (rps)

$v$  = kecepatan angin (m/s)

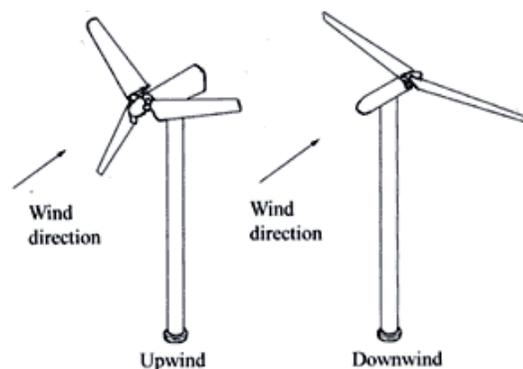
$R$  = jari-jari *rotor blade* (m)

Jika diasumsikan  $\omega$  adalah konstan sesuai *set point* yang diinginkan dan  $R$  *blade* adalah konstan, maka  $C_p$  hanya akan bergantung pada  $v$  (kecepatan angin)

dan  $\theta$  (pitch) sinilah kemudian  $\theta$  dijadikan variabel yang dikontrol sebagai kompensasi perubahan kecepatan angin ( $v$ ) untuk mendapatkan tenaga yang diinginkan. Sedangkan untuk mendapatkan  $\theta$  sesuai dengan yang dibutuhkan dilakukan pengambilan data dengan menggunakan kecepatan angin ( $v$ ) yang ditentukan.

#### 2.4 Turbin Angin Sumbu Horizontal

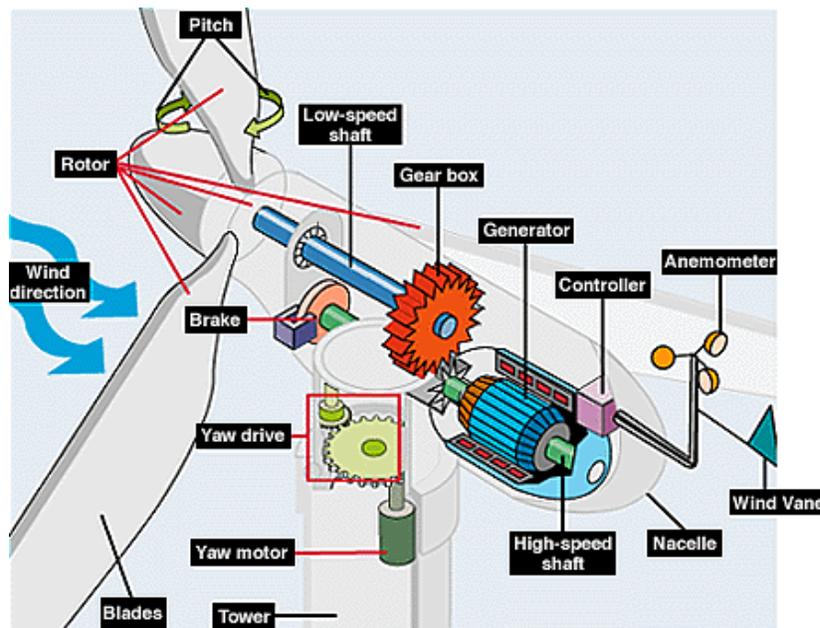
Turbin angin sumbu *Horizontal* (TASH) memiliki poros *rotor* utama dan generator listrik di puncak menara. Turbin berukuran kecil diarahkan oleh sebuah ekor (*tail*) yang sederhana, sedangkan turbin berukuran besar pada umumnya menggunakan sebuah sensor angin yang digandengkan ke sebuah *servo* motor. Sebagian besar memiliki sebuah *gearbox* yang mengubah perputaran kincir yang pelan menjadi lebih cepat berputar. Turbin angin sumbu *Horizontal* dibedakan juga terhadap datangnya arah angin terhadap *rotor* turbin, yaitu :



Gambar 2.1. Turbin angin sumbu horizontal (Sumber: Mathew;2006)

1. *Upwind*, apabila turbin angin diletakan menghadap arah angin (*upwind* memiliki *rotor* yang menghadap arah datangnya angin).
2. *Downwind*, apabila turbin angin diposisikan membelakangi arah angin.

## 2.5 Komponen Turbin Angin



Gambar 2.2. Komponen turbin angin (Sumber: <http://www.getsttpln.com/2014/03/komponen-pltb.html>)

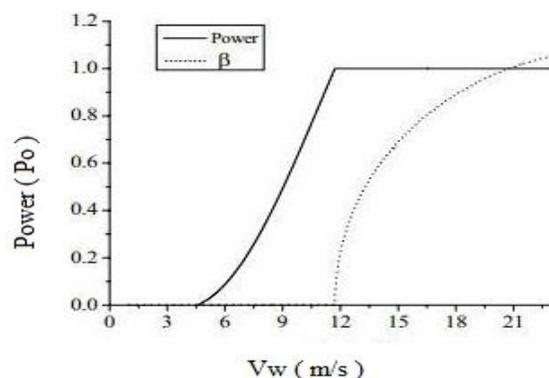
- 1 *Anemometer*: Mengukur kecepatan angin dan mengirim data angin ke Alat Pengontrol.
- 2 *Blades* (Bilah Kipas): Kebanyakan turbin angin mempunyai 3 bilah kipas. Angin yang menghembus menyebabkan turbin tersebut berputar.
- 3 *Brake* (Rem): Suatu rem cakram yang dapat digerakkan secara mekanis dengan bantuan tenaga listrik atau hidrolik untuk menghentikan *rotor* atau saat keadaan darurat.

- 4 *Control ler* (Alat Pengontrol): Alat Pengontrol ini men-start turbin pada kecepatan angin kira-kira 12-25 km/jam, dan kemudian mematkannya pada kecepatan 90 km/jam. Turbin tidak beroperasi di atas 90 km/jam. Hal ini dikarenakan tiupan angin yang terlalu kencang dapat merusakkannya.
- 5 *Gearbox* (Roda Gigi): Roda gigi menaikkan putaran dari 30-60 rpm menjadi sekitar 1000-1800 rpm. Ini merupakan tingkat putaran standar yang disyaratkan untuk memutar generator listrik.
- 6 *Generator*: Generator pembangkit listrik, biasanya sekarang disebut alternator arus bolak-balik.
- 7 *High-speed shaft* (Poros Putaran Tinggi): Berfungsi untuk menggerakkan generator.
- 8 *Low-speed shaft* (Poros Puutaran Rendah): Poros turbin yang berputar kira-kira 30-60 rpm.
- 9 *Nacelle* (Rumah Mesin): Rumah mesin ini terletak di atas menara . Di dalamnya berisi *gearbox*, poros putaran tinggi / rendah, generator, alat pengontrol, dan alat pengereman.
- 10 *Pitch* (Sudut Bilah Kipas): Bilah kipas dapat diatur sudutnya sesuai dengan kecepatan *rotor* yang dikehendaki. Tergantung kondisi angin yang terlalu rendah atau terlalu kencang.
- 11 *Rotor* : Bilah kipas bersama porosnya dinamakan *rotor*.

- 12 *Tower* (Menara): Menara bisa dibuat dari pipa baja, beton, ataupun rangka besi. Karena kencangnya angin bertambah dengan seiring dengan bertambahnya ketinggian, maka makin tinggi menara makin besar tenaga angin yang didapat.
- 13 *Wind direction* (Arah Angin): Adalah turbin yang menghadap angin. Desain turbin lain ada yang mendapat hembusan angin dari belakang.
- 14 *Wind vane* (Tebeng Angin): Mengukur arah angin, berhubungan dengan penggerak arah yang memutar arah turbin disesuaikan dengan arah angin.
- 15 *Yaw drive* (Penggerak Arah): Penggerak arah memutar turbin ke arah angin untuk desain turbin yang menghadap angin. Untuk desain turbin yang mendapat hembusan angin dari belakang tak memerlukan alat ini.
- 16 *Yaw motor* (Motor Penggerak Arah): Motor listrik yang menggerakkan *yaw drive*.

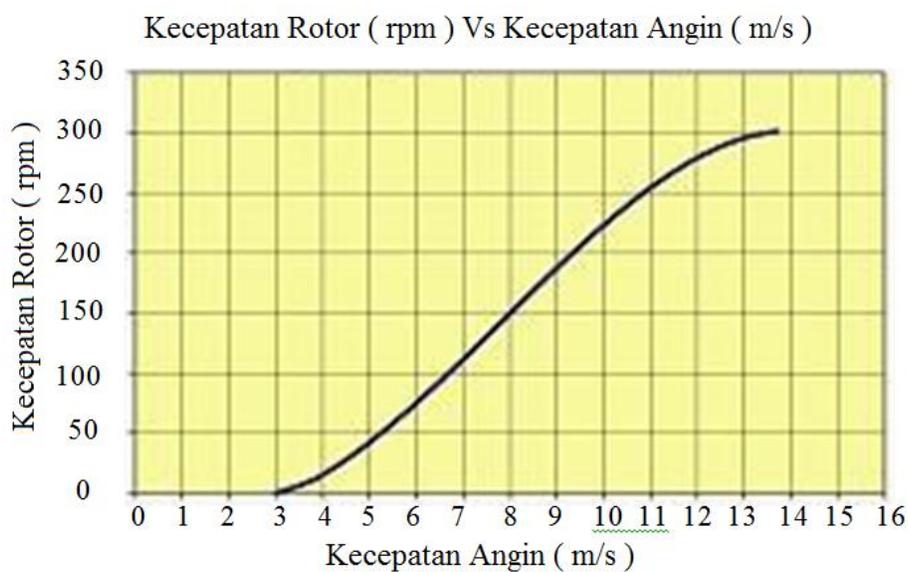
## 2.6 Karakteristik Turbin Angin

Turbin angin sebagai salah satu alat penghasil energi memiliki beberapa karakteristik yang perlu kita ketahui diantaranya sebagai berikut



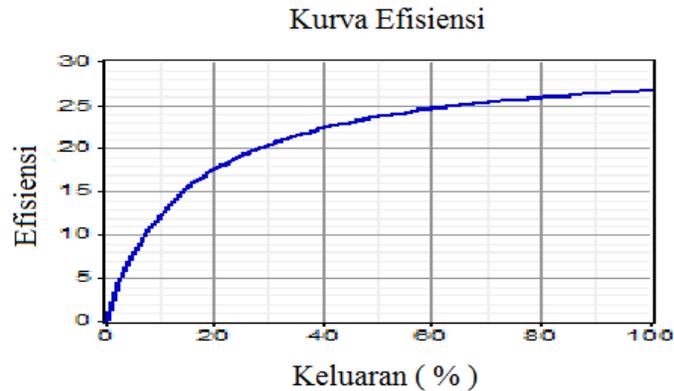
Gambar 2.3. Hubungan daya output terhadap kecepatan angin (*Sumber : Laporan Perencanaan Turbin Angin Horizontal, Polban*)

Dari persamaan  $P_o = \frac{1}{2} \rho v^3 A$  dan kurva di atas kita bisa mengetahui bahwa semakin cepat kecepatan angin maka akan semakin besar daya yang dihasilkan, akan tetapi terjadi kejenuhan pada kecepatan angin tertentu sehingga daya tidak bertambah melainkan konstan.



Gambar 2.4. Hubungan kecepatan rotor terhadap kecepatan angin (*Sumber : Laporan Perencanaan Turbin Angin Horizontal, Polban*)

Semakin cepat kecepatan angin maka akan semakin besar putaran *rotor* yang dihasilkan, dan hal tersebut dapat terlihat dari gambar 4 yang menunjukkan hubungan antara kecepatan putaran *rotor* terhadap kecepatan angin. Jadi dapat kita ketahui apabila menginginkan kecepatan *rotor* yang lebih tinggi caranya adalah dengan meningkatkan kecepatan angin yang digunakan untuk memutar turbin angin.



Gambar 2.5. Hubungan efisiensi terhadap output (*Sumber : Laporan Perencanaan Turbin Angin Horizontal, Polban*)

Untuk perbandingan antara efisiensi terhadap *output* pada saat *output* sekitar 0% hingga 40% dari kemampuan turbin atau generator peningkatan efisiensi sangat tinggi, namun pada saat 50% hingga 100% ada peningkatan efisiensi namun tidak signifikan namun tidak terlalu signifikan.

## **2.7 Mekanisme Turbin Angin**

Pembahasan mekanisme pada penelitian ini terbagi menjadi dua yaitu:

### **2.7.1 Mekanisme Pitch Blade Control**

*Pitch Blade Control* adalah teknologi yang digunakan untuk mengoperasikan dan mengontrol sudut pisau dalam turbin angin. Pengontrol utama turbin menghitung sudut kemiringan yang dibutuhkan dari satu set kondisi, seperti kecepatan angin, kecepatan generator dan produksi daya. Sudut kemiringan yang dibutuhkan ditransfer ke sistem *pitch blade control* sebagai *set point* untuk membuat aktuator menggerakkan *blade* ke sudut yang diperlukan.

*Pitch Blade Control* merupakan metode yang dioperasikan ketika kecepatan angin diluar dari nilai rata-rata, dalam situasi ini torsi elektromagnetik tidak cukup untuk mengontrol kecepatan *rotor* dengan demikian generator akan *overload*. Untuk menghindari hal ini, konversi daya turbin angin harus dibatasidan ini dapat dilakukan dengan mengurangi koefisien daya ( $C_p$ ) dari wind turbine. Koefisien daya dapat dimanipulasi dengan memvariasikan *blade pitch angle*.

Baling-baling pada turbin angin yang memiliki *pitch control* dapat berubah posisi menjauhi atau mendekati arah datangnya angin saat daya keluaran sangat tinggi ataupun sangat rendah, berurutan. *Pitch control* bekerja relatif cepat dan dapat digunakan untuk membatasi kecepatan *rotor* dengan mengatur aerodinamika aliran daya. Pada saat kecepatan angin rendah atau sedang, sudut baling-baling diatur agar turbin angin bekerja pada kondisi optimumnya.

Sedangkan saat kecepatan angin sedang tinggi, sudut baling-baling akan dinaikkan agar daya aerodinamika berkurang dan kecepatan *rotor* bertahan pada kecepatan *rating*. Manfaat yang dapat diambil dengan menggunakan kontrol sudut baling-baling ini adalah peningkatan daya tangkapan turbin angin. Dengan demikian, maka efisiensi kerja turbin angin dapat ditingkatkan dan menghasilkan energi listrik yang lebih besar. Penambahan kontrol sudut ini juga dapat menghindari daya masukan dari angin yang melebihi kemampuan kerja dari turbin angin dimana hal tersebut dapat menyebabkan perangkat mekanik dan elektronik pada turbin mengalami beban berlebih yang potensial menyebabkan kerusakan.

Aplikasi kontrol ini memungkinkan energi yang ditangkap turbin menjadi maksimal saat kecepatan angin rendah dengan memanfaatkan efek *tip speed ratio* yang konstan akibat penambahan kontrol tersebut. Pada saat kecepatan angin rendah, maka *pitch angle* akan diatur pada besaran yang konstan yaitu pada *pitch angle* yang menghasilkan daya terbesar. Sedangkan pada saat kecepatan angin tinggi, maka torsi dan daya akan dibatasi pada bagian yang memiliki besaran konstan.

### **2.7.2 Mekanisme Yaw drive Control**

Penggerak *yaw* merupakan komponen penting dari sistem *yaw* turbin angin sumbu *horizontal*. Untuk memastikan turbin angin menghasilkan jumlah energi listrik maksimal setiap saat, penggerak *yaw* digunakan untuk menjaga *rotor* menghadap angin saat arah angin berubah. Ini hanya berlaku untuk turbin angin dengan *rotor* sumbu *horizontal*. Turbin angin dikatakan memiliki kesalahan *yaw* jika *rotor* tidak sejajar dengan angin. Kesalahan *yaw* menyiratkan bahwa bagian energi yang lebih rendah dalam angin akan mengalir melalui area *rotor*. (Energi yang dihasilkan akan sebanding dengan kosinus dari kesalahan *yaw*).

### **2.7.3 Skala Beaufort**

Skala Beaufort adalah ukuran empiris yang berkaitan dengan kecepatan [angin](#) untuk pengamatan kondisi di darat atau di laut. Skala ini ditemukan oleh [Francis Beaufort](#) pada tahun [1805](#).<sup>3</sup> Beaufort mengukur kecepatan angin dengan menggambarkan pengaruhnya pada kecepatan kapal dan gelombang

---

<sup>3</sup> [https://id.wikipedia.org/wiki/Skala\\_Beaufort](https://id.wikipedia.org/wiki/Skala_Beaufort)

air laut. Skala Beaufort menggunakan angka dan simbol. Semakin besar angka skala Beaufort, maka semakin kencang angin berhembus dan bahkan bisa semakin merusak. Skala Beaufort dimulai dari angka 1 untuk hembusan angin yang paling tenang sampai angka 12 untuk hembusan angin yang dapat menyebabkan kehancuran. Skala Beaufort tetap berguna dan dipakai sampai sekarang.

Tabel 2.2 Tabel kecepatan angin berdasarkan skala beaufort

Nomor	Kekuatan Angin	Kecepatan Rata-rata (km/jam)
0	Tenang	<1
1	Sedikit tenang	1-5
2	Sedikit hembusan angin	6-11
3	Hembusan angin pelan	12-19
4	Hembusan angin sedang	20-29
5	Hembusan angin sejuk	30-39
6	Hembusan angin kencang	40-50
7	Mendekati kencang	51-61
8	Kencang	62-74
9	Kencang sekali	75-87

10	Badai	88-101
11	Badai dahsyat	102-117
12	Badai topan	>118

*Sumber: Brainly.co.id*