

## INTISARI

Ketersediaan listrik di Indonesia menjadi salah satu masalah yang belum dapat diselesaikan oleh pemerintah. Banyak daerah terpencil di Indonesia yang masih belum terjamah listrik. Perusahaan Listrik Negara (PLN) juga mulai mengembangkan pembangkit listrik tenaga alternatif dengan sumber energi terbarukan, salah satunya pembangkit listrik tenaga bayu (angin). Turbin angin merupakan solusi dari kedua masalah tersebut karena termasuk pembangkit listrik yang ramah lingkungan, murah dan mudah diaplikasikan di daerah terpencil.

Menara turbin angin dipilih menggunakan sistem rangka baja untuk memudahkan mobilisasi bahan ke daerah terpencil karena strukturnya aman, murah dan disusun dengan batang profil kecil. Penelitian ini bertujuan untuk merancang menara penopang turbin angin sistem rangka dengan batang baja yang murah dan aman. Program SAP2000 digunakan untuk menganalisis 5 model menara tinggi 30 meter dengan jarak tumpuan adalah 3m dan menggunakan *bracing* tipe X pada bagian mendatar menara dan *bracing* tipe K pada bagian mengecil menara. Variasi dilakukan dengan mengubah tinggi bagian datar menara menjadi 8 m; 9,6 m; 10 m; 11,2 m dan 12 m. Analisis dilakukan untuk mencari model menara dengan berat paling ringan dan masih memenuhi batas maksimal besarnya defleksi yang disyaratkan yaitu 150mm.

Berdasarkan hasil analisis didapatkan bahwa menara turbin angin dengan tinggi bagian datar sebesar 10 meter menghasilkan menara yang paling ringan dengan berat total struktur sebesar 54,9 kN dan defleksi maksimal sebesar 60,98 mm akibat kombinasi beban  $1,2D+1W_{90}$ . Berat total menara turbin angin tersebut lebih ringan 55,23 % bila dibandingkan dengan berat menara berjenis tubular yang dirancang oleh GHREPOWER. Tiga frekuensi natural pertama menara adalah sebesar 2,06 Hz; 2,06 Hz dan 6,10 Hz. Frekuensi natural menara berada diantara  $f_{rotor}$  dan  $f_{2p}$ .

Kata kunci: optimasi, turbin angin, menara rangka batang.

### ***ABSTRACT***

Equal distribution of power supply becomes one of the issues that can not be resolved by the Indonesian government. Many remote areas in Indonesia that is still not touched by electricity. Perusahaan Listrik Negara (PLN) begin to develop alternative power plants with renewable energy sources, which one of them is wind energy power plants. The wind turbine is a solution to both problems because it includes power generation environmentally friendly, inexpensive and easy to apply in remote areas.

Wind turbine towers are selected using the steel truss system to facilitate the mobilization of materials to remote areas because of the structure is safe, cheap and arranged with a small profile bars. This research aims to design a wind turbine tower truss system with steel bars that are cheap and safe. SAP2000 program is used to analyze the five models of 30 meter high towers at a toehold of 3 m and using the type X bracing on the flat section of the tower and type K bracing on the tapered section. Variation is done by changing the flat section tower height to 8 m; 9.6 m; 10 m; 11.2 m and 12 m. The analysis was performed to look for a tower model with the lowest weight and still meet the maximum limit of the amount of deflection required which is 150mm.

Based on the analysis we find that the windmill tower with a 10 meters height for the flat section produce the lightest tower structure with a total weight of 54.9 kN and a maximum of 60.98 mm deflection due to load combinations  $1,2D + 1W_{90}$ . The total weight of wind turbine tower is 55,23 % lighter when compared to the weight of tubular tower designed by GREPOWER. Three first natural frequency of tower is between  $f_{rotor}$  and  $f_{2p}$ .

*Keywords: optimization, wind turbines, lattice tower.*

## **BAB 1**

### **PENDAHULUAN**

#### **1.1 Latar Belakang**

Indonesia memiliki populasi yang sangat besar hingga menempati urutan ke-4 saat ini di dunia. Berdasarkan data dari Badan Pusat Statistik (BPS) tahun 2013 menyatakan bahwa jumlah penduduk Indonesia selama dua puluh lima tahun mendatang terus meningkat yaitu dari 238,5 juta pada tahun 2010 menjadi 305,6 juta pada tahun 2035.

Semakin meningkatnya jumlah penduduk di Indonesia membutuhkan perkembangan di bidang industri maupun teknologi. Dalam perkembangannya, kebutuhan energi listrik juga menjadi suatu masalah. Bidang industri dan teknologi merupakan aspek yang sangat bergantung pada suplai listrik.

Permasalahan lainnya adalah salah satu ciri penduduk Indonesia dengan persebaran antar pulau dan provinsi yang tidak merata. Sejak tahun 1930, sebagian besar penduduk Indonesia tinggal di Pulau Jawa. Hal itu sangat bertolak belakang dengan luas Pulau Jawa yang hanya sekitar 7% dari luas total wilayah daratan Indonesia. Hal tersebut mengancam terjadinya krisis energi di Pulau Jawa. Menurut mantan Menteri Koordinator Bidang Perekonomian Hatta Rajasa menyatakan jika Pulau Jawa akan mengalami krisis listrik pada tahun 2018 dan pemerintah harus cepat mencari sumber pasokan listrik alternatif menggunakan lahan yang sudah ada.

Perusahaan pemasok tunggal kebutuhan listrik Perusahaan Listrik Negara (PLN) sudah mulai mengembangkan pembangkit listrik tenaga alternatif seperti Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU), Pembangkit Listrik Tenaga Air (PLTA), Pembangkit Listrik Tenaga Gas Uap (PLTGU) maupun Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi (PLTPB). Pembangkit listrik tersebut masih menemui beberapa kendala karena sumber energinya yang tidak dapat mudah didapatkan.

Seperti PLTA yang harus mempunyai beda tinggi air yang cukup sehingga dapat menjalankan turbin listrik atau PLTU dan PLTGU yang masih bergantung pada pasokan batu bara dan gas dimana semakin menipis jumlahnya di perut bumi. PLTPB menggunakan panas bumi yaitu satu sumber energi yang terbarukan, tetapi hanya daerah tertentu yang hanya dapat diperoleh di daerah tertentu yang memiliki gunung berapi aktif.

Beberapa daerah terpencil di Pulau Jawa masih belum tersuplai listrik, baik hanya waktu malam saja yang tersuplai listrik maupun belum tersuplai samasekali. Hal tersebut disebabkan oleh susahnya akses suplai listrik ke daerah tersebut dan mahalnya biaya yang harus diinvestasikan untuk membangun sebuah pembangkit listrik. Untuk mengatasi hal tersebut, beberapa daerah di Indonesia sudah mulai mengembangkan Pembangkit Listrik Tenaga Angin/Bayu (PLTB). PLTB menggunakan angin sebagai sumber energi untuk menggerakkan motor listrik yang mengubah energi mekanik menjadi energi listrik. Beberapa daerah yang sudah mulai mengembangkan PLTB yaitu berupa kincir angin adalah Bangka Belitung, Pulau Selayar, dan Daerah Istimewa Yogyakarta. Indonesia memiliki potensi memiliki banyak daerah yang berpotensi untuk dibangun kincir angin yaitu dengan kecepatan angin diatas 5 m/s. Hasil pemetaan Lembaga Penerbangan dan Antariksa Nasional (Lapan) pada 120 lokasi menunjukkan, beberapa wilayah memiliki kecepatan angin di atas 5 m/detik, masing-masing Nusa Tenggara Timur, Nusa Tenggara Barat, Sulawesi Selatan, dan Pantai Selatan Jawa.

Kincir angin yang banyak dibangun di Indonesia menggunakan model tubular. Kincir angin model tubular membutuhkan biaya besar dan tidak mudah diaplikasikan di daerah terpencil karena perlu menggunakan alat berat untuk mengangkat sistem penyangga kincir angin tersebut. Berdasarkan potensi yang dimiliki dan mempertimbangkan kemudahan aplikasi kincir Angin maka di Indonesia sangat cocok diaplikasikan kincir angin dengan model *lattice*.

## **1.2 Tujuan Penelitian**

Tujuan diadakannya penelitian optimasi optimasi perancangan menara turbin angin sumbu horizontal tinggi 30 meter dengan rangka batang baja ini adalah sebagai berikut:

1. Mengetahui cara perencanaan menara turbin angin sumbu horizontal rangka batang baja secara spesifik.
2. Mengetahui kekuatan struktur bangunan turbin angin sumbu horizontal rangka batang baja tinggi 30 m dengan berbagai variasi tinggi bagian datar menara turbin angin.
3. Menentukan tinggi bagian datar menara turbin angin yang optimal untuk bangunan turbin angin sumbu horizontal rangka batang baja tinggi 30 m, yaitu menara dengan kekuatan dan kekakuan yang cukup untuk menopang gaya dengan berat struktur yang ringan.

## **1.3 Manfaat Penelitian**

Manfaat yang diperoleh dari hasil penelitian ini antara lain sebagai berikut:

1. Memberikan informasi mengenai keuntungan penggunaan rangka batang baja dalam perancangan bangunan turbin angin.
2. Mendapatkan struktur menara untuk turbin angin dengan kapasitas 50 kW yang murah dan mudah dirakit, serta dapat menjangkau daerah pedalaman
3. Memberikan informasi mengenai kekuatan struktur bangunan turbin angin sumbu horizontal rangka batang baja tinggi 30 m dengan berbagai variasi tinggi bagian datar menara turbin angin.
4. Memberikan rekomendasi tinggi bagian datar menara turbin angin yang optimal dalam perancangan bangunan turbin angin sumbu horizontal rangka batang baja tinggi 30 m.

#### 1.4 Batasan Masalah

Batasan masalah dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Jenis menara yang digunakan adalah menara tipe rangka batang kaki empat dengan tinggi 30 m.
2. Profil baja yang digunakan adalah profil siku merk Gunung Garuda dengan mutu BJ 41 dengan menggunakan sambungan baut dengan mutu A307.
3. Baja yang digunakan dalam perancangan adalah baja profil siku merk Gunung Garuda dengan mutu BJ 41, serta baut dengan mutu A307.
4. Kapasitas baja dihitung berdasarkan peraturan SNI 1729-2015.
5. Penelitian ini tidak berfokus pada pemodelan bagian transisi dan fondasi, bagian transisi dimodelkan berdasarkan model milik Daniel Kaufer (2007) dan ditunjukkan pada Bab 5 sedangkan bagian fondasi dimodelkan sebagai tumpuan sendi.
6. Jarak antar tumpuan yang digunakan pada penelitian adalah 3 m.
7. Tinggi menara adalah 30 m, dengan variasi tinggi bagian datar menara turbin angin masing-masing adalah 8 m; 9,6 m; 10m; 11,2 m dan 12 m.
8. Tipe rangka yang dipakai adalah kombinasi kombinasi dari *bracing* tipe K dan tipe X. *Bracing* tipe X digunakan pada bagian yang tegak dan bagian menara yang miring digunakan *bracing* tipe K.
9. Jenis turbin angin yang dipakai adalah turbin angin kecil dengan output daya maksimum 50 kW.
10. Jenis turbin angin yang dipakai adalah rotor GHREPOWER 50 kW berdiameter 14,2 meter.
11. Perencanaan pembebanan menggunakan SNI 1727:2013 untuk beban angin, dan SNI 1726:2012 untuk beban gempa.
12. Perencanaan desain turbin angin menggunakan IEC 61400-2
13. Lokasi konstruksi berada di pinggir pantai selatan Kabupaten Bantul dimana tidak terdapat bangunan di sekitarnya.

## 1.5 Keaslian Penelitian

Berdasarkan tinjauan pustaka dan studi literatur, cukup banyak ditemukan penelitian tentang desain turbin angin, antara lain Andika, dkk (2007) telah meneliti hubungan antara sudut sudu dengan besarnya koefisien daya yang dihasilkan turbin angin sumbu horizontal, Fatmawati (2012) melakukan studi karakteristik turbin angin tipe horizontal dengan jumlah sudu tiga buah berdiameter 1,6 m, Hadi, dkk (2013) meneliti karakteristik turbin angin sumbu horizontal tiga sudu menggunakan terowongan angin sederhana. Ditemukan juga penelitian tentang pengaruh tekanan angin pada struktur menara. Pitasari (2011) telah melakukan penelitian tentang hubungan antara tekanan kecepatan angin dengan ketinggian, serta merencanakan struktur menara akibat beban angin yang bekerja, Arjanggi (2012) melakukan studi perbandingan berat struktur dan biaya pembangunan menara *self supporting* kaki 3, kaki 4, dan menara *monopole*. Dalam berbagai studi literatur tersebut, optimasi tinggi bagian datar pada bangunan turbin angin sumbu horizontal dengan rangka batang baja tinggi 30 m belum pernah dilakukan sebelumnya, sehingga perencanaan yang dilakukan adalah bersifat asli.

## BAB 2

### TINJAUAN PUSTAKA

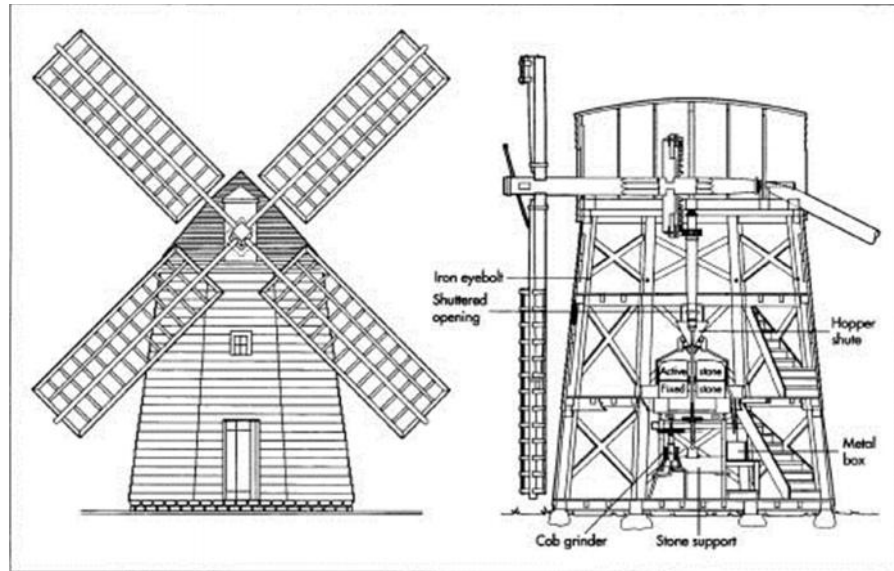
#### 2.1 Sejarah Kincir Angin dan Turbin Angin

Angin telah digunakan sebagai sumber energi untuk waktu yang sangat lama, misalnya untuk kapal berlayar. Kincir angin pertama digunakan oleh bangsa Persia sekitar tahun 900 Masehi. Ini merupakan kincir angin sumbu vertikal pertama yang pernah dibangun. Selama abad pertengahan, kincir angin sumbu horizontal dibangun di Eropa dan digunakan untuk kegiatan mekanis seperti memompa air dan menggiling biji-bijian. Ini merupakan kincir angin klasik dengan empat bilah dengan sistem *yawing* dan dipasang pada struktur yang besar. Kincir angin model ini mulai kurang diminati setelah revolusi industri. Pada saat yang sama, kincir angin yang digunakan untuk memompa air populer di Amerika Serikat, kincir dengan banyak bilah dan biasanya digunakan di peternakan.

Salah satu percobaan untuk menghasilkan listrik dengan tenaga angin dibuat di Amerika oleh Charles Brush pada tahun 1888. Di antara percobaan awal yang paling penting adalah turbin yang dikembangkan oleh Marcellus Jacobs. Turbin yang dikembangkan Jacobs memiliki tiga bilah kincir, baterai penyimpanan dan sebuah peredam untuk menjaga turbin melawan angin.

Pada abad ke-20, turbin angin sumbu horizontal terus berkembang dengan skala yang lebih besar dan efisien. Menurut Gasch dan Twele (2002), kincir angin buatan manusia pertama kali dibangun pada tahun 1700 SM untuk mengairi dataran Mesopotamia. Kincir angin pertama ini memiliki sumbu rotasi vertikal dengan sudu yang terbuat dari anyaman jerami. Anyaman jerami yang berputar karena tiupan angin inilah yang akan menggerakkan rotor untuk pengairan. Pada jaman tersebut semua kincir angin memiliki sumbu rotasi vertikal. Kincir angin bersumbu rotasi horizontal baru ditemukan pertama kali pada abad ke-12 M di Inggris dan Prancis. Sejak saat itu pemakaian kincir angin bersumbu rotasi horizontal mulai berkembang ke Jerman, Belanda, Polandia, dan Rusia.





**Gambar 2.1 Kincir Angin untuk Pengairan**

Seiring berjalannya waktu teknologi kincir angin bersumbu horizontal ini mulai dipakai di seluruh dunia. Pada jaman modern energi gerak yang berasal dari perputaran sudu akibat hembusan angin akan dimanfaatkan untuk menggerakkan generator yang dapat menghasilkan energi listrik. Sejarah mencatat bahwa turbin angin otomatis dengan generator listrik pertama kali dibuat pada tahun 1887 di Amerika Serikat oleh Charles F. Brush.

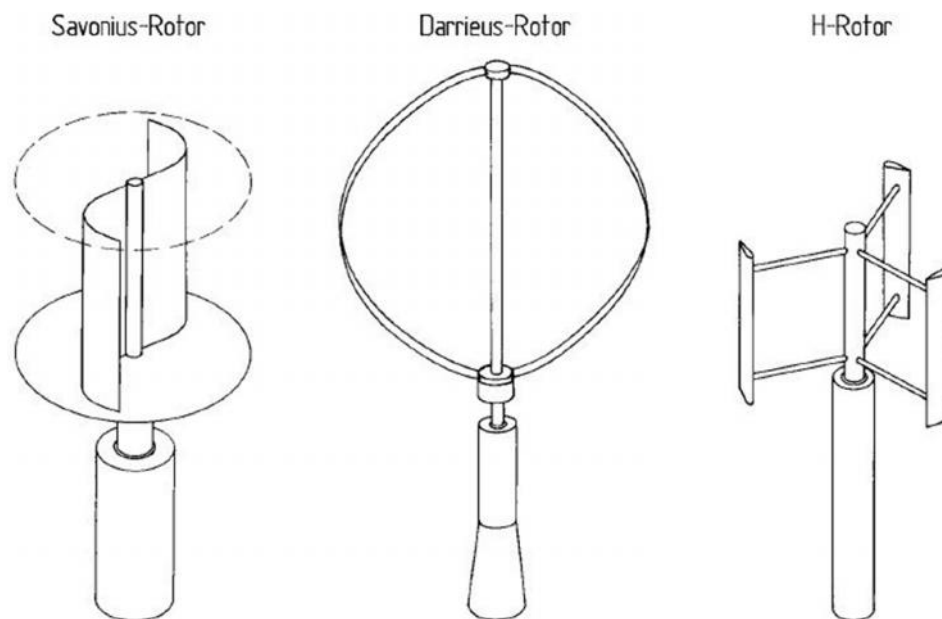
## **2.2 Turbin Angin**

Tenaga angin merupakan sumber energi ramah lingkungan dan telah berkembang dalam beberapa tahun terakhir. Turbin angin adalah sebuah alat yang digunakan dalam sistem konversi tenaga angin (SKEA). Turbin angin mengubah energi kinetik yang dimiliki oleh angin menjadi energi mekanik berupa putaran poros yang kemudian menghasilkan energi listrik. Jumlah pembangkit energi dengan angin terpasang meningkat setiap tahun dan banyak negara telah membuat rencana untuk melakukan berinvestasi besar di tenaga angin dalam waktu dekat.

### 2.2.1 Jenis Turbin Angin

Ada beberapa jenis turbin angin dan dapat dibagi menjadi 2 kelompok turbin berdasarkan orientasi sumbunya, yaitu turbin angin sumbu horisontal (HAWTs) dan turbin angin sumbu vertikal (VAWTs). Turbin angin sumbu vertikal memiliki rotor yang berputar terhadap sumbu vertikal, sedangkan turbin angin sumbu horizontal memiliki rotor yang berputar terhadap sumbu horizontalnya.

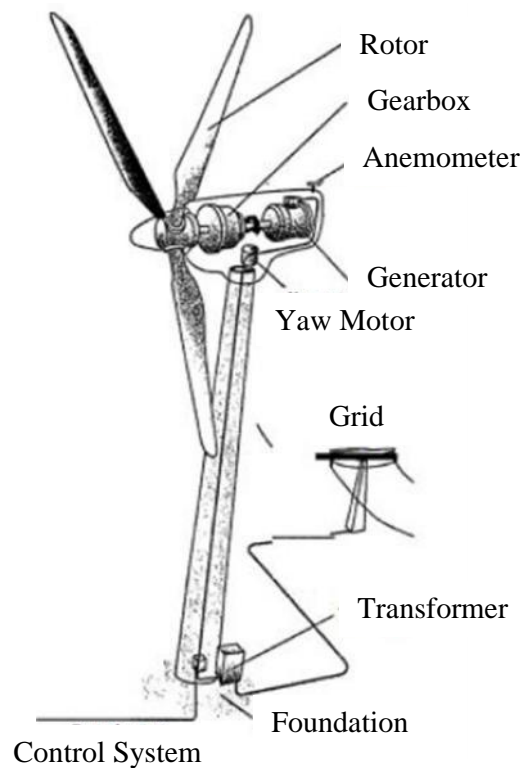
Turbin angin sumbu vertikal (VAWT) seperti dapat dilihat pada Gambar 2.2 Tipe Turbin Angin Sumbu Vertikal (VAWT); (Hau, 2006) merupakan turbin angin sumbu tegak yang gerakan poros dan rotor sejajar dengan arah angin, sehingga gerakan rotor independen terhadap arah angin. Saat ini terdapat 3 tipe turbin angin sumbu vertikal yang banyak digunakan yaitu turbin angin tipe Savonius, Darrieus, dan H rotor.



**Gambar 2.2 Tipe Turbin Angin Sumbu Vertikal (VAWT); (Hau, 2006)**

Turbin angin sumbu vertikal memiliki beberapa kelebihan antara lain dapat berputar pada kecepatan angin rendah, generator dapat ditempatkan pada bagian bawah turbin sehingga memudahkan perawatan, dan gerakan rotor tidak dipengaruhi oleh arah angin. Namun, turbin angin sumbu vertikal memiliki efisiensi yang lebih rendah dibanding turbin sumbu horizontal, sehingga banyak digunakan untuk konversi listrik skala kecil.

Turbin angin sumbu horizontal (HAWT) seperti terdapat pada Gambar 2.3 adalah turbin angin yang porosnya sejajar dengan arah angin. Turbin jenis ini memiliki baling-baling berbentuk airfoil seperti bentuk sayap pada pesawat. Turbin ini cocok digunakan untuk sistem konversi angin skala sedang dan besar.



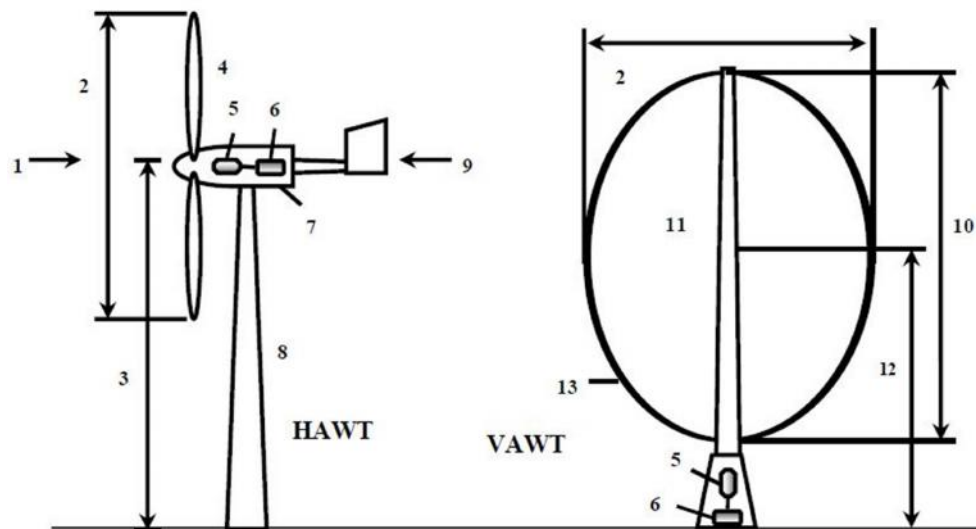
**Gambar 2.3 Turbin angin sumbu Horizontal (HAWT)**  
(*Wind Turbine Technology*, 2011)

Turbin angin sumbu horizontal memiliki efisiensi yang tinggi serta dapat menghasilkan listrik dalam jumlah yang relatif lebih besar dibanding turbin angin sumbu vertikal, namun rotor hanya dapat menangkap angin dari satu arah

sehingga membutuhkan sistem yaw. Selain itu pada turbin angin sumbu horizontal, rotor, dan generator terletak diatas menara sehingga menyulitkan proses perawatan dan pemeliharaan.

### 2.2.2 Komponen Turbin Angin

Turbin angin terdiri dari 4 komponen utama yaitu *rotor*, *nacelle*, *tower*, dan struktur pendukung turbin. Rotor berfungsi untuk mengubah energi kinetik yang dimiliki angin menjadi energi mekanik yang menggerakkan rotor. Nacelle merupakan tabung yang berfungsi sebagai rumah untuk gear box dan generator dan terletak pada bagian atas menara turbin angin. Struktur pendukung turbin angin terdiri dari menara dan fondasi. Secara detail komponen-komponen turbin angin dapat dilihat pada Gambar 2.4.



### Gambar 2.4 Detail Komponen Turbin Angin

Keterangan gambar :

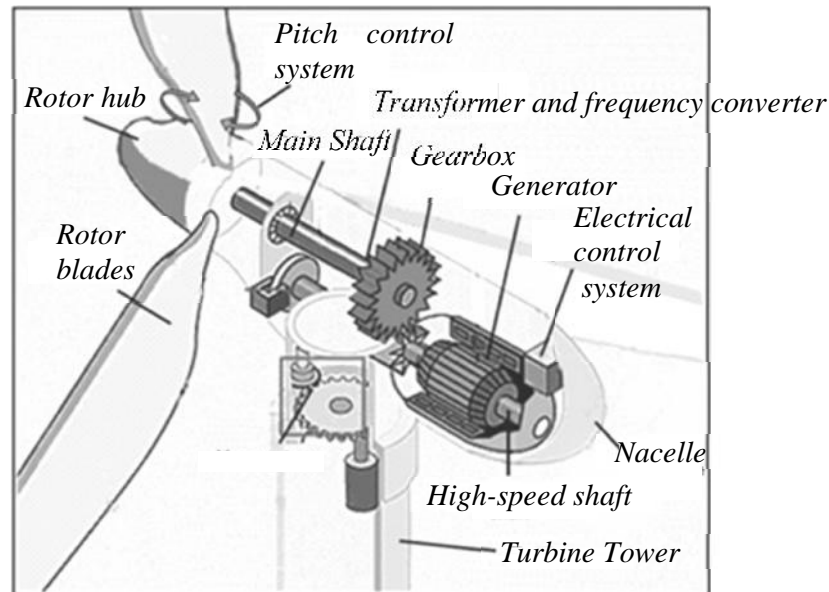
- |    |                    |     |                           |
|----|--------------------|-----|---------------------------|
| 1. | Arah angin         | 7.  | <i>Nacelle</i>            |
| 2. | Diameter rotor     | 8.  | <i>Tower</i> pada HAWT    |
| 3. | <i>Hub height</i>  | 9.  | Arah angin pada HAWT tipe |
| 4. | <i>Rotor blade</i> |     | downwind                  |
| 5. | <i>Gear box</i>    | 10. | Tinggi rotor              |
| 6. | <i>Generator</i>   |     |                           |

11. *Tower pada VAWT*
12. *Equator Height*

13. *Fixed-pitch rotor blade*

Seperti dikutip dalam Jha (2011), komponen utama dalam bangunan turbin angin meliputi menara dan fondasi, rotor, anemometer, sistem kontrol, enklosur utama, *gear box*, poros kecepatan tinggi dan rendah, mekanisme rem, generator, sistem *yaw*, indikator *pitch*, indikator angin, serta tabung rumah mesin/*nacelle* dan kabel untuk menghantarkan energi listrik ke bawah menara.

Berikut merupakan Gambar 2.5 tentang komponen-komponen rotor turbin angin:



**Gambar 2.5 Bagian-bagian Utama Turbin Angin**

Sumber: <http://sec.gov>

Dalam Al-Shemmeri (2010) diterangkan tentang fungsi dari tiap komponen utama turbin angin, yaitu:

1. Rotor, merupakan sudu aerofoil yang menerima angin dan secara aerodinamik merubah energi kinetik angin menjadi energi mekanik.
2. *Gearbox*, berfungsi untuk mengubah kecepatan rotasi poros sesuai generator.

3. Generator, adalah alat yang berfungsi untuk memproduksi gaya listrik ketika gaya mekanik diterapkan pada sistem.
4. Sistem kontrol dan rem, berfungsi sebagai kinerja pengaman yang memastikan agar turbin angin tidak bekerja dalam kondisi yang berbahaya. Mekanisme rem akan aktif apabila sistem kontrol menerima sinyal angin kencang sehingga rotor akan berhenti berputar.
5. Menara, merupakan badan utama yang berfungsi untuk meneruskan beban dari atas ke fondasi, serta sebagai indikator utama untuk menentukan elevasi rotor sehingga mampu menerima angin secara optimal.
6. Fondasi, merupakan penahan beban yang didistribusikan dari atas.

## 2.3 Menara Turbin Angin

### 2.3.1 *Free Standing* atau *Guy-wired*

Penggunaan *guy-wired* dapat menurunkan biaya awal pembuatan menara karena bahan yang digunakan relatif lebih sedikit. Banyak turbin angin skala kecil menggunakan tower jenis ini karena alasan tersebut, namun perlu adanya biaya operasional jika menggunakan menara sistem ini. Selain itu, menara model *guy-wired* membutuhkan tapak lahan yang lebih besar dan fondasi tambahan untuk menahan kabel penyangga dan dapat menimbulkan resiko masalah dengan aksesibilitas lahan. Contoh menara *free standing* atau *guy wired* dapat dilihat pada gambar 2.6-a.

### 2.3.2 Menara *Lattice*

Menara *lattice* terbuat dari kerangka baja yang dibaut atau di las bersama-sama. Biaya yang dibutuhkan untuk membuat sebuah menara *lattice* sedikit dibandingkan dengan menara tubular karena bahan yang lebih sedikit. Walaupun biaya awal lebih rendah tetapi jenis menara ini, biaya perakitan dan pemeliharaannya lebih tinggi karena setiap baut perlu dilakukan pemeriksaan secara berkala. Selain itu, biaya pondasi menara *lattice* lebih rendah daripada model menara tubular. Faktor lain adalah kurang menariknya menara model *lattice* dari segi estetika. Keuntungan lain dari model ini adalah bahan yang tebagi

tiap segmennya sehingga memudahkan dalam akomodasi ke lokasi perakitan. Contoh menara *lattice* dapat dilihat pada gambar 2.6-b.

### 2.3.3 Menara *Tubular*

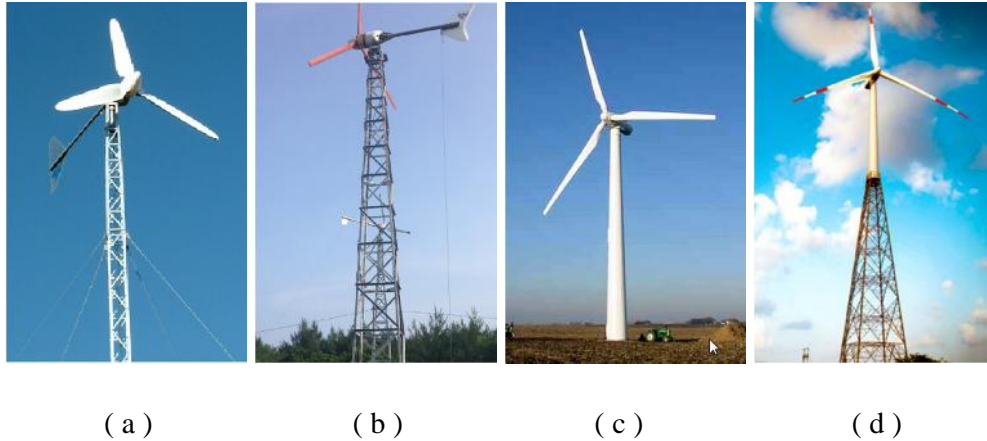
Struktur menara *tubular* memiliki penampang melintang berbentuk pipa. Menara *tubular* dibangun mengerucut dengan bagian struktur paling bawah paling besar dan berkurang seiring penambahan tinggi struktur. Menara *tubular* dibuat dengan ketebalan dinding yang berbeda tiap ruasnya untuk menghemat bahan tetap dengan memperhatikan aspek strukturalnya. Sistem pengaku baut digunakan untuk menggabungkan antar ruas menara dan bagian struktur pondasi dengan struktur menara.

Beberapa keunggulan dari menara *tubular* antara lain, ruang dalam rongga struktur menara dapat digunakan untuk ruang penyimpanan yang aman untuk berbagai perangkat listrik sehingga melindungi dari kontak langsung dengan cuaca luar dan dari tindakan pencurian. Ruang tersebut juga dapat digunakan menjadi ruang tertutup untuk mengakses turbin angin dalam kondisi cuaca buruk sehingga dapat menjaga keselamatan teknisi. Menara model *tubular* memiliki nilai estetika lebih jika dibandingkan dengan model lainnya dan tidak membutuhkan pemeriksaan berkala pada sambungan baut seperti pada model menara *lattice*. Kelemahan menara model *tubular* adalah biaya pembangunan yang relatif lebih mahal dan akomodasi dari bagian struktur menara yang lebih sulit karena bagian menara diproduksi lalu di bawa ke lokasi turbin angin yang akan dibangun. Contoh menara *tubular* dapat dilihat pada gambar 2.6-c.

### 2.3.4 Menara *Hybrid*

Struktur menara ini adalah penggabungan dari beberapa model konfigurasi struktur menara turbin angin. Menara *hybrid* menggabungkan antara tabung baja, rangka baja, dan *guy-wired*. Desain tersebut dapat mengatasi keterbatasan dari ukuran tabung baja dari sistem menara *tubular* yang maksimal hanya 4,3 m. Contoh menara *hybrid* dapat dilihat pada gambar 2.6-d.





**Gambar 2.6 Jenis Menara (a) Menara *Free Standing* atau *Guy Wired*  
(b) Menara *Lattice* (c) Menara *Tubular* (d) Menara *Hybrid***

## 2.4 Angin

Menurut Pusposutardjo (1993), angin merupakan gerakan perpindahan massa udara ke arah horizontal seperti suatu besaran vektor yang dapat dinyatakan dengan arah dan kecepatan perpindahan. Hembusan angin ini dapat menimbulkan kerusakan pada bangunan apabila telah mencapai kecepatan tertentu. Pada kecepatan 79-91 km/jam akan mulai terjadi kerusakan ringan pada bangunan. Selain kecepatan dan arah angin, waktu juga menentukan tingkat kerusakan. Apabila kecepatan angin telah mencapai kecepatan 123-135 km/jam dan datang secara tiba-tiba maka angin tersebut dapat digolongkan sebagai angin topan dan dapat menimbulkan kerusakan yang cukup serius pada bangunan.

Pada dasarnya angin merupakan manifestasi dari energi panas matahari. Energi yang berasal dari panas matahari ini besarnya bervariasi di permukaan bumi. Suhu pemanasan terbesar terjadi pada daerah ekuator, dan angin berhembus dari daerah ekuator ke daerah lain di permukaan bumi dari lapisan atas atmosfer ke lapisan yang lebih rendah. Pada ketinggian di atas 3 km dari permukaan air laut hembusan angin tidak terpengaruh oleh gaya friksi yang timbul dari interaksi dengan permukaan bumi. Sebaliknya hembusan angin yang terjadi di bawah ketinggian 3 m dari permukaan air laut sangat dipengaruhi oleh gaya friksi yang disebabkan oleh interaksi dengan permukaan bumi. Angin ini biasa disebut dengan angin



permukaan. Pegunungan, lembah, serta fitur topografik lainnya dapat mempengaruhi kecepatan angin, seperti dikutip dari Edelstein (2003).

Dalam Supriyadi (1995), bangunan yang diterpa angin dapat rusak karena tumbukan, puntiran, dan hisapan. Kerusakan karena tumbukan atau hisapan terjadi apabila angin menerpa bangunan dalam arah tegak lurus, sedangkan kerusakan karena puntiran terjadi apabila angin yang menerpa berupa siklon/puting beliung.

Rachman (2012) telah melakukan analisis dan pemetaan potensi energi angin di Indonesia. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui peta potensi energi angin di Indonesia dan mengetahui kecepatan angin rata-rata di kawasan pemukiman di Indonesia, untuk selanjutnya dikembangkan dalam pembangunan teknologi turbin angin agar sesuai dengan karakteristik angin di berbagai daerah di Indonesia. Penelitian tersebut berdasarkan pada data kecepatan angin di seluruh provinsi di Indonesia pada tahun 2000 sampai 2007 yang diperoleh dari data BMKG.

Berdasarkan penelitian tersebut diperoleh data mengenai kecepatan angin rerata di seluruh provinsi di Indonesia serta besarnya potensi energi spesifik angin di seluruh provinsi di Indonesia. Daerah D.I. Yogyakarta besarnya kecepatan angin rerata adalah sebesar 2 m/s, dengan potensi energi angin sebesar 30 kW.hr/m<sup>2</sup>.

Pakpahan (2003) telah memaparkan pemetaan potensi energi angin di Indonesia sebagai basis data milik Lembaga Penerbangan dan Antariksa Nasional (LAPAN). Penelitian tersebut dilaksanakan dengan tujuan untuk mengetahui besarnya kecepatan angin di berbagai daerah di Indonesia untuk dimanfaatkan sebagai pembangkit energi. Lokasi yang ditinjau kecepatan anginnya merupakan lokasi yang dianggap berpotensi untuk dijadikan lokasi pembangunan pembangkit listrik, salah satunya adalah sepanjang pantai selatan Yogyakarta. Dari paparan tersebut diketahui besarnya kecepatan angin rerata pada daerah sekitar Pantai Parangtritis sebesar 5,4 m/s pada ketinggian 40 m di atas permukaan air laut.