

**Kajian Potensi angin  
Untuk  
Pembangkit Listrik Tenaga Bayu**

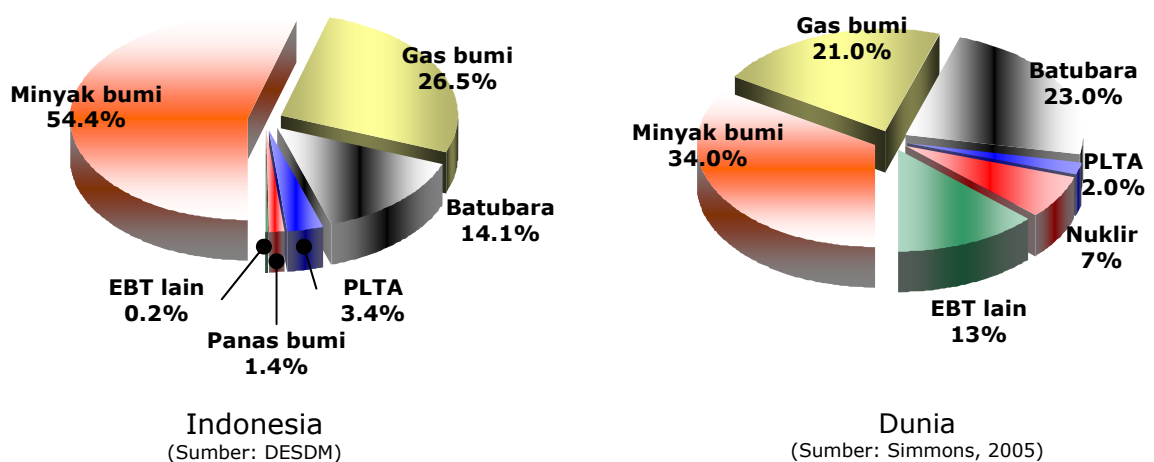
Oleh:  
**Y. Daryanto**

**BALAI PPTAGG – UPT-LAGG  
Yogyakarta, 5 April 2007**

## 1. Latar Belakang

### Umum

Kebutuhan energi di Indonesia khususnya dan di dunia pada umumnya terus meningkat karena pertambahan penduduk, pertumbuhan ekonomi dan pola konsumsi energi itu sendiri yang senantiasa meningkat. Sedangkan energi fosil yang selama ini merupakan sumber energi utama—seperti yang diperlihatkan **Gambar 1.1**—ketersediaannya sangat terbatas dan terus mengalami deplesi (*depletion*: kehabisan, menipis). Proses alam memerlukan waktu yang sangat lama untuk dapat kembali menyediakan energi fosil ini.



**Gambar 1.1** Energi Mix di Indonesia dan di Dunia.

Menurut *Blueprint* Pengelolaan Energi Nasional yang dikeluarkan oleh Departemen Energi dan Sumber Daya Mineral (DESDM) pada tahun 2005, cadangan minyak bumi di Indonesia pada tahun 2004 diperkirakan akan habis dalam kurun waktu 18 tahun dengan rasio cadangan/produksi pada tahun tersebut. Sedangkan gas diperkirakan akan habis dalam kurun waktu 61 tahun dan batubara 147 tahun, seperti yang diperlihatkan **Tabel 0.1** di bawah ini.

**Tabel 0.1** Cadangan energi fosil.

Jenis Energi Fosil	Cad/Prod	
	Indonesia	Dunia
Minyak	18 Tahun	40 Tahun
Gas	61 Tahun	60 Tahun
Batu bara	147 Tahun	200 Tahun

Sumber: DESDM (2005), WEC (2004)

Rasio antara cadangan dan produksi untuk energi fosil di dunia diperlihatkan juga dalam tabel tersebut sebagai bahan rujukan. Perkiraan rasio ini dihitung berdasarkan jumlah penduduk dan pola konsumsi energi pada saat itu. Apabila mempertimbangkan laju pertumbuhan penduduk yang eksponensial dan konsumsi energi yang terus meningkat, tentunya kurun waktu tersebut dapat diperkirakan akan jauh lebih cepat lagi.

Upaya-upaya pencarian sumber energi alternatif selain fosil menyemangati para peneliti di berbagai negara untuk mencari energi lain yang kita kenal sekarang dengan istilah energi terbarukan. Energi terbarukan dapat didefinisikan sebagai energi yang secara cepat dapat diproduksi kembali melalui proses alam. Energi terbarukan meliputi energi air, panas bumi, matahari, angin, biogas, bio mass serta gelombang laut. Beberapa kelebihan energi terbarukan antara lain: Sumbernya relatif mudah didapat; dapat diperoleh dengan gratis; minim limbah, tidak mempengaruhi suhu bumi secara global, dan tidak terpengaruh oleh kenaikan harga bahan bakar (Jarass, 1980).

### **Definisi Energi Terbarukan**

#### **Menurut Departemen Energi dan Sumber Daya Mineral (DESDM):**

Energi terbarukan adalah energi yang dapat diperbaharui dan apabila dikelola dengan baik, sumber daya itu tidak akan habis.

#### **Menurut *World Council for Renewable Energy (WCRE)*:**

Renewable energy includes solar, wind, hydro, oceanic, geothermal, biomass, and other sources of energy that are derived from "sun energy", and are thus renewed indefinitely as a course of nature. Forms of useable energy include electricity, hydrogen, fuels, thermal energy and mechanical force.

More broadly speaking, renewable energy is derived from non-fossil and non-nuclear sources in ways that can be replenished, are sustainable and have no harmful side effects. The ability of an energy source to be renewed also implies that its harvesting, conversion and use occur in a sustainable manner, i.e. avoiding negative impacts on the viability and rights of local communities and natural ecosystems.

Pertimbangan konservasi energi dan lingkungan hidup memang menuntut kita untuk segera dapat memanfaatkan energi terbarukan—yang tersedia dengan mudah dan lebih ramah lingkungan dibandingkan dengan energi fosil. Tetapi seperti kita ketahui, khususnya di Indonesia, pemanfaatan potensi energi terbarukan seperti air, angin, biomasa, panas bumi, surya dan samudera, sampai saat ini masih belum optimal (lihat **Tabel 0.2**). Misalnya, untuk kasus energi angin, sampai dengan tahun 2004, kapasitas terpasang dari pemanfaatan tenaga angin hanya mencapai 0.5 MW dari 9.29 GW potensi yang ada. Hal ini terutama karena beberapa kendala seperti di bawah ini:

1. Sering *dianggap belum kompetitif* dibandingkan dengan energi fosil, karena:
  - a. Kemampuan SDM yang masih rendah.
  - b. Rekayasa dan teknologi pembuatan sebagian besar komponen utamanya belum dapat dilakukan di dalam negeri, jadi masih harus impor.
  - c. Iklim investasi belum kondusif. Biaya investasi pembangunan yang tinggi menimbulkan masalah finansial pada penyediaan modal awal.
2. Belum tersedianya data potensi sumber daya yang lengkap, karena masih terbatasnya kajian/studi yang dilakukan.
3. Akses masyarakat terhadap energi masih rendah (DESDM, 2005).
4. Peran Pemerintah yang kurang:
  - a. Belum terlihat adanya *sense of urgency*
  - b. Antar lembaga pemerintah kurang sinergis
  - c. Masih kurang dapat menyediakan insentif-insentif

**Tabel 0.2** Potensi energi terbarukan di Indonesia 2004.

Jenis Energi	Sumber Daya	Setara	Kapasitas Terpasang
Air	845 x 10 <sup>6</sup> BOE	75.7 GW	4200.0 MW
Panas Bumi	219 x 10 <sup>6</sup> BOE	27.0 GW	800.0 MW
Mini/Mikrohidro	458 MW	458.0 MW	84.0 MW
Biomasa	49.81 GW	49.8 GW	302.4 MW
Surya	4.8 kWh/m <sup>2</sup> /hari		8.0 MW
Angin	9.29 GW	9.3 GW	0.5 MW

Sumber: DESDM, 2005

Beberapa strategi yang mungkin dilakukan untuk mengatasi kendala-kendala tersebut di atas, antara lain:

1. Meningkatkan kegiatan studi dan penelitian yang berkaitan dengan:
  - a. identifikasi setiap jenis potensi sumber daya energi terbarukan secara lengkap di setiap wilayah;
  - b. upaya perumusan spesifikasi dasar dan standar rekayasa sistem konversi energinya yang sesuai dengan kondisi di Indonesia;
  - c. pembuatan *prototype* yang sesuai dengan spesifikasi dasar dan standar rekayasanya;
  - d. pengumpulan pendapat dan tanggapan masyarakat tentang pemanfaatan energi terbarukan tersebut.
2. Memasyarakatkan pemanfaatan energi terbarukan sekaligus mengadakan

analisis dan evaluasi lebih mendalam tentang kelayakan operasi sistem di lapangan dengan pembangunan beberapa proyek percontohan.

3. Memberikan prioritas pembangunan pada daerah yang memiliki potensi sangat tinggi, baik teknis maupun sosio-ekonominya.

## **Energi Angin**

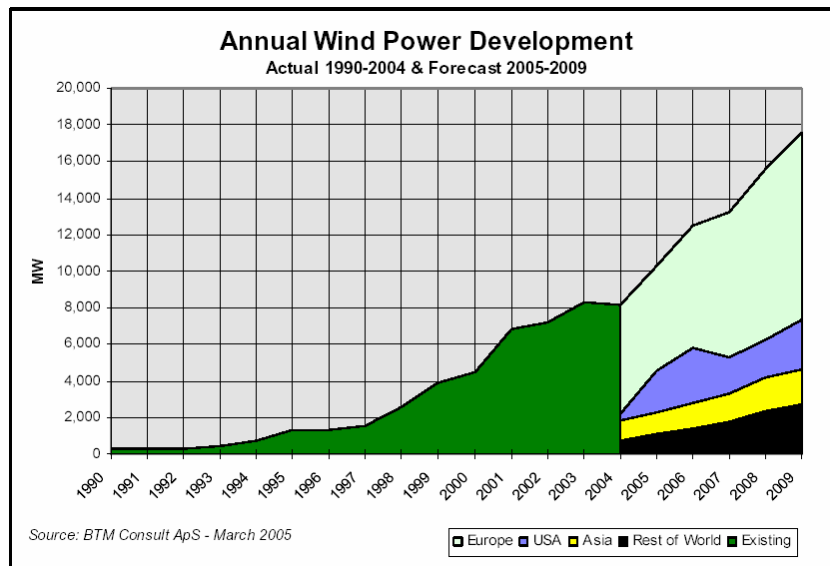
Salah satu energi terbarukan yang berkembang pesat di dunia saat ini adalah energi angin. Energi angin merupakan energi terbarukan yang sangat fleksibel. Energi angin dapat dimanfaatkan untuk berbagai keperluan misalnya pemompaan air untuk irigasi, pembangkit listrik, pengering atau pencacah hasil panen, aerasi tambak ikan/udang, pendingin ikan pada perahu-perahu nelayan dan lain-lain. Selain itu, pemanfaatan energi angin dapat dilakukan di mana-mana, baik di daerah landai maupun dataran tinggi, bahkan dapat di terapkan di laut, berbeda halnya dengan energi air.

Pemanfaatan energi angin ini, selain dapat mengurangi ketergantungan terhadap energi fosil, diharapkan juga dapat meningkatkan efektifitas dan efisiensi sistem pertanian, yang pada gilirannya akan meningkatkan produktifitas masyarakat pertanian.

Walaupun pemanfaatan energi angin dapat dilakukan di mana saja, daerah-daerah yang memiliki potensi energi angin yang tinggi tetap perlu diidentifikasi agar pemanfaatan energi angin ini lebih kompetitif dibandingkan dengan energi alternatif lainnya. Oleh karena itu studi potensi pemanfaatan energi angin ini sangat tepat dilakukan guna mengidentifikasi daerah-daerah berpotensi. Angin selama ini dipandang sebagai proses alam biasa yang kurang memiliki nilai ekonomis bagi kegiatan produktif masyarakat.

Secara umum, pemanfaatan tenaga angin di Indonesia memang kurang mendapat perhatian. Sampai tahun 2004, kapasitas terpasang dari pemanfaatan tenaga angin hanya mencapai 0.5 MW dari 9.29 GW potensi yang ada (DESDM, 2005). Padahal kapasitas pembangkitan listrik tenaga angin di dunia telah berkembang pesat dengan laju pertumbuhan kumulatif sampai dengan tahun 2004 melebihi 20 persen per tahun. Dari kapasitas terpasang 5 GW pada tahun 1995 menjadi hampir 48 GW pada akhir tahun 2004 tersebar dalam 74,400 turbin angin di sekitar 60 negara (BTM Consults ApS, 2005).

**Gambar 1.2 2** menunjukkan laju pertumbuhan energi angin tahunan dunia.



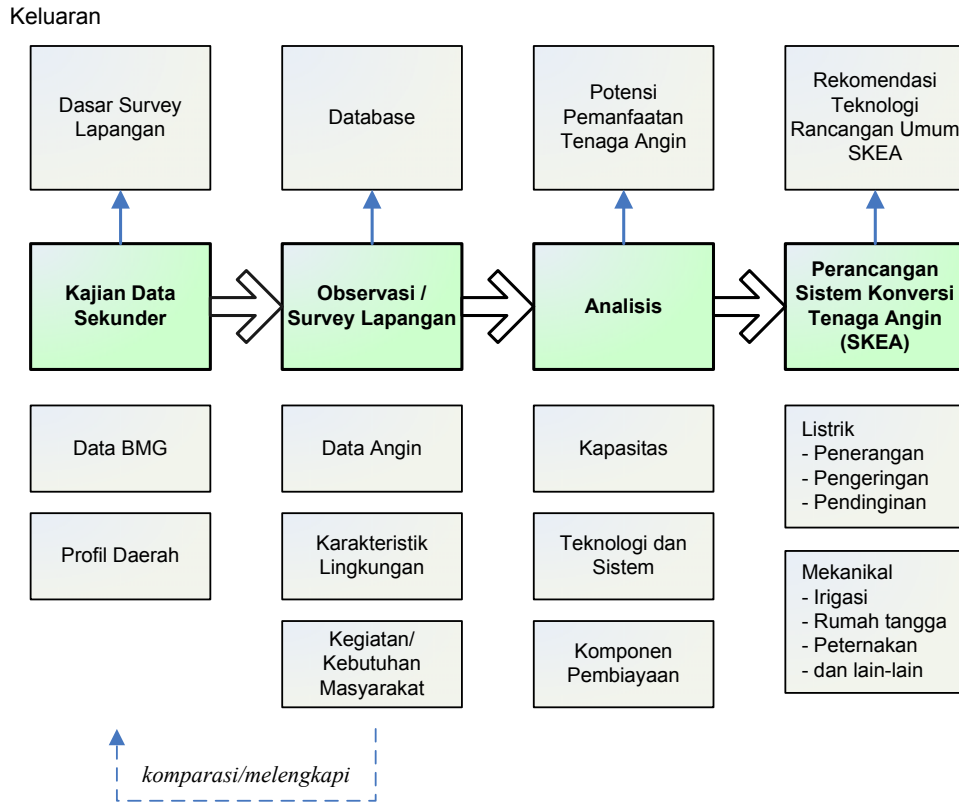
**Gambar 1.2** Laju pertumbuhan energi angin tahunan di dunia

Untuk mendukung *program diversifikasi energi* dan *Kebijakan Energi Hijau Nasional* (Pengembangan Energi Terbarukan dan Konservasi Energi), sudah semestinya kajian-kajian pengembangan sumber-sumber energi alternatif—khususnya energi terbarukan—lebih disemarakkan untuk berbagai kepentingan. Studi potensi pemanfaatan tenaga angin ini merupakan satu tahapan penting dalam pengembangan dan pemasyarakatan penggunaan energi terbarukan untuk berbagai kegiatan produktif masyarakat di daerah-daerah di wilayah Indonesia.

## 2. Potensi energi angin.

### ■ Pengukuran Data Angin

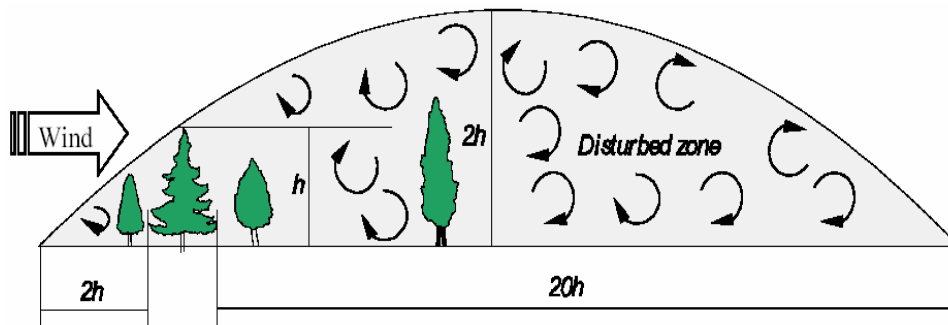
Studi potensi pemanfaatan tenaga angin dilakukan dengan kerangka kegiatan seperti terlihat pada **Gambar 1.3** Kajian data sekunder akan memulai studi ini diikuti dengan observasi melalui survey lapangan untuk mendapatkan data primer. Data sekunder dan hasil observasi dianalisis untuk dijadikan dasar rancangan umum sistem konversi energi angin (SKEA).



**Gambar 1.3** Kerangka kegiatan studi potensi pemanfaatan tenaga angin.

Untuk memperoleh data yang dapat dipercaya dan konsisten di lokasi, juga harus diperhatikan letak aktual anemometer, jarak dan tinggi bangunan-bangunan yang terdekat, vegetasi, pohon-pohonan dan bukit-bukit atau gundukan-gundukan terdekat yang dapat menjadi rintangan sehingga menimbulkan aliran berolak (lihat **Gambar 1.4**)

Kecepatan angin pada ketinggian di mana turbin angin dipasang akan diekstrapolasi dari data yang didapat dengan mempertimbangkan kekasaran permukaan setempat dan lapisan batas atmosfer.



**Gambar 1.4** Aliran berolak akibat rintangan.

Pengukuran data angin ini dilakukan bukan untuk dasar perancangan tetapi lebih ditujukan untuk keperluan sebagai berikut:

1. Mengetahui karakteristik angin lokal.
2. Mengumpulkan informasi yang dapat dijadikan dasar untuk menentukan peruntukkan dan kesesuaian rancangan.
3. Bahan komparasi terhadap data sekunder.

### ■ Analisis Potensi Angin

Analisa potensi angin dapat memberikan informasi mengenai:

- Pola angin berkala dalam periode tertentu,
- Durasi kecepatan angin rendah dan kecepatan angin tinggi,
- Kecepatan angin di daerah yang tidak jauh dengan lokasi pengukuran,
- Berapa banyak energi yang dapat tersedia pertahunnya.

Semua informasi ini berguna dalam menentukan apakah pemanfaatan energi angin pada suatu lokasi itu baik untuk kegunaan mekanikal atau elektrikal.

Kecepatan angin pada tempat di mana sistem konversi turbin angin akan di pasang akan dianalisis dan dihitung berdasarkan data yang ada, baik dari BMG maupun hasil pengukuran sebagai suplemen dan bahan rujukan.

Kecepatan angin pada tempat di mana sistem konversi turbin angin akan di pasang akan dianalisis dan dihitung berdasarkan data yang ada, baik dari BMG maupun hasil pengukuran.

Kecepatan angin pada tempat di mana sistem konversi turbin angin akan di pasang akan dianalisis dan dihitung berdasarkan data yang ada, baik dari BMG maupun hasil pengukuran.

Di sini data angin yang tersedia dalam rata-rata per jam atau rata-rata per hari selama kurun waktu satu bulanan dalam satu tahun akan diolah dengan menggunakan metoda-metoda statistik standar pengolahan data angin dan akan disajikan dalam beberapa buah bentuk grafik histogram berikut:

#### □ Distribusi Waktu

Plot data bulanan dengan rata-rata perhari dalam bentuk histogram memperlihatkan fluktuasi angin perharinya. Dari grafik ini kecepatan angin rata-rata perbulan dan pertahun dapat dihitung. Jika resolusi sampling pengambilan data rata-rata semakin kecil, misalkan 10 menit, informasi tambahan yang sangat berguna seperti kecepatan angin *gust* dapat juga dikumpulkan.



Informasi lain yang didapat dari distribusi waktu adalah informasi mengenai perioda angin rendah di bawah suatu kecepatan angin rujukan. Untuk SKEA mekanikal informasi ini berguna dalam menentukan ukuran volume bak penampungan. Sedangkan untuk yang elektrik, informasi ini berguna untuk mengetahui perioda di mana turbin angin tidak beroperasi.

#### □ **Distribusi Frekwensi**

Dalam kajian sumber daya angin, selain informasi mengenai distribusi kecepatan angin dalam kurun waktu tertentu, informasi mengenai jumlah jam perbulan atau pertahun untuk setiap nilai kecepatan angin diperlukan juga. Informasi ini disebut dengan distribusi frekwensi kecepatan angin.

Distribusi frekwensi kecepatan angin disajikan dalam bentuk histogram dengan ordinat jam dan aksis interval kecepatan angin. Histogram yang paling tinggi menunjukkan kecepatan angin yang paling sering terjadi tetapi bukan kecepatan angin rata-rata. Untuk daerah dengan kecepatan angin tidak terlalu bervariasi, bisa jadi kecepatan angin rata-rata adalah kecepatan angin yang paling sering terjadi. Tetapi di daerah dengan kecepatan angin yang sangat berfluktuatif pada umumnya kecepatan angin rata-rata lebih tinggi dibanding dengan kecepatan angin yang paling sering terjadi.

Jika diberikan suatu distribusi frekwensi, kecepatan angin rata-rata dapat dihitung dengan menggunakan rumus berikut,

$$\bar{V} = \frac{\sum_i t_i V_i}{\sum_i t_i} \quad (2.1)$$

Di sini,  $V$  adalah kecepatan angin dan  $t$  adalah waktu. Selain untuk mengetahui kecepatan angin rata-rata dengan cepat, distribusi frekwensi juga dipakai untuk menghitung keluaran energi turbin angin.

#### □ **Distribusi Durasi dan Distribusi Kumulatif**

Penyajian data angin dalam bentuk distribusi durasi berguna untuk mengetahui jumlah jam di mana kincir/turbin angin akan bekerja dan jumlah jam di mana kincir/turbin angin akan menghasilkan daya yang berlebihan. Jika kurva yang didapat lebih horisontal maka daerah kecepatan angin tertentu akan lebih konstan. Sebaliknya semakin curam kurva distribusi durasi maka pola angin di berbagai daerah aliran semakin fluktuatif.

Kebalikan dari distribusi durasi adalah distribusi kumulatif. Distribusi kumulatif akan memberikan informasi mengenai jumlah jam di mana kincir/turbin angin tidak dapat beroperasi pada angin rendah atau berapa jam turbin angin beroperasi di bawah daya nominalnya.

Data angin sering juga disajikan dalam bentuk distribusi waktu untuk angin-angin berkecepatan rendah saja (*Duration of Calms*), misalkan di bawah 2, 3 atau 4 m/s. Sumbu Vertikal dari histogram ini adalah persentase waktu total sedangkan sumbu horisontal disajikan dalam kelipatan logaritma pangkat  $2^n$ . *Total Duration of Calms* yang merupakan distribusi durasi untuk kecepatan-kecepatan angin rendah saja bermanfaat untuk melihat jumlah jam di mana turbin angin tidak dapat beroperasi.

#### □ **Distribusi Weibull**

Data angin ini juga akan didekati dengan suatu fungsi kontinyu berupa distribusi Weibull untuk mendapatkan prediksi yang akurat mengenai keluaran turbin angin dan juga untuk mengetahui karakteristik pola angin.

Dengan melihat berbagai bentuk histogram penyajian data, dapat dicari informasi-informasi yang dibutuhkan mengenai karakteristik pola angin di suatu lokasi. Dengan mendekati data dengan menggunakan fungsi distribusi tertentu akan lebih berguna untuk meramalkan keluaran turbin angin dengan lebih akurat dan juga untuk mengetahui berbagai informasi mengenai pola angin.

Fungsi distribusi yang sangat mendekati dengan data angin seperti ini adalah fungsi Weibull. Fungsi Weibull yang digunakan di sini adalah Fungsi Distribusi Kumulatif dan Fungsi Densitas Probabilitas. Fungsi Distribusi Kumulatif  $F(V)$  menunjukkan fraksi atau kemungkinan di mana kecepatan angin tertentu lebih kecil atau sama dengan suatu kecepatan angin referensi dan didefinisikan dengan formulasi berikut,

$$F(V) = 1 - \exp\left(-\left(\frac{V}{c}\right)^k\right) \quad (2.2)$$

Sedangkan Fungsi Densitas Probabilitas  $f(V)$  dan Fungsi Distribusi Durasi  $S(V)$  masing-masing didefinisikan sebagai,

$$f(V) = \frac{k}{c} \left(\frac{V}{c}\right)^{k-1} \exp\left(-\left(\frac{V}{c}\right)^k\right) \quad (2.3)$$

dan

$$S(V) = \exp\left(-\left(\frac{V}{c}\right)^k\right) \quad (2.4)$$

Di mana  $k$  dan  $c$  masing-masing disebut sebagai parameter bentuk dan parameter skala yang harus dicari dari data hasil pengukuran.

### 3. Sumber Daya Energi Angin

#### Energi Angin

Angin adalah udara yang bergerak dari tekanan udara yang lebih tinggi ke tekanan udara yang lebih rendah. Perbedaan tekanan udara disebabkan oleh perbedaan suhu udara akibat pemanasan atmosfer yang tidak merata oleh sinar matahari. Karena bergerak angin memiliki energi kinetik. Energi angin dapat dikonversi atau ditransfer ke dalam bentuk energi lain seperti listrik atau mekanik dengan menggunakan kincir atau turbin angin. Oleh karena itu, kincir atau turbin angin sering disebut sebagai Sistem Konversi Energi Angin (SKEA).

Daya adalah energi per satuan waktu. Daya angin berbanding lurus dengan kerapatan udara, dan kubik kecepatan angin, seperti diungkapkan dengan persamaan berikut:

$$P = \frac{1}{2} \rho V^3 \text{ [watt/m}^2\text{]} \quad (3.1)$$

Persamaan mengenai daya angin ini dapat dijabarkan sebagai berikut. Karena perbedaan kerapatan udara di dataran rendah dan di daerah yang tinggi, energi angin yang dapat diekstrak di daerah pantai akan lebih besar dibandingkan dengan yang di pegunungan. Kemudian, apabila suatu tempat memiliki kecepatan angin 2 kali lebih cepat dari tempat lain, tempat pertama tersebut memiliki energi angin 8 kali lebih besar. Oleh karena itu, pemilihan lokasi sangat menentukan besarnya penyerapan energi angin.

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

$$P = \frac{16}{27} \frac{1}{2} \rho A V^3 \text{ (W)} \quad (3.2)$$

Angka  $16/27$  (=59.3%) ini disebut batas Betz (*Betz limit*, diambil dari ilmuwan Jerman Albert Betz). Angka ini secara teori menunjukkan efisiensi maksimum yang dapat dicapai oleh rotor turbin angin tipe sumbu horisontal. Pada kenyataannya karena ada rugi-rugi gesekan dan kerugian di ujung sudu, efisiensi aerodinamik dari rotor,  $\eta_{rotor}$  ini akan lebih

kecil lagi yaitu berkisar pada harga maksimum 0.45 saja untuk sudu yang dirancang dengan sangat baik. Maka daya yang dapat diserap oleh turbin angin menjadi

$$P = \eta_{rotor} \frac{1}{2} \rho A V^3 \text{ (W)} \quad (3.3)$$

Untuk beberapa turbin angin yang dipakai pada pemompaan air mekanikal dapat digunakan formula yang sudah biasa dipakai yaitu :

$$P = 0.1 A \bar{V}^3 \text{ (W)} \quad (3.4)$$

di mana  $\bar{V}$  adalah kecepatan rata-rata pada lokasi tersebut.

### ■ Faktor Pola Energi

Faktor pola energi  $k_E$  didefinisikan sebagai,

$$k_E = \frac{\text{Daya Angin Tersedia}}{\text{Daya Berdasar Kecepatan Rata-rata}} \quad (3.5)$$

Potensi energi angin di suatu lokasi adalah merupakan daya angin yang tersedia di lokasi tersebut dan dikoreksi dengan menggunakan faktor pola energi  $k_E$ ,

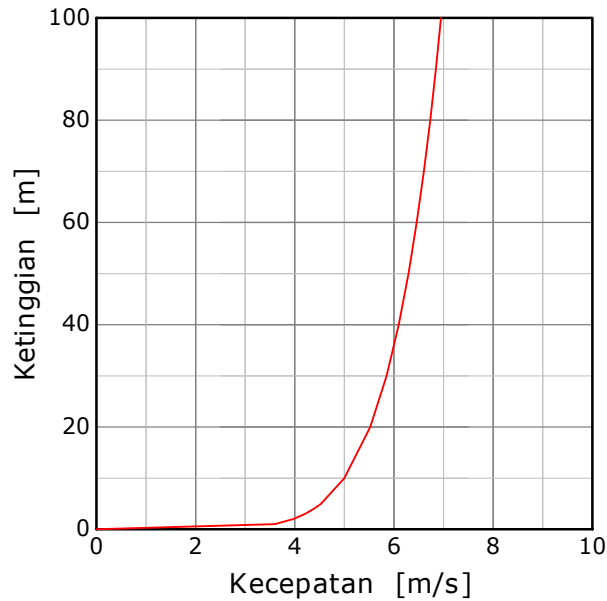
$$P/A = k_E \frac{1}{2} \rho \bar{V}^3 \text{ (W/m}^2\text{)} \quad (3.6)$$

### Profil Geseran Angin (*Wind Shear Profile*)

Angin seperti fluida yang lain pada umumnya mempunyai profil geseran atau profil kecepatan ketika mengalir melewati benda padat, misalnya permukaan bumi. Pada tepat di permukaan bumi, kecepatan relatif angin terhadap permukaan bumi sama dengan nol. Kemudian kecepatan ini menjadi semakin tinggi sebanding ketinggian dari permukaan bumi. Ada dua jenis profil geseran angin yang biasa digunakan untuk menghitung energi: profil geseran angin eksponensial (*exponential wind shear profile*) dan profil geseran angin kekasaran permukaan (*surface roughness wind shear stress*).

**Gambar 1.5** menunjukkan profil geseran fluida eksponensial yang diungkapkan dengan rumus berikut:

$$v = v_{\text{ref}} \left( \frac{h}{h_{\text{ref}}} \right)^\alpha \quad (3.7)$$



**Gambar 1.5** Profil umum geseran angin.

Di mana,  $v$  adalah kecepatan pada ketinggian  $h$ ,  $v_{\text{ref}}$  dan  $h_{\text{ref}}$  masing-masing adalah kecepatan dan ketinggian di mana pengukuran dilakukan. Profil ini tergantung pada kekasaran permukaan. Untuk fluida secara umum  $\alpha$  mempunyai nilai  $1/7$ . Profil angin pada daerah yang memiliki banyak pepohonan seperti perkebunan atau hutan, nilai  $\alpha$  dapat mencapai 0.3, sedangkan untuk laut atau daerah-daerah yang terbuka,  $\alpha$  mempunyai nilai 0.1.

### Pemilihan Tempat Pemasangan

Secara umum tempat-tempat yang baik untuk pemasangan turbin angin antara lain:

1. Celah di antara gunung. Tempat ini dapat berfungsi sebagai *nozzle*, yang mempercepat aliran angin.
2. Dataran terbuka. Karena tidak ada penghalang yang dapat memperlambat angin, dataran terbuka yang sangat luas memiliki potensi energi angin yang besar.
3. Pesisir pantai. Perbedaan suhu udara di laut dan di daratan menyebabkan angin bertiup secara terus menerus.

Walau pada dasarnya turbin angin dapat dipasang di mana saja di tempat-tempat tersebut di atas, pengkajian potensi angin tetap harus dilakukan untuk mendapatkan suatu sistem konversi energi angin yang tepat. Pengkajian potensi energi angin di suatu tempat dilakukan dengan mengukur dan menganalisis kecepatan dan arah angin. Analisis data angin dilakukan dengan menggunakan metoda statistik untuk mencari kecepatan angin rata-rata, durasi kecepatan angin dan distribusi frekwensi data angin. Jika informasi

mengenai arah angin juga tersedia, analisis dengan menggunakan metoda *wind rose* dapat dilakukan untuk mengetahui kecepatan rata-rata, frekwensi dan energi angin di setiap arah mata angin.

Pada prakteknya, penentuan tempat pemasangan sistem konversi energi angin dapat ditentukan dengan cara:

- **Pilih Tempat.** Tempat ditentukan sesuai kebutuhan, kemudian potensi energi angin dikaji dari data yang didapat. Cara ini mempertimbangkan:
  - aksesibilitas baik untuk pekerjaan konstruksi maupun perawatan,
  - kondisi sosial budaya setempat,
  - kepentingan lain
- **Pilih Potensi.** Pemilihan tempat berdasarkan besarnya potensi energi angin yang tersedia. Semakin besar kecepatan angin rata-rata di suatu tempat akan semakin baik. Semakin tinggi potensi energi yang tersedia akan memberikan keuntungan berupa ukuran sistem konversi energi angin yang semakin kecil dan tidak perlu terlalu efisien sehingga pembuatannya akan lebih mudah dan murah.

Hal-hal lain yang harus diperhatikan dalam pemasangan sistem konversi energi angin, antara lain:

- Untuk kegunaan elektrikal jarak tempat pemasangan harus cukup dekat dengan beban pengguna agar tidak ada kerugian yang berlebih. Pengurangan tegangan lebih dari 5% sudah dianggap sangat besar untuk sistem tegangan 12 VDC dan 24 VDC. Jarak lebih dari 300 m harus dihindari kecuali jika digunakan tegangan tinggi 220 VAC.
- Tempat pemasangan harus dilindungi atau dipagari agar terhindar dari aksi kerusakan. Sebaiknya lokasi pemasangan harus dapat dipantau dengan mudah dari jalan atau tempat beban pengguna. Tempat-tempat di mana terdapat kecepatan angin yang sangat kencang dan dapat merusak pada waktu-waktu tertentu tidak direkomendasikan.
- Aliran angin di dekat permukaan bumi akan semakin mengecil dan mencapai harga nol di permukaan tanah. Profil kecepatan angin ini disebut dengan lapisan batas atmosfer. Permukaan bumi memiliki tingkat kekasaran yang berbeda-beda. Semakin kasar permukaan bumi akan semakin tebal lapisan batas atmosfer. Dengan semakin besarnya lapisan batas atmosfer maka kecepatan angin pada ketinggian tertentu akan semakin kecil. Dengan demikian tempat pemasangan harus diarahkan pada tempat dengan tingkat kekasaran yang rendah seperti daerah lepas pantai, daerah pantai, padang

rumput, dan tempat-tempat dengan tumbuh-tumbuhan dan bangunan yang tidak terlalu tinggi.

- Turbin angin yang digunakan untuk keperluan pengisian batere biasanya ditempatkan di perahu, bangunan atau rumah. Lokasi pemasangan harus diperhatikan agar aliran yang datang pada sistem konversi energi angin ini tidak turbulen atau tidak berbalik arah di bagian belakang. Untuk hal ini ada aturan atau konvensi bahwa turbin angin harus lebih tinggi sekitar 10 m dari pohon atau bangunan tertinggi di tempat tersebut. Lokasi pemasangan juga setidaknya harus berjarak minimal sekitar 10 kali dari diameter rotor terhadap hambatan atau rintangan terdekat.

## 4. Teknologi Turbin Angin

### Jenis Turbin Angin

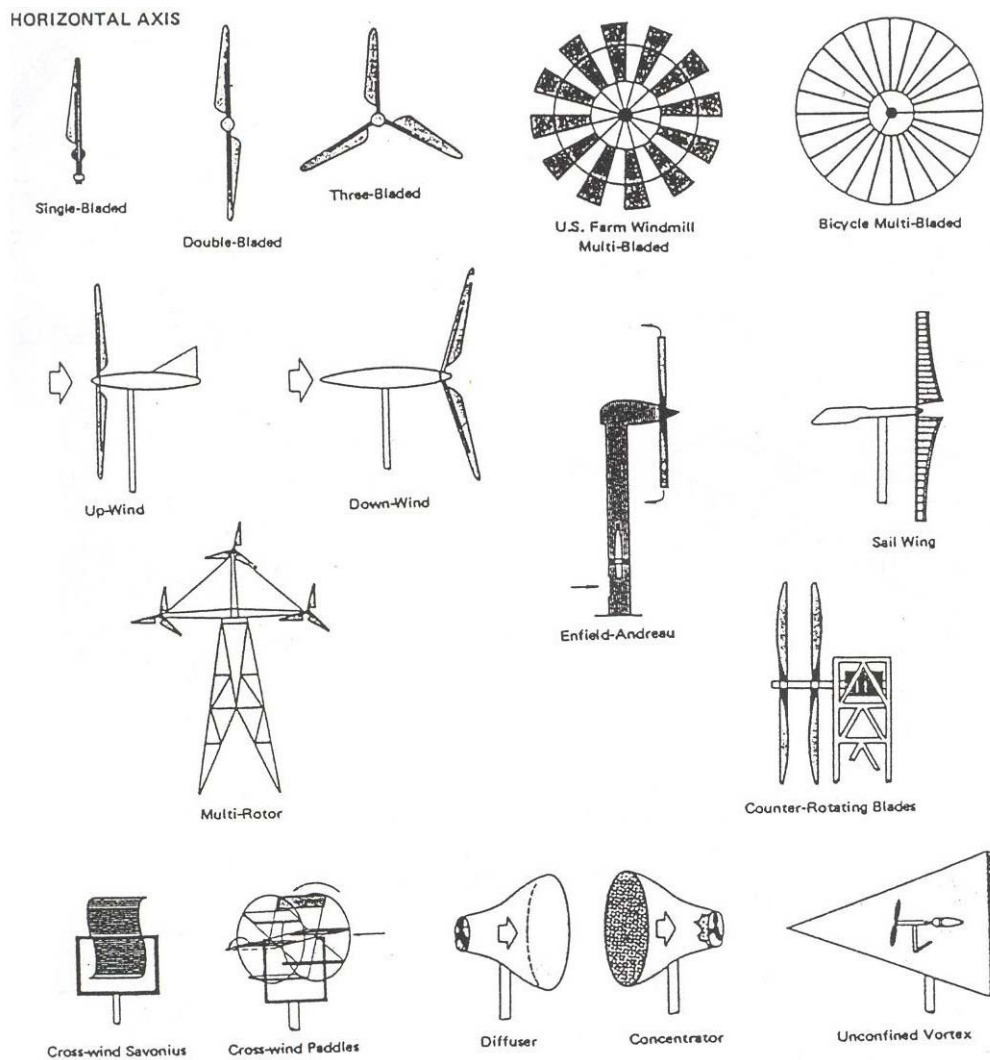
Turbin angin dibagi menjadi dua kelompok utama berdasarkan arah sumbu:

1. **Horizontal.** Turbin angin dengan sumbu horizontal mempunyai sudu yang berputar dalam bidang vertikal seperti halnya propeler pesawat terbang. **Gambar 1.6** memperlihatkan berbagai jenis turbin angin horizontal. Turbin angin biasanya mempunyai sudu dengan bentuk irisan melintang khusus di mana aliran udara pada salah satu sisinya dapat bergerak lebih cepat dari aliran udara di sisi yang lain ketika angin melewatinya. Fenomena ini menimbulkan daerah tekanan rendah pada belakang sudu dan daerah tekanan tinggi di depan sudu. Perbedaan tekanan ini membentuk gaya yang menyebabkan sudu berputar.
2. **Vertikal.** Turbin angin dengan sumbu vertikal bekerja dengan prinsip yang sama seperti halnya kelompok horizontal. Namun, sudunya berputar dalam bidang yang paralel dengan tanah, seperti *mixer* kocokan telur.

Setiap jenis turbin angin memiliki ukuran dan efisiensi yang berbeda. Untuk memilih jenis turbin angin yang tepat untuk suatu kegunaan diperlukan tidak hanya sekedar pengetahuan tetapi juga pengalaman.

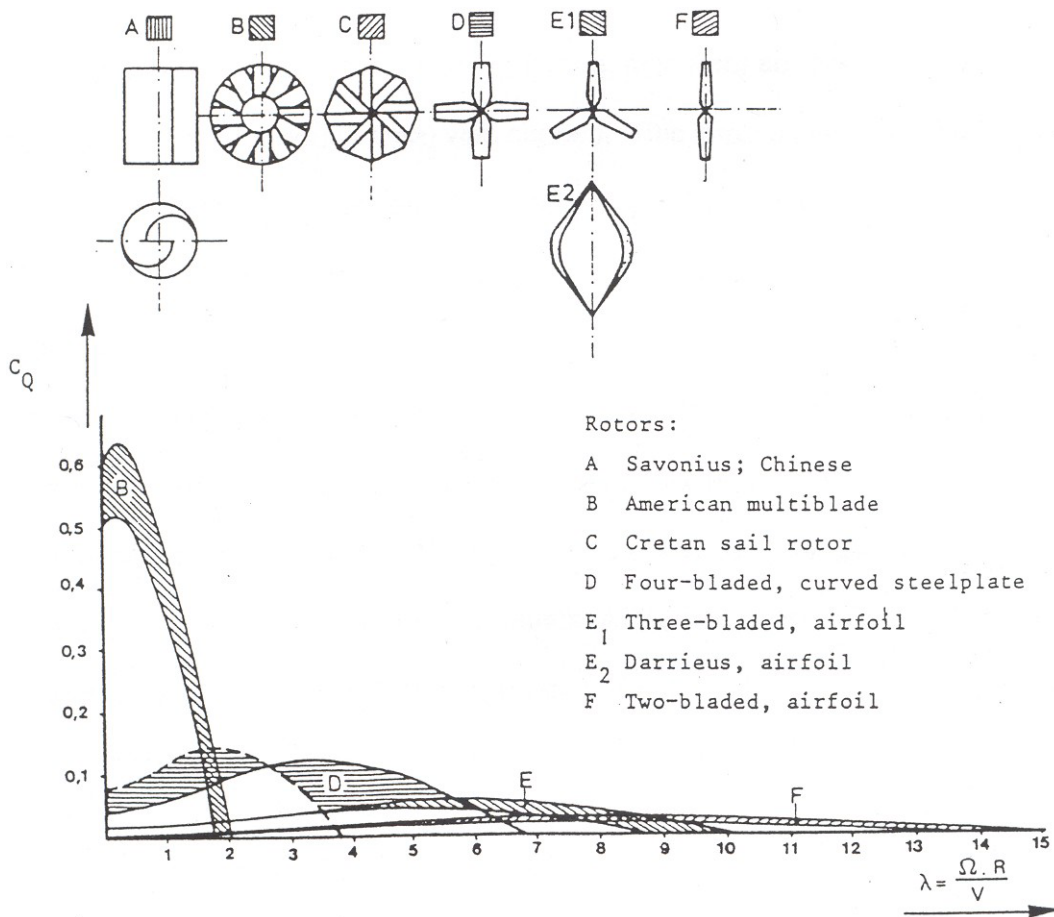
Pada umumnya turbin angin yang mempunyai jumlah sudu banyak (soliditas tinggi) akan mempunyai torsi yang besar. Turbin angin jenis ini banyak digunakan untuk keperluan mekanikal seperti pemompaan air, pengolahan hasil pertanian dan aerasi tambak. Sedangkan turbin angin dengan jumlah sudu sedikit, misalnya dua atau tiga, digunakan untuk keperluan pembangkitan listrik. Turbin angin jenis ini mempunyai torsi rendah tetapi putaran rotor yang tinggi. **Gambar 1.7** memperlihatkan korelasi antara efisiensi ( $\lambda$ ,  $TSR=Tip\ Speed\ Ratio$ ) dengan torsi ( $C_Q$ ). Gambar ini menjelaskan bahwa rotor dengan

jumlah sudu banyak akan mempunyai torsi yang besar tetapi efisiensi tidak terlalu tinggi atau sebaliknya. Diskusi lebih rinci mengenai efisiensi dilanjutkan di **Subseksi 0**.



**Gambar 1.6** Berbagai jenis turbin angin ([www.energy.iastate.edu](http://www.energy.iastate.edu))





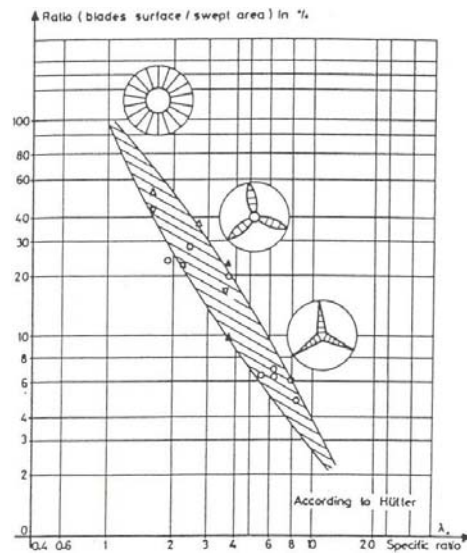
**Gambar 1.7** Torsi rotor untuk berbagai jenis turbin angin (Tong, 1997).

Jika dikaitkan dengan sumber daya angin, turbin angin dengan jumlah sudu banyak lebih cocok digunakan pada daerah dengan potensi energi angin yang rendah karena *rated wind speed*-nya tercapai pada putaran rotor dan kecepatan angin yang tidak terlalu tinggi. Sedangkan turbin angin dengan sudu sedikit (untuk pembangkitan listrik) tidak akan beroperasi secara efisien pada daerah dengan kecepatan angin rata-rata kurang dari 4 m/s.

Dengan demikian daerah-daerah dengan potensi energi angin rendah, yaitu kecepatan angin rata-rata kurang dari 4 m/s, lebih cocok untuk dikembangkan turbin angin keperluan mekanikal. Jenis turbin angin yang cocok untuk keperluan ini antara lain *american tipe multi blade*, *cretan sail* dan *savonius*.

### Efisiensi Rotor

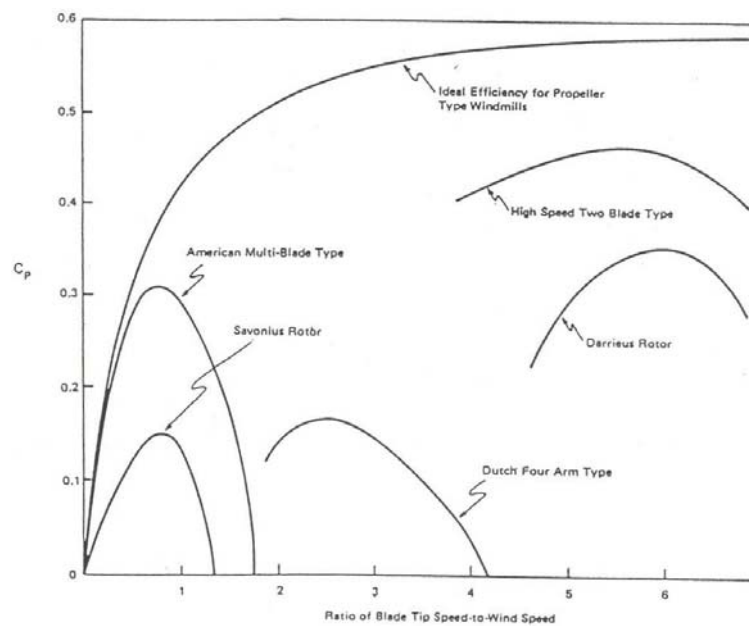
Efisiensi rotor ditentukan oleh jenis turbin angin dan kesempurnaan teknologi aerodinamik yang digunakan. Rotor dengan soliditas tinggi mempunyai efisiensi yang lebih kecil dibandingkan dengan rotor yang mempunyai soliditas rendah (**Gambar 1.8**).



**Gambar 1.8** Efisiensi rotor dan soliditas rotor (Jansen, 1976)

**Gambar 1.9** menunjukkan efisiensi rotor berbagai jenis turbin angin. Di sini terlihat bahwa turbin angin kelompok sumbu horizontal pada umumnya memiliki efisiensi yang lebih tinggi dibandingkan dengan turbin angin sumbu vertikal. Dari gambar ini juga terlihat bahwa pada umumnya turbin angin dengan soliditas tinggi mempunyai torsi yang besar, efisiensi rendah serta *rated wind speed* yang tidak terlalu tinggi.

Sehingga terlihat jelas di sini bahwa di daerah-daerah berpotensi energi angin rendah cocok diterapkan teknologi turbin angin *multi blade* yang dapat digunakan untuk keperluan-keperluan mekanikal, seperti pemompaan air.



**Gambar 1.9** Efisiensi rotor untuk berbagai tipe turbin angin (Tong, 1997)

## Diameter Rotor

Diameter rotor ditentukan berdasarkan pemenuhan kebutuhan energi oleh energi angin yang tersedia, baik itu untuk kegunaan mekanikal maupun elektrikal, dengan mempertimbangkan efisiensi rotor dan juga efisiensi sistem mekanik. Perkiraan diameter rotor ini tidak terlalu eksak. Kompromi dapat dilakukan dalam rangka optimisasi dengan kekuatan struktur sudu dan juga biaya pembuatan.

Dengan efisiensi rotor dan kondisi angin yang sama, semakin besar diameter rotor semakin besar pula energi angin yang dapat diekstrak. Oleh karena itu ukuran rotor menggambarkan berapa besar kapasitas suatu sistem konversi energi angin.

## Pertimbangan Aerodinamik

Rancangan aerodinamik yang sangat baik akan meningkatkan efisiensi sudu dan efisiensi rotor. Hal yang harus diperhatikan di sini adalah bahwa optimisasi antara biaya perancangan aerodinamik dengan peningkatan daya yang dihasilkan harus cukup rasional. Perhitungan efisiensi rotor kadang kala membutuhkan komputasi dengan biaya tinggi dan waktu yang lama. Hal ini tentu tidak perlu dilakukan jika peningkatan efisiensinya tidak sebanding.

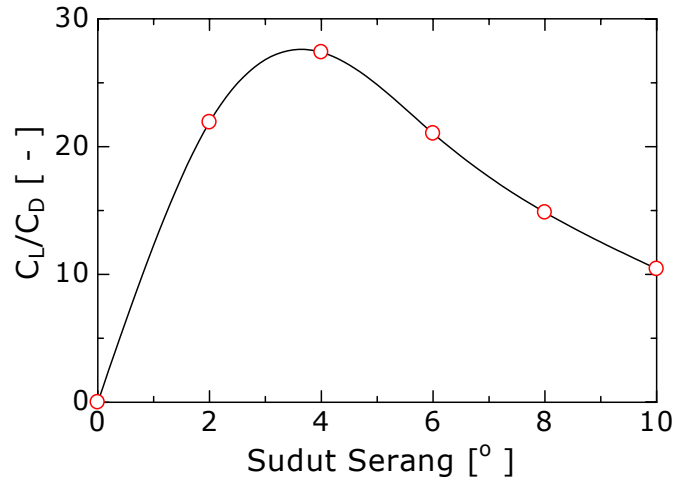
Sudu yang dirancang dengan pertimbangan aerodinamik yang sangat baik biasanya menghasilkan geometri sudu yang kompleks. Bentuk geometri yang kompleks tentu akan mempertinggi tingkat kesulitan dan juga biaya pembuatan.

Dengan demikian pertimbangan aerodinamik yang tepat diharapkan dapat memberikan rekomendasi bentuk sudu dan rotor yang tepat yang memiliki efisiensi cukup untuk suatu kegunaan tertentu (baik mekanikal maupun elektrikal), sehingga tidak menghabiskan biaya tinggi untuk desain dan pembuatan.

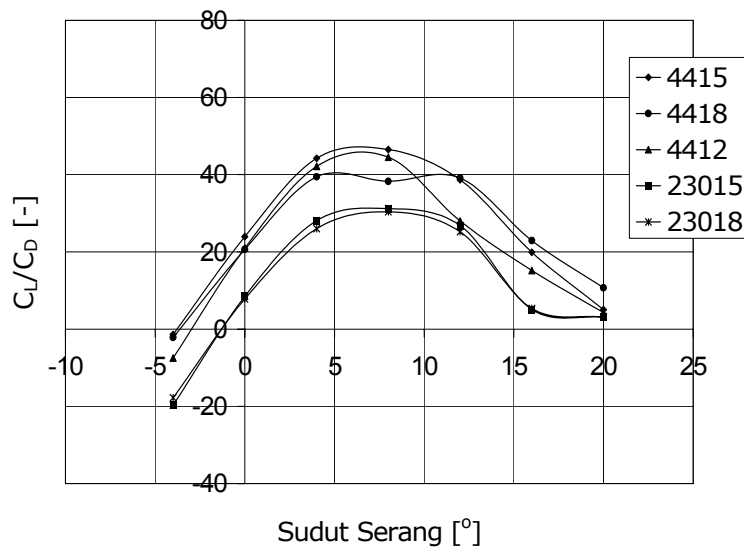
Secara teknis rancangan aerodinamik yang baik akan memberikan keluaran berupa distribusi sudut pasang dan distribusi panjang *chord* sudu yang tepat. Perancangan aerodinamik lebih lanjut akan menyarankan modifikasi *airfoil* (bentuk irisan melintang sudu) menjadi bentuk yang tidak konvensional. Bahkan pada tahap desain lanjut dapat juga diciptakan bentuk-bentuk *airfoil* baru yang tidak sama distribusinya dari pangkal hingga ke ujung sudu.

Secara ideal bentuk *airfoil* sudu harus mempunyai efisiensi aerodinamik yang paling tinggi. Tetapi pembuatannya secara teknis cukup sulit dan membutuhkan biaya yang tinggi. Untuk penerapan yang praktis ekonomis, biasanya dipilih rancangan aerodinamik yang optimal.

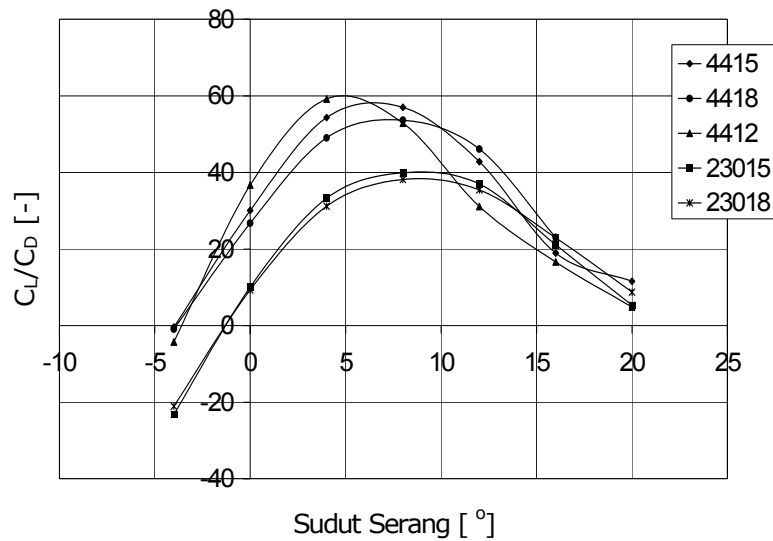
Efisiensi aerodinamik yang dimaksud di sini adalah perbandingan antara gaya angkat dan gaya hambat dari profil *airfoil* sudu. Contoh dari efisiensi aerodinamik untuk pelat datar dan *airfoil* NACA series (44xx dan 230xx), pada bilangan Reynold  $10^5$  dan  $1.5 \times 10^5$  diperlihatkan masing-masing pada **Gambar 1.10-Gambar 1.12** di bawah ini.



**Gambar 1.10** Efisiensi aerodinamik pelat datar.



**Gambar 1.11** Efisiensi aerodinamik berbagai airfoil untuk bilangan Reynold  $10^5$ .



**Gambar 1.12** Efisiensi aerodinamik berbagai airfoil untuk bilangan Reynold  $1.5 \times 10^5$ .

### Pertimbangan Struktur

Rancangan struktur yang baik dan komprehensif sangat menentukan usia dan kekuatan konstruksi terhadap beban-beban yang bekerja. Struktur juga harus dirancang untuk dapat menahan beban dari kejutan angin (*gust wind load*).

Perhitungan struktur dapat dilakukan dengan mempertimbangkan semua gaya maksimum yang bekerja lalu menganalisisnya untuk setiap bagian atau komponen struktur. Dari analisis struktur kemudian dirancang dimensi sudu, rotor dan sistem pendukung seperti *turn mechanism*, ekor pengarah dan tiang.

Selain analisis struktur, aspek lingkungan yang dapat merugikan khususnya sifat karat bahan juga harus diperhatikan. Untuk menghindari karat, konstruksi harus dilakukan di tempat yang tidak terlalu lembab. Konstruksi mungkin harus dicat dan dilengkapi dengan

## 5. Teknologi Energi Terbarukan untuk Pemompaan

Sumber energi terbarukan yang paling umum digunakan untuk pemompaan adalah angin. Tenaga angin dapat dimanfaatkan secara mekanik atau elektrik untuk sistem pemompaan. Sejak lama energi angin telah dimanfaatkan untuk menggerakkan perahu. Sejak awal abad ke 13 energi angin mulai digunakan untuk menguras air dari lahan pertanian di Belanda. Di Eropa, pompa air tenaga angin skala kecil yang terbuat dari kayu telah lama juga digunakan untuk memompa air laut dalam pembuatan garam. Kemudian yang menjadi sangat populer hingga saat ini adalah pompa air tenaga angin mekanik—yang sekarang kita kenal dengan *american type*—yang terbuat dari besi dengan jumlah sudu

banyak. Ulasan ringkas mengenai sistem pompa air tenaga angin dibahas di bawah ini.

### **Pompa Air Tenaga Angin Mekanik (*Mechanical Wind Pumps*)**

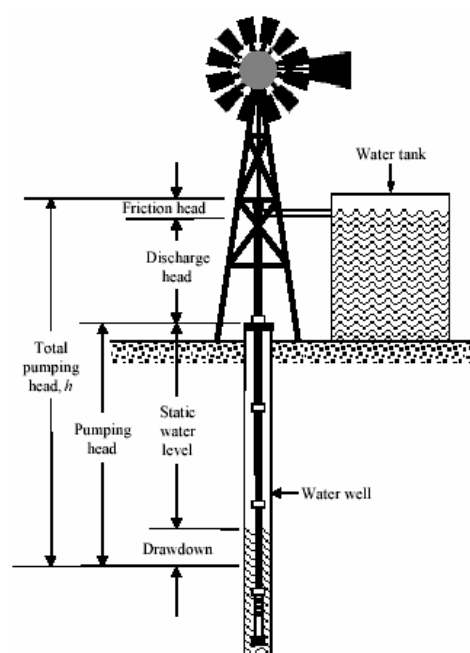
Pompa angin mekanik biasanya menggunakan kincir angin tradisional yang dapat berputar pada kecepatan angin yang relatif rendah. Kincir angin seperti ini sering disebut *old american windmill* atau *american type windmill* (lihat **Gambar 1.13**).

Pompa air tenaga angin jenis ini mulai digunakan di Amerika pada akhir abad ke 19 untuk kebutuhan air rumah tangga dan pembuatan rel kereta api. Selama kurang lebih 100 tahun terakhir ini, sudah lebih dari 8 juta kincir angin seperti ini dibuat di Amerika. Desainnya sudah terbukti berhasil sehingga banyak ditiru di seluruh dunia. Kincir angin jenis ini menggerakkan pompa piston yang dihubungkan dengan gear.

Kincir angin tradisional biasanya mempunyai sudu sederhana yang terbuat dari plat melengkung berjumlah banyak, sekitar 15-18. Yang lebih modern sekarang menggunakan sudu berbentuk *airfoil* dan jumlahnya tidak begitu banyak, sekitar 6-8.

Salah satu masalah pada penerapan pompa angin mekanik ini adalah lokasi instalasi. Kincir angin harus dipasang langsung di atas *borehole* atau sumber air. Sedangkan lokasi sumber air yang baik belum tentu merupakan lokasi sumber daya angin yang baik pula.

Secara umum, pompa angin mekanik baik untuk kecepatan angin rendah karena soliditas rotor yang tinggi, yang membatasi kecepatan pompa piston sampai 40-50 stroke per menit. Effisiensi konversi pompa air tenaga angin mekanik biasanya berkisar antara 7-27% (Argaw, 2003).



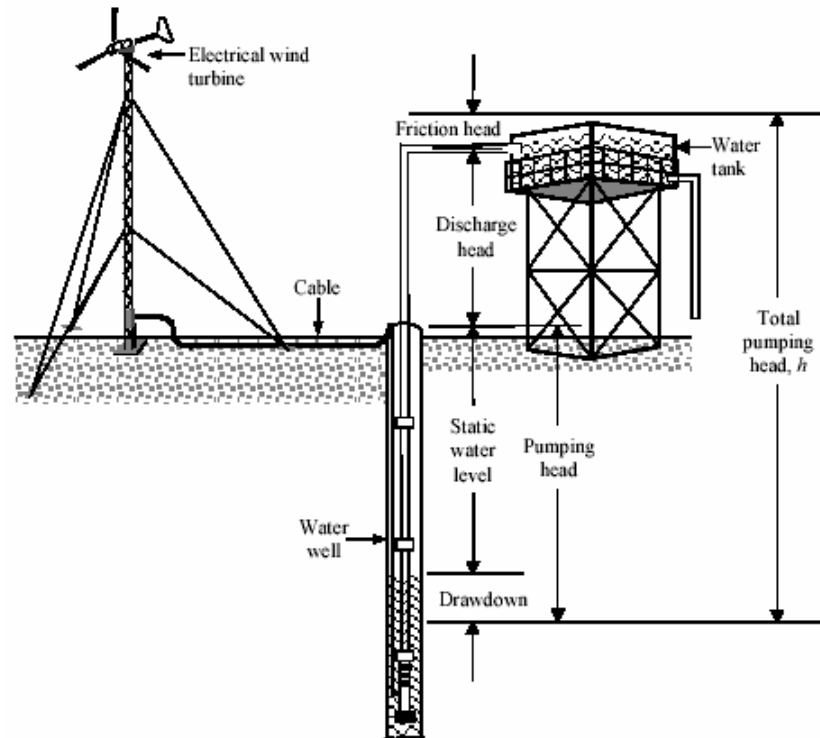
**Gambar 1.13** Diagram skematik pompa air tenaga angin mekanik.

### **Pompa Air Tenaga Angin Elektrik (*Electrical Wind Pumps*)**

Pemompaan air dengan turbin angin secara elektrikal menawarkan teknologi yang lebih menjanjikan. Turbin angin dapat menghasilkan listrik baik AC maupun DC, dan pompa dapat langsung dihubungkan dengan langsung dengan motor AC atau DC. Pompa sentrifugal dapat digunakan karena turbin angin listrik dirancang untuk rotor dengan soliditas rendah (lihat **Gambar 1.14**). Dengan cara ini beberapa keuntungan yang dapat diambil adalah sebagai berikut:

- Tidak memerlukan batere atau inverter, karena pompa dapat langsung dihubungkan dengan motor.
- Lebih mudah untuk menyelaraskan turbin angin dengan pompa air dengan mengatur beban secara elektrikal bukan mekanikal.
- Memberikan kemudahan dalam penentuan tempat instalasi, karena turbin angin dapat dipasang di mana saja yang anginnya kuat, sementara pompa sendiri dapat dipasang di mana sumber air berada. Kemudahan ini tidak akan didapatkan apabila kita menggunakan pompa angin mekanik, karena terkadang sumber daya air dan angin tidak berada ditempat yang sama.

Berbeda dengan kincir angin tradisional, turbin angin elektrikal menuntut kecepatan angin yang lebih tinggi. Misalnya, untuk mulai memompa, turbin angin kecil skala 1.5 kW akan memerlukan kecepatan angin rata-rata 4-5 m/s sedangkan pompa angin mekanik hanya memerlukan 2.5-3.5 m/s. Turbin angin seperti ini mempunyai kinerja yang lebih efisien pada kecepatan tinggi daripada kecepatan rendah. Turbin angin seperti ini dua kali lebih efisien daripada kincir angin tradisional, lebih kompetitif dari diesel, sistem photovoltaic, dan kincir angin tradisional itu sendiri. Karena bagian yang bergerak/berputar lebih sedikit dibandingkan dengan kincir angin tradisional, turbin angin seperti ini juga menjanjikan biaya pemeliharaan yang lebih murah.



**Gambar 1.14** Diagram skematik pompa air tenaga angin elektrik.

## PUSTAKA

1. Argaw, N., R. Foster, R. and A. Ellis (2003), *Renewable Energy for Water Pumping Applications in Rural Villages*, NREL (National Renewable Energy Laboratory), Colorado.
2. Brown, L. A. (2004), *Europe Leading World Into Age of Wind Energy*, Earth Institute Policy.
3. BTM Consults ApS (2005), *International Wind Energy Development World Market Update 2004 Forecast 2005-2009*, Press Release March 31, 2005.
4. Chikkoba, T. B. (2004), *Wind Energy Developments in India*, Centre for Wind Energy Technology, Chennai, India.
5. DESDM (2003), *Kebijakan Pengembangan Energi Terbarukan dan Konservasi Energi (Energi Hijau)*, Jakarta.
6. DESDM (2005), *Blueprint Pengelolaan Energi Nasional 2005-2025*, Jakarta.
7. Internasional Energy Agency - IEA (2004), *World Energy Outlook*



2004.

8. Jarass (1980), *Strom aus Wind - Integration einer regenerativen EnergieQuelle*, Springer-Verlag, Berlin.
9. Jansen, W. A. M. (1976), *Horizontal Axis Fast Running Wind Turbines for Developing Countries*, Steering Committee Wind Energy Developing Countries, The Netherlands.
10. Lieshout, v. P. (2004), "Time Dependent Energy Calculations," *Wind flow and Trees Workshop*, British Wind Energy Association, Glasgow.
11. Moring, F. (2005), "In Orbit," *Aviation Week & Space Technology*, Oct. 17.
12. Omara, A. I., H. Sourell, H. Irps and C. Sommer (2004), "Low-pressure irrigation system powered by wind energy," *J. App. Irrigation Sci.*, **39**, 83-91.
13. Reeves, A. (2003), *Wind Energy for Electric Power - A REPP Issue Brief*, REPP (Renewable Energy Policy Project), Washington.
14. Simmons, M. R. (2005), *The Status of Future Energy Sources*, Office of Coal & Power Systems, U.S. Dept. Energy, Queenstown, MD.
15. Tong, C.W. (1997), *The Design and Testing of a Wind Turbine for Malaysian Wind Condition*, Thesis, UTM.
16. Websites for AWEA, Wind Web Tutorial, Wind Energy Basics, <[www.awea.org](http://www.awea.org)>.
17. Websites for CREST (Center for Renewable Energy and Sustainable Technology), <[www.crest.org](http://www.crest.org)>.
18. Website for Iowa University, <[www.energy.iastate.edu](http://www.energy.iastate.edu)>.
19. Website for Denmark Wind Power Organization, <[www.windpower.org](http://www.windpower.org)>.
20. World Energy Council, WEC (2004), *Survey of Energy Resources 2004*.

## DAFTAR ISTILAH

**Airfoil**—bilah atau sudu yang padat dengan kurvatur tertentu sehingga memiliki gaya angkat ketika berada dalam udara yang bergerak.

**Altitude**—Sudut antara horison (bidang horizontal) dan matahari.

**Anemometer**—sebuah alat untuk mengukur kecepatan angin.

**Centrifugal pump**—pompa yang mengangkat/mengalirkan air dengan impeller/baling-baling secara sentrifugal dengan membentuk perbedaan tekanan.

**Conversion efficiency**—rasio antara energi listrik yang dihasilkan dengan energi yang tersedia sebagai sumber daya.

**Cut-in speed**—kecepatan angin minimum di mana turbin angin akan memproduksi energi.

**Cut-out speed**—kecepatan di mana turbin angin akan mengurangi kekuatannya untuk melindungi dirinya dari kecepatan angin berlebih. Kebanyakan pada turbin angin kecil hal ini dilakukan dengan cara memasang ekor sehingga dapat menggelak dari angin.

**Centrifugal pump**—pompa yang mengangkat/mengalirkan air dengan impeller/baling-baling secara sentrifugal dengan membentuk perbedaan tekanan.

**Conversion efficiency**—rasio antara energi listrik yang dihasilkan dengan energi yang tersedia sebagai sumber daya.

**Cut-in speed**—kecepatan angin minimum di mana turbin angin akan memproduksi energi.

**Cut-out speed**—kecepatan di mana turbin angin akan mengurangi kekuatannya untuk melindungi dirinya dari kecepatan angin berlebih. Kebanyakan pada turbin angin kecil hal ini dilakukan dengan cara memasang ekor sehingga dapat menggelak dari angin.

**Darrieus**—rotor dengan vertikal axis yang memiliki sudu berbentuk airfoil. Sudunya sering dibentuk menurut profil Troposkien.

**Days of autonomy**—jumlah hari konsekutif di mana sebuah sistem *stand alone* akan mendapat beban yang telah ditentukan tanpa input energi.

**Drag force**—gaya hambat yang terjadi pada benda dalam aliran udara, gaya ini sejajar

dengan arah aliran.

**Efficiency**—rasio antara daya output dan input, biasanya diungkapkan dalam persentase.

**Grid**—jaringan transmisi, distribusi dan transformasi listrik yang digunakan dalam sistem daya pusat.

**Hub height**—jarak dari tanah ke pusat rotor (hub) dalam turbin angin.

**Inverter**—alat untuk mengubah input DC menjadi output AC.

**Life-cycle cost**—estimasi biaya dalam memiliki dan mengoperasikan suatu sistem selama sistem itu dapat berfungsi. Biasanya estimasi ini diungkapkan dalam nilai saat ini terhadap semua biaya selama *lifetime* sistem tersebut, atau dengan kata lain semua modal dan biaya-biaya operasional, pemeliharaan, penggantian suku cadang dan lain-lain.

**Load**—atau beban adalah jumlah daya listrik yang digunakan pada saat tertentu.

**Load matching**—proses menyetarakan beban dengan input daya untuk memaksimalkan transfer daya pada beban. Metoda yang digunakan pada proses ini berdasarkan pemaksimalan energi elektromekanikal total yang dikirim pada beban mekanik. Setiap komponen dari sistem masing-masing harus dioptimalkan terpisah sebelum dirakit, kemudian sistem dirakit sehingga mempunyai efisiensi yang tinggi secara keseluruhan.

**Nominal voltage**—tegangan listrik yang digunakan sebagai rujukan untuk menggambarkan batere, modul atau suatu sistem, misalnya batere 12 volt atau modul 24 volt.

**Power curve**—kurva daya adalah graph yang menampilkan daya turbin angin sebagai fungsi dari kecepatan angin.

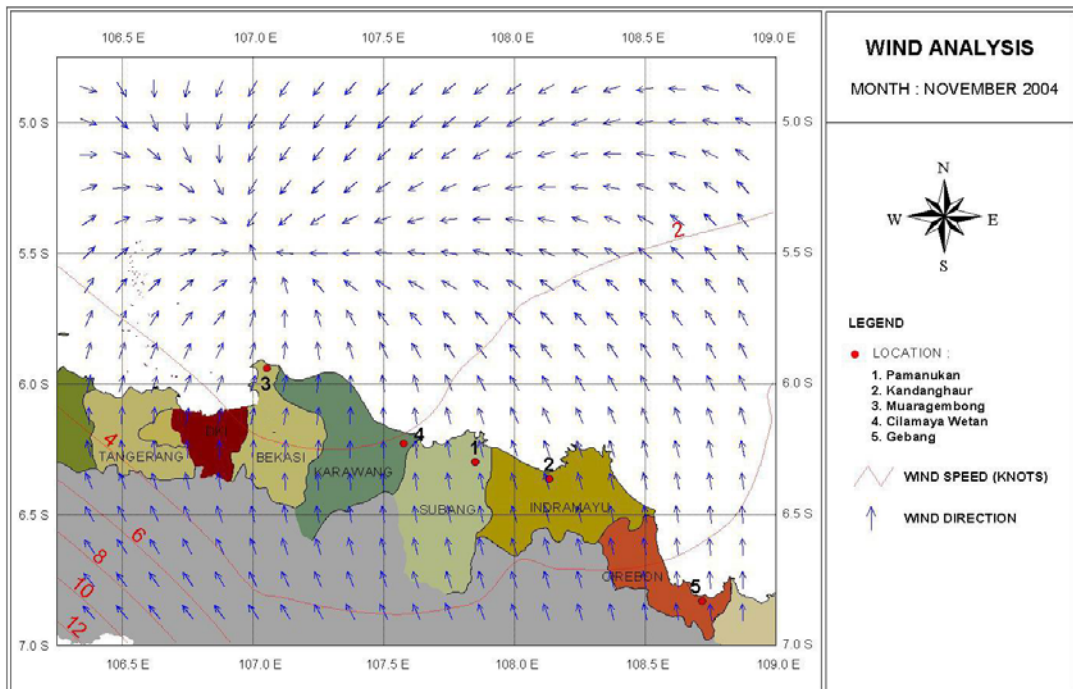
**Solidity**—rasio antara lebar sudu total dengan keliling rotor.

**Tip-speed ratio**—rasio antara kecepatan pada tip sudu dengan kecepatan angin.

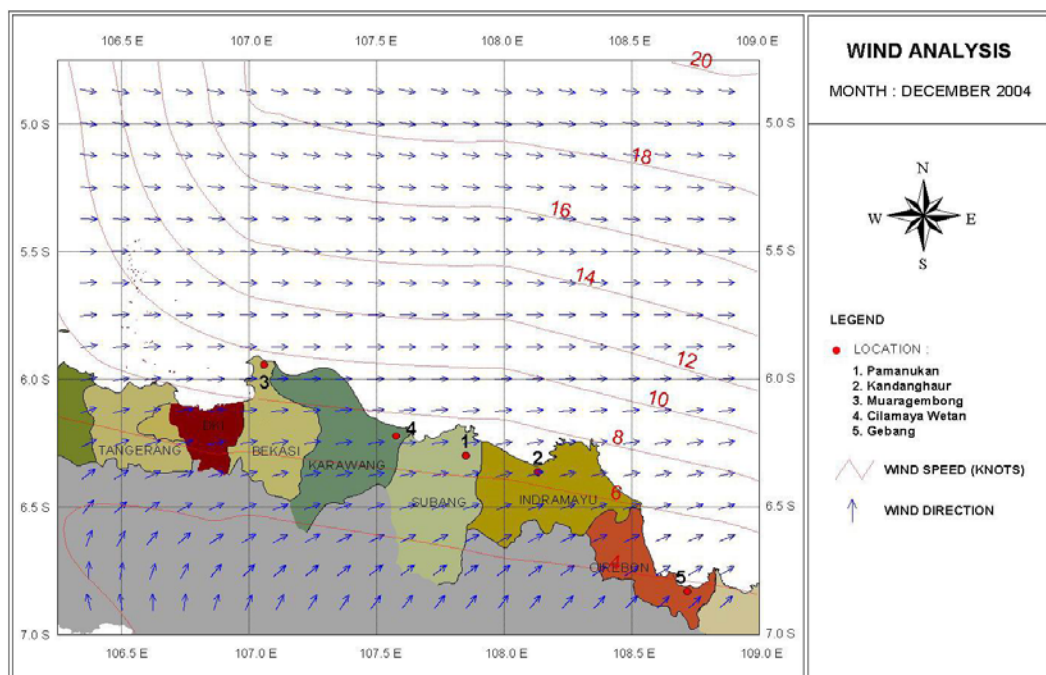
## LAMPIRAN

### A.1 Contoh Hasil Pengolahan Data Angin

#### A.1.1 Peta angin di Pantura Jawa Barat

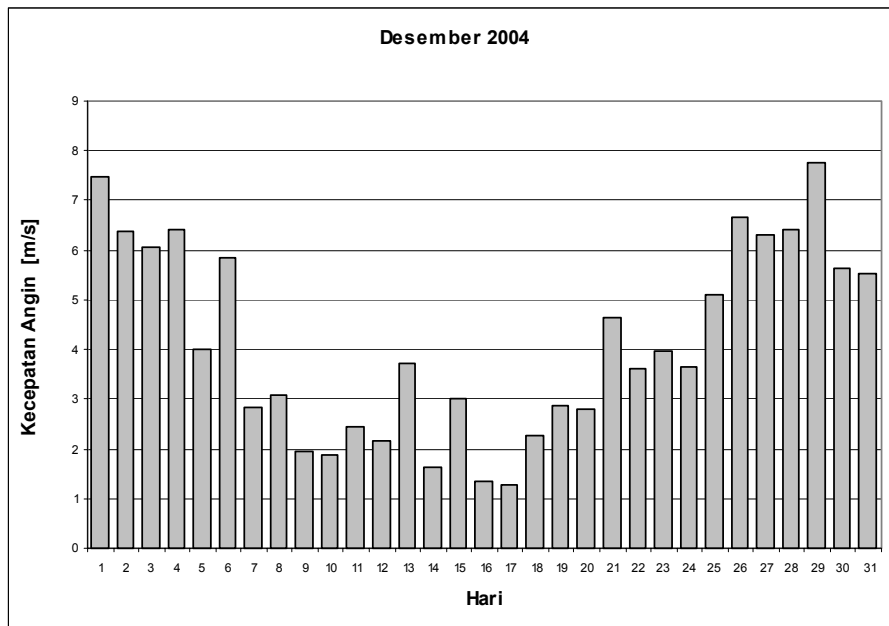


Gambar 1.15 Peta angin di Wilayah Pantura Jawa Barat November 2004.

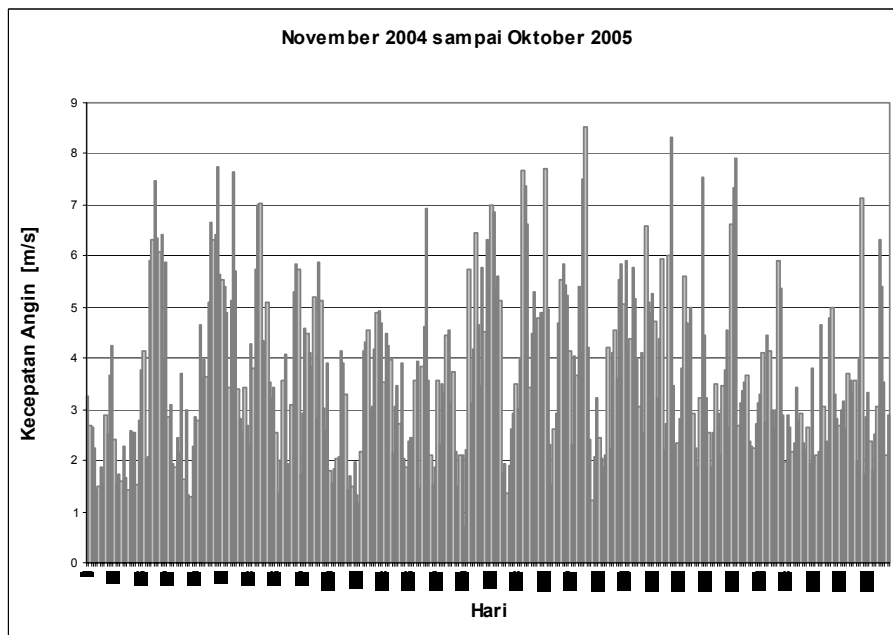


Gambar 1.16 Peta angin di Wilayah Pantura Jawa Barat Desember 2004.

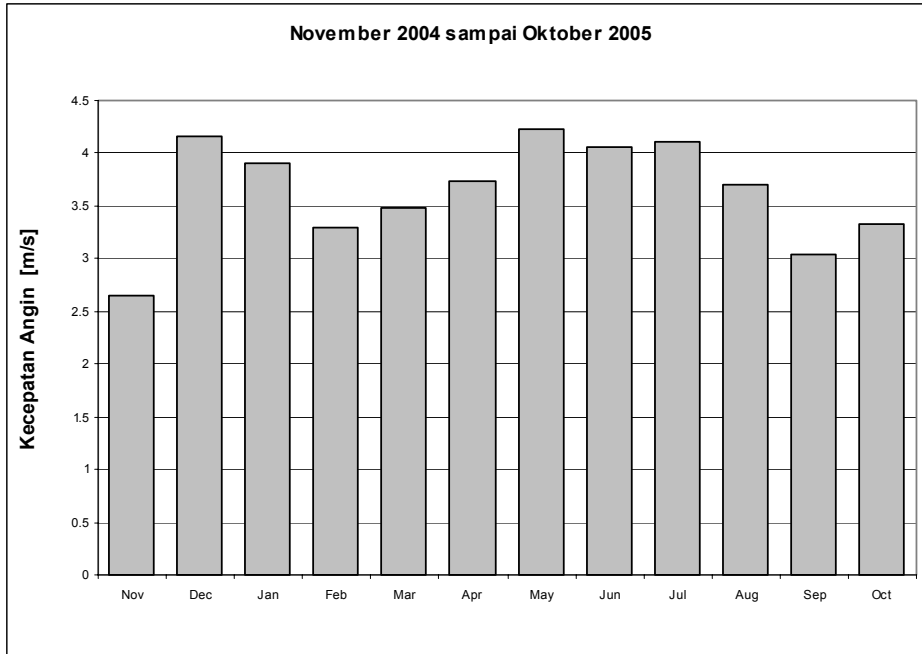
### A.1.2 Contoh Data angin di Muara Gembong, Bekasi



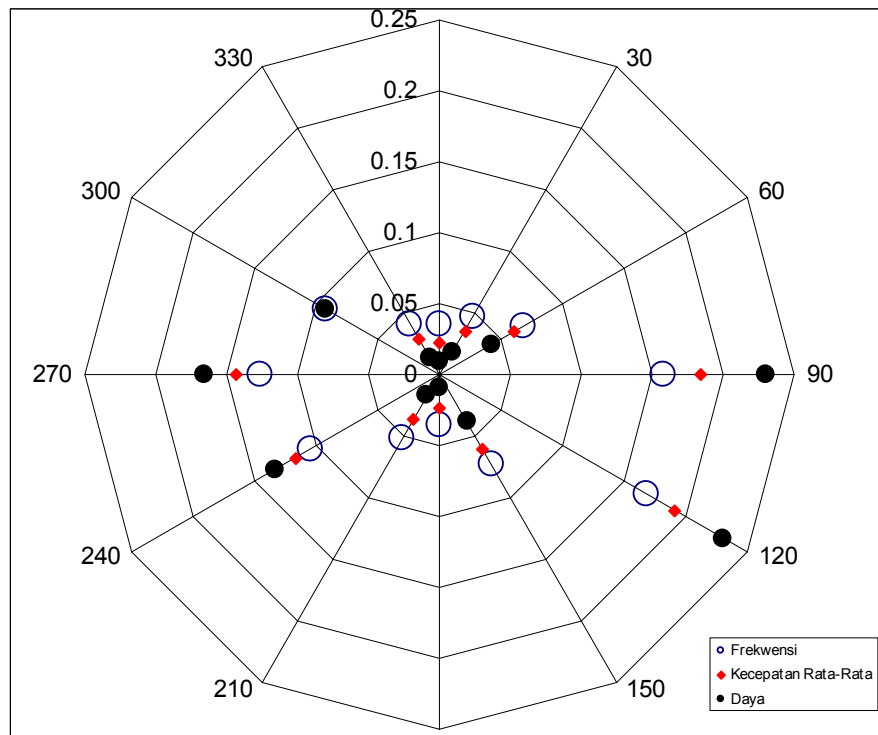
**Gambar 1.17** Data angin harian bulan Desember 2004 di Muara Gembong, Bekasi.



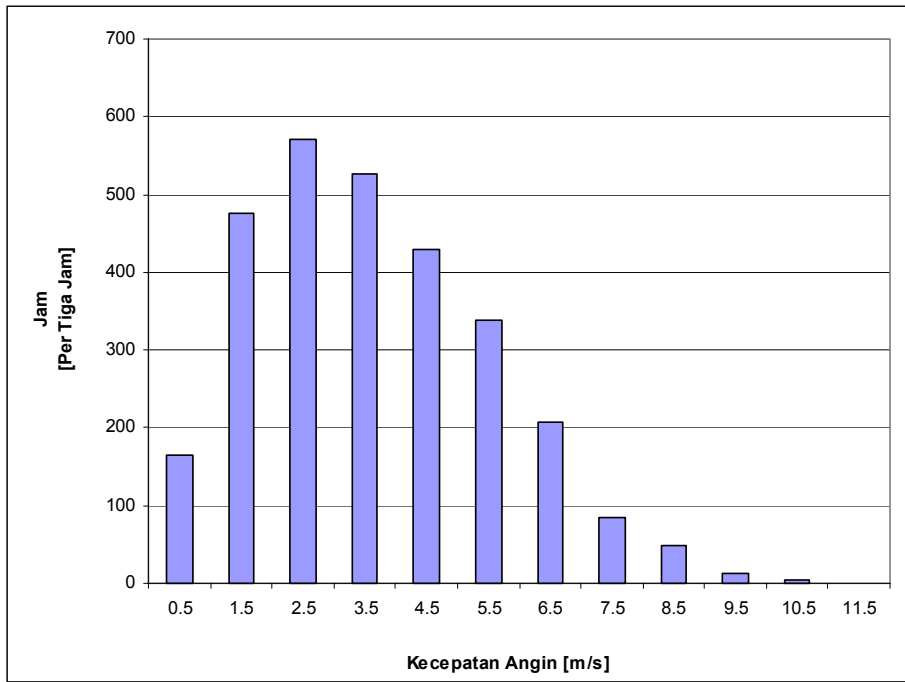
**Gambar 1.18** Fluktuasi kecepatan angin dalam satu tahun antara di Muara Gembong, Bekasi.



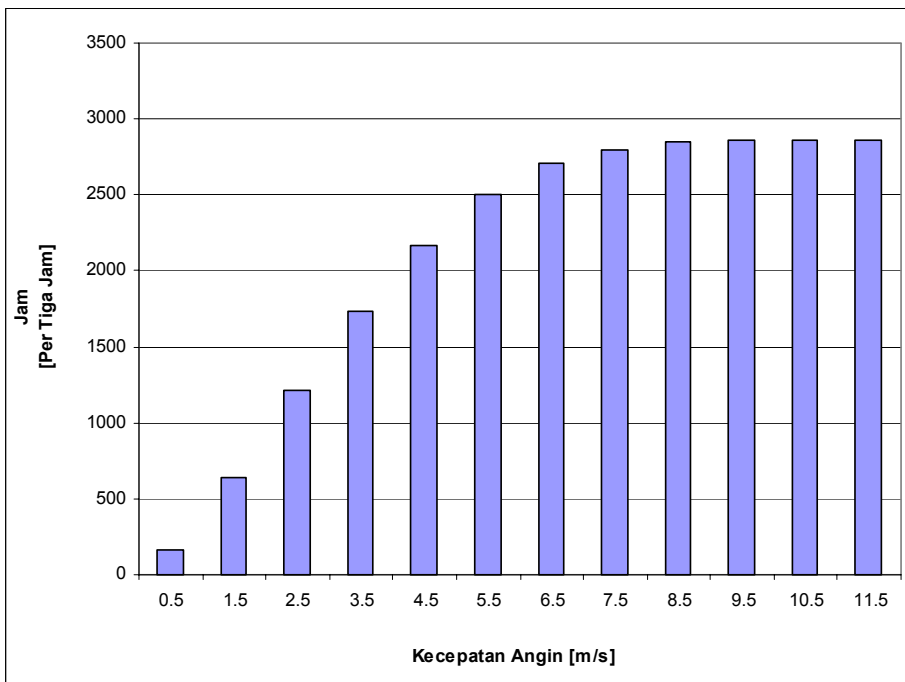
**Gambar 1.19** Data angin bulanan selama satu tahun antara di Muara Gembong, Bekasi.



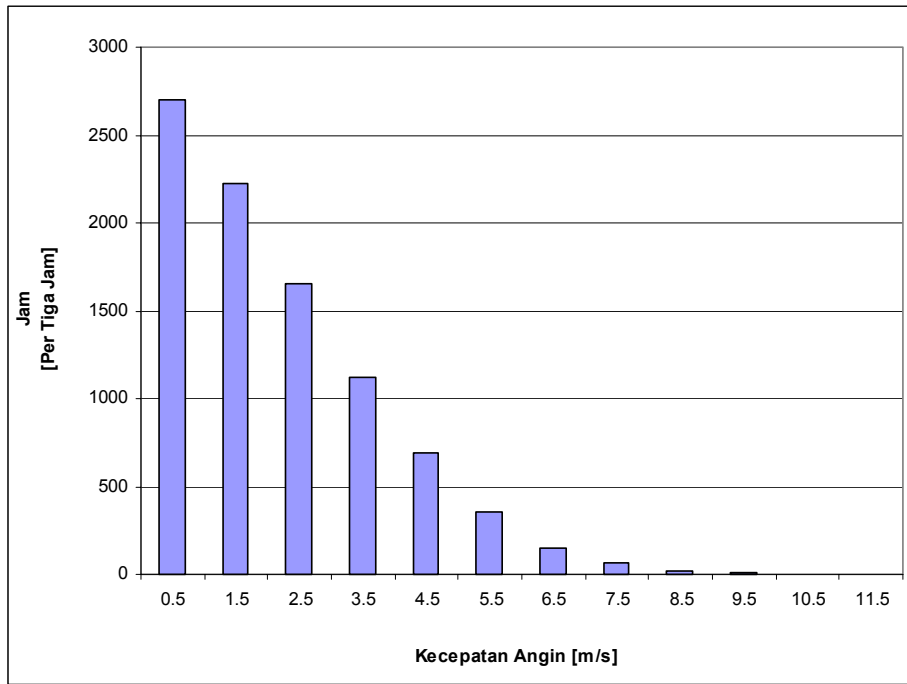
**Gambar 1.20** Wind rose untuk Muara Gembong, Bekasi.



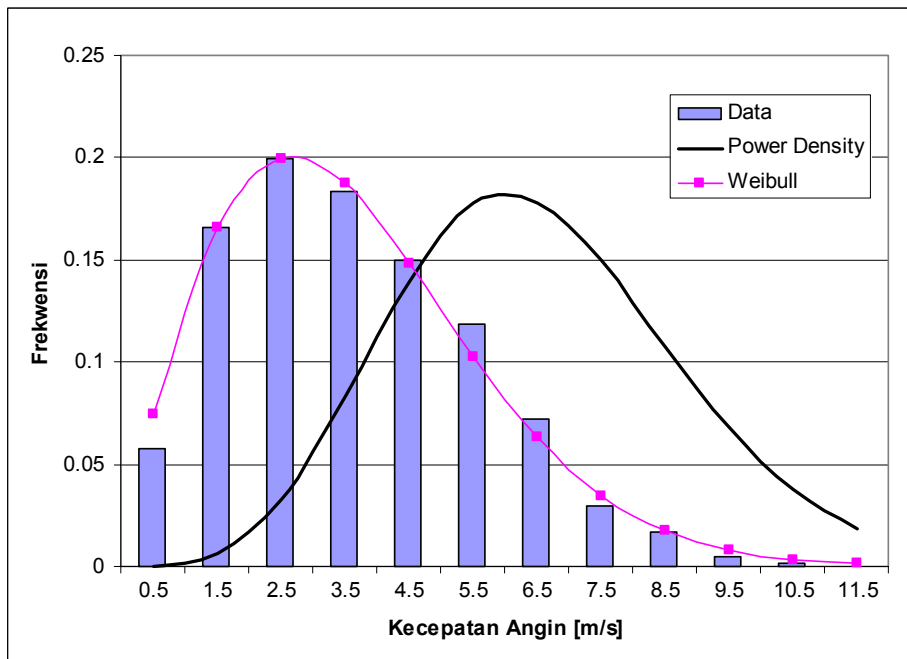
**Gambar 1.21** Distribusi frekwensi di Muara Gembong, Bekasi.



**Gambar 1.22** Distribusi kumulatif di Muara Gembong, Bekasi.



**Gambar 1.23** Distribusi durasi di Muara Gembong, Bekasi.



**Gambar 1.24** Distribusi Weibull di Muara Gembong, Bekasi.