

2. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Angin

Angin adalah pergerakan udara dari wilayah bertekanan tinggi ke wilayah bertekanan rendah, atau dari area bersuhu rendah ke area bersuhu lebih tinggi. Pergerakan ini disebabkan oleh pemanasan permukaan bumi oleh radiasi matahari. Selain mendapatkan panas langsung dari matahari, udara di atas permukaan bumi juga menerima pemanasan melalui radiasi matahari yang dipantulkan bumi. Karena permukaan bumi tidak seragam, terjadi perbedaan suhu dan tekanan udara antara wilayah yang menerima energi panas lebih besar dengan wilayah yang menerima energi panas lebih sedikit, yang pada akhirnya menciptakan aliran udara atau angin.

Dalam kajian ilmiah, terutama yang berkaitan dengan potensi pemanfaatan angin, diperlukan pemahaman terhadap beberapa parameter utama yang menggambarkan sifat angin. Parameter-parameter tersebut antara lain:

- Kecepatan angin (v):

Kecepatan angin menunjukkan seberapa cepat massa udara bergerak pada suatu titik dan dinyatakan dalam satuan meter per detik (m/s). Parameter ini menjadi salah satu faktor terpenting dalam analisis karakteristik angin.

- Arah angin

Arah angin menunjukkan dari mana angin berasal, diukur dalam derajat terhadap arah utara geografis. Informasi mengenai arah angin diperlukan untuk memahami pola sirkulasi angin di suatu wilayah.

- Tinggi pengukuran:

Kecepatan angin umumnya meningkat seiring dengan ketinggian dari permukaan tanah. Oleh karena itu, pengukuran angin perlu memperhatikan ketinggian agar hasilnya akurat dan representatif.

- Massa jenis udara (ρ):

Massa jenis udara merupakan parameter yang menggambarkan kerapatan udara dan dipengaruhi oleh suhu serta tekanan atmosfer. Nilai standar massa jenis udara pada permukaan laut adalah sekitar $1,225 \text{ kg/m}^3$.

- Variasi temporal:

Angin memiliki sifat fluktuatif yang dapat berubah-ubah dalam jangka waktu tertentu. Oleh karena itu, analisis angin memerlukan data historis jangka panjang untuk memperoleh hasil yang representatif.

- Distribusi kecepatan angin:

Untuk memodelkan karakteristik angin di suatu lokasi, digunakan pendekatan statistik seperti distribusi Weibull. Distribusi ini membantu menggambarkan frekuensi terjadinya kecepatan angin tertentu dalam periode waktu tertentu.

Angin yang bergerak membawa energi kinetik karena merupakan massa udara yang bergerak dengan kecepatan tertentu. Energi ini dapat dimanfaatkan apabila dikonversi menjadi bentuk energi lain, seperti energi mekanik atau energi listrik. Secara fisika, jumlah energi kinetik yang terkandung dalam aliran angin dapat dihitung menggunakan prinsip dasar mekanika fluida.

Energi kinetik (E) yang terkandung dalam massa udara m yang bergerak dengan kecepatan v dinyatakan dengan rumus berikut:

$$E = \frac{1}{2}mv^2 \quad (1)$$

Dengan keterangan:

E = Energi kinetik (Watt)

m = massa udara(kg)

v = kecepatan angin (m/s)

Namun, untuk menghitung daya (energi per satuan waktu) dari aliran angin yang melewati suatu luas penampang A , digunakan rumus berikut:

$$P = \frac{1}{2}\rho v^3 A \quad (2)$$

Dengan keterangan:

P = daya angin (Watt)

ρ = massa jenis udara (kg/m^3), umumnya sekitar $1,225 \text{ kg/m}^3$ di permukaan laut

A = luas area yang dilalui angin (m^2)

Rumus ini menunjukkan bahwa daya yang tersedia dari angin berbanding lurus dengan pangkat tiga dari kecepatan angin. Artinya, sedikit peningkatan kecepatan angin akan menghasilkan peningkatan daya yang sangat signifikan. Oleh karena itu, pemilihan lokasi dengan kecepatan angin rata-rata tinggi sangat krusial dalam analisis dan pengembangan energi angin.

2.2 Definisi Distribusi Weibull

Distribusi Weibull adalah fungsi densitas probabilitas yang digunakan dalam analisis probabilitas data kecepatan angin. Untuk memanfaatkan distribusi Weibull dengan baik, dibutuhkan dua parameter yang berkaitan dengan rata-rata kecepatan angin. Parameter pertama adalah k (parameter bentuk), yang berfungsi sebagai faktor bentuk untuk menggambarkan distribusi kecepatan angin. Parameter kedua adalah c (parameter skala), yang berperan sebagai faktor skala untuk menunjukkan di mana kecepatan angin paling terkonsentrasi. Dengan menggunakan kedua parameter ini, analisis potensi energi angin dapat dilakukan secara lebih akurat dan efektif.

Distribusi Weibull dipilih sebagai metode analisis utama karena beberapa keunggulan. Menurut Louassa et al. (2018), pertama, fleksibilitasnya yang tinggi dalam memodelkan berbagai macam model angin hanya dengan dua parameter (k dan c). Kedua, metode ini telah divalidasi secara luas dan menjadi standar industri global untuk analisis potensi energi angin. Meskipun demikian, metode ini juga memiliki keterbatasan, yaitu asumsi bahwa distribusi angin bersifat unimodal (memiliki satu puncak), yang mungkin tidak selalu akurat di lokasi dengan pola angin yang kompleks. Akurasi metode ini juga sangat bergantung pada kualitas dan panjang rentang data historis yang digunakan.

Distribusi angin umumnya diwakili oleh distribusi Weibull. Distribusi Weibull dapat dilihat oleh adanya dua fungsi yaitu fungsi kepadatan probabilitas (f) dan fungsi distribusi kumulatif. Fungsi kepadatan probabilitas dapat ditentukan dengan persamaan berikut :

$$f(v) = \frac{k}{c} \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^k} \quad (3)$$

Dimana :

$f(v)$ = Fungsi kepadatan probabilitas Weibull

k = parameter bentuk

c = parameter skala (m/s)

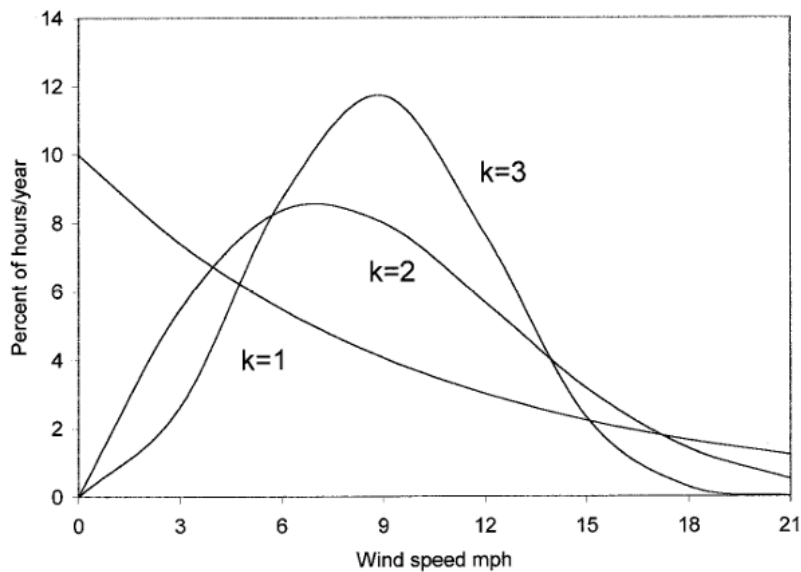
v = kecepatan angin (m/s)

Dan fungsi distribusi kumulatif dapat ditentukan dengan persamaan berikut :

$$F(v) = 1 - e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^k} \quad (4)$$

Dengan keterangan :

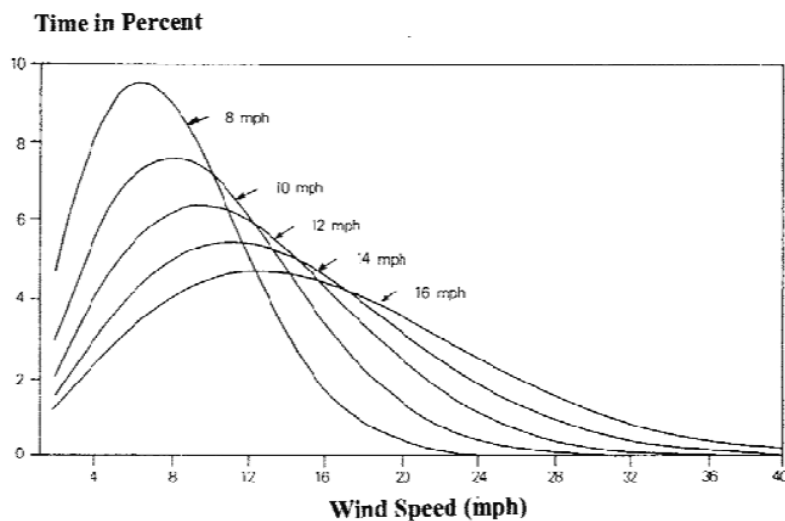
$F(v)$ = Fungsi distribusi kumulatif Weibull untuk kecepatan angin



Gambar 2.1 Karakteristik Weibull, $k = 1, 2, 3$

Sumber : *Weibull distribution* <https://doi.org/10.22373/crc.v1i1.1377>

Gambar 2.1 menunjukkan bagaimana variasi faktor bentuk “ k ” mempengaruhi distribusi Weibull. Ketika nilai “ k ” meningkat, puncak distribusi menjadi lebih tajam, yang menunjukkan variasi kecepatan angin yang lebih kecil. Sebaliknya, ketika nilai “ k ” menurun, puncak distribusi menjadi lebih lebar, yang mengindikasikan variasi kecepatan angin yang lebih besar.



Gambar 2.2 Karakteristik Weibull, $k = 2$, $c = 8$ sampai 16

Sumber : Weibull distribution <https://doi.org/10.22373/crc.v1i1.1377>

Gambar 2.2 menunjukkan kurva distribusi kecepatan angin yang diasumsikan mengikuti distribusi Weibull dua parameter. Setiap kurva merepresentasikan nilai parameter skala (*scale parameter*) c yang berbeda, yaitu 8 mph, 10 mph, 12 mph, 14 mph, dan 16 mph. Parameter c mempengaruhi posisi kurva terhadap sumbu kecepatan angin; semakin besar nilai c , maka kurva akan bergeser ke kanan dan menunjukkan bahwa kecepatan angin yang lebih tinggi terjadi lebih sering. Selain itu, kenaikan nilai c juga menyebabkan puncak kurva menurun dan sebaran data menjadi lebih lebar, yang mengindikasikan variabilitas angin yang lebih besar. Karakteristik ini penting dalam analisis potensi energi angin, karena semakin tinggi nilai c , maka secara umum potensi energi angin yang tersedia juga meningkat.

Menurut Louassa et al. (2018), metode empiris seperti Justus (EM) dan Lysen (EML) mampu menghasilkan estimasi parameter Weibull yang cukup mendekati data aktual, dengan performa statistik yang baik berdasarkan nilai *root mean square error* (RMSE) dan koefisien korelasi (R^2). Kedua metode ini dinilai andal untuk pemodelan distribusi kecepatan angin, terutama ketika data terbatas. Oleh karena itu, pada tugas akhir ini digunakan pendekatan empiris Justus dan Lysen untuk menghitung nilai parameter bentuk (k) dan skala (c) distribusi Weibull, masing-masing dengan rumus sebagai berikut:

$$k = \left(\frac{\sigma}{v_m} \right)^{-1.086} \quad (5)$$

$$c = v_m \left(0.568 + \frac{0.433}{k} \right)^{-\frac{1}{k}} \quad (6)$$

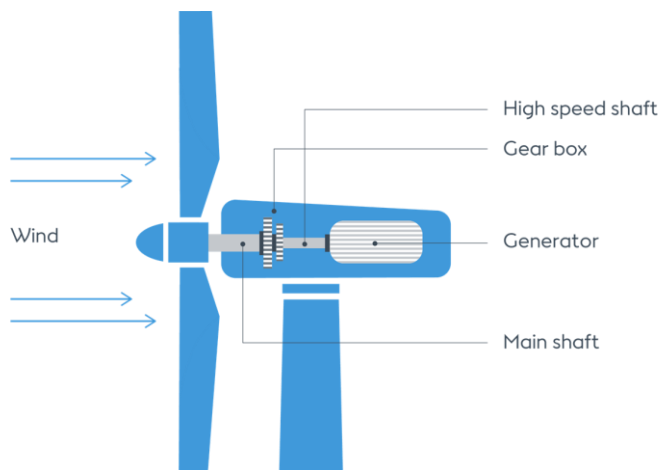
Dimana :

σ = standard deviasi kecepatan angin (m/s)

v_m = kecepatan rata-rata angin (m/s)

2.3 Turbin Angin

2.3.1 Cara Kerja Turbin



Gambar 2.3.1 Cara Kerja Turbin Angin

Sumber : *Inside the wind turbine* <https://orsted.com/en/what-we-do/renewable-energy-solutions/offshore-wind/technology>

Gambar 2.3.1 merupakan perangkat mekanik yang berfungsi mengubah energi kinetik dari angin menjadi energi listrik melalui proses konversi energi. Prinsip kerja turbin angin didasarkan pada perputaran baling-baling (rotor) yang digerakkan oleh hembusan angin. Energi gerak tersebut kemudian diteruskan ke generator melalui sistem transmisi (*gearbox* atau *direct-drive*) untuk menghasilkan listrik. Area lintasan angin (A) pada rumus (2) merupakan luas area yang dilewati oleh hembusan angin melalui turbin. Area ini berbentuk lingkaran dengan jari-jari lintasan angin yang sama dengan jari-jari rotor (R). Maka, area lintasan angin (A) dapat direpresentasikan sebagai:

$$A = \pi R^2 \quad (7)$$

Dimana :

A = area lintasan angin

R = jari-jari baling-baling

Dengan demikian, daya mekanik yang dihasilkan oleh energi angin dapat dihitung sebagai berikut:

$$P_m = \frac{1}{2} \rho v^3 A C_p \quad (8)$$

Dimana :

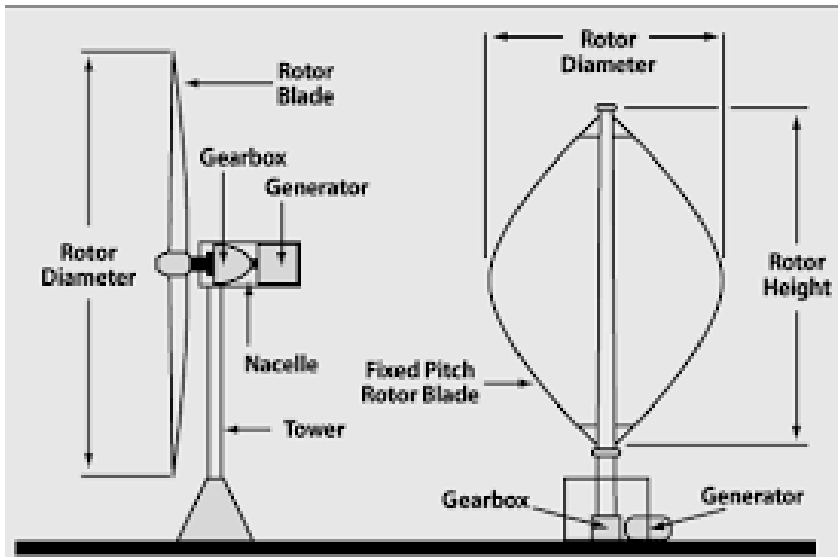
P_m = Daya mekanik angin yang diterima rotor Watt (W)

C_p = Koefisien performa turbin (effisiensi max 0,59)

Koefisien daya rotor atau efisiensi konversi energi oleh rotor dinyatakan dengan C_p , yang menunjukkan seberapa besar energi angin yang dapat dikonversi menjadi energi mekanik. Nilai koefisien daya C_p tidak tetap, melainkan bergantung pada jenis turbin dan kondisi operasionalnya. Untuk turbin angin horizontal modern (HAWT), nilai C_p realistis biasanya berada di rentang 0,35 hingga 0,45. Sementara itu, untuk turbin berskala besar atau *hubheight-scale*, nilai C_p sedikit lebih tinggi, berkisar antara 0,40 hingga 0,48 karena efisiensi aerodinamisnya yang lebih baik. Turbin kecil seperti yang digunakan di rumah tangga atau turbin poros vertikal (VAWT) umumnya memiliki nilai C_p yang lebih rendah, sekitar 0,20 hingga 0,35. Dalam konteks perhitungan akademik atau studi konservatif, nilai C_p sebesar 0,35 sering digunakan sebagai pendekatan aman. Namun, untuk estimasi yang lebih realistis dan banyak dipakai dalam studi teknis maupun simulasi lokasi nyata, nilai $C_p = 0,4$ dianggap representatif dan seimbang antara konservatif dan optimistis. Oleh karena itu, dalam perhitungan potensi daya pada studi ini, nilai $C_p = 0,4$ digunakan sebagai nilai baku yang realistis sesuai dengan karakteristik turbin horizontal sumbu modern yang direncanakan.

Secara teoritis, nilai maksimum C_p dibatasi oleh hukum Betz, yaitu sebesar 0,59 atau 59%. Daya mekanik maksimum yang dapat dihasilkan turbin berbanding lurus dengan pangkat tiga dari kecepatan angin (v^3), sehingga data kecepatan angin yang akurat sangat penting dalam menghitung potensi daya yang dapat dihasilkan oleh turbin angin.

2.3.2 Jenis Turbin



Gambar 2.3.2 Tipe Turbin Angin

Sumber : https://www.researchgate.net/figure/Types-of-wind-turbines-Mahmoud-and-Xia-2012_fig2_347549373

Jenis turbin angin umumnya dibedakan menjadi dua berdasarkan orientasi porosnya, seperti pada gambar 2.3. 2 yaitu turbin angin poros horizontal (HAWT) dan poros vertikal (VAWT). Turbin poros horizontal lebih umum digunakan karena efisiensinya yang tinggi dan kemampuannya untuk menghasilkan daya besar, khususnya di wilayah dengan kecepatan angin yang stabil dan konsisten. Pemilihan jenis dan kapasitas turbin sangat bergantung pada kondisi angin di lokasi pemasangan, sehingga analisis distribusi kecepatan angin menjadi tahap penting dalam perencanaan sistem PLTB.

- Kelebihan dan Kekurangan Jenis Turbin Angin

Turbin angin poros horizontal (HAWT) memiliki kelebihan berupa efisiensi konversi energi yang lebih tinggi dibandingkan dengan turbin poros vertikal (VAWT). HAWT juga lebih cocok digunakan pada skala besar dan pada lokasi dengan arah angin yang dominan dan stabil, seperti di daerah pesisir atau padang terbuka. Namun, HAWT memerlukan sistem yaw untuk mengarahkan rotor ke arah angin dan biasanya membutuhkan menara tinggi serta area lahan yang luas.

Sebaliknya, turbin angin poros vertikal (VAWT) memiliki desain yang lebih sederhana dan dapat menangkap angin dari segala arah tanpa perlu sistem pengarah. VAWT cocok untuk

penggunaan di daerah urban atau tempat dengan arah angin yang berubah-ubah. Akan tetapi, efisiensi VAWT cenderung lebih rendah dibandingkan HAWT, dan daya yang dihasilkan umumnya terbatas, sehingga lebih sesuai untuk aplikasi skala kecil.

2.3.3 Power Curve Turbin

Power curve atau kurva daya turbin adalah grafik yang menunjukkan hubungan antara kecepatan angin dan daya output yang dihasilkan oleh turbin angin. Kurva ini terdiri dari beberapa titik penting, yaitu:

- *Cut-in speed*: kecepatan angin minimum di mana turbin mulai menghasilkan daya.
- *Cut-out speed*: kecepatan angin maksimum di mana turbin dihentikan untuk menghindari kerusakan.

Rumus energi yang dihasilkan turbin angin berdasarkan data *power curve* selama satu tahun adalah sebagai berikut:

$$E_{tahun} = \sum_{i=1}^n P(v_i) \times t(v_i) \tag{9}$$

Keterangan :

E_{tahun} : Energi total yang dihasilkan dalam setahun (Wh atau kWh).

$P(v_i)$: Output daya turbin (Watt) pada kecepatan angin v_i , diambil dari *power curve* turbin.

$t(v_i)$: Waktu tahunan (jam per tahun) di mana kecepatan angin berada pada kisaran v_i .

n : Jumlah bin/kelas kecepatan angin (biasanya 1 m/s interval).

Kurva daya digunakan untuk menghitung estimasi energi tahunan yang dihasilkan oleh turbin, berdasarkan distribusi kecepatan angin di suatu lokasi. Oleh karena itu, *power curve* sangat penting dalam simulasi kinerja dan seleksi turbin yang sesuai dengan kondisi angin setempat.

2.3.4 Capacity Factor (CF)

Capacity Factor (CF) atau faktor kapasitas adalah rasio antara energi listrik aktual yang dihasilkan oleh turbin dalam periode tertentu terhadap energi maksimum yang dapat dihasilkan jika turbin beroperasi pada kapasitas penuh secara terus-menerus. Rumusnya adalah:

$$CF = \frac{E_{aktual}}{P_{terpasang} \times T} \quad (10)$$

dengan:

- E_{aktual} adalah total energi listrik yang dihasilkan (kWh),
- $P_{terpasang}$ adalah kapasitas daya maksimum turbin (kW),
- T adalah total waktu (jam dalam setahun = 8760 jam).

Nilai CF mencerminkan kinerja operasional turbin di suatu lokasi. Turbin yang dipasang pada lokasi dengan kecepatan angin yang tinggi dan stabil akan memiliki CF yang lebih besar. Sebaliknya, jika turbin sering berhenti karena kecepatan angin terlalu rendah atau terlalu tinggi (di luar rentang kerja), maka CF akan lebih kecil.