

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Semakin menipisnya bahan bakar fosil menjadi hal yang sangat diperhatikan akhir-akhir ini. Seperti yang kita tahu bahwa bahan bakar fosil merupakan sumber energi yang paling banyak digunakan saat ini, jumlahnya yang semakin berkurang tentu saja akan mendorong pencarian sumber energi alternatif untuk mengantisipasi menipisnya kelangkaan energi. Salah satu sumber energi alternatif yang tersedia adalah energi angin. Energi angin merupakan sumber energi yang terbarukan dan ramah lingkungan. Namun untuk dapat memanfaatkan energi angin secara maksimal, energi angin harus dikonversi ke dalam bentuk energi lain. Untuk hal tersebut dibutuhkan alat yang disebut turbin angin (*wind turbine*).

Turbin angin digunakan untuk mengkonversi energi angin menjadi energi listrik. Prinsip kerja turbin angin adalah mengubah energi kinetik yang dimiliki oleh angin menjadi energi mekanik pada poros turbin, lalu poros turbin akan berputar dan menggerakkan generator sehingga mampu membangkitkan energi listrik. Ada dua jenis turbin angin, yaitu *Horizontal Axis Wind turbine* (turbin angin sumbu horisontal) dan *Vertical Axis Wind Turbine* (turbin angin sumbu vertikal). Pada skripsi ini yang dibahas adalah *Vertical Axis Wind Turbine* (VAWT).

Vertical Axis Wind Turbine (VAWT) adalah turbin angin yang memiliki poros atau sumbu rotor utama yang disusun tegak lurus. Kelebihan utama susunan ini adalah turbin tidak harus diarahkan sesuai arah angin untuk menghasilkan energi listrik. Kelebihan ini sangat berguna di tempat-tempat yang arah anginnya sangat bervariasi, VAWT dapat mendayagunakan angin dari berbagai arah. Performa dari suatu turbin angin dapat dilihat dari daya poros, efisiensi turbin dan torsi yang dihasilkannya.

Berbagai penelitian telah dilakukan untuk memaksimalkan kinerja dari turbin angin ini. Salah satunya adalah Michael Suseno, 2011, yang memvariasikan panjang sudu untuk memaksimalkan unjuk kerja turbin angin.

Pada skripsi ini saya akan memvariasikan diameter sapuan rotor untuk mengetahui pengaruhnya terhadap unjuk kerja darrieus VAWT tipe H.

1.2 Rumusan Masalah

Dari latar belakang di atas, maka dapat dirumuskan permasalahan sebagai berikut :

Bagaimanakah pengaruh variasi diameter sapuan rotor terhadap unjuk kerja turbin angin Darrieus tipe-H?

1.3 Batasan Masalah

Agar permasalahan tidak meluas dan terfokus, maka perlu dilakukan batasan-batasan masalah sebagai berikut :

1. Turbin angin yang diteliti pada penelitian ini adalah turbin angin sumbu vertikal darrieus tipe H
2. Fluida kerja yang digunakan adalah udara.
3. Penelitian dilakukan pada *wind tunnel* dengan kecepatan angin bervariasi yaitu 3 m/s, 4 m/s, 5 m/s, 6 m/s, 7 m/s.
4. Diameter sapuan rotor (D) awal adalah 0.2 m.
5. Panjang *blade* (p) adalah 0.40 m; hambatan 30 ohm.
6. Variasi diameter sapuan rotor adalah 0.24 m; 0.28 m; 0.32 m.

1.4 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui bagaimanakah pengaruh variasi diameter sapuan rotor terhadap unjuk kerja turbin angin Darrieus tipe H.

1.5 Manfaat Penelitian

Manfaat dari Penelitian ini adalah :

1. Media untuk mengaplikasikan teori yang telah diperoleh selama perkuliahan, khususnya mengenai mekanika fluida.
2. Memperdalam pengetahuan tentang turbin angin sebagai sumber energi alternatif pengganti sumber energi fosil.

3. Sebagai sumber informasi lebih jauh mengenai turbin angin Darrieus tipe H, serta penerapannya di masyarakat untuk mencapai unjuk kerja maksimalnya.



BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitian Sebelumnya

Prasetya (2008) dalam penelitiannya melakukan variasi desain turbin pada *Vertical Axis Wind Turbine* (VAWT) lalu meneliti pengaruh variasi tersebut terhadap VAWT. Variasi desain yang dilakukan adalah variasi terhadap sudut kemiringan blade, yaitu 15° ; 30° ; 45° . Penelitian dilakukan pada kecepatan angin yang bervariasi antara 3-6 m/s. Hasilnya adalah diketahui bahwa performansi terbaik didapat sudut kemiringan 30° yaitu dapat mencapai 42.75 putaran/menit.

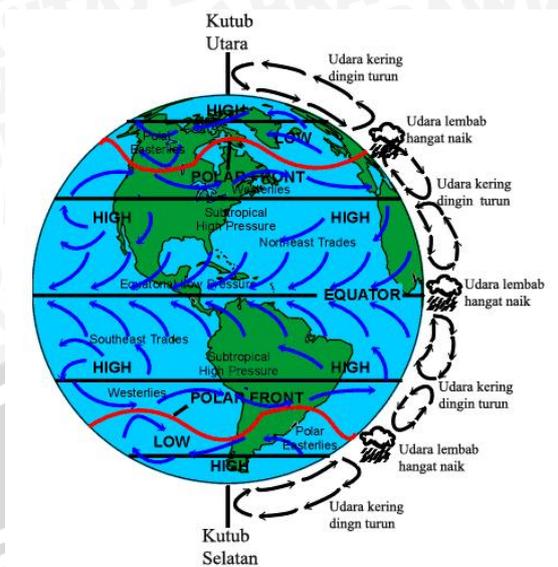
Suseno (2011) dalam penelitiannya melakukan variasi panjang sudu turbin angin darrieus tipe H lalu meneliti pengaruh variasi tersebut terhadap performansi turbin angin darrieus tipe-H. Hasilnya adalah diketahui bahwa pada kecepatan angin tetap, peningkatan panjang sudu akan menyebabkan peningkatan terhadap performansi turbin angin darrieus tipe-H.

2.2 Energi Angin

Energi angin adalah sumber energi alternatif yang bersih, ramah lingkungan dan jumlahnya tersedia tak terbatas di dunia ini. Akhir-akhir ini manusia berusaha untuk memaksimalkan potensi energi angin sebagai sumber energi pengganti energi fosil yang makin lama jumlahnya makin menipis.

Angin adalah udara yang bergerak dari tekanan udara yang lebih tinggi ke tekanan udara yang lebih rendah (Daryanto 2007). Perbedaan tekanan udara ini disebabkan oleh perbedaan suhu udara akibat pemanasan yang tidak merata pada permukaan bumi oleh sinar matahari.

Seperti yang telah disebutkan di atas, bahwa angin adalah udara yang bergerak, maka dari itu angin memiliki energi kinetik. Energi angin dapat dikonversi menjadi bentuk energi lain seperti energi listrik dan energi mekanik. Namun untuk mengkonversikan energi angin menjadi energi lainnya tidak bisa dilakukan begitu saja, dibutuhkan suatu alat yang dinamakan turbin angin. Karena berfungsi untuk mengkonversikan energi angin menjadi bentuk energi lainnya, maka turbin angin disebut sebagai Sistem Konversi Tenaga Angin (SKEA).



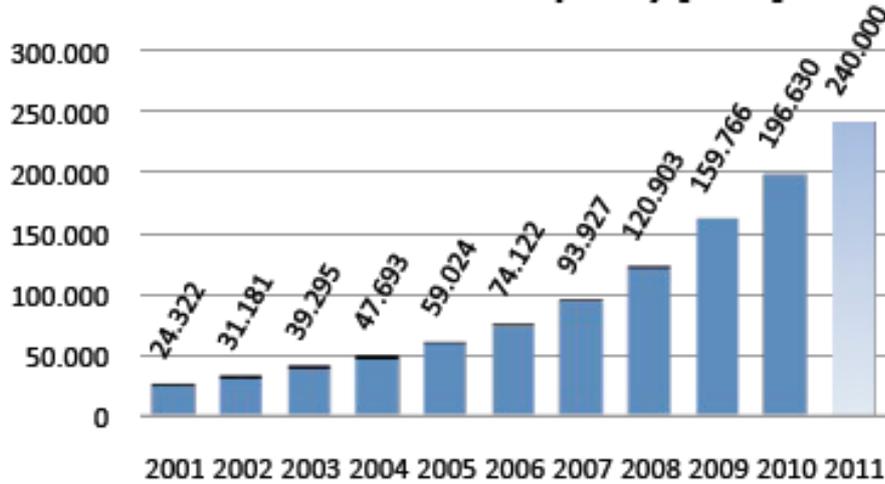
Gambar 2.1 Skema Terjadinya Angin.

Sumber : Kadir (1996)

Berbeda dengan energi air yang pemanfaatannya hanya bisa dilakukan di tempat-tempat tertentu di mana terdapat aliran air, pemanfaatan energi angin dapat dilakukan di berbagai tempat karena di semua tempat di bumi ini mengandung udara, baik di daerah landai maupun dataran tinggi, bahkan dapat di terapkan di laut. Pemanfaatan energi angin selain dapat mengurangi ketergantungan terhadap energi fosil, diharapkan juga dapat meningkatkan efektivitas dan efisiensi sistem pertanian, yang pada gilirannya akan meningkatkan produktivitas masyarakat, terutama di Indonesia yang terkenal sebagai negara agraris (Daryanto, 2007).

Akan tetapi pemanfaatan tenaga angin di Indonesia secara umum kurang mendapat perhatian. Padahal menurut Badan Pengkajian dan Penerapan Teknologi (BPPT), potensi energi angin yang dimanfaatkan di seluruh Indonesia adalah 9300 Mega Watt (MW). Tetapi pemanfaatan akan tenaga angin di Indonesia masih kurang dari 2 MW (Media Indonesia). Padahal seperti kita lihat di gambar 2.2 kapasitas pembangkitan listrik tenaga angin di dunia telah berkembang pesat dengan laju pertumbuhan kumulatif sampai dengan tahun 2011 mencapai 240.000 MW per tahun dari kapasitas terpasang 24.000 MW pada tahun 2005. (WWEA, 2011)

World Total Installed Capacity [MW]



Gambar 2.2 Laju Pertumbuhan Energi Angin Tahunan di Dunia

Sumber : WWEA (2011)

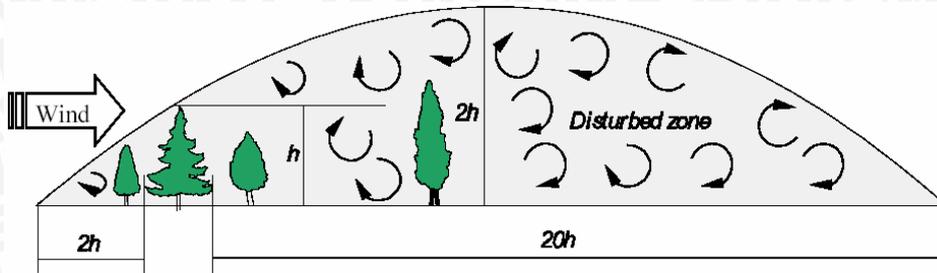
Pada altitude tinggi, arah angin akan dipengaruhi oleh arah putaran bumi dan bergerak sejajar dengan garis isobar. Pada belahan bumi utara, angin berputar melawan arah jarum jam, sementara di belahan bumi selatan angin berputar searah jarum jam. Arah angin ditentukan oleh arah darimana angin itu berhembus. Jadi angin barat berarti angin yang berhembus dari barat ke timur (Kadir, 1996). Secara fisik kecepatan angin dan fenomena yang terjadi dapat dilihat pada Tabel 2.1.

Tabel 2.1 Skala Beaufort

Skala Beaufort	Tingkatan	Kecepatan (knot)	Kecepatan (km/jam)	Kecepatan (m/s)	Tanda-tanda di darat
0	Tenang	<1	0-0,2	<1	Tenang, asap mengepul vertical
1	Teduh	1-3	0,3-1,5	1-5	Asap mengepul miring tetapi alat anemometer tidak berputar
2	Sepoi Lemah	4-6	1,6-3,3	6-11	Terpaan angin terasa di muka, anemometer berputar perlahan

3	Sepoi Lembut	7-10	3,4-5,4	12-19	Daun-daun kecil di pohon bergerak, bendera dapat bergerak
4	Sepoi Sedang	11-16	5,5-7,9	20-28	Debu dan kertas dapat terbang, ranting pohon bergerak
5	Sepoi Segar	17-21	8,0-10,7	29-38	Pohon-pohon kecil terlihat condong. Genangan air tanah terlihat mengombak kecil
6	Sepoi Kuat	22-27	10,8-13,8	39-49	Batang pohon terlihat bergerak, suara berdesing dari kawat telepon dapat terdengar, payung dapat terangkat
7	Angin ribut lemah	28-33	13,9-17,1	50-61	Pohon-pohon bergerak, berjalan terasa berat
8	Angin ribut	34-40	17,2-20,7	62-74	Batang pohon dapat tumbang,
9	Angin ribut kuat	41-47	20,8-24,4	75-88	Dapat membuat kerusakan cerobong, pot-pot beterbangan
10	Badai	48-55	24,5-28,4	89-102	Kerusakan lebih besar, tetapi di darat jarang
11	Badai amuk	56-63	28,5-32,6	103-117	Kerusakan berat tetapi sangat jarang terjadi di darat
12	Topan	>63	>32,6	>117	Hampir tidak pernah terjadi

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



Gambar 2.3 Aliran Berolak Akibat Rintangan

Sumber : Daryanto (2007).

Pengukuran data angin ini dilakukan bukan untuk dasar perancangan tetapi lebih ditujukan untuk keperluan sebagai berikut (Daryanto, 2007).

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

Distribusi frekuensi kecepatan angin disajikan dalam bentuk histogram. Histogram yang paling tinggi menunjukkan kecepatan angin yang paling sering terjadi tetapi bukan kecepatan angin rata-rata. Kecepatan angin rata-rata dapat dihitung dengan persamaan

$$\bar{U} = \frac{\sum tiU_i}{\sum ti} \quad (\text{Daryanto, 2007:9}) \quad (2-1)$$

Dengan : \bar{U} : kecepatan angin rata-rata (m/s)

U_i : kecepatan angin pengukuran (m/s)

t_i : waktu pengukuran (s)

Sehingga potensi energi angin di suatu lokasi adalah :

$$\frac{P_\infty}{A} = \frac{1}{2} \rho A U^3 \quad (\text{Daryanto, 2007:12}) \quad (2-2)$$

Dengan : P_∞ : daya angin tersedia (W)

A : luas permukaan yang diekspose (m²)

ρ : kerapatan massa udara (kg/m³)

\bar{U} : kecepatan angin rata-rata(m/det)

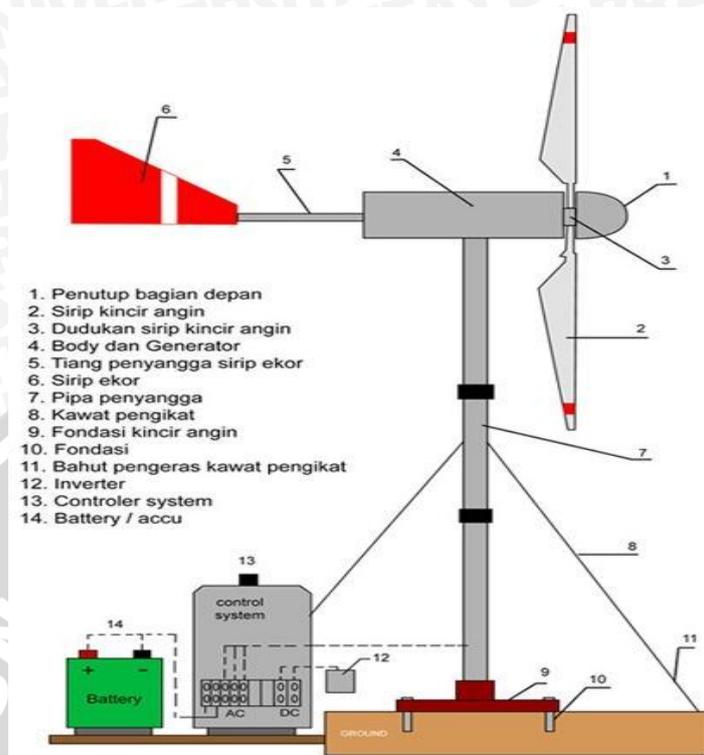
2.3 Klasifikasi Turbin Angin

Turbin angin adalah suatu mesin konversi energi yang digunakan untuk mengkonversi energi kinetik pada angin menjadi energi listrik. Turbin angin banyak digunakan di berbagai negara di eropa misalnya Denmark, Belanda dan negara-negara Eropa lainnya. Jika dulu turbin angin dikenal dengan nama *windmill* (kincir angin) dan banyak digunakan untuk berbagai keperluan pertanian seperti penggilingan atau irigasi, maka sekarang penggunaan turbin angin lebih kepada penyediaan energi listrik. Prinsip utama dari turbin angin adalah mengkonversi energi angin menjadi energi putar pada rotor yang mana nantinya akan rotor akan menggerakkan generator.

Memang pada saat ini pembangkit listrik tenaga angin masih belum sepopuler pembangkit listrik yang sudah ada sekarang ini seperti seperti PLTA, PLTU, PLTN dll, namun penelitian guna memaksimalkan kinerja dari turbin angin terus dilakukan karena dalam waktu dekat manusia akan dihadapkan dengan permasalahan menipisnya sumber daya alam yang tidak dapat diperbarui (misal : batubara dan minyak bumi) sebagai bahan dasar untuk membangkitkan energi listrik. Turbin angin dapat dibagi menjadi dua kategori utama yaitu : turbin angin sumbu horizontal (*Horizontal Axis Wind turbine*) dan turbin angin sumbu vertical (*Vertical Axis Wind Turbine*).

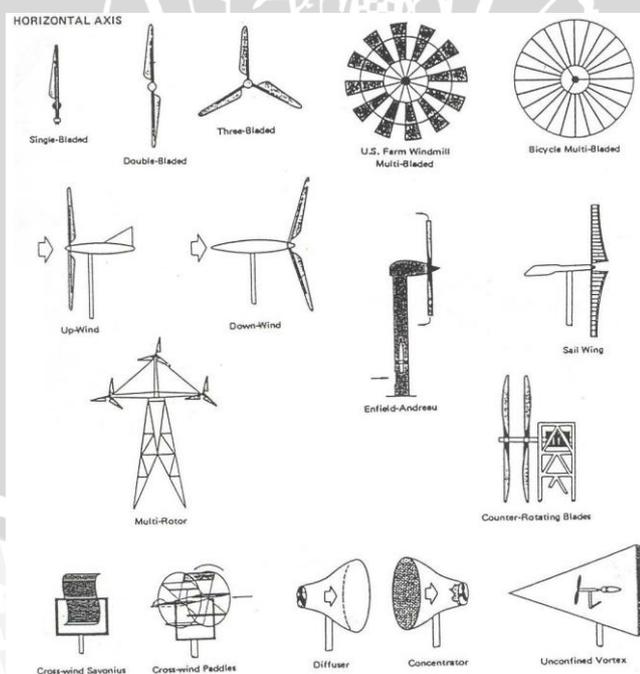
2.3.1 Turbin Angin Sumbu Horizontal (*Horizontal Axis Wind Turbine*)

Turbin angin sumbu horizontal (HAWT) ialah jenis turbin angin yang paling banyak digunakan. Turbin ini terdiri dari sebuah menara yang di puncaknya terdapat sebuah baling-baling yang berfungsi sebagai rotor dan menghadap atau membelakangi arah angin. Kebanyakan turbin angin jenis ini mempunyai dua atau tiga bilah baling-baling, walaupun ada juga turbin yang mempunyai bilah baling-baling kurang atau lebih daripada tersebut di atas. Contoh turbin angin horizontal (HAWT) dapat dilihat pada gambar 2.4 di bawah ini.



Gambar 2.4 Turbin Angin Sumbu Horizontal

Sumber : <http://k310mp0k1.blogspot.com/>



Gambar 2.5 Macam Turbin Angin Horizontal

Sumber : Daryanto (2007)

2.3.2 Turbin Angin Sumbu Vertical (*Vertical Axis Wind Turbine*)

Berbeda dengan turbin angin sumbu horisontal yang arahnya harus disesuaikan dengan arah angin, turbin angin sumbu vertikal atau VAWT mampu menangkap angin dari segala arah. Turbin angin sumbu vertikal dibedakan menjadi dua jenis yaitu tipe *Darrieus* dan *Savonius*.

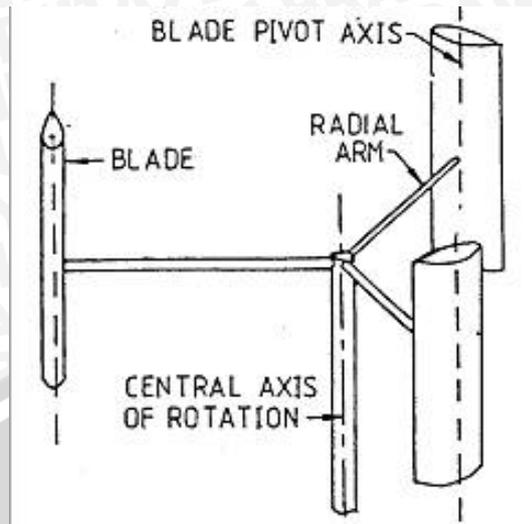
a. Turbin angin darrieus

Turbin angin darrieus pertama kali ditemukan oleh Georges Darrieus pada tahun 1927. Seperti halnya turbin angin sumbu vertikal, turbin angin darrieus mempunyai sudu yang tegak lurus terhadap arah angin. Turbin angin darrieus mempunyai sudu berpenampang *airfoil*. *Airfoil* adalah suatu body aerodinamika yang digunakan untuk menghasilkan daya angkat pada suatu obyek. Turbin angin darrieus menggunakan energi angkat yang dihasilkan oleh *airfoil* untuk menggerakkan rotor. Mengenai bagaimana gaya angkat pada sudu mampu menggerakkan turbin angin darrieus akan dijelaskan pada bagian berikutnya.



Gambar 2.6 Turbin angin Darrieus

Sumber : www.nbmachines.com

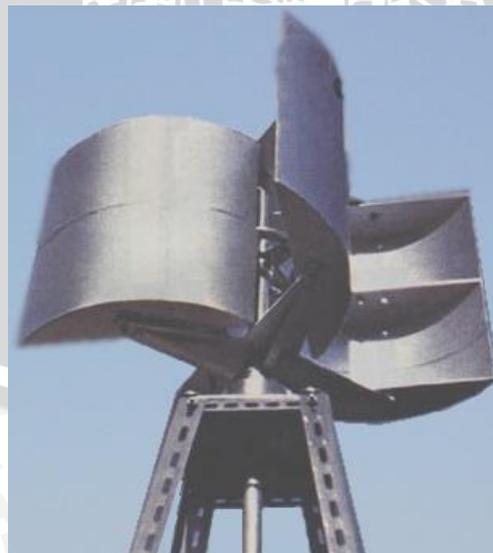


Gambar 2.7 Bagian-bagian Turbin Angin Darrieus

Sumber : www.reuk.co.uk

b. Turbin Angin Savonius

Turbin angin Savonius pertama kali ditemukan di negara Finlandia oleh S. J. Savonius pada waktu yang hampir bersamaan dengan penemuan turbin angin Darrieus. Turbin ini memiliki ciri khas yang mudah dikenali yaitu jika dilihat dari atas, turbin angin ini akan terlihat seperti huruf S. Keunggulan yang utama dari turbin angin sumbu vertikal Savonius adalah turbin jenis ini mempunyai torsi awal yang sangat besar.

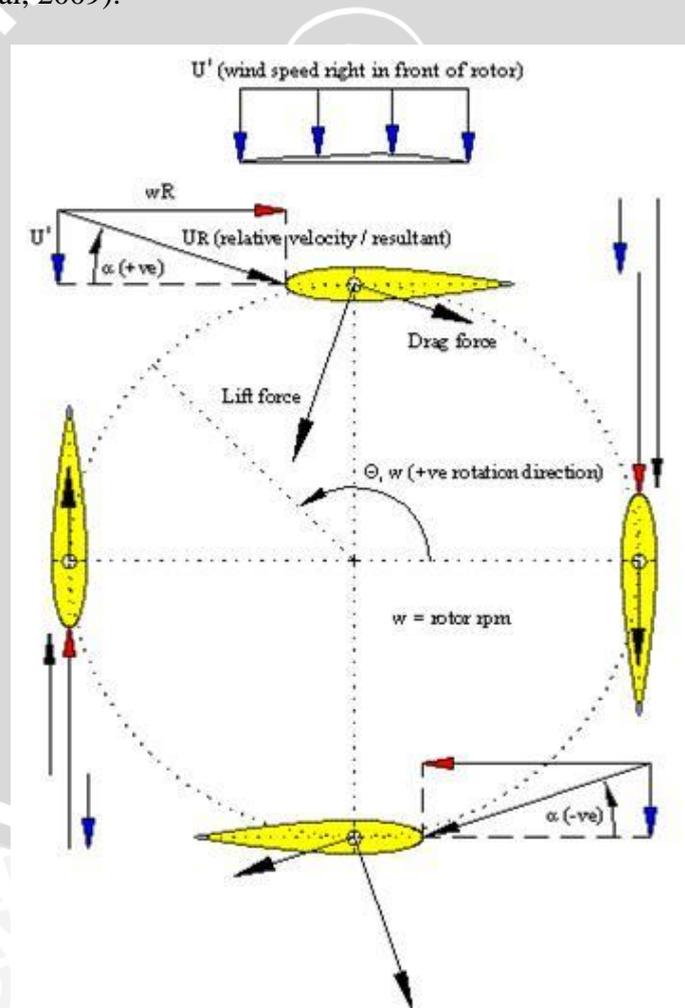


Gambar 2.8 Turbin angin savonius

Sumber : www.thegreenenergywebsite.com

2.4 Gaya Aerodinamik pada turbin angin Darrieus

Prinsip kerja dari rotor Darrieus dapat disederhanakan sebagai berikut. Turbin angin darrieus memanfaatkan gaya angkat (*lift*) yang timbul pada saat angin menumbuk sudu turbin. Pertama, asumsikan arah angin datang dari depan rotor baling-baling seperti pada gambar di bawah. Seperti yang telah dijelaskan sebelumnya bahwa turbin angin darrieus tidak mempunyai sistem *self starting* maka untuk mendapatkan putaran awal, digunakanlah *induction motor*. Ketika pergerakan rotor lebih cepat daripada kecepatan angin yaitu ratio kecepatan *blade* dengan kecepatan angin bebas, $tsr > 3$. Maka vektor-vektor percepatan yang timbul dapat dilihat pada gambar 2.9. Gambar tersebut menunjukkan garis vektor percepatan dari bentuk *airfoil* baling-baling pada posisi angular yang berbeda-beda (Arsad et al, 2009).



Gambar 2.9 Gambar gaya-gaya pada setiap blade turbin angin darrieus

Sumber : Arsad et al (2009)

Dengan :

1. Panah biru : Kecepatan relatif
2. Panah merah : Kecepatan relatif baling-baling
3. Panah Hitam : Resultan Kecepatan udara relatif ke baling-baling
4. Panah hijau : Gaya angkat (*lift force*)
5. Panah abu-abu : Gaya seret (*drag force*)

Dengan nilai t_{sr} yang tinggi, baling-baling akan “memotong” melalui angin dengan sudut serang (*angle of attack*) yang kecil. Resultan gaya angkat (*lift*) akan membantu perputaran baling-baling, sedangkan gaya seret (*drag*) akan melawan perputaran dari baling-baling itu. Ketika gaya angkat nol pada sisi kiri (0°) dan sisi kanan (180°) dengan baling-baling bergerak paralel menuju arah angin, torsi berubah menjadi negatif di sekitar posisi ini. Mendekati posisi depan (90°) dan posisi di belakang (270°), komponen dari gaya angkat (*lift*) lebih besar dibandingkan gaya seret (*drag*) sehingga menghasilkan torsi. Torsi total per satu putaran akan bernilai positif jika baling-baling diposisikan pada tempat yang tepat sehingga rotor akan berputar pada arah yang benar (Arsad et al, 2009).

Keuntungan turbin angin Darrieus (Johnson, 2006)

- a. Tidak memerlukan pengarah angin dan konstruksinya relatif sederhana
- b. Biaya pembuatannya lebih murah dibandingkan dengan turbin angin sumbu horisontal dan memiliki desain rotor yang lebih mudah.
- c. Dapat digunakan pada kecepatan angin rendah
- d. Komponen – komponen *power train* (*generator, gearbox, main bearing, brakes*) terletak pada *ground* sehingga memudahkan pengawasan dan perawatan.
- e. Memiliki efisiensi yang hampir sama dengan turbin angin horisontal.

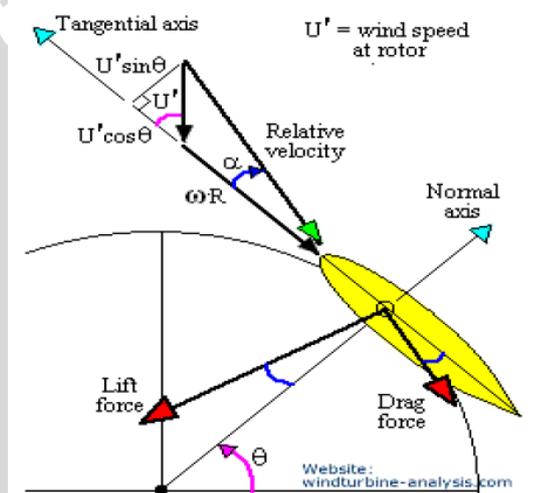
Kerugian turbin angin darrieus (Kragten, 2004)

- a. Tidak memiliki sistem *self starting*
- b. Proses pembuatan sudu yang lumayan rumit
- c. Sudut serang berubah ubah seiring dengan berputarnya turbin.

2.5 Teori Elemen Bilah

Teori elemen bilah adalah metode sederhana yang digunakan untuk menganalisis rotor, propeler, fan dan kompresor. Teori ini digunakan untuk menganalisa gaya aerodinamika pada *rotating machine*. Pada teori ini, gaya angkat dan gaya hambat dihitung per elemen sudu kemudian diintegrasikan sepanjang sudu.

Prinsip teori ini adalah membagi sudu menjadi beberapa bagian dan menghitung gaya-gaya yang timbul pada setiap sub bagian untuk kemudian disatukan kembali. Penerapan teori elemen bilah pada turbin angin darrieus tipe – H ditunjukkan pada gambar 2.10 di bawah ini :



Gambar 2.10 Gaya pada sudu turbin angin darrieus

Sumber : Arsad et al (2009)

Dari gambar 2.9 dapat diturunkan kecepatan relatif

$$U_r = \sqrt{(U' \sin \theta)^2 + (U' \cos \theta + \omega R)^2} \quad (\text{Arsad et al, 2009:4}) \quad (2-3)$$

Sudut serang α ,

$$\tan \alpha = \frac{-U' \sin \theta}{U' \cos \theta + \omega R} \quad (\text{Arsad et al, 2009:4}) \quad (2-4)$$

Koefisien normal dan tangensial,

$$F_{\text{normal}} = -F_l \cos \alpha - F_d \sin \alpha \quad (\text{Arsad et al, 2009:4}) \quad (2-5)$$

$$F_{\text{tangensial}} = -F_l \sin \alpha - F_d \cos \alpha \quad (\text{Arsad et al, 2009:4}) \quad (2-6)$$

Sehingga Torsi yang diperoleh searah putaran θ tertentu suatu airfoil adalah :

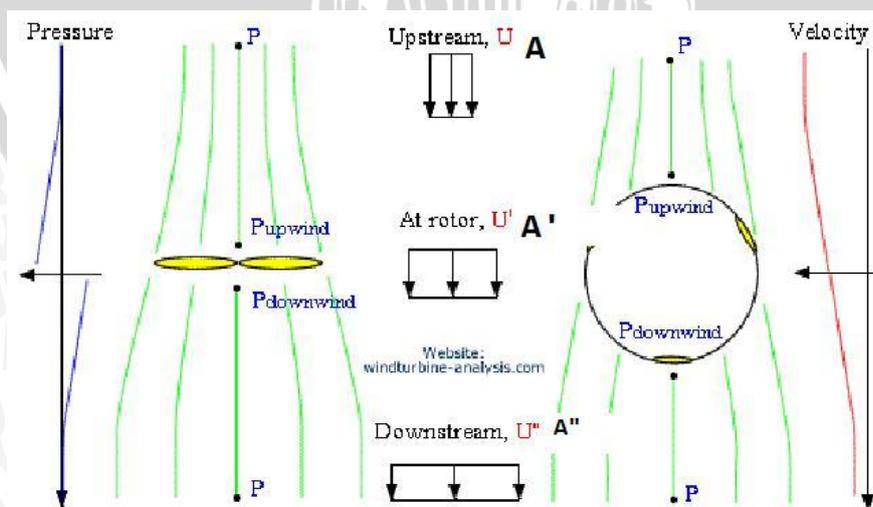
$$T = r (F_l \sin \alpha - F_d \cos \alpha) \quad (\text{Arsad et al, 2009:4}) \quad (2-7)$$

- Dengan
- Ur : kecepatan relatif udara (m/s)
 - P : massa jenis udara (kg/m³)
 - U' : kecepatan udara pada sudu (m/s)
 - ω : kecepatan tangensial turbin (rad/s)
 - F_l : Gaya angkat airfoil (N)
 - R : Jari-jari Turbin (m)

2.6 Teori momentum

Teori momentum adalah metode analisis dengan cara memperhitungkan perubahan momentum udara selama melewati turbin angin. Teori momentum mengasumsikan bahwa aliran adalah tidak viskos dan tunak, juga rotor dianggap sebagai sebuah piringan dengan jumlah sudu tak terbatas. Pertimbangan yang digunakan dalam teori momentum yang juga diaplikasikan pada teori elemen sudu adalah (Liang, 2002) :

1. Daya merupakan fungsi sederhana dari *thrust*
2. Kecepatan angin dianggap seragam



Gambar 2.11 Arah angin sebelum dan sesudah melewati turbin

Sumber : Liang (2002)

Seperti pada gambar 2.10 terlihat bahwa jika U adalah kecepatan angin di depan rotor, U' adalah kecepatan angin pada saat melalui rotor dan U'' adalah kecepatan angin di belakang rotor, maka berdasarkan persamaan kontinuitas :

$$A U = A' U' = A'' U'' \quad (\text{Liang, 2002}) \quad (2-8)$$

Selanjutnya berdasarkan teorema Euler, gaya yang bekerja pada rotor adalah :

$$F = \rho A' U' (U - U'') \quad (\text{Liang, 2002}) \quad (2-9)$$

Oleh karena itu daya kinetik angin yang diserap oleh rotor adalah :

$$P_t = F U' = \rho A' U'^2 (U - U'') \quad (\text{Liang, 2002}) \quad (2-10)$$

Selisih daya kinetik di depan dan di belakang rotor dapat dihitung dengan persamaan energi kinetik :

$$\int_{U_1}^{U_2} \rho U dU = \int_{P_1}^{P_2} dP \quad (\text{Liang, 2002}) \quad (2-11)$$

Dengan integral diperoleh :

$$\rho \left(\frac{U_1 + U_2}{2} \right) (U_1 - U_2) = P_2 - P_1 \quad (\text{Liang, 2002}) \quad (2-12)$$

Lalu kita substitusikan kecepatan angin di atas ke dalam persamaan bernoulli, sehingga diperoleh :

$$\rho \left(\frac{U + U'}{2} \right) (U - U') = P_{up} - P \quad (\text{Liang, 2002}) \quad (2-13)$$

dan

$$\rho \left(\frac{U' + U''}{2} \right) (U' - U'') = P - P_{down} \quad (\text{Liang, 2002}) \quad (2-14)$$

Dengan menambahkan kedua persamaan untuk menghilangkan P maka diperoleh :

$$\rho \left(\frac{U + U'}{2} \right) (U - U') + \rho \left(\frac{U' + U''}{2} \right) (U' - U'') = P_{up} - P_{down} \quad (\text{Liang, 2002}) \quad (2-15)$$

$$\frac{\rho U^2}{2} - \frac{\rho U'^2}{2} = P_{up} - P_{down} \quad (\text{Liang, 2002}) \quad (2-16)$$



Dengan membandingkan dengan perbedaan energi kinetik di depan dan di belakang rotor :

$$\rho U'(U - U'') = P_{up} - P_{down} \quad (\text{Liang, 2002}) \quad (2-17)$$

Maka diperoleh :

$$U' = \left(\frac{U+U''}{2} \right) \quad (\text{Liang, 2002}) \quad (2-18)$$

Jika persamaan 2-18 disubstitusikan ke dalam 2-9 dan 2-10 diperoleh :

$$F = \frac{1}{2} \rho A'(U^2 - U''^2) \quad (\text{Liang, 2002}) \quad (2-19)$$

dan

$$P_t = \frac{1}{4} \rho A'(U^2 - U''^2)(U + U'') \quad (\text{Liang, 2002}) \quad (2-20)$$

Untuk kecepatan U tertentu dapat dikaji besarnya P_t sebagai fungsi dari U'' dengan mendefinisikan persamaan :

$$\frac{dP_t}{dU''} = \frac{1}{4} \rho A'(U^2 - U''^2) \cdot (-1) + (-2U'')(U + U'')$$

$$\frac{dP_t}{dU''} = \frac{1}{4} \rho A'(-3U''^2 - 2U''U - U) \quad (\text{Liang, 2002}) \quad (2-21)$$

Pada $\frac{dP_t}{dU''} = 0$; maka :

$$\frac{1}{4} \rho A'(-3U''^2 - 2U''U - U) = 0$$

Untuk persamaan di atas dapat diperoleh akar-akarnya dengan persamaan di bawah ini :

$$X_{1,2} = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a} \text{ dengan :}$$

$$a = 3$$

$$b = 2U$$

$$c = U$$

sehingga diperoleh dua akar persamaan yaitu $U'' = -U$ yang berarti menghasilkan energi kinetik minimum dan $U'' = \frac{U}{3}$ yang merupakan harga yang menghasilkan energi kinetik maksimum. Dengan demikian energi kinetik maksimum yang diperoleh adalah :

$$P_{t \text{ maks}} = \frac{8}{27} \rho A' U^3 \quad (\text{Liang, 2002}) \quad (2-22)$$



2.7 Efisiensi Betz

Albert betz adalah orang pertama yang mengemukakan teori global tentang turbin angin. Betz mengasumsikan bahwa rotor turbin angin merupakan pengkonversi energi yang ideal di mana berarti

1. tidak memiliki hub (tempat menyambung rotor ke pangkal sudu).
2. memiliki jumlah sudu tak terbatas sehingga tidak menghasilkan *drag resistance* pada angin yang melewati sudu.

Efisiensi turbin angin adalah perbandingan antara energi kinetik yang diserap oleh turbin angin terhadap energi kinetik angin yang tersedia. Energi kinetik maksimal yang mampu dicapai turbin angin telah dijelaskan pada persamaan (2-22) sedangkan untuk energi kinetik angin tersedia dapat dilihat pada persamaan (2-2). Sehingga persamaan untuk mendapatkan efisiensi maksimum turbin angin adalah sebagai berikut :

$$C_p = \frac{\frac{8}{27}\rho A U^3}{\frac{1}{2}\rho A U^3} \times 100\% \quad (\text{Liang, 2002}) \quad (2-23)$$

$$C_p = \frac{16}{27} \times 100\% \quad (\text{Liang, 2002}) \quad (2-24)$$

Nilai 16/27 adalah batas maksimum Betz (*Betz limit*) yang menyatakan daya maksimum yang mampu diserap oleh turbin angin tidak lebih dari 59,3% dari daya angin yang tersedia.

2.8 Daya Available Turbin Angin

Daya yang dihasilkan dari konversi oleh rotor turbin angin sebanding dengan pangkat tiga kecepatan angin. Daya maksimal yang dapat dihasilkan rotor turbin adalah :

$$P_t = \frac{1}{2} C_p \rho A U^3 \quad (\text{Hunt, 1981:104}) \quad (2-25)$$

Dengan P_t : daya keluaran rotor turbin angin (watt)

C_p : koefisien daya turbin angin

P : massa jenis udara (kg/m^3)

A' : Luas sapuan rotor (m^2)

U : Kecepatan angin (m/s)

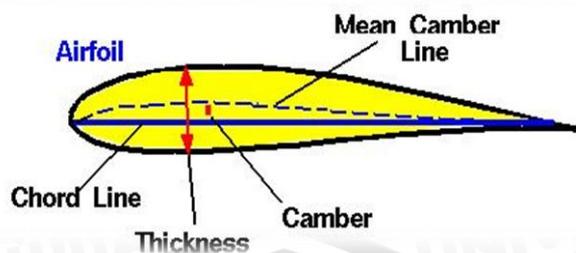
2.9 Airfoil

2.9.1 Airfoil NACA (*National Advisory Committee for Aeronautics*)

NACA *airfoil* adalah salah satu bentuk bodi aerodinamika sederhana yang berguna untuk memberikan gaya angkat tertentu terhadap suatu bodi lainnya dan dengan bantuan penyelesaian matematis sangat memungkinkan untuk memprediksi berapa besarnya gaya angkat yang dihasilkan oleh suatu bodi *airfoil*. Geometri *airfoil* memiliki pengaruh besar terhadap karakteristik aerodinamika dengan parameter penting berupa CL, dan kemudian akan terkait dengan lift (gaya angkat yang dihasilkan) (Mulyadi, 2010).

Hingga sekitar Perang Dunia II, *airfoil* yang banyak digunakan adalah hasil riset Gottingen. Selama periode ini banyak pengujian *airfoil* dilakukan diberbagai negara, namun hasil riset NACA lah yang paling terkemuka. Pengujian yang dilakukan NACA lebih sistematis dengan membagi pengaruh efek kelengkungan dan distribusi ketebalan atau *thickness* serta pengujiannya dilakukan pada bilangan Reynold yang lebih tinggi dibanding yang lain. Hal ini sering dirangkum oleh beberapa parameter seperti: ketebalan maksimum, maksimum bentuk melengkung, posisi max ketebalan, posisi maks bentuk melengkung, dan hidung jari-jari. Seperti terlihat pada gambar 2.10 suatu *airfoil* terdiri dari (Mulyadi, 2010):

1. Permukaan atas (*Upper Surface*)
2. Permukaan bawah (*Lowerer Surface*)
3. *Mean camber line* adalah tempat kedudukan titik-titik antara permukaan atas dan bawah *airfoil* yang diukur tegak lurus terhadap *mean camber line* itu sendiri.
4. *Leading edge* adalah titik paling depan pada *mean camber line*, biasanya berbentuk lingkaran dengan jari-jari mendekati 0,02 cm.
5. *Trailing edge* adalah titik paling belakang pada *mean camber line*
6. *Camber* adalah jarak maksimum antara *mean camber line* dan garis *chord* yang diukur tegak lurus terhadap garis *chord*.
7. Ketebalan (*thickness*) adalah jarak antara permukaan atas dan permukaan bawah yang diukur tegak lurus terhadap garis *chord*.



Gambar 2.12 NACA Airfoil Geometry

Sumber: Benson (2010)

2.9.2 Karakteristik Airfoil

Di terowongan angin atau pada sebuah penerbangan, sebuah *airfoil* secara sederhana adalah sebuah objek *streamline* yang disisipkan pada aliran udara yang bergerak. Jika *airfoil*nya berbentuk tetesan air maka perubahan kecepatan dan tekanan dari aliran udara yang melewati bagian atas dan bawah akan sama di kedua sisi. Tapi kalau bentuk tetesan air itu dipotong di tengah dengan sama rata, hasilnya adalah sebuah bentuk sederhana *airfoil* (sayap). Jika *airfoil* itu dinaikkan (mendongak) maka aliran udara akan menabrak dengan sebuah sudut tertentu (*angle of attack*), molekul udara yang bergerak melewati permukaan atas akan dipaksa untuk bergerak dengan kecepatan yang lebih tinggi dibandingkan dengan molekul udara yang bergerak di bawah *airfoil*, hal ini karena molekul di atas harus menjalani jarak yang lebih jauh karena lengkungan dari permukaan yang di atas. Pertambahan kecepatan ini mengurangi tekanan di atas *airfoil* (Mulyadi, 2010).

Momentum adalah resistansi dari sebuah benda yang bergerak ketika arah dan besar gerakannya diubah. Ketika setiap benda dipaksa untuk bergerak dalam gerakan melingkar, benda tersebut akan memberikan reaksi resistansi dengan arah keluar yang berlawanan dengan pusat putaran. Ini disebut gaya sentrifugal. Seperti pada gambar 2.11 terlihat ketika partikel udara bergerak dengan arah melengkung AB, gaya sentrifugal cenderung membuangnya ke arah panah antara A dan B, sehingga menyebabkan udara untuk mendesak lebih dari tekanan normal di leading edge-nya *airfoil*. Tapi setelah partikel udara melewati titik B (titik berbalik arah dari arah lengkungan/kurva) gaya sentrifugal cenderung untuk membuang partikel pada arah panah antara B dan C (menyebabkan berkurangnya

tekanan pada *airfoil*). Efek ini berlaku sampai partikel udara mencapai titik C, titik kedua berbalik arah dari lengkungan aliran udara. Kembali lagi, gaya sentrifugal dibalikkan dan partikel udara cenderung untuk memberi sedikit lebih tekanan dari normal pada trailing edge dari *airfoil* tersebut, sebagaimana digambarkan dengan panah pendek antara C dan D (Suseno, 2010).



Gambar 2.13 Momentum Mempengaruhi Aliran Udara Pada *Airfoil*

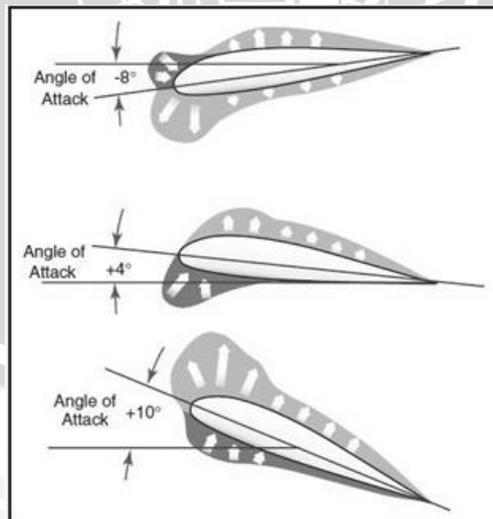
Sumber: Suseno (2010)

Tekanan udara dari permukaan bagian atas *airfoil* disebarkan sehingga tekanan lebih besar di leading edge daripada tekanan atmosfer sekitarnya, menyebabkan tahanan yang kuat pada gerakan ke depan, tapi tekanan udara lebih sedikit daripada tekanan atmosfer sekitarnya di sebagian besar permukaan atas (B ke C). Seperti terlihat pada penggunaan teori Bernoulli pada sebuah bejana venturi, pertambahan kecepatan udara pada bagian atas dari *airfoil* menyebabkan turunnya tekanan. Tekanan yang turun ini adalah salah satu komponen dari total daya angkat. Tapi adalah sebuah kesalahan untuk berasumsi bahwa perbedaan tekanan antara permukaan bagian atas dan bagian bawah tersebut adalah satu-satunya hasil total dari produksi daya angkat (Suseno, 2010).

Sebuah tekanan positif dihasilkan karena sifat udara yang mengalir di bawah sayap, terutama pada *angle of attack* yang tinggi. Tapi ada aspek lain dari aliran udara ini yang harus dipelajari. Pada sebuah titik di dekat *leading edge*, aliran udara pada hakekatnya sebenarnya berhenti (*stagnation point*) dan dengan bertahap kecepatannya akan bertambah. Di titik yang sama di *trailing edge*, kembali lagi aliran udara itu mencapai kecepatan yang sama dengan kecepatan aliran udara di permukaan atasnya. Sesuai dengan prinsip Bernoulli, ketika aliran udara makin pelan di bawah sayap, sebuah tekanan positif ke atas terjadi menekan sayap, jika kecepatan fluida berkurang, tekanan harus bertambah (Suseno, 2010).

Pada dasarnya, hal ini hanyalah “memperkuat tekanan positif” karena kejadian ini menambah perbedaan tekanan antara permukaan atas dan bawah dari *airfoil*, sehingga menambah total daya angkat dibandingkan jika tidak ada penambahan tekanan di bagian bawah permukaan. Kedua prinsip Bernoulli dan hukum Newton bekerja jika daya angkat diproduksi oleh sebuah *airfoil*. Dari percobaan yang dilakukan pada model di terowongan angin sebenarnya, telah diketahui bahwa pada waktu udara mengalir sepanjang permukaan dari sebuah sayap dengan *angle of attack* yang berbeda-beda, maka ditemukan bagian-bagian sepanjang permukaan di mana tekanannya adalah negatif atau kurang dari tekanan atmosfer dan juga bagian-bagian dengan tekanan positif atau lebih besar dari tekanan atmosfer (Suseno, 2010).

Tekanan negatif pada permukaan atas sayap membuat gaya yang lebih besar dari pada tekanan positif yang mengenai permukaan bawah sayap. Gambar 2.12 menunjukkan penyebaran tekanan sepanjang *airfoil* pada 3 *angle of attack* yang berbeda-beda. Pada umumnya, pada *angle of attack* yang besar, pusat tekanan (*Center of Pressure*) pindah ke depan sedangkan pada *angle of attack* yang kecil pusat tekanan berpindah ke bagian belakang. Dalam rancangan struktur sayap, pergeseran pusat tekanan ini sangat penting, karena mempengaruhi posisi beban udara yang ditanggung oleh sayap pada keadaan *angle of attack* yang kecil dan *angle of attack* yang besar (Suseno, 2010).

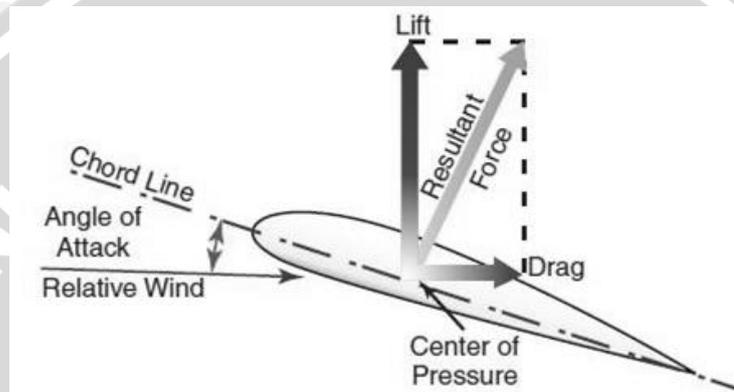


Gambar 2.14 Distribusi Tekanan Pada *Airfoil*

Sumber: Suseno (2010)

Keseimbangan aerodinamis dan kemampuan kendali diatur oleh perbedaan dari pusat tekanan. Pusat tekanan ditentukan oleh perhitungan dan percobaan di terowongan angin dengan cara memberikan *angle of attack* yang berbeda-beda pada *airfoil* di sepanjang jangkauan kerja normal. Pada waktu *angle of attack* diubah, karakteristik penyebaran tekanan juga berubah (Suseno, 2010).

Gaya tekanan positif (+) dan negatif (-) dijumlahkan pada setiap nilai *angle of attack* dan didapat resultan hasilnya. Total resultan tekanan diperlihatkan oleh vektor resultan gaya pada gambar 2.13 (Suseno, 2010).



Gambar 2.15 Gaya Pada Airfoil

Sumber: Suseno (2010)

2.10 Performansi Turbin Angin Darrieus Tipe-H

Dalam penelitian ini parameter-parameter performansi / unjuk kerja turbin angin Darrieus yang dibahas adalah Daya poros, Efisiensi (η).

2.10.1 Daya Poros Turbin Angin

Daya poros disini diukur dengan menggunakan multimeter untuk memperoleh voltase yang dihasilkan. Dengan perumusannya menjadi:

$$P_t = \frac{V \cdot I}{\eta_g \cdot \eta_T} \quad (\text{Suseno, 2011})$$

(2-26)

- Dengan :
- P_t : Daya poros (Watt)
 - V : voltase (volt)
 - I : arus (A)
 - η_g : efiesni generator (%)
 - η_T : efisiensi transmisi (%)

2.10.2 Efisiensi Turbin Angin (η)

Perbandingan antara kerja berguna dengan jumlah energi yang masuk ke mesin adalah definisi dari efisiensi. Lebih sederhananya adalah perbandingan antara output dengan input yang dinyatakan dalam persen. Efisiensi dapat dinyatakan dalam persamaan berikut (Fox, 1994):

$$\eta = \frac{P_{\text{output}}}{P_{\text{input}}} \cdot 100\% \quad (\text{Ragheb, 2010}) \quad (2-27)$$

$$\eta = \frac{P_t}{P_{\text{angin}}} \cdot 100\% \quad (\text{Ragheb, 2010}) \quad (2-28)$$

2.11 Hipotesis

Apabila diameter sapuan rotor (D) pada turbin angin sumbu vertikal Darrieus tipe H semakin meningkat maka akan menyebabkan meningkatnya luas sapuan (A') dari rotor turbin angin. Karena luas sapuan rotor sebanding dengan daya dari turbin angin (P_t), sehingga peningkatan luas sapuan rotor akan berakibat pada meningkatnya daya turbin angin. Berdasarkan persamaan (2-28) dapat kita lihat bahwa daya turbin angin sebanding dengan efisiensinya, maka peningkatan daya dari turbin angin akan mengakibatkan meningkatnya efisiensi. Sehingga apabila digambarkan dalam grafik akan terbentuk kurva linier. Namun dalam kenyataannya mungkin terdapat kendala yang dapat menyebabkan menurunnya daya dari turbin angin misalnya gaya gesek yang terjadi pada poros saat dihubungkan dengan generator.