

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitian Sebelumnya

Wisnu (2012), dalam penelitiannya turbin angin *Darrieus* divariasikan diameter sapuan rotornya, yaitu 0,20; 0,24; 0,28; 0,32 m dengan kecepatan angin 3; 4; 5; 6; dan 7 m/s. Sedangkan variabel terikat yang digunakan sebagai parameter unjuk kerja pada penelitian ini adalah daya poros dan efisiensi. Dari hasil penelitian variasi diameter sapuan rotor turbin angin *Darrieus* type H ini didapatkan peningkatan daya poros dan pada tiap peningkatan diameter sapuan rotor, namun efisiensi yang dihasilkan menurun. Efisiensi tertinggi yang didapat pada penelitian ini adalah 30,52 % pada diameter 0,3 m dan daya poros tertinggi adalah 0,55 Watt pada variasi diameter sapuan rotor 0,32 m dengan kecepatan angin 7 m/s.

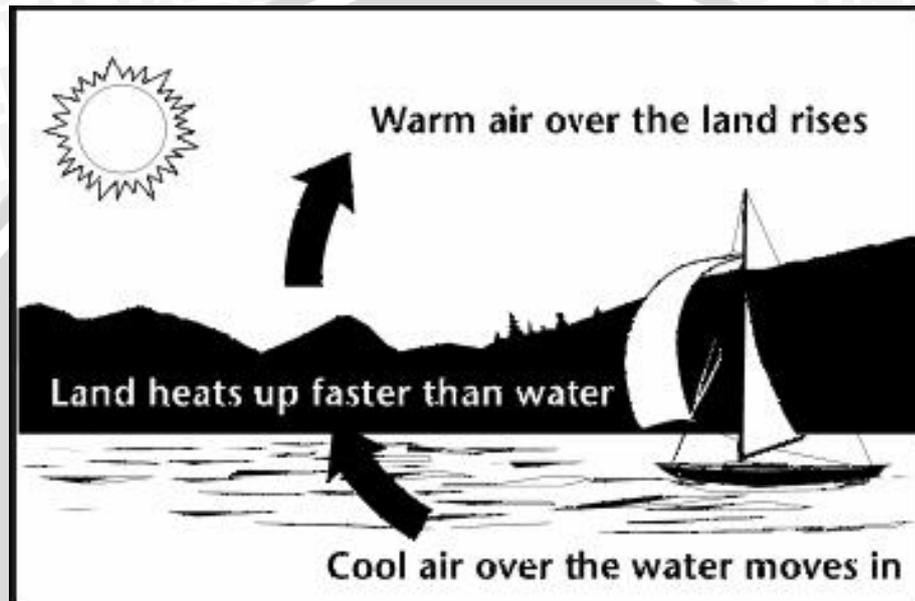
Afrizal (2012), dalam penelitiannya yang dilakukan adalah penelitian eksperimen menggunakan variabel terikat daya dan efisiensi, variabel bebas adalah jumlah *blade*, kecepatan angin, sudut *pitch* dan variasi beban. Penelitian menggunakan kipas angin yang diarahkan ke turbin angin *vertical axis* ini, kemudian diberi beban 200, 250 dan 300 gram. Beban tersebut akan terangkat dan menempuh jarak 10 cm, pada saat itu kita ukur berapa lama beban ini terangkat. Dan dari situ kita menghitung berapa besar daya dan efisiensi yang dihasilkan turbin angin ini. Dari penelitian ini, dihasilkan bahwa turbin angin vertikal aksis ini menghasilkan daya maksimal sebesar $4,9 \times 10$ Watt pada beban yang terangkat 300 gram dengan sudut *pitch* 15° . Sedangkan efisiensi maksimal yang dihasilkan adalah 7,84 %.

2.2 Angin

2.2.1 Proses Terbentuknya Angin

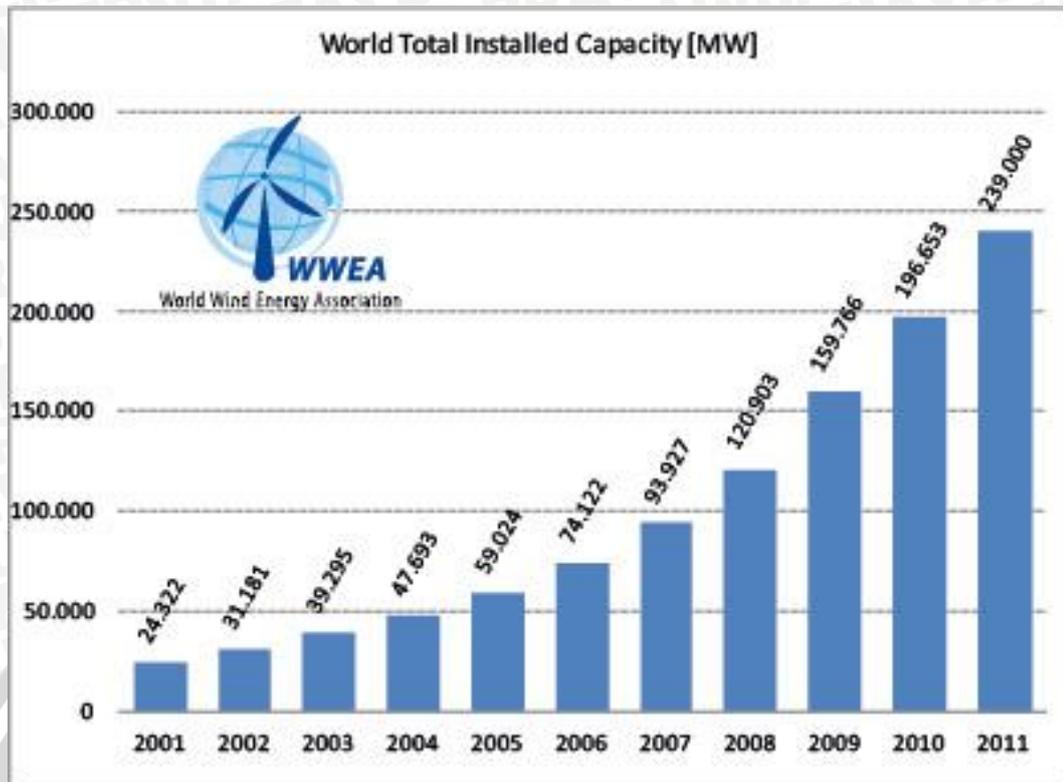
Angin memiliki hubungan erat dengan sinar matahari karena daerah yang terkena banyak sinar matahari akan memiliki suhu yang lebih tinggi serta tekanan udara yang lebih rendah dari daerah disekitarnya sehingga menyebabkan terjadinya aliran udara. Angin juga dapat disebabkan oleh pergerakan benda, sehingga mendorong udara di sekitarnya untuk bergerak ke tempat lain.

Di daerah khatulistiwa yang panas, udaranya menjadi panas, mengembang dan menjadi ringan, naik ke atas dan bergerak ke daerah yang lebih dingin, misalnya daerah kutub sebaliknya daerah kutub yang dingin, udaranya menjadi dingin dan turun kebawah. Dengan demikian terjadi suatu perputaran udara dari kutub utara ke garis khatulistiwa menyusuri permukaan bumi, dan sebaliknya, suatu perpindahan udara dari garis khatulistiwa kembali ke kutub utara melalui lapisan udara yang lebih tinggi, bisa dilihat pada gambar 2.1.



Gambar 2.1 Skema terjadinya angin.
Sumber: Kadir, 1996

Pemanfaatan tenaga angin di Indonesia secara umum kurang mendapat perhatian. Indonesia adalah negara yang terletak di garis khatulistiwa, memiliki potensi energi angin yang memadai. 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 239.000 MW per tahun.



Gambar 2.2 Laju pertumbuhan energi angin tahunan di Dunia.
 Sumber: World Wind Energy Association, 2011

Disamping itu hasil pemetaan Lembaga Penerbangan dan Antariksa Nasional (LAPAN) pada tabel 2.1 ada 120 lokasi menunjukkan beberapa wilayah memiliki kecepatan angin diatas 5 m/s, yaitu Nusa Tenggara Timur, Nusa Tenggara Barat, Sulawesi Selatan, dan Pantai Selatan Jawa. Merupakan faktor pendukung pengembangan teknologi tenaga angin di Indonesia.

Tabel 2.1 Pengelompokkan potensi energi angin, pemanfaatan dan lokasi potensial.

KELAS	Kec. Angin (m/s)	Daya Spesifik (W/m ²)	Kapasitas (kW)	Lokasi
Skala Kecil	2,5 - 4,0	< 75	0 s/d 10	Jawa, NTB, NTT, Maluku, Sulawesi
Skala Menengah	4,0 – 5,0	75 -150	10 -100	NTB, NTT, Sulsel, Sultra
Skala Besar	>5,0	> 150	> 100	Sulsel, NTB, NTT, Pantai Selatan Jawa

Sumber: LAPAN, 2006

Secara fisik kecepatan angin dan fenomena yang terjadi dapat dilihat pada tabel

2.2.

Tabel 2.2 Skala *Beaufort*

Kekuatan Angin	Kecepatan Angin		Nama	Keterangan
	Skala <i>Beaufort</i>	m/s		
0	0,0-0,5	0-1	Angin reda	Tiang asap tegak
1	0,6-1,7	2-6	Angin sepoi-sepoi	Tiang asap miring
2	1,8-3,3	7-12	Angin lemah	Daun-daun bergerak
3	3,4-5,2	13-18	Angin sedang	Ranting-ranting bergerak
4	5,3-7,4	19-26	Angin tegang	Dahan-dahan bergerak
5	7,5-9,8	27-35	Angin keras	Batang pohon bergerak
6	9,9-12,4	36-44	Angin keras sekali	Batang pohon besar bergerak
7	12,5-15,2	45-54	Angin ribut	Dahan-dahan patah
8	15,3-18,2	55-65	Angin ribut hebat	Pohon-pohon kecil patah
9	18,3-21,5	66-77	Angin badai	Pohon-pohon besar patah
10	21,6-25,1	78-90	Angin badai hebat	Rumah-rumah roboh
11	25,2-29,0	91-104	Angin taifun	Benda berat berterbangan
12	29 ke atas	105 ke atas	Angin taifun hebat	Benda berat berterbangan hingga beberapa km

Sumber: http://belajar.kemdiknas.go.id/file_storage/modul_online/MO_132/Image/geo109_12.gif

2.2.2 Energi Angin

Energi kinetik didapat ketika sebuah obyek yang memiliki massa bergerak dengan kecepatan translasi atau rotasi. Energi kinetik dapat dinyatakan dengan rumus 2-1:

$$E_k = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 \quad (\text{Bueche; 1991: 46}) \quad (2-1)$$

Keterangan:

E_k = energi dari udara yang bergerak (joule)

m = massa udara (kg)

v = kecepatan angin untuk waktu tertentu (m/detik)

Rumus 2-1 juga berlaku untuk angin yang merupakan udara yang bergerak. Ketika suatu “blok” udara memiliki penampang A dan bergerak dengan kecepatan v , maka jumlah massa yang melewati suatu tempat dapat dilihat pada rumus 2-2:

$$\dot{m} = \rho \cdot A \cdot v \quad (\text{White; 2001; 133}) \quad (2-2)$$

Keterangan:

$$\begin{aligned} \dot{m} &= \text{laju alir massa udara} && (\text{kg/s}) \\ v &= \text{kecepatan udara} && (\text{m/s}) \\ \rho &= \text{kerapatan udara} && (\text{kg/m}^3) \\ A &= \text{luas penampang} && (\text{m}^2) \end{aligned}$$

Dimana $A = d \times h$

Keterangan: $d =$ diameter sudu (m)

$h =$ tinggi sudu (m)

Dengan demikian maka energi yang dapat dihasilkan per satuan waktu adalah sesuai dengan rumus 2-3:

$$\begin{aligned} P_{\text{angin}} &= \text{Energi} / \text{waktu} && (\text{Giancoli; 1995; 157}) \quad (2-3) \\ &= (\frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2) / t \\ &= \frac{1}{2} \cdot m/t \cdot v^2 \\ &= \frac{1}{2} \cdot \dot{m} \cdot v^2 \\ &= \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v^3 \end{aligned}$$

Keterangan:

$$\begin{aligned} P_{\text{angin}} &= \text{daya angin} && (\text{W}) \\ \rho &= \text{kerapatan udara} && (\text{kg/m}^3) \\ A &= \text{luas penampang} && (\text{m}^2) \\ v &= \text{kecepatan angin} && (\text{m/detik}) \end{aligned}$$

2.3 Turbin Angin

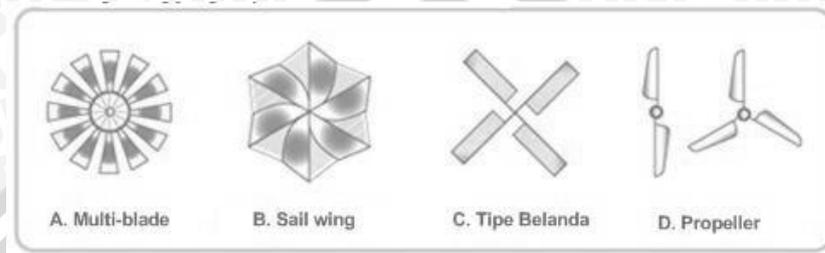
2.3.1 Klasifikasi Turbin Angin

Secara umum turbin angin dibagi menjadi dua jenis berdasarkan arah sumbunya, yaitu:

1. Turbin angin sumbu horizontal atau *Horizontal Axis Wind Turbine (HAWT)*

Turbin angin sumbu horizontal memiliki sudu yang berputar pada bidang vertikal layaknya baling-baling pesawat terbang. Turbin ini biasanya memiliki sudu

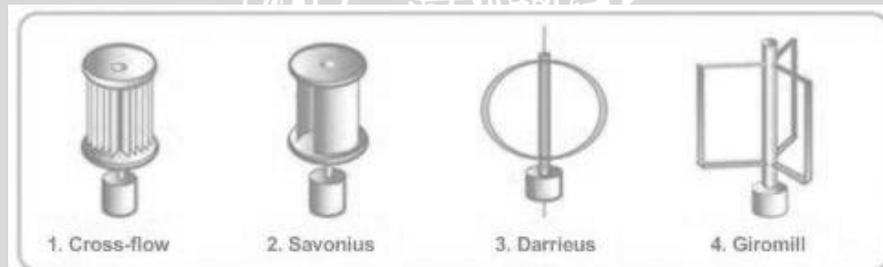
dengan bentuk irisan melintang khusus dimana aliran udara pada salah satu sisinya dapat bergerak lebih cepat dari aliran udara di sisi yang lain ketika melewatinya. Sehingga menimbulkan daerah tekanan rendah pada belakang sudu dan daerah tekanan tinggi pada depan sudu. Perbedaan tekanan ini membentuk gaya yang menyebabkan sudu berputar. Macam – macam bentuk turbin angin sumbu horizontal bisa dilihat pada gambar 2.3.



Gambar 2.3 Turbin angin *Horizontal Axis Wind Turbine (HAWT)*
Sumber: Hau E, (2006)

2. Turbin angin sumbu vertikal atau *Vertical Axis Wind Turbine (VAWT)*

Turbin angin sumbu vertikal/tegak memiliki poros/sumbu rotor utama yang disusun tegak lurus terhadap permukaan tanah. Pada umumnya turbin angin jenis ini memiliki putaran awal yang baik, sehingga dapat beroperasi walaupun dalam kecepatan angin yang rendah. Macam – macam bentuk turbin angin sumbu horizontal bisa dilihat pada gambar 2.4.



Gambar 2.4 Turbin angin *Vertical Axis Wind Turbine (VAWT)*
Sumber: Hau E, (2006)

2.4 Turbin Angin *Darrieus*

2.4.1 Pengertian Turbin Angin *Darrieus*

Turbin angin *Darrieus* merupakan salah satu jenis turbin yang dikembangkan oleh seorang *aeronautical engineer* asal Prancis yang bernama Georges Jean Marie Darrieus pada tahun 1931. Turbin *Darrieus* ini memiliki keunggulan diantaranya tidak terlalu memperhitungkan arah aliran karena bentuknya yang simetri, tekanan gravitasi tidak mampu balik pada bentuk sudunya, mampu beroperasi pada head dan kecepatan

yang rendah, sedangkan kelemahannya adalah ketidak mampuan melakukan *self starting*, dan getaran yang tinggi. (El-Sayed, 1995)

Prinsip kerja turbin *Darrieus* adalah akibat kecepatan aliran udara maka menyebabkan sudu berputar dengan kecepatan putar tertentu, maka resultan dari kecepatan tersebut akan menghasilkan gaya *aerodinamis*.

Gaya angkat (*lift*) dihasilkan karena bentuk *airfoil* dari sudu turbin. Sudu-sudu ini memotong udara dengan sudut serang yang mengakibatkan perbedaan tekanan. Hasil dari perbedaan tekanan inilah yang mengakibatkan gaya angkat, yang mana mendorong sudu bergerak ke depan. Untuk mendorong turbin, torsi yang disebabkan oleh gaya angkat harus lebih besar dibanding torsi yang dihasilkan oleh gaya hambat (*drag*) sehingga menghasilkan torsi *netto*. (DeCoste, 2004)

2.4.2 Macam – macam Jenis Sudu Turbin Angin *Darrieus*

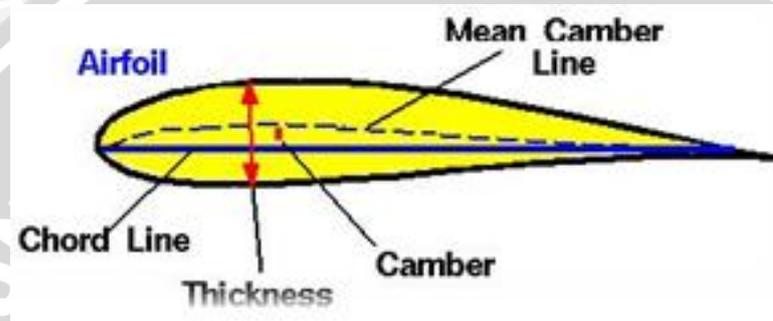
2.4.2.1 *Airfoil* NACA (*National Advisory Committee for Aeronautics*)

NACA *airfoil* adalah salah satu bentuk bodi aerodinamika sederhana yang berguna untuk dapat 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). Gaya – gaya yang bekerja pada *airfoil* dapat dilihat pada gambar 2.6.

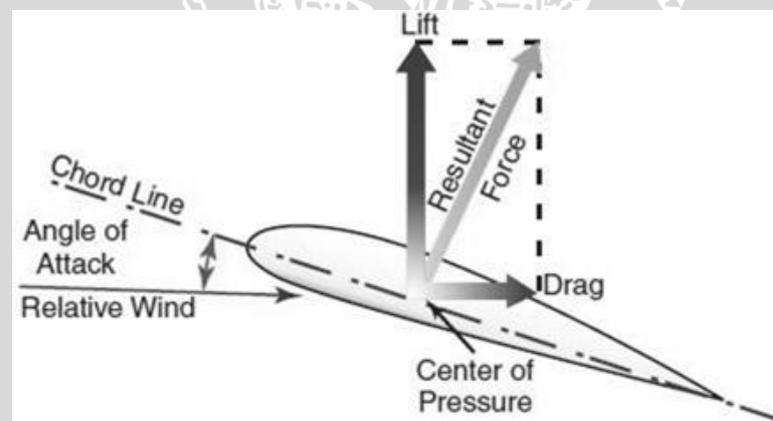
Hingga sekitar Perang Dunia II, *airfoil* yang banyak digunakan adalah hasil riset Gottingen. Selama periode ini banyak pengajuan *airfoil* dilakukan diberbagai negara, namun hasil riset NACA lah yang paling terkemuka. Pengujian yang dilakukan NACA lebih sistematis dengan membagi pengaruh efek kelengkungan 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 2.5 suatu *airfoil* terdiri dari: (Mulyadi, 2010)

- Permukaan atas (*Upper Surface*)
- Permukaan bawah (*Lowerer Surface*)

- *Mean camber line* adalah tempat kedudukan titik-titik antara permukaan atas dan bawah *airfoil* yang diukur tegak lurus terhadap *mean camber line* itu sendiri.
- *Leading edge* adalah titik paling depan pada *mean camber line*, biasanya berbentuk lingkaran dengan jari-jari mendekati 2% dari panjang *chord*.
- *Trailing edge* adalah titik paling belakang pada *mean camber line*
- *Camber* adalah jarak maksimum antara *mean camber line* dan garis *chord* yang diukur tegak lurus terhadap garis *chord*.
- Ketebalan (*thickness*) adalah jarak antara permukaan atas dan permukaan bawah yang diukur tegak lurus terhadap garis *chord*.



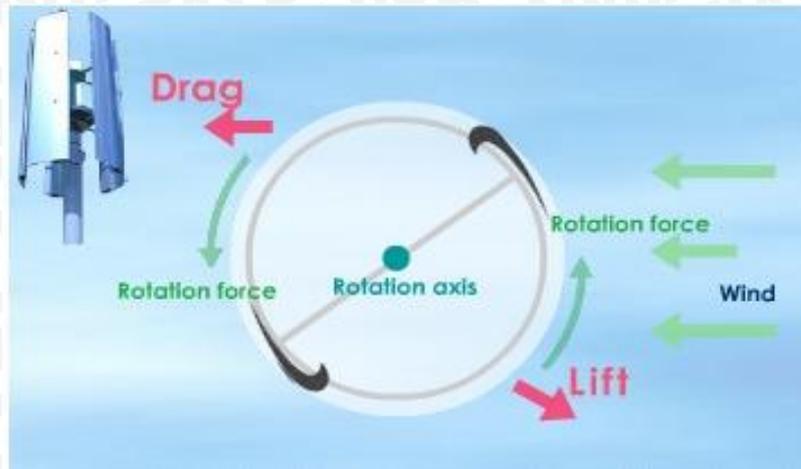
Gambar 2.5 NACA Airfoil Geometry
Sumber: Benson (2010)



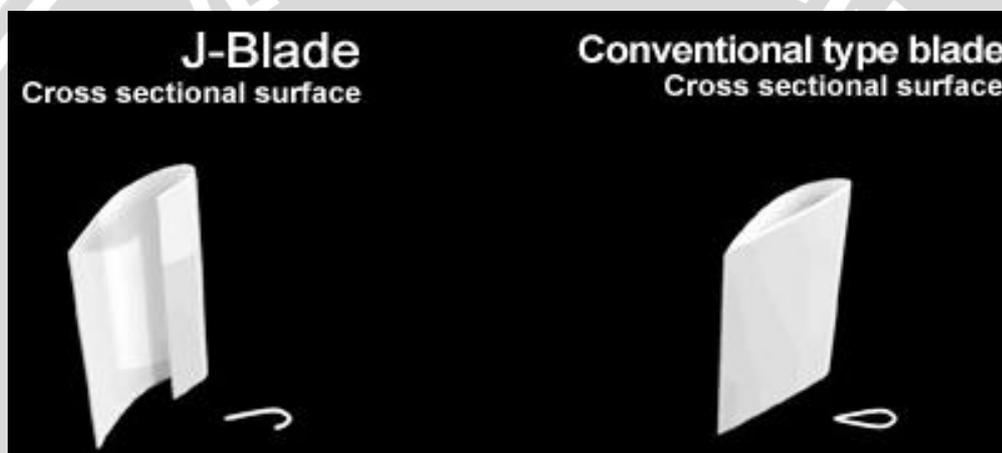
Gambar 2.6 Gaya pada Airfoil
Sumber: Suseno (2010)

2.4.2.2 Sudu J (*J-Blades*)

Sudu ini diperkenalkan oleh perusahaan Wind-Smile Co., LTD. Tokyo. Sudu-J ini sudah terdaftar dengan hak paten Jepang dengan No. 3451085. Tetapi perusahaan Wind-Smile tidak memberitau lebih lanjut tentang dimensi dari sudu-J tersebut. Perusahaan Wind-Smile menunjukkan ilustrasi gaya – gaya yang bekerja pada sudu-J pada gambar 2.7 dan menunjukkan perbandingan penampang pada sudu-J dengan sudu konvensional pada gambar 2.8.



Gambar 2.7 Ilustrasi gaya-gaya yang bekerja pada Sudu J
Sumber: www.wind-smile.com/technology/utilized.html



Gambar 2.8 Perbandingan penampang pada sudu J dengan sudu konvensional
Sumber: www.wind-smile.com/technology/utilized.html

2.5 Unjuk Kerja Turbin Angin Darrieus

Dalam pembahasan kali ini, parameter – parameter dari unjuk kerja turbin angin yang dibahas adalah *Brake Horse Power* (BHP), Torsi (T), dan Efisiensi ().

2.5.1 Brake Horse Power (BHP)

Brake Horse Power adalah daya dari turbin yang diukur setelah mengalami kerugian energi. Dalam percobaan nantinya *BHP* dinyatakan dengan menggunakan motor listrik. Dengan mengetahui besar tegangan yang dihasilkan maka bisa diketahui besarnya daya, dengan menggunakan hukum ohm seperti pada rumus 2-6.

$$P_{\text{motor}} = V \times I \quad (2-6)$$

Keterangan:

P_{motor} = Daya motor listrik (Watt)

V = Tegangan motor listrik (Volt)

I = Arus listrik (Ampere)

Setelah didapatkan harga P_{motor} maka dapat dihitung BHP:

$$\text{BHP} = \frac{P_{\text{motor}}}{\eta_{\text{motor}}} \quad (2-7)$$

Keterangan:

BHP = *Brake Horse Power* (Watt)

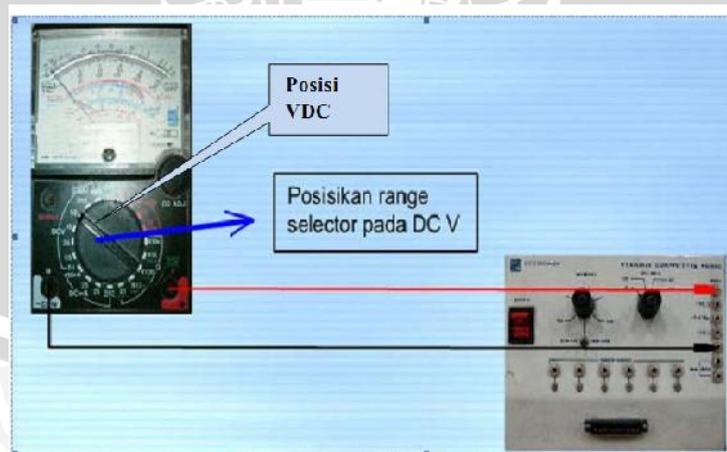
η_{motor} = Efisiensi motor listrik (%)

- Prinsip pengukuran tegangan dan arus DC

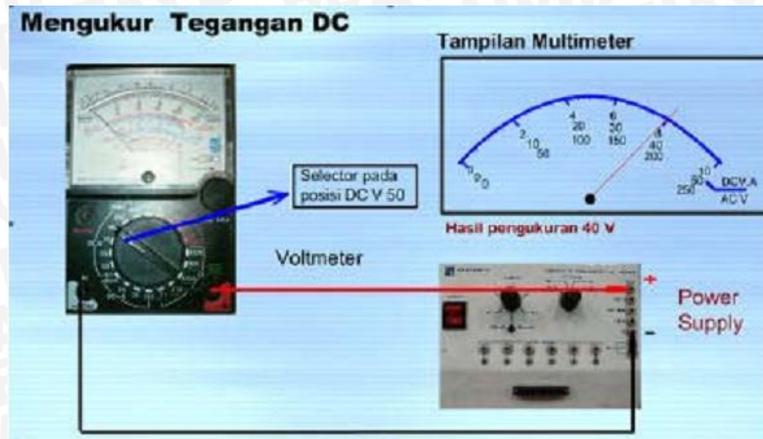
Pengukuran tegangan dan arus dilakukan dengan menggunakan multimeter elektronik dengan cara sebagai berikut:

- Pengukuran tegangan DC

Tegangan DC dapat diukur dengan menggunakan Voltmeter, Prinsip kerjanya semakin tinggi arus listrik yang melewati voltmeter maka semakin besar medan magnet yang dihasilkan sehingga pembacaan pada layar akan semakin besar pula, dapat dilihat pada gambar 2.9 dan gambar 2.10.



Gambar 2.9 : Rangkaian Pengukuran Tegangan DC
Sumber : Sri (2008 : 78)

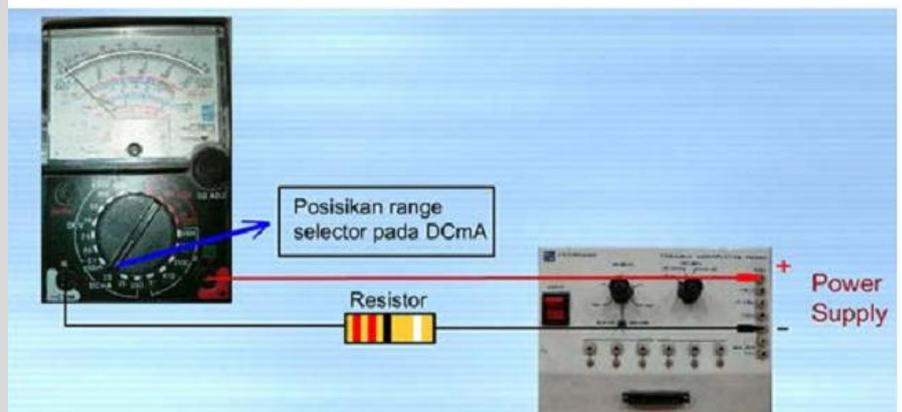


Gambar 2.10 : Penunjukkan Pengukuran Tegangan DC
 Sumber : Sri (2008 : 78)

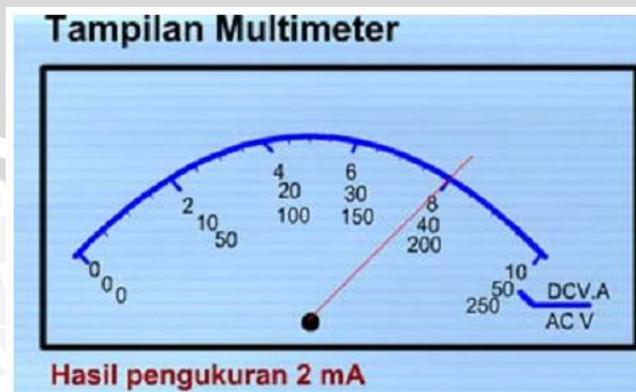
- Prinsip pengukuran arus DC

Pengukuran arus dilakukan dengan menggunakan multimeter elektronik dengan cara pada gambar 2.11 dan gambar 2.12.

Pemasangan meter seri terhadap beban yang akan di ukur arusnya.



Gambar 2.11 Rangkaian Pengukuran Arus DC
 Sumber: Sri (2008:85)



Gambar 2.12 Penunjukkan Pengukuran Arus DC
 Sumber: Sri (2008:85)

2.5.2 Torsi (T)

Torsi biasa disebut juga momen atau gaya yang menyatakan benda berputar pada suatu sumbu. Torsi juga bisa didefinisikan ukuran keefektifan gaya tersebut dalam menghasilkan putaran atau rotasi mengelilingi sumbu tersebut (Bueche, 1988:16). Besar torsi dapat dihitung dengan menggunakan rumus 2-8.

$$T = \frac{\text{BHP}}{2 \cdot f \cdot \frac{n_{\text{motor}}}{60}} \quad (2-8)$$

Keterangan:

T = Torsi (Nm)

n_{motor} = Putaran motor (rpm)

2.5.3 Efisiensi ()

Untuk menyatakan performa suatu mesin biasanya dinyatakan dalam efisiensi yang merupakan perbandingan antara efek manfaat yang digunakan dengan pengorbanan yang dilakukan. Besar efisiensi dapat dihitung dengan rumus 2-9:

$$= \frac{\text{BHP}}{P_{\text{angin}}} \times 100\% \quad (\text{Fox, 1994 : 570}) \quad (2-9)$$

Keterangan:

= Efisiensi (%)

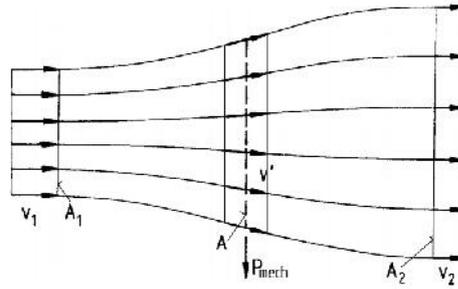
2.6 Teori dan Persamaan

2.6.1 Teori Betz

Teori Betz mengasumsikan bahwa suatu turbin ideal merupakan rotor tanpa naf (hub) dan mempunyai sudu-sudu yang tak terhingga jumlahnya tanpa hambatan (Reksoatmodjo, 2004). Juga diasumsikan bahwa aliran udara didepan dan belakang rotor memiliki kecepatan yang seragam (laminar). Jika V_1 = kecepatan angin didepan rotor, V_2 = kecepatan angin dibelakang rotor, dan V = kecepatan angin ketika melewati rotor, maka berdasarkan persamaan kontinuitas pada persamaan 2-10 dan persamaan 2-11, dan aliran udara yang dapat menghasilkan energi dapat dilihat pada gambar 2.13.

$$Q_1 = Q_2 \quad (2-10)$$

$$A_1 V_1 = A_2 V_2 \quad (2-11)$$

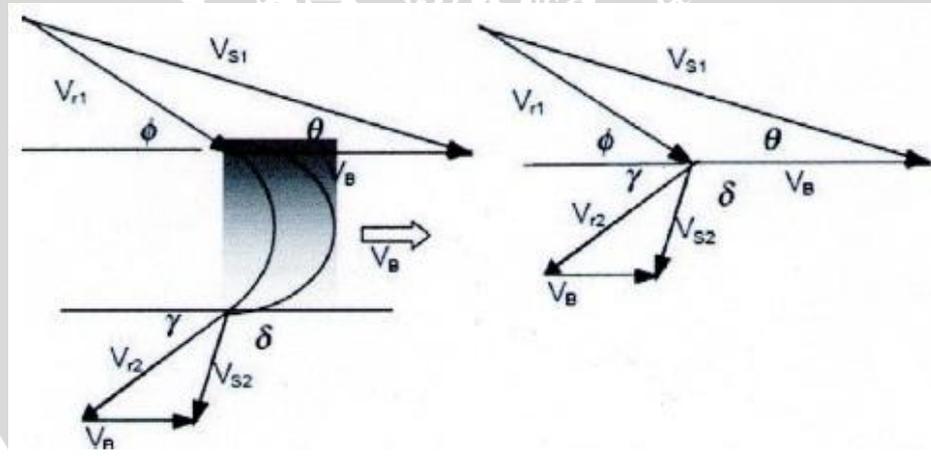


Gambar 2.13 Aliran udara yang menghasilkan energi, berdasarkan teori kontinuitas

Sumber: Hau (2005:82)

2.6.2 Segitiga Kecepatan

Segitiga kecepatan dapat didefinisikan sebagai segitiga yang dibentuk oleh 3 kecepatan yaitu kecepatan *absolute* oleh angin, kecepatan tangensial, dan kecepatan *relative*. Pada mesin – mesin berputar yang memanfaatkan sudu, biasanya digunakan segitiga kecepatan untuk menghitung performa dasar dari sebuah tingkat turbin. Segitiga kecepatan terdiri dari tiga buah vektor kecepatan yaitu kecepatan *absolute* (v_s), kecepatan *relative* (v_r), dan kecepatan tangensial (v_b). Setiap fluida di tiap titik ditinjau mempunyai segitiga kecepatan bisa dilihat pada gambar 2.14.



Gambar 2.14 Skema segitiga kecepatan

Sumber: Sunyoto. 2011

V_{s1} = kecepatan *absolute* fluida meninggalkan nosel

V_B = kecepatan tangensial

V_{r1} = kecepatan *relative* fluida

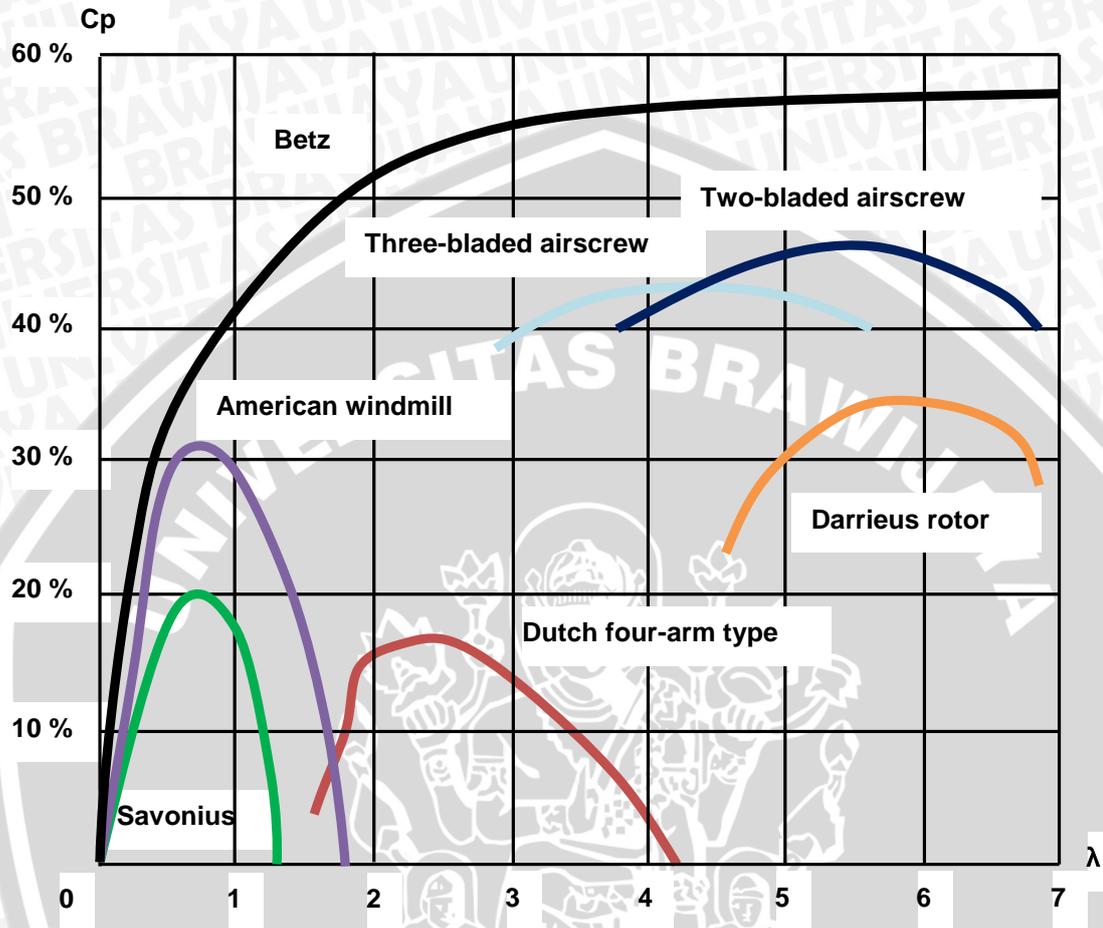
V_{r2} = kecepatan *relative* fluida meninggalkan sudu

V_{s2} = kecepatan *absolute* fluida meninggalkan sudu



2.6.3 Daya pada Turbin Angin *Darrieus*

Besar daya yang dapat dibangkitkan dari putaran rotor turbin angin *Darrieus* dapat dihitung melalui pendekatan Betz.



Gambar 2.15 Kinerja utama pada turbin angin konvensional
Sumber: Bouraba (November 2004)

Berdasarkan teori Betz yang divisualisasikan dalam bentuk grafik pada gambar 2.15, menjelaskan ketidakmungkinan suatu desain turbin angin memiliki *coeffisien power* (C_p) diatas angka 56%. Hal ini dapat diartikan bahwa desain turbin terbaik tipe apapun tidak akan menghasilkan efisiensi rotor diatas 56%. Nilai efisiensi 56% juga sering disebut sebagai *Betz Limit*.

Nilai C_p untuk satu tipe turbin angin tidak selalu sama karena nilai C_p merupakan fungsi dari *tip speed ratio* atau λ . *Tip speed ratio* merupakan antara perbandingan antara kecepatan tangensial dengan kecepatan angin. Untuk mengetahui nilai C_p maksimal yang mampu dihasilkan oleh sebuah turbin angin, maka perlu

diketahui terlebih dahulu berapa nilai *tip speed ratio* yang dihasilkan dengan persamaan

2-21:

$$= \frac{\dot{\Sigma} \cdot R}{v} \quad (\text{Fox, 1994: 579}) \quad (2-21)$$

Dimana: $\dot{\Sigma} \cdot R = v_{\text{tangensial}} \quad (\text{rad.m/s}) \quad (2-22)$

Keterangan:

$$= \text{kecepatan sudut} = \frac{2fn}{60}$$

n = putaran (rpm)

R = radius rotor (m)

v = kecepatan angin (m/s)

Pada turbin angin *Darrieus* dengan tinggi rotor (h) serta jari-jari rotor (r), dikenai aliran berkecepatan (v), maka dayanya adalah:

$$P_{\text{aktual}} = C_p \cdot \rho \cdot r \cdot h \cdot v^3 \quad (2-23)$$

Keterangan:

P_{aktual} = Daya aktual (Watt)

C_p = *Coefficient of power*

ρ = Massa jenis udara (kg/m³)

r = Jari-jari sudu (m)

h = Tinggi sudu (m)

v = Kecepatan angin (m/s)

P_{teoritis} merupakan daya maksimum yang dihasilkan oleh poros rotor turbin angin *Darrieus* ketika mengkonversikan energi kinetik aliran angin.

$$P_{\text{teoritis}} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v^3 \quad (2-24)$$

Keterangan:

P_{teoritis} = daya teoritis (Watt)

ρ = kecepatan udara (kg/m³)

A = luas penampang (m²)

v = kecepatan angin (m/s)

2.7 Hipotesa

Dengan bertambahnya radius bagian depan sudu menyebabkan luas daerah terpaan angin pada radius bagian depan sudu turbin akan bertambah luas, sehingga gaya dorong yang bekerja pada radius bagian depan sudu juga akan bertambah, akibatnya daya poros, torsi dan efisiensi yang dihasilkan oleh turbin angin *Darrieus* tipe sudu-J akan mengalami peningkatan.

