

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitian Sebelumnya

Tjukup Marnoto (2011), Turbin angin poros vertikal memiliki beberapa kelebihan antara lain: aman, mudah membangunnya, bisa dipasang tidak jauh dari tanah, dan dapat menangkap angin dari berbagai arah sehingga tidak membutuhkan yaw. Sudu kincir angin VAWT (*Vertical Axis Wind Turbine*) berputar secara horizontal pada sumbu vertikal terhadap tanah, sehingga setiap sudu turbin mengalami *head wind* dan *tail wind*. *Head wind* terjadi ketika arah sudu berlawanan dengan arah angin yang masuk sedangkan *tailwind* terjadi ketika arah sudu sama dengan arah angin yang masuk. *Head wind* cenderung memperlambat rotasi sehingga menyebabkan koefisien kincir turun maksimum sekitar 16% (R. Gasch & J. Twele, 2002). Masalah ini dapat dipecahkan dengan merancang sudu kincir khusus yang dapat memperkecil *head wind* dengan mekanisme buka tutup. Sirip-sirip akan terbuka pada posisi sudu berlawanan arah angin, sebaliknya sirip-sirip akan menutup jika searah dengan arah angin karena dorongan angin itu sendiri.

Dari hasil penelitian kincir angin tipe bilah bersirip rata-rata dapat berputar pada kecepatan angin terendah 3,1 m/s. Pada penelitian diberikan variasi kecepatan angin antara 3,1 dan 7,8 m/s dengan energi kinetik turbin 0,008-2,93 W dan efisiensi atau *power* koefisien mencapai 2,17-23,54 %.

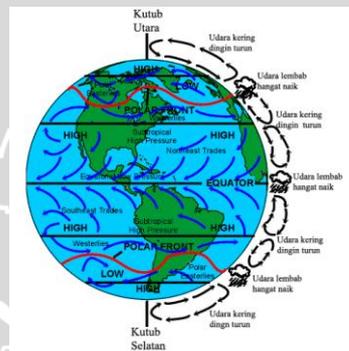
Sebelumnya M. Trifiananto (2012), pernah melakukan penelitian terhadap turbin angin bilah bersirip ini dengan tiga buah sudu. Variabel bebas yang digunakan dalam penelitian sebelumnya adalah kecepatan angin dan panjang bilah. Variasi kecepatan angin adalah 3; 4; 5; 6; 7 m/s dan variasi panjang bilah 0.15 m; 0.20 m; 0.25 m. Sedangkan variabel terikatnya adalah torsi, daya poros dan efisiensi. Untuk mendapatkan data-data yang dibutuhkan dilakukan metode bersifat studi eksperimental, selanjutnya hasil eksperimen diolah dengan rumus-rumus yang relevan kemudian dilakukan analisis.

Dari hasil penelitian tersebut diperoleh daya poros (BHP) tertinggi yang dicapai oleh turbin dengan panjang bilah 0,25 m yaitu sebesar 0,003 Watt pada kecepatan 7 m/s. Torsi tertinggi dicapai oleh turbin dengan panjang bilah 0,25 m yaitu sebesar 0,00015 Nm pada kecepatan angin 7 m/s. Untuk efisiensi tertinggi diperoleh pada bilah dengan panjang 0,25 m dan kecepatan angin 4 m/s sebesar 0,18%.

2.2 Angin

2.2.1 Proses Terbentuknya Angin

Angin adalah udara yang bergerak yang diakibatkan oleh rotasi bumi dan juga karena adanya perbedaan tekanan udara di sekitarnya. Seperti pada Gambar 2.1 angin bergerak dari tempat bertekanan udara tinggi ke tempat bertekanan udara rendah. Udara akan memuai bila dipanaskan. Udara yang telah memuai menjadi lebih ringan sehingga naik. Apabila hal ini terjadi, tekanan udara turun karena udaranya berkurang. Udara dingin di sekitarnya mengalir ke tempat yang bertekanan rendah tadi. Udara menyusut menjadi lebih berat dan turun ke tanah. Di atas tanah udara menjadi panas lagi dan naik kembali (Daryanto, 2007).



Gambar 2.1 :Skema Terjadinya Angin.
Sumber : Kadir (1996).

Meskipun pada kenyataan angin tidak dapat dilihat bagaimana wujudnya, namun masih dapat diketahui keberadaannya melalui efek yang ditimbulkan pada benda - benda yang mendapat hembusan angin. Seperti ketika melihat dahan pohon bergerak atau bendera yang berkibar kita tahu bahwa ada angin yang berhembus. Dari mana angin bertiup dan berapa kecepatannya dapat diketahui dengan menggunakan alat - alat pengukur angin. Alat-alat pengukur angin tersebut adalah :

1. Anemometer, yaitu alat yang mengukur kecepatan angin.
2. *Wind vane*, yaitu alat untuk mengetahui arah angin.
3. *Wind sock*, yaitu alat untuk mengetahui arah angin dan memperkirakan besar kecepatan angin. Biasanya ditemukan di bandara-bandara.

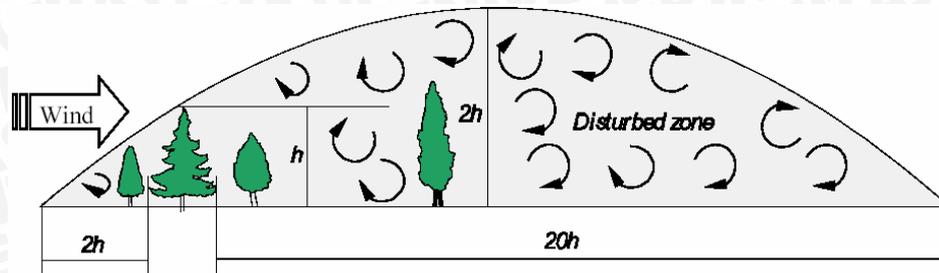
Selain dengan menggunakan alat-alat pengukur angin, arah dan kecepatan angin juga dapat diukur atau diperkirakan dengan menggunakan tabel Skala Beaufort seperti terlihat pada tabel 2.1 dibawah.

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	Tenang, asap mengepul vertikal
1	Teduh	1-3	<5	1	Asap mengepul miring tetapi alat anemometer tidak berputar
2	Sepoi Lemah	4-6	5-10	2-3	Terpaan angin terasa di muka, anemometer berputar perlahan
3	Sepoi Lembut	7-10	>15	4-5	Daun-daun kecil di pohon bergerak, bendera dapat bergerak
4	Sepoi Sedang	11-16	20-25	6-7	Debu dan kertas dapat terbang, ranting pohon bergerak
5	Sepoi Segar	17-21	30-35	8-10	Pohon-pohon kecil terlihat condong, Genangan air tanah terlihat mengombak kecil
6	Sepoi Kuat	22-27	40-45	11-13	Batang pohon terlihat bergerak, suara berdesing dari kawat telepon dapat terdengar, payung dapat terangkat
7	Angin ribut lemah	28-33	50-60	14-17	Pohon-pohon bergerak, berjalan terasa berat
8	Angin ribut	34-40	65-70	18-20	Batang pohon dapat tumbang,
9	Angin ribut kuat	41-47	75-85	21-24	Dapat membuat kerusakan cerobong, pot-pot beterbangan
10	Badai	48-55	90-100	25-28	Kerusakan lebih besar, tetapi di darat jarang
11	Badai amuk	56-63	105-115	29-32	Kerusakan berat tetapi sangat jarang terjadi di darat
12	Topan	>63	>120	>33	Hampir tidak pernah terjadi

Sumber: Daryanto, 2007

Kecepatan angin pada ketinggian di mana turbin angin dipasang akan diekstrapolasi dari data yang didapat dengan mempertimbangkan kekasaran permukaan setempat dan lapisan batas atmosfer seperti pada gambar 2.2



Gambar 2.2 : Aliran Berolak Akibat Rintangan

Sumber : Daryanto (2007)

Menurut ilmu fisika, energi kinetik dari sebuah benda dengan massa m dan kecepatan v dirumuskan, sesuai dengan rumus 2-1 berikut, dengan ketentuan kecepatan v tidak mendekati kecepatan cahaya.

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

keterangan:

E : energi dari udara yang bergerak (Joule)

m : massa udara (kg)

v : kecepatan angin (m/detik)

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

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

keterangan:

\dot{m} : laju alir massa (Kg/s)

ρ : massa jenis udara (Kg/m³)

A : luas penampang (m²)

v : kecepatan angin (m/detik)

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

$$\text{Power} = \text{Work} / \text{time} \quad (\text{Giancoli; 1995: 157}) \quad (2-3)$$

$$\begin{aligned} P &= (\frac{1}{2} m \cdot v^2) / t \\ &= \frac{1}{2} \cdot m/t \cdot v^2 \\ &= \frac{1}{2} \cdot \dot{m} \cdot v^2 \\ &= \frac{1}{2} \rho \cdot A \cdot v^3 \end{aligned}$$

keterangan:

P : daya angin (Watt)

Work : energi angin (Joule)

ρ : massa jenis udara (Kg/m³)

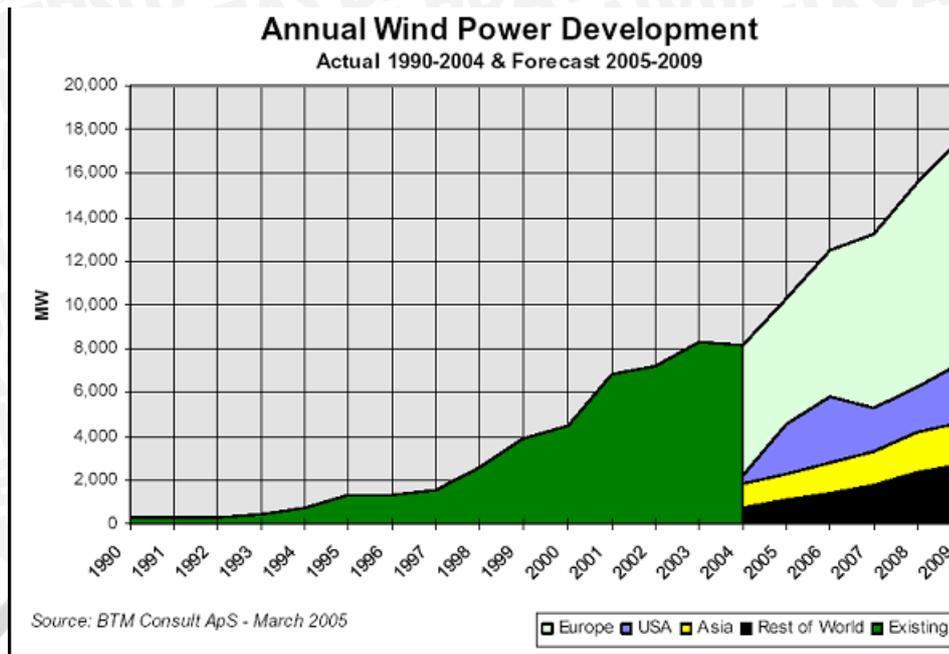
A : Plan view area (m²)

v : kecepatan angin (m/s)

2.2.2 Energi Angin

Pemanfaatan energi angin dapat dilakukan di mana-mana, baik di daerah landai maupun dataran tinggi, bahkan dapat diterapkan di laut, berbeda halnya dengan energi air. 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 pertanian (Daryanto, 2007).

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% 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 2.3 : Laju Pertumbuhan Energi Angin Tahunan di Dunia

Sumber : Daryanto (2007)

Tabel 2.2: Pemanfaatan Energi Angin di Indonesia

KELAS	KEC. ANGIN (m/s)	DAYA SPESIFIK (W/m ²)	KAPASITAS (kW)	LOKASI (Wilayah)
SKALA KECIL	2,5 - 4,0	< 75	s/d 10	Jawa, NTB, NTT, Maluku, Sulawesi
SKALA MENENGAH	4,0 - 5,0	75 - 150	10 - 100	NTB, NTT, Sulsel, Sultra, Selatan Jawa
SKALA BESAR	> 5,0	> 150	> 100	Sulsel, NTB, NTT, Pantai Selatan Jawa

Sumber: Kementerian Riset dan Teknologi (2010)

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 dari mana angin itu berhembus. Jadi angin barat berarti angin yang berhembus dari barat ke timur (Kadir, 1996).

2.3 Klasifikasi Turbin Angin

Turbin angin adalah kincir angin yang digunakan untuk membangkitkan tenaga listrik. Turbin angin ini pada awalnya dibuat untuk mengakomodasi kebutuhan para petani dalam melakukan penggilingan padi, keperluan irigasi, dll. Turbin angin terdahulu banyak dibangun di Denmark, Belanda dan negara-negara Eropa lainnya dan

lebih dikenal dengan *Windmill*. Kini turbin angin lebih banyak digunakan untuk mengakomodasi kebutuhan listrik masyarakat, dengan menggunakan prinsip konversi energi dan menggunakan sumber daya alam yang dapat diperbaharui yaitu angin (Daryanto, 2007)

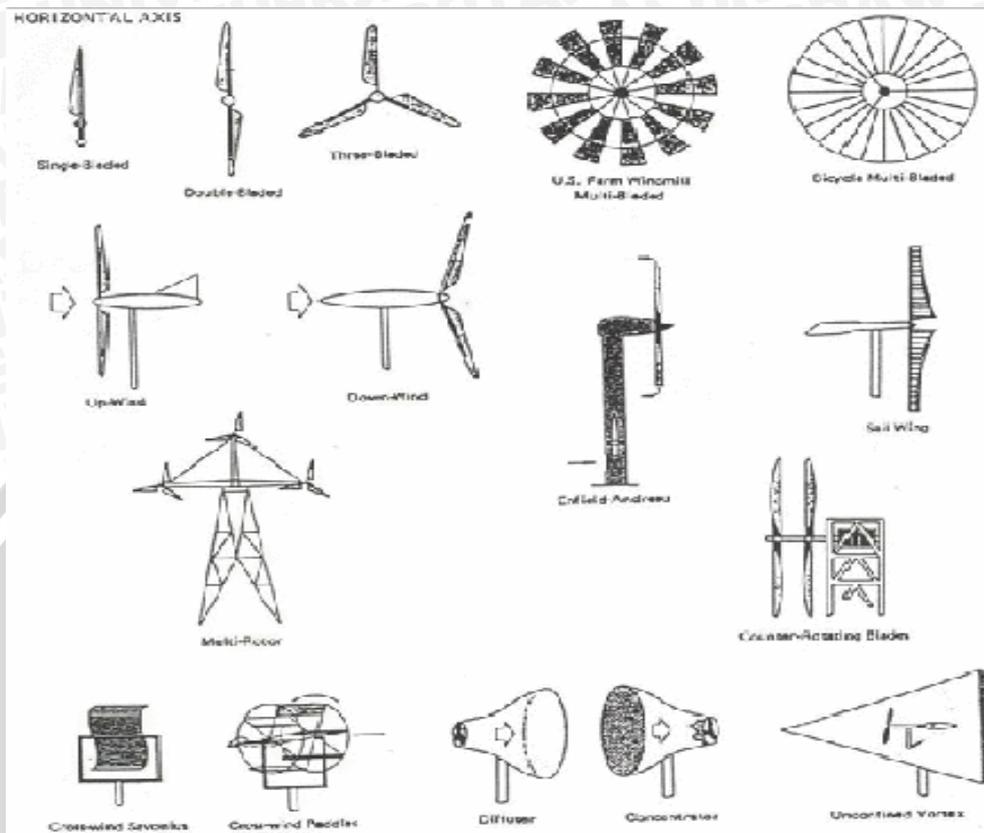
Saat ini pembangunan turbin angin masih belum dapat menyaingi pembangkit listrik konvensional (Contoh: PLTD, PLTU, dll), namun turbin masih lebih dikembangkan oleh para ilmuwan karena dalam waktu dekat manusia akan dihadapkan dengan masalah kekurangan sumber daya alam tak dapat diperbaharui (Contoh: batu bara, minyak bumi) sebagai bahan dasar untuk membangkitkan listrik. Turbin angin dapat dibagi menjadi dua kategori utama, yaitu: turbin angin sumbu horizontal dan turbin angin sumbu vertikal (Daryanto, 2007).

2.3.1 Turbin Angin Poros Horizontal atau HAWT (*Horizontal Axis Wind Turbine*)

Turbin angin dengan sumbu horizontal mempunyai sudu yang berputar dalam bidang vertikal seperti halnya propeler pesawat terbang. Gambar 2.4 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.



Horizontal Axis Wind Turbine (HAWT).



Gambar 2.4 : Turbin Angin Sumbu Horizontal

Sumber : Daryanto (2007)

2.3.2 Turbin Angin Poros Vertikal atau VAWT (*Vertical Axis Wind Turbine*)

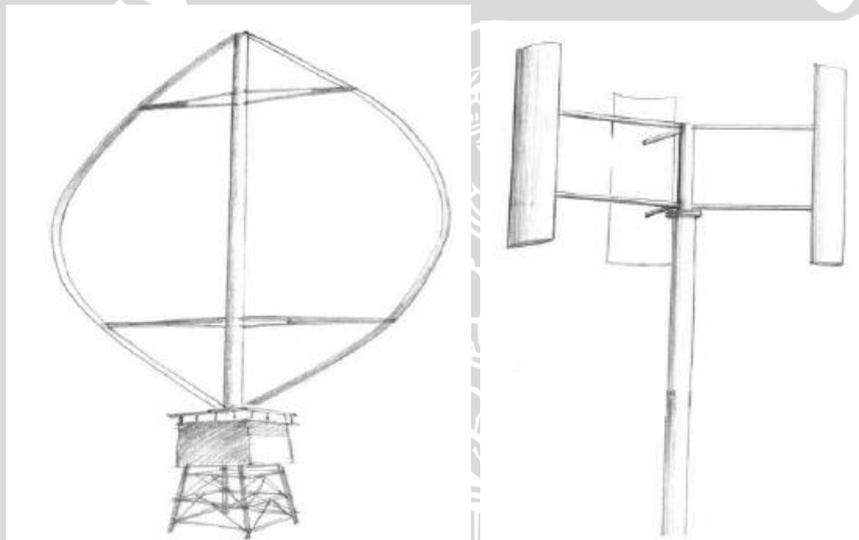
Ada berbagai tipe VAWT yang sering digunakan diantaranya adalah: Tipe Savonius; Tipe Darrieus; Tipe H-Rotor.

a. Tipe Savonius VAWT

Seperti yang ditunjukkan pada gambar 1 dan gambar 2, diciptakan oleh seorang insinyur Finlandia, SJ. Savonius pada tahun 1929. Kincir VAWT ini merupakan jenis yang paling sederhana. Kincir Savonius dapat berputar karena adanya gaya dorong dari angin, sehingga putaran rotor pun tidak akan melebihi kecepatan angin. Meskipun daya koefisien untuk jenis turbin angin bervariasi antara 30% sampai 45%, menurut banyak peneliti untuk jenis Savonius biasanya tidak lebih dari 25%. Jenis turbin ini cocok untuk aplikasi daya yang rendah dan biasanya digunakan pada kecepatan angin yang berbeda. (Savonius SJ., *The S-Rotor and Its Applications* : 1931)

b. Tipe Darrieus VAWT

Tipe Darrieus VAWT ditemukan oleh seorang insinyur Perancis George Jean Maria Darrieus yang dipatenkan pada tahun 1931. Ia memiliki dua bentuk turbin yang digunakan diantaranya adalah *eggbeater/ curved bladed* dan *straightbladed* VAWT. Sketsa dari kedua variasi konsep Darrieus ditunjukkan dalam gambar 2.6. Kincir angin Darrieus VAWT mempunyai bilah sudu yang disusun dalam posisi simetri dengan sudu bilah yang diatur relatif terhadap poros. Pengaturan ini cukup efektif untuk menangkap berbagai arah angin. Berbeda dengan Savonius, kincir angin Darrieus bergerak dengan memanfaatkan gaya angkat yang terjadi ketika angin bertiup. Bilah sudu turbin Darrieus bergerak berputar mengelilingi sumbu.



Egg Darrieus

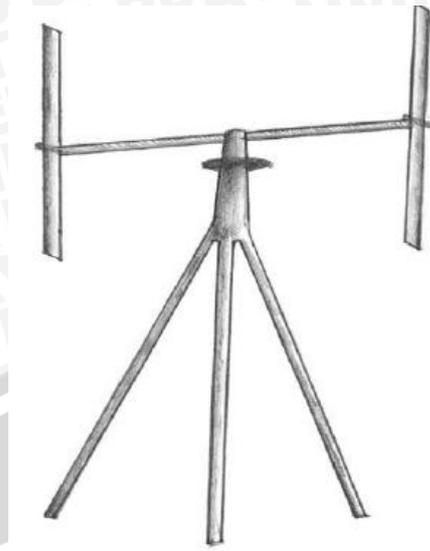
Straight Blade

Gambar 2.5 : Tipe Darrieus VAWT

Sumber : Martono Tjukup (2010)

c. Tipe H-Rotor

Tipe H-Rotor dikembangkan di Inggris melalui penelitian yang dilakukan selama 1970-1980an, diuraikan bahwa mekanisme yang digunakan pada pisau berbilah lurus (*straight-bladed*) Darrieus VAWT tidak diperlukan, ternyata ditemukan bahwa efek hambatan yang diciptakan oleh sebuah pisau akan membatasi kecepatan aliran angin. Oleh karena itu, H-rotor akan mengatur semua kecepatan angin untuk mencapai kecepatan putaran optimalnya.



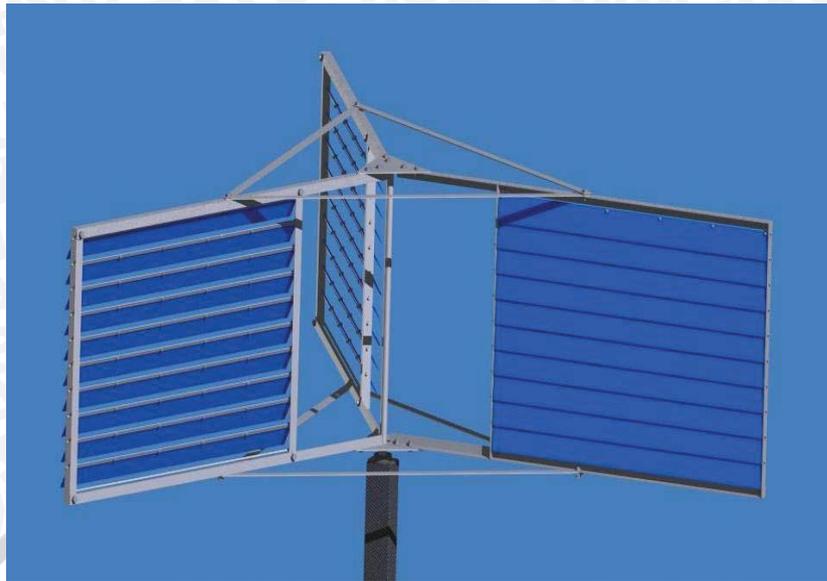
Gambar 2.6 : Turbin Angin H-Rotor

Sumber : Marnoto Tjukup (2010)

2.4 Turbin Angin Poros Vertikal Tipe Bilah Bersirip

2.4.1 Tinjauan Umum Turbin Angin Poros Vertikal Tipe Bilah Bersirip

Turbin angin vertikal tipe bilah bersirip ini tergolong baru difokuskan pada peningkatan efisiensi, dengan model yang dapat menurunkan energi *drag* penghambat dan memperluas kolektor energi *drag* (pendorong) sehingga akan meningkatkan efisiensi dan menurunkan kecepatan angin minimum yang dapat memutar turbin. Turbin angin yang dirancang ini memiliki tiga buah sudu bersirip, sudu ini bila berlawanan dengan arah angin dan putaran rotor maka sirip-sirip akan terbuka sehingga akan menurunkan energi *drag* (penghambat) sebaliknya bila posisi searah dengan arah angin dan putaran rotor sirip-sirip akan menutup karena dorongan angin itu sendiri sehingga meningkatkan daya dorong. Dengan rancangan baru ini dapat meningkatkan efisiensi konversi energi dan menurunkan kecepatan angin minimum untuk memutar turbin, sehingga turbin ini dapat diterapkan di semua lokasi yang memiliki kecepatan dan arah angin yang berubah-ubah.



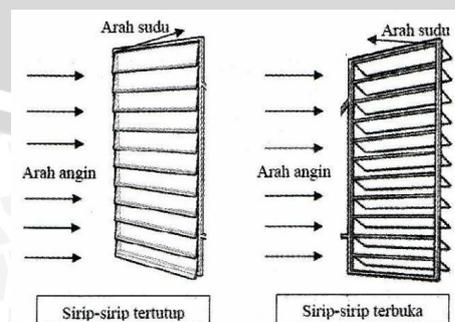
Gambar 2.7 : Model Turbin Angin Tipe Bilah Bersirip

Sumber : Marnoto Tjukup, 2010

2.4.2 Prinsip Kerja Turbin Angin Poros Vertikal Tipe Bilah Bersirip

Turbin angin poros vertikal tipe bilah bersirip memiliki prinsip kerja sama seperti turbin pada umumnya. Dimulai dari pemanfaatan energi kinetik yang dimiliki oleh angin, yang kemudian dikonversikan oleh sudu menjadi energi mekanik pada poros atau rotor.

Perbedaan yang mencolok antara turbin angin poros vertikal tipe bilah bersirip dengan turbin angin lainnya adalah mekanisme buka-tutup sirip. Dimana sistem buka tutup sirip ini dimaksudkan untuk mengurangi gaya hambat yang dapat menyebabkan berkurangnya putaran poros. Sehingga luas bilah (sudu) tidak akan berpengaruh terhadap daya penghambat, oleh itu luas bilah dapat dibuat lebar agar kolektor angin lebih besar. Di bawah ini gambar ilustrasi saat sirip membuka dan menutup.



Gambar 2.8 : Ilustrasi Pergerakan Sirip Saat Terbuka dan Tertutup

Sumber : Marnoto Tjukup (2011)

Dari gambar diatas terlihat bahwa pada saat *tail wind* sirip sirip tertutup dan pada saat *head wind* sirip terbuka. *Tail wind* adalah kondisi dimana arah sudu sama dengan arah angin. Sedangkan *head wind* terjadi ketika arah sudu berlawanan dengan arah angin yang masuk. Kondisi *head wind* cenderung memperlambat rotasi.

2.5 Unjuk Kerja Turbin Angin Vertikal Tipe Bilah Bersirip

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

2.5.1 Brake Horse Power (BHP)

Brake Horse Power adalah daya dari turbin yang diukur sebelum mengalami kerugian energi yang disebabkan oleh *altenator*, *gearbox*, pompa ataupun perangkat tambahan lainnya. Dalam percobaan nantinya BHP diukur dengan menggunakan motor listrik. Dengan mengukur besarnya tegangan dan arus yang dihasilkan maka bisa diketahui besarnya daya, dengan menggunakan hukum ohm seperti pada rumusan:

$$P_{motor} = V \times I \quad (\text{PT.PLN; 2001: 8}) \quad (2-4)$$

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

$$BHP = \frac{P_{motor}}{\eta_{motor}} \quad (2-5)$$

keterangan:

BHP : daya poros motor listrik (Watt)

P_{motor} : daya motor listrik (Watt)

η_{motor} : efisiensi motor listrik (%)

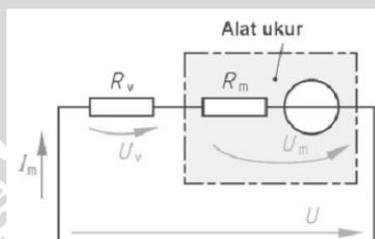
➤ Prinsip Pengukuran Tegangan dan Arus DC.

Pengukuran tegangan dan arus listrik dilakukan dengan menggunakan digital multimeter. Alat ukur ini banyak digunakan dalam pengukuran tegangan dan arus listrik karena praktis, murah dan mudah dioperasikan. *Digital multimeter* mampu

menampilkan beberapa pengukuran untuk arus miliamper, temperatur °C, tegangan milivolt, resistansi ohm, frekuensi Hz, daya listrik mW sampai kapasitansi nF.

- **Pengukuran Tegangan DC**

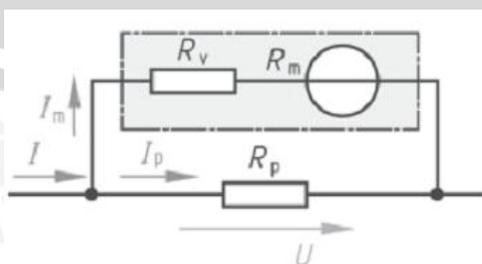
Tegangan DC dapat diukur dengan menggunakan voltmeter. Prinsip kerjanya semakin tinggi arus listrik yang melewati voltmeter maka semakin besar medan magnet yang dihasilkan sehingga pembacaan pada layar akan semakin besar pula. Pengukur tegangan voltmeter memiliki tahanan meter R_m seperti gambar 2.9. Tahanan dalam meter juga menunjukkan kepekaan meter, disebut *fsd (full scale deflection)* arus yang diperlukan untuk menggerakkan jarum meter pada skala penuh. Untuk menaikkan batas ukur voltmeter harus dipasang tahanan seri sebesar R_v .



Gambar 2.9 : Pengukuran Tegangan DC
Sumber : PT. PLN (2001)

- **Pengukuran Arus DC**

Arus DC diukur dengan menggunakan amperemeter. Namun pengukur arus listrik amperemeter memiliki keterbatasan untuk dapat mengukur arus, tahanan dalam meter R_m membatasi kemampuan batas ukur. Menaikkan batas ukur dilakukan dengan memasang tahanan paralel R_p dengan amperemeter gambar 2.10. Tahanan R_p akan dialiri arus sebesar I_p , arus yang melalui meter R_m sebesar I_m .



Gambar 2.10 : Pengukuran arus DC
Sumber : PT. PLN (2001)

2.5.2 Torsi

Torsi biasa juga disebut momen atau momen gaya yang menyebabkan benda berputar pada suatu sumbu. Torsi juga didefinisikan ukuran keefektifan gaya tersebut dalam menghasilkan putaran atau rotasi mengelilingi sumbu tersebut (Bueche, 1988: 16) . Besarnya torsi dapat dihitung dengan menggunakan rumus (2-6).

$$T = \frac{P}{2\pi n} \quad (\text{Musthofa Lutfi ; 2008; 232}) \quad (2-6)$$

keterangan :

T : Torsi (Nm)

P_{MA} : Daya poros motor listrik aktual (Watt)

n : Putaran motor listrik (rpm)

2.5.3 Efisiensi (η)

Untuk menyatakan performa suatu mesin biasanya dinyatakan dalam efisiensi yang merupakan perbandingan antara efek manfaat yang digunakan dengan pengorbanan yang dilakukan (Fox, 1994). Lebih sederhananya adalah perbandingan antara *input* dan *output* yang dinyatakan dalam persen. Seperti pada rumus 2-7 berikut

$$\eta = \frac{P_{usefull}}{P_{input}} \times 100\% \quad (\text{Fox; 1994: 570}) \quad (2-7)$$

keterangan :

η :efisiensi (%)

$P_{usefull}$: efek bermanfaat (watt)

P_{input} : masukan yang dikorbankan (watt)

2.6. Teori dan Persamaan

2.6.1 Teori Betz

Betz dianggap sebagai sarjana yang pertama memperkenalkan teori tentang turbin angin ia mengasumsikan bahwa suatu turbin ideal merupakan rotor tanpa naf (hub) dan mempunyai sudu-sudu yang tak terhingga jumlahnya tanpa hambatan (Reksoatmojo, 2004). Juga diasumsikan bahwa aliran udara didepan dan belakang rotor memiliki kecepatan yang seragam (laminar). Jika V_1 =kecepatan angin di depan rotor,

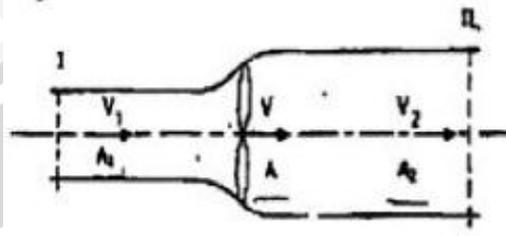
V_2 = kecepatan angin di belakang rotor dan V = kecepatan angin pada saat melewati rotor, maka berdasarkan persamaan kontinuitas:

$$A_1 V_1 = A_2 V_2 \quad (\text{Reksoatmodjo; 2004: 67}) \quad (2-8)$$

keterangan:

A = Luas penampang (m^2)

V = Kecepatan alir udara (m/s)



Gambar 2.11 : Asumsi Teori Betz

Sumber : Reksoatmodjo, 2004

Selanjutnya berdasarkan teorema Euler, gaya yang bekerja pada rotor :

$$F = \rho A V (V_1 - V_2) \quad (2-9)$$

Karena gaya kinetik yang diserap oleh rotor :

$$P = FV = \rho A V^2 (V_1 - V_2) \quad (2-10)$$

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

$$\Delta P = \frac{1}{2} \rho A V (V_1 - V_2) \quad (2-11)$$

Persamaan (2-10) adalah sama dengan persamaan (2-11) sehingga dari kedua persamaan itu diperoleh :

$$V = (V_1 + V_2) / 2 \quad (2-12)$$

Jika hasil V tersebut disubstitusikan ke dalam persamaan (2-9) dan (2-10) akan menghasilkan persamaan :

$$F = \frac{1}{2} \rho A V (V_1^2 - V_2^2) \quad (2-13)$$

$$\text{Dan } P = \frac{1}{4} \rho A V (V_1^2 - V_2^2) (V_1 - V_2) \quad (2-14)$$

Untuk kecepatan V_1 tertentu dapat dikaji besar P sebagai fungsi dari V_2 dengan mendiferensiasi persamaan (2-14) :

$$dP / dV_2 = d\{ \frac{1}{4} \rho A V (V_1^3 - V_1^2 V_2^2 - V_2^2 V_1 - V_2^3) \} \quad (2-15)$$

$$dP / dV_2 = \frac{1}{4} \rho A V (V_1^2 - 2V_1 V_2 - 3V_2^2) \quad (2-16)$$

pada $dP/dV_2 = 0$ diperoleh dua akar persamaan : $V_2 = -V_1$ yang berarti udara dalam keadaan tenang ($B_N = 0$), dan $V_2 = V_1/3$ yang merupakan harga yang menghasilkan daya maksimum. Dengan demikian daya maksimum yang diperoleh adalah :

$$P_{\text{maks}} = \frac{8}{27} \rho A V_1^3 \quad (2-17)$$

Persamaan (2-17) menunjukkan bahwa daya maksimum yang diperoleh tergantung pada massa jenis udara (berubah dengan tekanan dan temperatur) serta kecepatan angin. Pada jumlah sudu-sudu tertentu (*finite*) daya yang dihasilkan diperkirakan perlu dikoreksi (Reksoatmojo, 2004).

2.6.2 Coefficient of Power (Cp)

Coefficient of Power dapat didefinisikan sebagai rasio antara daya turbin pada poros (P_t) dengan daya angin (P_w) karena energi kinetiknya sebelum mengenai permukaan sudu turbin (Sargolzaei, 2007), dapat dirumuskan sesuai dengan rumus 2-7 dibawah :

$$C_p = \frac{P_t}{P_w} \quad (\text{Sargolzaei, 2007:52}) \quad (2-18)$$

keterangan:

C_p : *Coefficient power*

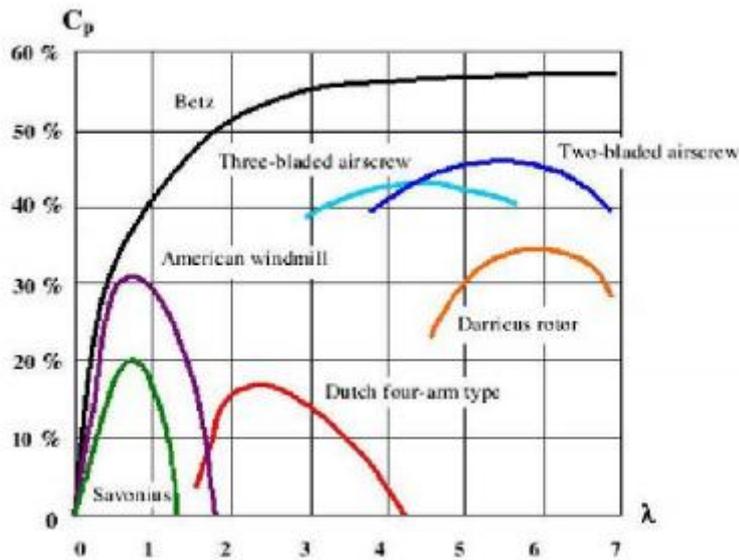
P_t : Daya pada poros turbin (watt)

P_w : Daya Angin (watt)

Hasil dari persamaan diatas adalah bilangan tanpa satuan yang menyatakan faktor keefektifan dari daya yang dihasilkan dengan arah putaran yang sama. Sehingga bentuk dari sudu sangat mempengaruhi besarnya C_p .

2.6.3 Daya pada Turbin Angin Bilah Bersirip

Besar daya yang dapat dibangkitkan dari putaran rotor turbin angin bilah bersirip dapat dihitung melalui pendekatan teori Betz. Percobaan Betz dapat dilihat pada gambar 2.12 berikut :



Gambar 2.12 : Performance of Main Conventional Wind Machines

Sumber : Bourabaa, 2004

Berdasarkan teori Betz yang divisualisasikan dalam bentuk grafik pada gambar 2.12, menjelaskan ketidakmungkinan suatu desain turbin angin memiliki *coefficient of 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 . 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 :

$$\lambda = \frac{\omega R}{v} \quad (\text{Fox, 1994: 579}) \quad (2-19)$$

keterangan:

$$\omega : \text{kecepatan sudut} = \frac{2\pi n}{60}$$

R : radius rotor (m)

v : kecepatan angin (m/s)

Dengan diketahuinya nilai λ dapat ditarik suatu garis lurus vertikal pada grafik gambar 2.12 untuk mengetahui berapa nilai C_p maksimum. Pada turbin angin Savonius

dengan tinggi rotor H serta jari-jari rotor R, dikenai aliran angin berkecepatan V, maka daya maksimumnya adalah :

$$P_{\text{aktual}} = C_p \rho R H v^3 \quad (\text{Menet, 2004: 20})$$

dengan :

P_{aktual} : Daya aktual turbin (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 Savonius ketika mengkonversikan energi kinetik aliran angin.

2.7 Hipotesa

Meningkatnya tinggi sudu menyebabkan luas daerah terpaan angin pada sudu turbin akan bertambah, massa aliran yang meningkat akan menyebabkan gaya *drag* yang bekerja pada sudu juga semakin besar, akibatnya torsi pada rotor semakin tinggi, daya poros juga bertambah.