

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitian Sebelumnya

Soelaiman, dkk (2007) melakukan beberapa penelitian tentang beberapa macam *blade*, yaitu *savonius* dengan *blade* tipe U dan *savonius* dengan *blade* tipe L. dari penelitian mereka menyimpulkan bahwa *blade savonius* tipe L menghasilkan unjuk kerja yang paling baik dibandingkan dengan tipe yang lain.

Hermawan (2010) melakukan variasi terhadap jumlah sudu dan posisi sudu turbin *savonius* tipe U. Penelitian ini menggunakan turbin *savonius* tipe U tiga tingkat. Hasil dari penelitian ini adalah nilai C_p maksimum dihasilkan oleh turbin dengan dua sudu. Namun daya maksimum dihasilkan oleh turbin dengan tiga sudu.

Hendra A. (2012), dalam penelitiannya yang berjudul *Pengaruh Jumlah Sudu Terhadap Unjuk Kerja Turbin Angin Savonius*. Menggunakan metode penelitian eksperimental dengan variasi jumlah sudu : 2, 3, dan 4 buah dengan variabel bebas kecepatan angin pada *wind tunnel* dari kecepatan 3 m/s, 4m/s, 5m/s, 6m/s dan 7 m/s. Didapatkan hasil analisis bahwa turbin angin dengan jumlah sudu 3 buah memiliki unjuk kerja yang tinggi dibandingkan dengan jumlah sudu yang lain. Hal ini terjadi karena pada turbin dengan jumlah sudu 3 buah mempunyai jarak antara sudu yang satu dengan lainnya terhadap poros sudu turbin mempunyai kerenggangan menjadikan aliran dapat mengalir dan menerpa sudu di belakang poros dan ini akan meningkatkan gaya momen serta mengurangi gaya hambat negatif pada sudu sehingga aliran turbulensi yang terdapat pada turbin tersebut relatif kecil.

2.2 Angin

2.2.1 Pengertian Angin

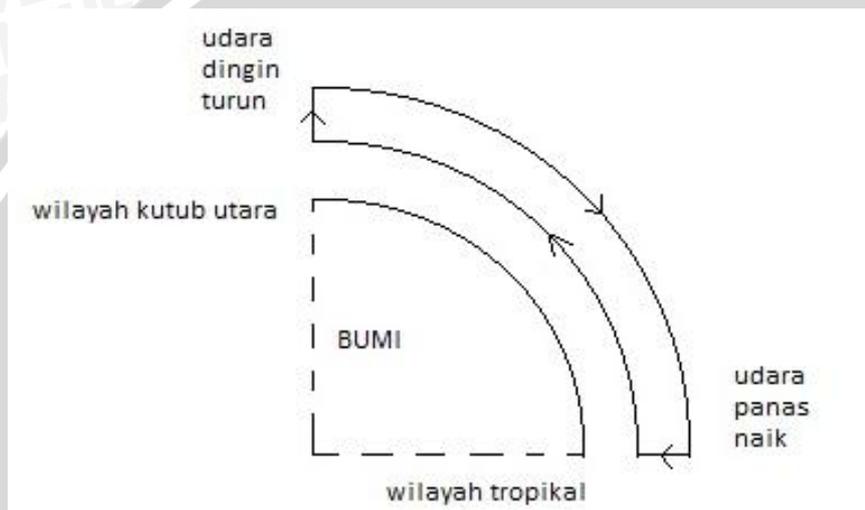
Angin adalah udara yang bergerak akibat adanya perbedaan tekanan dengan arah aliran angin dari tempat yang memiliki tekanan tinggi ke tempat yang bertekanan rendah atau dari daerah yang memiliki suhu rendah ke tempat yang bersuhu tinggi. (wikipedia.org/Angin).

2.2.2 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

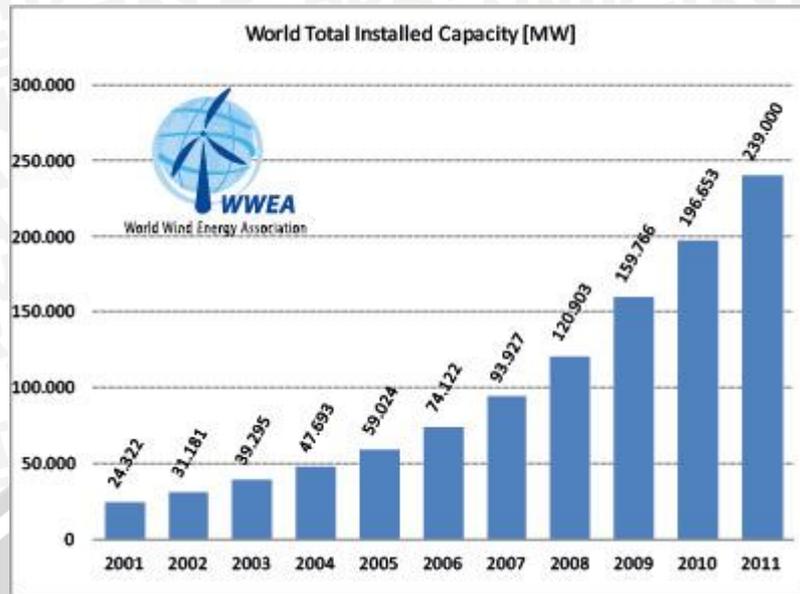
aliran udara. Angin juga dapat disebabkan oleh pergerakan benda, sehingga mendorong udara di sekitarnya untuk bergerak ke tempat lain (Kadir, 1996).

Terlihat pada gambar 2.1 bahwa 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.



Gambar 2.1 : Skema Terjadinya Angin.
Sumber: Diadopsi dari 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 dan garis pantai yang sangat 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 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	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 Beaufort	m/dt		
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 bsr 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 : Hasan (2011)

2.2.3 Energi Angin

Menurut ilmu fisika, energi kinetik didapat ketika sebuah obyek yang memiliki massa m bergerak dengan kecepatan v translasi atau rotasi. Energi kinetik dapat dinyatakan dengan rumus:

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

keterangan :

- E = energi dari udara yang bergerak (joule)
- m = massa udara (kg)
- v = kecepatan angin untuk waktu tertentu (m/detik)

Rumus 2-1 di atas juga berlaku untuk angin yang merupakan udara yang bergerak. Terlihat pada gambar 2.3 Bilamana suatu “blok” udara memiliki penampang A dan bergerak dengan kecepatan v, maka jumlah massa yang melewati suatu tempat dapat dilihat pada rumus 2-2 berikut:

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

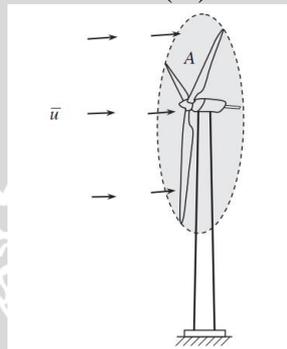
keterangan :

- \dot{m} = laju alir massa udara (kg/s)
- ρ = kerapatan udara (kg/m³)
- v = kecepatan udara (m/s)
- A = luas penampang (m²)

Dengan $A = d \times h$

d : diameter sudu (m)

h : tinggi sudu (m)



Gambar 2.3 : Luas Daerah Sapuan Turbin Angin

Sumber : Wei Tong, (2010 : 10)

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

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

$$= (1/2 \cdot m \cdot v^2) / t$$

$$= 1/2 \cdot m/t \cdot v^2$$

$$= 1/2 \cdot \dot{m} \cdot v^2$$

$$= 1/2 \rho \cdot A \cdot v^3$$

keterangan :

P_w = power / daya (W)

Work = energi angin. (Joule)

ρ = kerapatan udara (kg/m³)

A = luas penampang (m²)

v = kecepatan angin (m/detik)

2.3. Turbin Angin

2.3.1. Pengertian Turbin Angin Untuk Pembangkit Listrik

Turbin angin untuk pembangkit listrik adalah sebuah sistem yang dapat mengubah energi kinetik angin menjadi energi mekanis pada kincir, sehingga dapat menggerakkan poros yang memutar generator yang akan menghasilkan listrik (Wikipedia, 2012).

2.3.2. 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 dengan sumbu horizontal memiliki sudu yang berputar pada bidang vertikal seperti halnya propeler pesawat terbang seperti pada gambar 2.4. 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. Fenomena ini menimbulkan daerah tekanan rendah pada belakang sudu dan daerah tekanan tinggi pada depan sudu. Perbedaan tekanan ini membentuk gaya yang menyebabkan sudu berputar.



Gambar 2.4 : 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 ciri utama yaitu poros/sumbu rotor utama yang disusun tegak lurus terhadap permukaan tanah terlihat pada gambar 2.5. Pada umumnya turbin angin jenis ini memiliki putaran awal yang baik, sehingga dapat beroperasi walaupun dalam kecepatan angin yang rendah. Torsi yang dihasilkan pun lebih tinggi dibandingkan dengan HAWT.



Gambar 2.5 : Turbin Angin *Vertical Axis Wind Turbine (VAWT)*
 Sumber : Hau E, (2006)

2.4 Turbin Angin Savonius

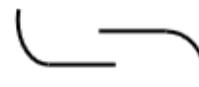
2.4.1 Pengertian Turbin Angin Savonius

Salah satu jenis turbin angin sumbu vertikal (VAWT) yang dapat digunakan pada angin dengan kecepatan rendah adalah turbin angin *Savonius*. Turbin ini ditemukan oleh sarjana Finlandia bernama Sigurd J. Savonius pada tahun 1922. Konstruksi turbin sangat sederhana, tersusun dari dua buah sudu setengah silinder. Desain turbin Savonius mempunyai beberapa keuntungan dibandingkan dengan turbin angin poros horizontal. Dalam kaitannya dengan poros, Savonius dapat beroperasi pada arah angin yang bermacam-macam, dimana hal ini tidak ditemukan pada turbin poros horizontal. Desain Savonius dapat beroperasi pada kecepatan angin yang rendah, sehingga tidak memerlukan sebuah menara penyangga dan dapat ditempatkan pada dasar tanah untuk mempermudah pemeliharaan. Dari kesederhanaan struktur turbin Savonius, maka banyak dimanfaatkan untuk kebutuhan rumah tangga, seperti pembangkit listrik skala kecil

Pada perkembangannya turbin Savonius ini banyak mengalami perubahan bentuk rotor, seperti desain rotor yang berbentuk huruf L seperti ditunjukkan oleh Gambar 2.6 berikut.



(a) Tipe U



(b) Tipe L

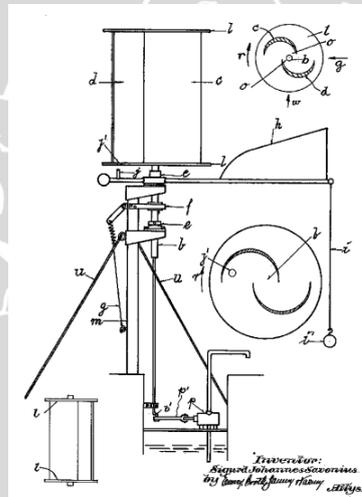
Gambar 2.6 tipe rotor savonius
 Sumber : soelaiman, (2006)



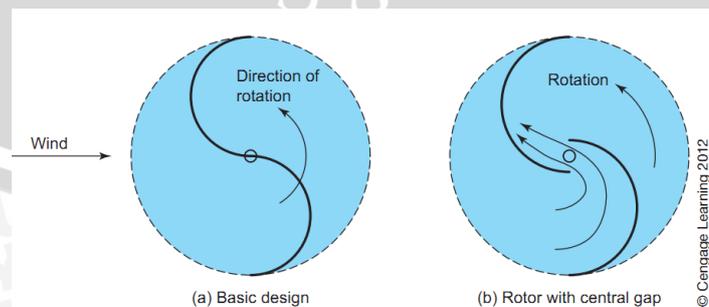
Pada rotor *Savonius*, angin yang berhembus salah satu bilah rotor diharapkan lebih banyak mengalir ke bilah rotor lainnya melalui celah di sekitar poros sehingga menyediakan daya dorong tambahan pada bilah rotor ini, akibatnya rotor dapat berputar lebih cepat.

Dari pengembangan rotor *Savonius* L oleh Sadaaki diatas terlihat bahwa pada bentuk rotor *Savonius* setengah lingkaran *Savonius* U yang dipatenkan seperti pada gambar 2.7, aliran udara di kedua sisi bilah sama besar, sementara pada rancangan kedua *Savonius* L aliran udara pada sisi bilah yang lurus lebih besar dibandingkan pada sisi bilah lengkung seperempat lingkaran (Soelaiman, 2006).

Konsep turbin angin *Savonius* cukup sederhana, prinsip kerjanya berdasarkan *differential drag windmill* seperti pada gambar 2.8. Pada perkembangan selanjutnya, rotor *Savonius* tidak lagi selalu berbentuk setengah silinder, tetapi mengalami modifikasi guna meningkatkan performa dan efisiensi.



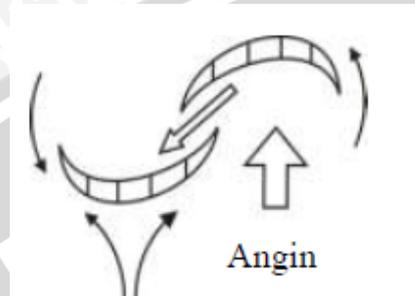
Gambar 2.7 : Turbin Angin Tipe Vertikal *Savonius* yang Dipatenkan
Sumber : Wei (2010 : 281)



Gambar 2.8 : Tampak Atas Desain Alternatif Turbin Angin *Savonius*
Sumber : Ahmad H. (2012 : 60)

2.4.2. Prinsip Kerja Turbin Angin *Savonius*

Angin jenis ini memiliki prinsip kerja yang sama seperti turbin pada umumnya. Dimulai dari pemanfaatan energi kinetik yang dimiliki angin, kemudian dikonversikan oleh sudu menjadi energi mekanik poros. Hal ini dapat kita lihat pada gambar 2.9 berikut.



Gambar 2.9 : Prinsip kerja turbin angin *savonius type L*

Sumber : soelaiman, (2006)

Turbin angin *savonius* adalah jenis turbin angin tipe *drag*, seperti pada gambar 2.9 diatas dimana turbin ini menghasilkan daya dengan memanfaatkan gaya drag yang di hasilkan dari tiap-tiap sudunya. Drag merupakan gaya yang bekerja berlawanan dengan arah angin yang menumbuk sudu (white, 1986: 412). Besarnya gaya drag yang dihasilkan oleh masing sudu tergantung dari nilai *Coefficient of Drag* dari sudu tersebut sesuai dengan rumus 2-5 berikut :

$$C_d = \frac{\text{Drag}}{\frac{1}{2}\rho A v^2} \quad (\text{White, 1986: 413}) \quad (2-5)$$

$$\text{Drag} = C_d \frac{1}{2}\rho A v^2$$

keterangan :

C_d = *Coefficient of Drag*

Drag = Gaya drag (kg.m/s²)

ρ = Massa jenis udara (Kg/m³)

A = Luas permukaan sudu (m²)

v = Kecepatan angin (m/s)

untuk mengetahui besarnya *Coefficient of Drag* dari tiap-tiap bentuk sudu dapat dilihat pada tabel dibawah

Tabel 2.3 : *Coefficient of Drag* tiap-tiap bentuk sudu

	SHAPE	C_D		SHAPE	C_D
1)		0.47	12)		1.17
2)		0.38	13)		1.20
3)		0.42	14)		1.16
4)		0.59	15)		1.60
5)		0.80	16)		1.55
6)		0.50	17)		1.55
7)		1.17	18)		1.98
8)		1.17	19)		2.00
9)		1.42	20)		2.30
10)		1.38	21)		2.20
11)		1.05	22)		2.05

Sumber : : <http://www.aerospaceweb.org>, 2005

Dari tabel di atas terlihat perbedaan *Coefficient of Drag* pada bentuk setengah lingkaran dengan dua posisi berbeda. Dari perbedaan tersebut *drag* yang dihasilkan masing-masing sudu juga berbeda, sehingga resultan gaya-gaya yang bekerja akan mengakibatkan rotor berputar. Dengan kata lain, torsi pada turbin angin *savonius* dihasilkan dari perbedaan tekanan antara bentuk cembung dan cekung sudu yang menghadap ke arah angin dan juga dari efek resirkulasi pada sisi cembung yang mengarahkan angin ke belakang melawan arah angin.

2.5. Unjuk Kerja Turbin Angin Savonius

2.5.1 Brake Horsepower (BHP)

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

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

keterangan:

$P_{generator}$ = Daya generator listrik (Watt)

V = Tegangan generator listrik (Volt)

I = Arus listrik (Ampere)

Setelah didapatkan harga $P_{generator}$ maka dapat dihitung BHP :

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

keterangan:

BHP = Brake Horse Power (watt)

$P_{generator}$ = Daya generator listrik (watt)

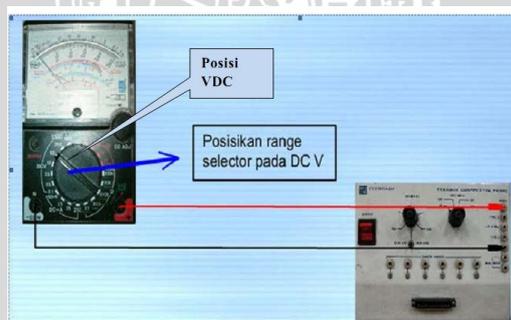
η_{motor} = Efisiensi generator listrik (%)

- Prinsip pengukuran tegangan dan arus DC

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

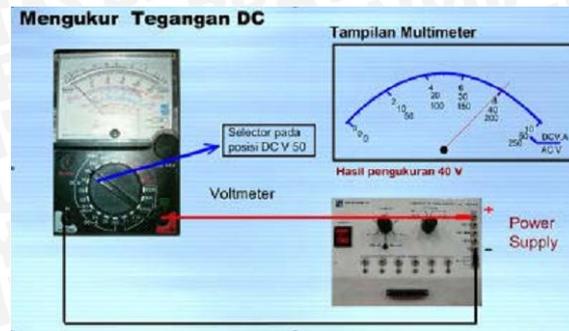
- Pengukuran tegangan DC

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 seperti pada gambar 2.10 dan gambar 2.11. Sedangkan pengukuran arus DC dapat kita lihat pada gambar 2.12 dan gambar 2.13.



Gambar 2.10 : Rangkaian Pengukuran Tegangan DC

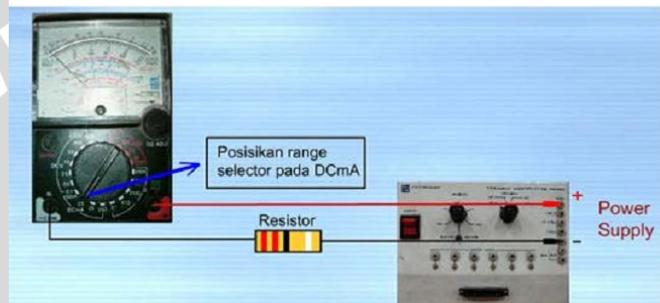
Sumber : Sri (2008 : 78)



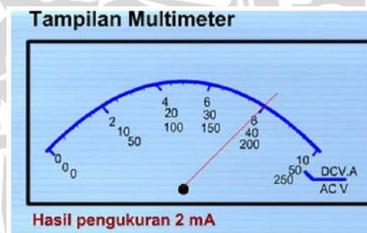
Gambar 2.11 : Penunjukkan Pengukuran Tegangan DC
 Sumber : Sri (2008 : 78)

- Pengukuran arus DC

Pemasangan meter seri terhadap beban yang akan di ukur arusnya.



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



Gambar 2.13 : Penunjukkan Pengukuran Arus DC
 Sumber : Sri (2008 : 85)

2.5.2 Torsi (T)

Torsi biasa disebut juga momen atau gaya yang menyebabkan atau mengubah gerak rotasi dari suatu benda. Besar torsi dapat dihitung dengan menggunakan rumus :

$$T = \frac{BHP}{2\pi \frac{n}{60}} \quad (2-8)$$

keterangan :

T = Torsi (Nm)

BHP = Brake Horse Power (Watt)

$n_{generator}$ = Putaran generator (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. Rumus efisiensi adalah sebagai berikut :

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

keterangan :

η = Efisiensi (%)

BHP = Brake Horse Power (Watt)

P input = Daya masukan / Daya angin (Watt)

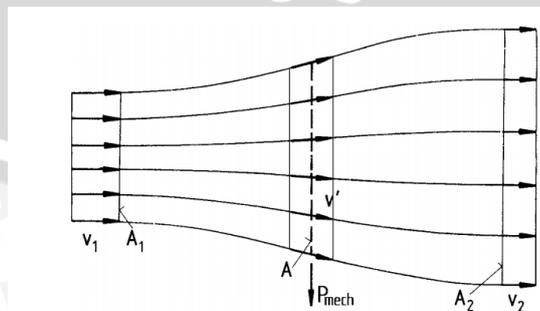
2.6 Teori dan Persamaan

2.6.1 Teori Betz

Teori Bertz 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) seperti pada gambar 2.14. Jika V_1 = kecepatan angin didepan rotor, V_2 = kecepatan angin dibelakang rotor, dan V = kecepatan angin ketika melewati rotor, maka berdasarkan persamaan kontinuitas :

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

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

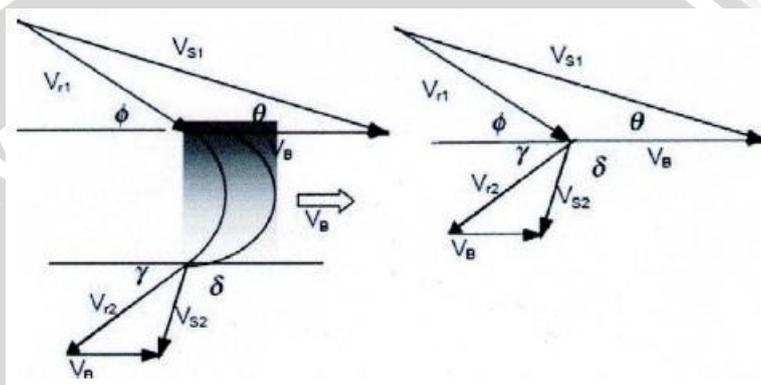


Gambar 2.14 : Aliran Udara Berdasarkan Teori Betz

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* seperti pada gambar 2.15. 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.



Gambar 2.15: Skema segitiga kecepatan
Sumber : Sunyoto (2011: 15)

- 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 Savonius

Pmerupakan daya maksimum yang dihasilkan oleh poros rotor turbin angin *Savonius* ketika mengkonversikan energi kinetik aliran angin.

$$P = \frac{1}{2} \rho \cdot A \cdot v^3 \quad (2-15)$$

keterangan :

- P = daya Turbin Angin *savonius* (W)
- ρ = kecepatan udara (kg/m^3)
- A = luas penampang (m^2)
- v = kecepatan angin (m/detik)

2.7 Hipotesa

Dengan bertambahnya tinggi sudu menyebabkan luas daerah terpaan angin pada sudu turbin akan bertambah, sehingga gaya dorong yang bekerja pada sudu juga bertambah, akibatnya daya poros, torsi dan efisiensi yang dihasilkan oleh turbin angin *savonius type L* akan bertambah besar.

