

PENINGKATAN UNJUK KERJA TURBIN ANGIN ROTOR SAVONIUS DENGAN PEMAKAIAN ABAR SENTRIFUGAL, HOOD DAN RUDER

Adi Purwanto ¹

ABSTRACT

Clean water performing for urban society is a serious problem, because clean water is very important thing not only for life but also for home industry. To supply clean water from water sources to urban society neighborhood is needed a very expensive equipment, including the operational cost. Wind turbine is right solution to solve this problem as a energy source for water supplying for urban society because wind energy is available along a years. Savonius Rotor Wind Turbine is one of many Turbine Wind types. Savonius Rotor is a vertical shaft rotor type which simple construction and low cost production. Increasing the performance of this rotor is earned by using design optimization and modification method. This a low speed turbine need wind energy speed of 3–4 Beaufort Scale (7-16 knot) which has Centrifugal Brake, Hood and Ruder.

This Savonius Rotor can supply 284, 47 Watt of electrical power that is used to water pumping.

Key words : *Savonius rotor, centrifugal brake, hood and ruder*

INTISARI

Pengadaan air bersih bagi penduduk pedesaan merupakan masalah serius, karena air merupakan kebutuhan hidup sehari-hari, maupun untuk keperluan usaha. Prasarana fisik untuk pengadaan air sangat mahal, termasuk biaya operasionalnya. Turbin angin adalah solusi yang tepat sebagai sumber energi untuk pengadaan air tersebut, karena energi angin tersedia sepanjang tahun. Turbin angin rotor Savonius adalah turbin poros vertikal yang mempunyai konstruksi sederhana dan cukup mudah pembuatannya. Melalui optimasi rancangan dan modifikasi dapat diperoleh unjuk kerja yang lebih baik. Turbin dengan kecepatan rendah ini membutuhkan energi angin dengan kecepatan 3 –4 Skala Beaufort (7 – 16 knot) dilengkapi dengan abar sentrifugal, perisai dan sudu pengarah sehingga dapat menghasilkan energi 284,47 Watt digunakan untuk pemompaan air bersih.

Kata kunci: *rotor Savonius, abar sentrifugal, hood dan ruder.*

PENDAHULUAN

Dewasa ini mesin-mesin tenaga kebanyakan bekerja dengan pemalihan energi bahan bakar menjadi energi termal yang diperoleh dengan proses pembakaran. Kebutuhan energi dunia untuk transportasi, listrik, pemanas, dan lain-lain, kira-kira 90% dibangkitkan dengan proses pembakaran bahan bakar cair, gas dan padat. Sedang sisanya diperoleh dari tenaga nuklir, tenaga air, tenaga panas bumi, tenaga gelombang, tenaga angin dan lainnya (Borman, Ragland, 1986).

Kebanyakan bentuk energi adalah listrik yang dihasilkan oleh pembakaran bahan bakar fosil untuk mendidihkan air. Air mendidih menghasilkan uap yang digunakan untuk menggerakkan turbin untuk membangkitkan listrik. Setiap jam hampir 1.000.000 Ton bahan bakar fosil dibakar. Bahan bakar ini tidak dapat diperbarui. Meskipun bahan bakar minyak dan gas masih tersedia cadangan hingga 50 tahun mendatang, sementara batu bara masih tersedia hingga 300 tahun mendatang, akan tetapi sumber energi terbarukan harus dikembangkan sebelum bahan bakar

¹ Staf Pengajar Jurusan Teknik Mesin, FTI, ISTA, Yogyakarta

fosil habis. Karena bahan bakar fosil menyebabkan kerusakan lingkungan yang serius. Pada proses pembakaran bahan bakar fosil, menghasilkan gas beracun yang jatuh menjadi hujan asam yang dapat merusak atau mematikan flora dan fauna serta struktur bangunan. Beberapa gas beracun tersebut juga mengakibatkan pengaruh rumah kaca, yang sedikit demi sedikit telah mengakibatkan pemanasan global. Angin merupakan salah satu energi alternatif terbarukan yang disediakan alam. Pada awalnya energi angin hanya digunakan pada sektor pertanian, yaitu untuk menggerakkan pompa air, penyediaan energi mekanik untuk menggerakkan mesin penumbuk padi atau penggiling gandum. Setelah ditemukan sistem konversi, energi angin sudah bisa diubah menjadi energi listrik dalam skala kecil. Disebabkan oleh berkembangnya mesin uap, dan motor bakar yang merupakan implementasi teknologi energi fosil yang bisa menghasilkan energi listrik dalam skala besar ditemukan penggunaan energi angin seolah terlupakan. Tahap berikutnya, implementasi turbin angin didorong oleh kesadaran akan masalah kerusakan lingkungan dan perkembangan teknik pesawat terbang. Dengan berkembangnya teori tentang aerodinamika yang menerapkan azas *streamline* maka telah dapat dibuat baling-baling *streamline*, sehingga efisiensi turbin angin dapat ditingkatkan dengan menurunkan kerugian akibat gesekan udara. Beberapa bentuk baling-baling atau sudu *streamline* dibuat berdasarkan standard; *NACA, Gttinger, Clark*, atau yang lainnya. Angin mempunyai energi kinetik dalam jumlah besar, akan tetapi hanya sesuai dengan kecepatannya. Energi angin berasal dari matahari. Matahari memanaskan udara di bumi, sehingga timbul perbedaan berat jenis, dan menyebabkan pergerakan udara yang disebut angin. Oleh karena itu Energi angin juga disebut sebagai "*the greatest terrestrial medium harvesting, harnessing, and conserving solar energy*". Energi angin telah digunakan ribuan tahun yang lalu untuk mendorong kapal, dan menggerakkan

mesin giling biji-bijian, yang kesemuanya itu bertujuan untuk mengurangi kejerihan manusia. Di Mesir kuno, penggunaan kincir angin sejak 3600 SM, untuk pemompaan air irigasi dan menepung butiran. Di Persia (sekitar 200 SM) telah dibuat kincir air sumbu vertikal dengan layar kain terbentang radial, dipasang pada dinding batu yang sekaligus sebagai pengarah angin. Di Cina pada masa dinasti Sung, telah dikembangkan kincir angin horisontal digunakan untuk irigasi, pengi-lingan dan konveyor gayung dari bambu. Di Thailand, kincir angin digunakan untuk menggerakkan konveyor pengangkat air untuk irigasi. Di Eropah penggunaan kincir angin dipelopori oleh Belanda dan Inggris sejak abad XII hingga XIII. Selanjutnya, teknologi kincir angin berkembang dengan beberapa tipe, untuk poros vertikal antara lain; 1) rotor Darrieus, 2) rotor Savonius, dan 3) rotor cross arm. Sedangkan beberapa tipe kincir angin poros horizontal antara lain; a) *sail windmill*, b) *jumbo windmill*, c) *merry-go-round windmill*, d) *battle-ax windmill*, e) *Holland windmill*, f) *American fanwheel windmill*, g) *bicycle multiblade windtur-bine*, selanjutnya berkembang turbin angin modern dengan sudu berbentuk *airfoil* yang *streamlin* dengan efisiensi yang lebih tinggi. Dari seluruh tipe kincir atau turbin angin jenis poros horizontal dan turbin angin poros vertikal tersebut yang banyak diterapkan untuk menghasilkan daya yang besar adalah jenis turbin angin poros horizontal. Dua turbin angin terbesar di dunia adalah LS-1 (berdiameter 60 m, dan keluaran 3 MW) milik Inggris di Pulau Orkney, dan MOD 5-B (berdiameter 96 m, dan keluaran 36 MW) milik Amerika di Hawaii.

Jadi energi angin dapat digunakan untuk menghasilkan listrik yang merupakan bentuk umum dari energi. Analog dengan pemberian nama untuk pembangkit listrik yang lain, konversi energi angin menjadi energi listrik melalui turbin angin disebut pembangkit listrik tenaga bayu (PLTB). Hasil pengukuran LAPAN selama 2 tahun tentang potensi angin di

Indonesia (*Win Atlas Analysis and Application*) bahwa kecepatan angin rata-rata tahunan sekitar 3 – 5 m/s pada ketinggian sampai 30 meter dan kecepatan maksimum hanya terjadi di beberapa tempat yang besarnya 20 – 30 m/s. Dengan demikian turbin angin yang potensial dibangun di Indonesia adalah yang berskala kecil sampai menengah.

TABEL. 1. KECEPATAN ANGIN RATA-RATA BULANAN & ENERGI ANGIN SPESIFIK DI INDONESIA TAHUN 1996.

No	Bulan	Kecepatan Angin (m/s)	Energi Angin Spesifik (KWh/m ²)
1	Jan	4.5	43.600
2	Feb	5.5	76.209
3	Mar	3.9	29.531
4	April	3.5	17.832
5	Mei	4.0	26.711
6	Juni	3.8	25.714
7	Juli	4.5	39.248
8	Agust	4.9	48.539
9	Sept	5.1	49.335

Sumber: LAPAN

Rotor Savonius

Turbin angin rotor Savonius, adalah turbin poros vertikal dengan penampang melintang berbentuk huruf S, dikembangkan oleh S. J. Savonius, seorang sarjana Finlandia pada 1920an. Rotor savonius adalah desain turbin angin yang populer terbuat dari drum minyak dibelah dua, disusun saling berhadapan (membentuk huruf S), konstruksi sederhana dan praktis, sehingga cocok untuk pemakaian lokal. Ditinjau dari prinsip kerjanya turbin angin ini termasuk jenis *vertical axis differential drag windmill*. Selain itu rotor Savonius, tidak terpengaruh oleh arah angin. Beberapa percobaan tentang turbin angin poros vertikal rotor Savonius dilakukan oleh universitas kebanyakan bertujuan untuk penyediaan energi listrik dan pemompaan air.

Prof. John D. Isaacs (Scrips Institution of Oceanography) tertarik dan membuat rotor Savonius dengan lengan horizontal untuk pemompaan.



Gambar 1. Rotor Savonius.

Newman dan Lek Ah Chai dari McGill University, Montreal meneliti tentang turbulensi yang terjadi pada rotor Savonius dengan membuat 5 unit model rotor berukuran diameter dan tinggi; $\varnothing 6'' \times 15''$, masing-masing rotor di-offset dengan $e = 0'', 1'', 1,5'', 2'', \text{ dan } 2,5'$. Percobaan menghasilkan diagram polar, koefisien daya, dan koefisien momen yang akan digunakan untuk acuan dalam pembuatan rotor yang sebenarnya.

Akhmad K. Maliki dan Adi P.Wakhid (KKN 1995, ISTA Yogyakarta) telah mengembangkan program TTG turbin angin rotor Savonius untuk keperluan pompa kolam ikan air tawar di Plumbon, Kec. Temon, Kulonprogo. Rotor berukuran radius sudu dan tinggi; $R11'' \times 34''$. Jarak offset sudu tidak dilakukan dengan *trial n error*, tetapi dengan perhitungan selisih antara diameter rotor rata-rata, D_{ave} dan diameter efektif, D_{mean} . Pada rotor ideal, yakni sebuah rotor yang mempunyai jumlah sudu tak terhingga dengan ketebalan 0, dianggap udara

mempunyai perilaku sempurna. Artinya, energi kinetik dengan massa kolom udara akan mendorong sudu rotor secara tangensial dengan titik tangkap tepat pada diameter rata-ratanya. Secara aktual, terdapat perbedaan antara D_{ave} dan D_{mean} , hal ini, adalah akibat dari diameter hub D_{hub} , yang harus diperhitungkan untuk mampu melawan energi angin dalam luasan kolom udara.

Alexey J. Stepanoff telah merumuskan *design constants* untuk *rotodynamic impeller* dengan membedakan antara D_{ave} dan D_{mean} . Dalam formula berikut:

$$D_{mean} = \sqrt{\frac{D_{out}^2 + D_{in}^2}{2}} \quad (1)$$

dan

$$D_{ave} = (D_{out} + D_{in}) / 2 \quad (2)$$

sehingga *offset*, e adalah

$$e = D_{mean} - D_{ave}$$

Jika $D_{hub} = D_{in}$, dari hasil rancangan $D_{hub} \varnothing 1.5"$, maka dapat ditentukan *offset* $e = 98$ mm. Daya teoritis dari turbin angin dapat dihitung sebagai berikut;

Masa kolom udara, M

$$M = \rho V t A \quad (3)$$

Energi kinetik kolom udara, E_k

$$E_k = M \frac{V^2}{2gc} = \rho \frac{V^3}{2gc} t A \quad (4)$$

Dalam hal ini, A adalah luasan kolom udara yang mendorong rotor, adalah diameter sudu x tinggi rotor (m^2). Masa jenis udara, ρ (kg/m^3) dan kecepatan angin V (m/s), maka daya angin, P dapat dihitung sebagai berikut:

$$P = \rho \frac{V^3}{2gc} A \quad (kW) \quad (5)$$

Poros turbin angin dikopel dengan kotak roda gigi payung, poros keluaran horizontal berhubungan dengan poros engkol untuk menggerakkan 2 unit pompa air Dragon. Pompa air mempunyai ukuran diameter dan

langkah torak $\varnothing 4" \times 8"$, dengan putaran poros engkol 60 rpm, digunakan untuk mengangkat air dari saluran irigasi menuju kolam budidaya ikan air tawar dengan beda elevasi 1,6 m.

Reksoatmodjo, T.N, pada Tahun 2004 telah melakukan eksperimen dengan mengembang-kan PLTAn atau PLTB, daya teoritis 1000 Watt, kecepatan angin $B_N 9$ atau $V = 22$ m/s. Dari hasil rancang bangun mendapatkan spesifikasi teknik turbin angin dengan diameter rotor 400 mm, diameter sudu-sudu 250 mm, tinggi rotor 600 mm, jumlah sudu-sudu = 3, *offset* sudu terhadap sumbu poros 100 mm. Turbin udara tersebut diuji-coba di perbukitan sekitar Cimahi Selatan selama bulan Januari s/d Maret 2004, dari percobaan pada $B_N = 2 \div 10$ tersebut diketahui turbin angin mempunyai efisiensi mekanis sebesar 0,670 hingga 0,836.

PEMBAHASAN

Arah angin dan Kecepatan angin

Angin terjadi saat udara mengalami perbedaan berat jenis yang disebabkan oleh panas matahari. Di seluruh dunia terdapat pola angin yang tetap, yang selalu bertiup ke arah yang sama. Akan tetapi panas matahari yang diterima atmosfer di setiap tempat tidak sama dan terdapat variasi tekanan udara yang menyebabkan udara akan terus bergerak dengan arah yang berubah-ubah dalam bentuk aliran udara yang disebut angin. Karakteristik angin ditentukan oleh arah dan kecepatannya. Pada *altitude* tinggi, arah angin terpengaruh oleh putaran bumi. Hukum Buisballot menjelaskan bahwa pola angin berdasarkan garis lintang, yaitu di daerah tropis, sub tropis dan kutup. Di utara katulistiwa angin berhembus dari arah *timur laut*, di daerah sub tropik terjadi *angin-barat*, sedangkan di daerah kutub terdapat *angin-timur*. Di selatan katulistiwa angin berhembus dari arah *tenggara*, di daerah sub tropik terjadi *angin-barat*, sedangkan di daerah kutub terdapat *angin-timur*.

Satu-satunya besaran yang berubah-ubah yang mempunyai arti penting bagi "angin" adalah kecepatan atau arus angin. Disamping itu besaran yang cukup penting adalah massa jenis. Massa jenis udara berdasarkan standard asmosfir, $\rho_{udara} = 1,225 \text{ kg/m}^3$, pada temperatur 18 °C, tekanan 760 mmHg. Oleh karena pengaruh temperatur maka massa jenis udara di setiap tempat tidaklah sama.

Di Indonesia penelitian masalah angin dilakukan oleh BMG dan LAPAN. Kedua instansi itu telah melakukan pengukuran terhadap angin pada ketinggian 10 m secara berulang kali di beberapa lokasi dan ternyata hasilnya sama, yaitu 3 – 5 m/s. Daratan lebih cepat menerima panas dibandingkan lautan sehingga di daerah pantai terdapat angin-laut pada siang hari, dan terjadi angin-darat pada malam hari. Daerah pantai menjadi tempat yang lebih berangin dari pada daerah lain, sehingga pantai menjadi tempat yang baik untuk pengembangan energi angin. Lembaga Meteorologi Kerajaan Belanda (KNMI) telah membuat peta dan grafik kecepatan angin versus prosenan (V vs %), serta kecepatan angin versus energi spesifik (V vs P). Dalam peta angin diketahui bahwa daerah garis pantai mempunyai kecepatan angin (44% dari waktu dengan kecepatan angin 11 m/s) dan energi spesifik (127 kWh, pada kecepatan 11 m/s) adalah merupakan yang paling besar, berturut-turut menjadi semakin kecil, semakin menjauhi garis pantai. Demikian pula di Indonesia, kendati kecepatan angin rata-rata tahunan 3 – 5 m/s, namun pada daerah-daerah tertentu mempunyai kecepatan yang lebih tinggi. Kecepatan angin yang mudah diukur adalah pada ketinggian 10 m, sedangkan menurut PATRA (2000:13) untuk ketinggian di bawah 10 m digunakan rumus:

$$V_2 = V_1 \left[\frac{Z_2}{Z_1} \right] \quad (6)$$

Dalam hal ini, V_1 = kecepatan angin yang sudah diketahui pada ketinggian Z_1 , V_2 = kecepatan angin yang akan diukur pada ketinggian Z_2 yang lebih besar dari

Z_1 . Kecepatan angin biasanya dinyatakan dengan satuan *knot* atau m/s. Nisbah antara skala Beaufort, kecepatan angin dan tekanan angin dapat dilihat di Tabel 2.

Tabel 2. Nisbah antara skala Beaufort, Kecapatan angin dan Tekanan angin.

Skala Beaufort	Kecepatan/Tekanan Angin		Nama	Deskripsi
	V Knot (m/s)	P (N/m ²)		
0	1		<i>Calm</i>	Asap naik vertikal
1	1-5	13	<i>Light breeze</i>	Dedaunan gemerisik
2	(4-7)	39		
3	7-10 (9)	65	<i>Gentle breeze</i>	Ranting bergerak
4	11-16 (11)	97	<i>Moderate breeze</i>	Cabang kecil bergerak, debu berterbangan
5	17-21 (14)	157	<i>Frash breeze</i>	Pohon kecil berayun-ayun
6	22-33 (16-19)	205	<i>Strong wind</i>	Cabang besar, batang pohon bergerak
7		289		
8	34-47 (23-28)	423	<i>Gale</i>	Pohon patah, tercerai-berai
9		540		
10	48-63 (33-38)	872	<i>Whole gale</i>	Pohon tumbang
11		1160		
12	64-71 (43)	1480	<i>Hurricane</i>	

Sumber: Physics, Principles & Applications.

Energi angin

Terdapat 2 terminologi tentang energi angin, yaitu: 1) Energi Angin yang Tersedia dan 2) Energi Angin yang Diperlukan. *Energi angin yang tersedia* atau *available wind energy* tergantung pada kecepatan angin yang berhembus dan sedikit dipengaruhi oleh temperatur. PLTB mulai menghasilkan daya pada kecepatan angin V_m yang disebut "*cut in speed*". Menurut Rekso-atmodjo (2004:66) pada kecepatan angin sebesar ini, turbin angin masih

mempunyai koefisien daya yang rendah. Selanjutnya jika kecepatan angin bertambah dan mencapai $V_N = \text{rated wind speed}$, barulah PLTB menghasilkan daya nominal sesuai rancangan. Pada kecepatan angin $>V_N$ daya yang dihasilkan akan dipertahankan konstan dengan menggunakan kendali, misal abar sentrifugal.

Menurut Gourieres (1982:25) faktor pola penggunaan energi atau usable energy patern factor Ku dapat ditentukan dengan persamaan:

$$K_u = \frac{V_N^3(t_2 - t_1) + \int_{t_2}^{t_3} V^3 dt}{\bar{V}^3 t} \quad (7)$$

V = kecepatan angin sesaat,

V_N = kecepatan rata-rata,

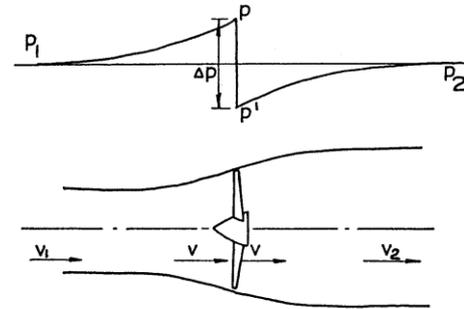
\bar{V} = kecepatan rata-rata tahunan, dalam hal ini

$$\bar{V} = \frac{1}{t} = \int_0^t V dt$$

Keterangan rumus (7), t_1 = waktu dalam setahun di mana kecepatan angin $> V_M$ (= kecepatan angin saat badai, $B_N > 10$, turbin angin harus dihentikan); t_2 = waktu dalam setahun di mana kecepatan angin $> V_N$; dan t_3 = waktu dalam setahun di mana kecepatan angin $> V_m$ (*cut-in-speed*, turbin angin belum menghasilkan daya).

Point of operation dari turbin angin adalah *rotor* atau *propeller*. Sarjana yang pertama memperkenalkan teori tentang turbin angin adalah A.Betz. Pemaparan teori dasar tentang turbin angin ideal dengan asumsi menggunakan rotor tanpa *hub*, dengan jumlah sudu tak terhingga dengan ketebalan nol, tanpa hambatan. Selain hal itu *stream tube* di depan dan belakang rotor memiliki kecepatan dan tekanan yang seragam. Menurut Wartena, R., dalam bukunya *Windgeneratoren* (1987:12) bahwa laju tekanan di depan rotor akan naik secara landai karena terbendung oleh rotor, kemudian terjadi penurunan tekanan karena energinya untuk

memutar rotor, dan setelah itu tekanan kembali ke asalnya.



Gambar 2. *Stream tube* dan Rotor ideal

Jika kecepatan angin V_1 , kecepatan angin saat melalui rotor V , dan kecepatan angin meninggalkan rotor V_2 , maka berdasarkan persamaan kontinuitas dapat dituliskan sebagai berikut :

$$A_1 V_1 = A V = A_2 V_2$$

Selanjutnya menurut Wartena, perbandingan antara $V_1/V_2 = 1/3$, karena luasan *streamtube* menjadi tiga kali lebih besar. Diameter dari *streamtube* di belakang rotor menjadi $\sqrt{3} = 1,73$ kali lebih besar. Dari berbagai penelitian menunjukkan bahwa nilai empiris perbandingan V_1/V_2 terhadap penjabaran secara matematik adalah cocok sekali. Kerugian teoritis aliran udara V_2 pada *streamtube*, jika $V_1/V_2 = 1/3$ adalah sebesar $1/9$. Sehingga $8/9$ dari energi semula akan tersisa, sedangkan hasil tersebut masih dikalikan dengan $2/3$ akibat pembesaran *streamtube* pada rotor. Sehingga dari persamaan (5), jika $\rho_{udara} = 1,204 \text{ kg/m}^3$ (20°C) untuk setiap m^2 luasan rotor, persamaan energinya akan menjadi:

$$P = \frac{1}{2} \times 1,204 \times V^3 = 0,602.V^3 \text{ (Watt)}$$

sehingga

$$P = \frac{8}{9} \times \frac{2}{3} \times 0,602.V^3 = 0,357.V^3 \text{ (Watt)}$$

(8)

Persamaan (8) adalah menunjukkan daya teoritis tiap m² luasan rotor (H x D_{blade}) dengan asumsi ρ_{udara} konstan, tidak terpengaruh oleh pantulan panas dari daratan, karena turbin angin dipancang pada menara >10 m.

Pemasangan Ruder dan Hood pada Rotor Savonius

Perancangan pesawat tenaga atau pesawat kerja selalu diawali dengan idealisasi. Dalam kenyataan kondisi ideal itu tidak akan pernah tercapai. Untuk hal tersebut, perlu dilakukan koreksi terhadap penyimpangan-penyimpangan yang mungkin terjadi.

Rotor Savonius ketika pertama kali dibuat oleh penemunya mempunyai 2 buah sudu. Berbeda dengan turbin ideal dengan jumlah sudu tak terhingga. Rotor dengan 2 sudu hanya mempunyai *duty cycle* 50%, dengan merancang rotor bersudu 3, maka akan diperoleh *duty cycle* sebesar 67%, putaran rotor lebih stabil, serta dapat memberbesar koefisien daya dari rotor turbin. Penambahan jumlah sudu yang lebih banyak lagi, akan berakibat terpaan angin dari tiap-tiap sudu dipengaruhi oleh sudu berikutnya, hal ini akan menurunkan efisiensi aerodinamik rotor.

Kemungkinan terjadinya *circulatory flow* karena sudu berbentuk lengkung juga perlu diperhitungkan. Kondisi ini akan berpengaruh pada Bilangan Reynold karena akan membuat aliran udara berubah menjadi turbulen. Pemasangan *rudder* bertujuan untuk menggerakkan perisai, seperti pada kincir angin Persia atau kincir angin *merry-go-round*. Dengan pemasangan perisai (*hood*) dan sirip kemudi (*rudder*) kinerja turbin angin dapat ditingkatkan, disamping itu pemasangan perisai untuk mengeliminasi arus pusar (Eddy current) pada posisi 180° dari arah angin. Menurut A. Betz koefisien hambatan, C_d (*drag coefficient*) pada bentuk *setengah silinder* yang berada pada *streamline*, sisi cekung mempunyai C_d = 2,3, sedangkan pada sisi cembung C_d = 1,2. (Le & Gourieres, 1982:122) Dengan pemberian perisai (*hood*) maka sisi cembung tidak pernah diterpa angin

secara langsung oleh angin dan akan menurunkan gaya hambat pada sudu.

Perancangan & Pengembangan Rotor Savonius

Turbin angin Plumbon mempunyai rotor dengan diameter sudu x tinggi rotor, yaitu Ø22"x34" = 748 inch² atau 0,483 m². Jika masa jenis udara di Plumbon ± 1,20 kg/m³ (27 °C), dan kecepatan angin V = 9 m/s, maka daya angin, P dapat dihitung sebagai berikut:

$$P = \rho \frac{V^3}{2gc} A \text{ kWatt}$$

$$P = 1,2x \frac{9^3}{2} x 0,483$$

$$= 211,3 \text{ Watt atau } 21,55 \text{ kg.m/detik}$$

Poros turbin tersebut dikopel dengan kotak roda gigi payung, dengan poros keluaran horizontal berhubungan dengan poros engkol untuk menggerakkan 2 unit pompa air Dragon. Pompa air mempunyai ukuran diameter dan langkah torak Ø4" x 8", dengan putaran poros engkol 60 rpm, digunakan untuk mengangkat air dari saluran irigasi menuju kolam budidaya ikan air tawar dengan beda elevasi 1,6 m. Kapasitas pompa air 188,52 liter/menit atau 0,18852 m³/menit. Sehingga daya air dapat dihitung sebesar 3,142 kg.m/detik. Dengan asumsi efisiensi penyaluran daya η_{link} = 0,90 dan efisiensi pompa η_{pump} = 0,75, efisiensi aerodinamik η_{aero} = 0,65 dapat dihitung efisiensi turbin angin penggerak pompa tersebut adalah :

$$\eta_{turbin} = \frac{W_{air}}{W_{turbin} \times \eta_{link} \times \eta_{pump} \times \eta_{aero}}$$

$$\eta_{turbin} = 0,332 \text{ atau } 33,2\%$$

Pengembangan turbin berikutnya, digunakan untuk pengadaan air bersih di Bumi Perkemahan Caturharjo, Kec. Pandak-Bantul. Meskipun diketahui kecepatan angin di Indonesia berkisar antara 3-5 m/s, namun pada daerah-daerah tertentu, khususnya di DIY,

beberapa tempat mempunyai potensi angin yang layak untuk pengembangan PLTB.

Atribut dan optimasi rancangan

Perancangan turbin angin rotor Savonius dikembangkan dengan beberapa *attribute* sebagai berikut:

- Turbin dirancang dengan kecepatan menengah (3 ÷7 m/s), asumsi 40% dari waktu, kecepatan angin 6 m/s.
- Jika terjadi angin kencang/badai (>7m/s) putaran rotor dikendalikan oleh abar sentrifugal.
- Rotor dirancang dengan diameter reatif besar untuk mendapatkan koefisien torsi yang tinggi.
- Ukuran sudu dibatasi oleh ukuran lembaran plat (1200x 2400 mm) dan diusahakan tidak ada sambungan.
- Untuk memperbesar daya turbin susunan rotor dapat dibuat bertingkat, hingga sesuai daya nominal keluaran.

Dengan lebar plat 1200 mm, diameter maksimum sudu-sudu yang dapat dibentuk adalah sebesar 763 mm. Tinggi sudu-sudu ditentukan dengan perhitungan optimasi sebagai berikut: Penerapan teori Betz, terpengaruh dengan perbedaan C_d , dilakukan dengan asumsi $V = V_1$ dan $V_2 = C = R$ (kecepatan rotor). Gaya aerodinamik yang bekerja pada sudu-sudu proporsional dengan $(V + C)^2$ pada arah melawan hembusan angin dan $(V - C)^2$ pada arah hembusan angin. Oleh karena gaya tangensial kecepatan C membentuk sudut 60° terhadap sumbu tegak, maka persamaan daya yang dihasilkan menjadi:

$$P = -\frac{1}{2} \rho A [C_{d1}(V - C \cdot \cos 60^\circ - C \cdot \cos 60^\circ)C - C_{d2}(V + C)^2 C]$$

$$P = -\frac{1}{2} \rho A [C_{d1}(V - C)^2 C - C_{d2}(V - C)^2 C]$$

(9)

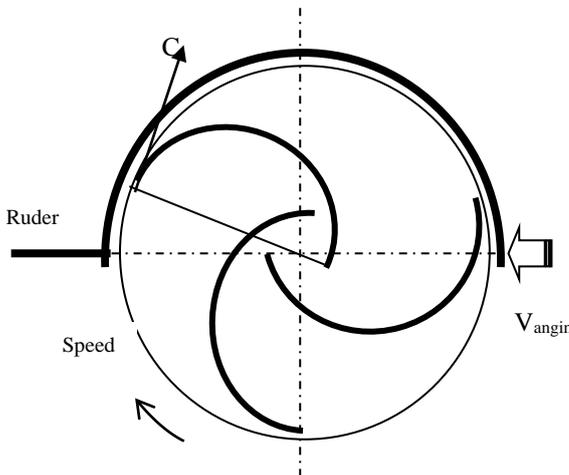
Tabel 3. Kecepatan angin rata-rata di beberapa lokasi wisata DIY.

Nama Tempat	Koordinat		V _{angin} (m/s)	Potensi Daerah
	Altitude	latitude		
Pumbon, Temon	6 m	S 07°53'45" E 110°8'16"	8,1 - 10,9	Ikan air tawar
Suroloyo, Samigaluh	1.060 m	S 07°38'50" E 110°10'43"	11,4 - 13,9	Wisata, bts repeater
Banyu Urip, Pandak	39 m	S 07°48'43" E 110°24'25"	5,5 - 8,0	Wisata, perkemahan
Pandnsimo Srandakan	3 m	S 07°58'16" E 110°14'30"	11,4 - 13,9	Wisata, nelayan
Samas, Bantul	4 m	S 08°00'08" E 110°15'07"	11,4 - 13,9	Wisata, tambak
G. Butak, Patuk	687 m	S 07°54'18" E 110°16'30"	14,1 - 16,9	Wisata, repeater TV

Ket. : Rata-rata mingguan

Pengukuran dilakukan hanya pada siang hari.

tanda minus pada awal persamaan (9) menunjukkan bahwa daya yang dihasilkan merupakan reaksi terhadap daya angin.



Gambar 3. Pemasangan Hood dan Ruder untuk menurunkan hambatan sudu-sudu.

Penyelesaian persamaan (9) menghasilkan:

$$P = -\frac{1}{2} \rho A [C_{d1} (V - C)^2 C - C_{d2} (V + C)^2 C]$$

$$P = -\frac{1}{2} \rho A [C_{d1} (V - C)^2 C - C_{d2} (V + C)^2 C]$$

$$P = -\frac{1}{2} \rho A [C_{d1} (V^2 C - 2VC^2 + C^3) - C_{d2} (V^2 C + 2VC^2 + C^3)]$$

$$P = -\frac{1}{2} \rho A [C_{d1} - C_{d2}] V^2 C - (C_{d1} + C_{d2}) 2VC^2 + (C_{d1} - C_{d2}) C^3 \quad (10)$$

Jika A direncanakan sebanding dengan $(C_{d1} + C_{d2})$ dan D sebanding dengan $(C_{d1} - C_{d2})$ maka pada persamaan (10) diperoleh bentuk:

$$P = \frac{1}{2} \rho A [DC^3 - 2AVC^2 + DV^2 C] \quad (11)$$

Harga C optimum, untuk diferensiasi $\frac{dP}{dC} = 0$ pada persamaan (11)

$$\frac{dP}{dC} = 0, \quad 3DC^2 - 4AVC + DV^2 = 0$$

Kemudian, akar-akar C dicari, sebagai berikut:

$$C_{1,2} = \frac{4AV \pm \sqrt{16A^2 V^2 - 4.3D.DV^2}}{6D}$$

$$C_{1,2} = \frac{4AV \pm \sqrt{4A^2 - 3D^2}}{6D}$$

$$C_{1,2} = \frac{2AV \pm \sqrt{4A^2 - 3D^2}}{3D} \quad (12)$$

Dalam hal ini, dua parameter yang ada ialah A = luasan sudu-sudu, dan D = diameter rotor. Dengan cara *trial n error*, jika perbandingan A dan D², ditentukan maka tiga parameter A, D, dan C diketahui. Diketahui perbandingan sebagai berikut; A = D², A = 1,5 D², dan A = 2D², disubstitusikan ke dalam persamaan (12), diperoleh:

$$C_{1,2} = \frac{3D^2 V \pm V \sqrt{6D^4 - 3D^2}}{3D}$$

$$C_{1,2} = DV \pm \frac{1}{3} V \sqrt{6D^2 - 3} \quad (13)$$

Untuk perbandingan A = 1,5 D², persamaan (13) akan memberikan harga C_{1,2} optimal jika 6D²-3=0. Dengan cara yang sama untuk ke dua harga perbandingan yang lain, diperoleh hasil sebagai berikut:

Rasio A/D	Harga optimum	Diamete r	C _{1,2}
A = D ²	4D ² -3=0	0,870 m	0,58V
A = 1,5 D ²	6D ² -3=0	0,700 m	0,70 V*)
A = 2 D ²	8D ² -3=0	0,430 m	0,58V

Dipilih perbandingan rotor A = 1,5 D².

Spesifikasi teknik data perancangan:

Diameter rotor	: 1.500 mm
Diameter hub	: 100 mm
Tinggi rotor	: 2.250 mm
Radius sudu-sudu rotor	: 375 mm
Offset sudu-sudu	: 260 mm
Jumlah sudu-sudu	: 3

$$P_{non-hood} = \eta_{aero} \times P_{teoritis},$$

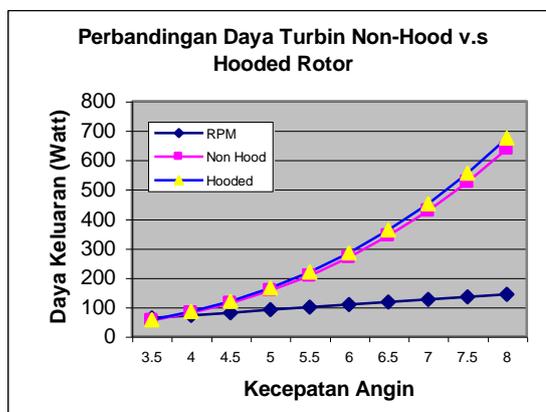
$$P_{non-hooded} = 1,244V^3 \quad (18)$$

Hasil perhitungan daya rotor dibuat dalam Tabel 4. Perbandingan daya turbin dengan rotor tanpa perisai v.s. rotor dengan perisai tampak pada Grafik 1.

Perancangan ini berdasar pada program pengadaan air bersih, daya keluaran turbin sebagai penggerak pompa air dengan daya 150 Watt.

Tabel. 4 Hasil Perhitungan Daya Turbin

V _{Angin} (m/s)	Putaran Rotor (RPM)	Daya Turbin (Watt)	
		Non Hoode	Hooded Rotor
3,5	63	53,34	56,47
4,0	72	79,62	84,29
4,5	81	113,36	120,01
5,0	90	155,5	164,63
5,5	99	206,97	219,12
6,0	108	268,7	284,47
6,5	117	341,63	361,68
7,0	126	426,69	451,73
7,5	135	524,81	555,61
8,0	144	636,93	674,30



Gambar 4. Grafik Performansi Turbin Angin

Abar Sentrifugal

Pengaturan putaran pada turbin angin merupakan masalah yang paling sulit, dan sebetulnya hanya dapat dilakukan dengan baik pada turbin poros mendatar melalui pengaturan laras semua sudu-sudunya, terutama untuk turbin angin putaran rendah. Abar atau rem dengan penggerak sentrifugal dapat diterapkan pada turbin angin, untuk membatasi putaran liar, agar saat terjadi badai tidak terjadi kerusakan pada turbin angin.

Pada pengembangan turbin angin ini digunakan komponen standard dengan mengadopsi komponen atau suku cadang sepatu rem dan teromol truk. Teromol dibuat statis, sedangkan sepatu rem terletak pada piringan berputar untuk membangkitkan gaya sentrifugal. Dalam hal ini diperlukan pegas untuk mengembalikan sepatu rem pada posisi normal.

Konstanta pegas dapat dihitung dengan persamaan:

$$S = \frac{1}{900} \times n^2 \times R \times G \quad (\text{kg}) \quad (19)$$

dengan; n = putaran maksimum saat abar harus bekerja, 144 rpm; R = radius teromol, 25 mm; dan G = berat sepatu rem, 1,5 kg. Maka diperlukan konstan pegas, S = 8,64 kg.

KESIMPULAN

Turbin angin jenis *Savonius hooded rotor*, adalah rotor poros vertikal berperisai dilengkapi dengan kemudi (*ruder*) arah angin. Rotor ukuran \varnothing 1.500 x 2.250 mm, pada kecepatan angin 3 – 4 skala Beaufort mempunyai kecepatan rotor 108 rpm, mampu menghasilkan daya 284,47 Watt. Efisiensi aerodinamik mencapai sebesar 64,8%, sehingga mampu untuk menggerakkan pompa air 150 Watt.

DAFTAR PUSTAKA

- Borman, G.L., dan Ragland, K.W., 1986., *Applied Combustion*, (Lecture Note ME 569) Department of Mechanical Engineering, University of Wisconsin, Madison.
- Reksoatmodjo, T.N., 2005, *Vertical-Axis Differential Drag Windmill*, <http://puslit.petra.ac.id/journals/mechanical/>
- Hughes, W.F., Brighton, J.A., 1967, *Fluid Dynamics*, Schaum's Outline Series, McGraw-Hill Book, Co., New York.
- Rickard, G., 1998, *Alternatif Energy-Weind Energy*, Wayland Publisher, Ltd. London.
- Hughes, W.L. , 1980, *Energy for Rural Development, Renewable Resources and Alternative Technologies for Developing Countries*, 3rd Edition, National Academy of Sciences, Washington, D.C.
- Pertamina, *Mengubah Angin Menjadi Listrik*, PATRA Proben, Edisi XXII-Oktober 2000, 12 – 14.
- Wartena, R. 1987, *Wind Generatoren*, Kluwer Technische Boeken B.V., Deventer - Netherland.