Vertical-Axis Differential Drag Windmill

Tedjo Narsoyo Reksoatmodjo
Dosen Fakultas Teknik, Universitas Jenderal Achmad Yani (UNJANI)

Abstrak

Walaupun pembangunan perlistrikan nasional cukup pesat, namun pada kenyataannya belum dapat menjangkau desa-desa terpencil. Hal ini disebabkan biaya untuk pembangunan jaringan transmisi listrik ke desa-desa terpencil jauh lebih mahal daripada pendapatan yang diperoleh dari pelanggan di desa-desa ter- pencil tersebut.

Indonesia sebagai negara kepulauan, angin merupakan sumber energi yang tersedia sepanjang tahun baik di darat maupun di lautan. Oleh sebab itu suatu pembangkit listrik tenaga angin (PLTAn) berskala kecil dengan konstruksi sederhana dan mudah pemeliharaannya merupakan solusi yang bisa dioperasikan sendiri oleh masyarakat pedesaan.

Kata kunci: pembangkit tenaga listrik, turbin angin, turbin angin deferensial sumbu vertical.

Abstract

Eventhough the development of national electricity in Indonesia rapidly in- creased, but in reality it does not reach the remote villages. The reason is that the establishment of electricity network to reach the remote villages is much more expensive than the revenues gained from the customers.

Indonesia as an archipelagos stretch along the equator, the wind to be the source of energy blows throughout the years both in lands and seas. Therefore a simple small scale wind power generator is considered to be the best solution to provide electricity for the remote village communities.

Keywords: electric power generator, windmill, vertical axis differential drag windmill.

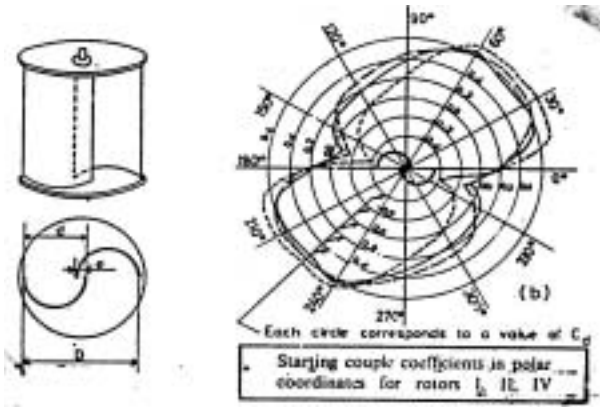
1. Pendahuluan

Turbin angin yang juga dikenal dengan sebutan *kincir-angin* merupakan sarana pengubah energi kinetik angin menjadi energi mekanik untuk memutar generator listrik. Sejarah penggunaan energi angin dimulai sejak abad ke-17 SM dan tersebar di berbagai negara: Persia, Babilonia, Mesir, China dan di benua Eropa dengan berbagai bentuk rancangbangun. Namun berdasarkan kedu- dukan poros, jenis-jenis turbin angin itu dapat dibagi ke dalam dua kategori, yakni: turbin angin dengan *sumbu horisontal* dan turbin angin dengan *sumbu vertikal*.

Dari kedua jenis turbin angin tersebut yang banyak diterapkan dan menghasilkan daya yang besar adalah jenis turbin angin dengan sumbu horisontal (Vadot Neyrpic, 1 MW, Perancis). Sementara dari jenis sumbu vertikal (dengan rotor Darius) hanya mencapai daya 200 kW (Iles de la Madeleine, Canada).

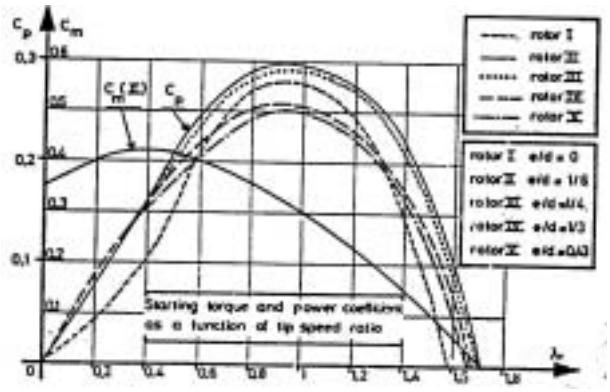
Turbin angin dengan konstruksi sederhana yang cocok untuk penggu- naan di pedesaan adalah temuan sarjana Finlandia bernama S. Savonius (1924). Turbin ini termasuk jenis turbin angin dengan sumbu vertikal, dengan rotor yang tersusun dari dua buah sudu-sudu setengah silinder (Gambar 1a). Konsep turbin angin Savonius ini cukup sederhana dan praktis tidak terpengaruh oleh arah angin. Ditinjau dari prinsip kerjanya, turbin angin ini tergolong pada jenis *vertical-axis differential drag windmill.* Salah satu eksperimen yang dilaku- kan oleh Newmann dan Lek Ah Chai dari McGill University, Montreal, Canada, menggunakan dua sudu-sudu setengah silinder berukuran, tinggi h = 15 in. dan diameter d = 6 in. dengan lima varians yang dibedakan berdasarkan besarnya *offset e* antara kedua sudu-sudunya (rotor-I dengan e = 0; rotor-II dengan e = 1 *in*; rotor-III dengan e = 1,5 *in*; rotor-IV dengan e = 2 *in*; dan rotor-V dengan e = 2,5 *in*). Hasil eksperimen tersebut dituangkan dalam bentuk diagram kutub (Gambar 1b) sementara koefisien daya C_p dan kefisien momen C_m dilukiskan dalam diagram Cartisian (Gambar 2). Dari kedua diagram tersebut diketahui bahwa, konstruksi yang optimal diperoleh dengan rotor II (e = 1 *in*) dan rotor-IV (e = 2 *in*). Hasil yang optimal ini akan digunakan sebagai referensi turbin angin yang dirancang.

Catatan: Diskusi untuk makalah ini diterima sebelum tanggal 1 Februari 2005. Diskusi yang layak muat akan diterbitkan pada Jurnal Teknik Mesin Volume 7 Nomor 1 April 2005.



(a) (b)

Gambar 1: Sudu-sudu Turbin-Angin Savonius



Gambar 2. Diagram C_p dan C_m

2. Landasan Teori

2.1 Arah Angin

Variasi tekanan atmosfir menyebabkan udara akan terus bergerak dengan arah yang berubah-ubah dalam bentuk aliran udara yang disebut *angin*. Karakteristik angin ditentukan oleh arah dan kecepatannya. Secara teoretis, angin berhembus dari daerah bertekanan tinggi ke daerah bertekanan rendah. Pada *altitude* tinggi, arah angin akan dipengaruhi oleh putaran bumi dan bergerak sejajar dengan garis isobar. Pada belahan bumi utara angin berputar melawan putaran jarum jam, sementara di belahan bumi selatan angin berputar searah putaran jarum jam. Arah angin ditentukan oleh arah dari mana angin itu berhembus. Jadi, *angin-barat* berarti angin yang berhembus dari barat ke timur; demikian pula *angin-tenggara* berarti angin yang berhembus dari tenggara ke barat-daya.

2.2 Kecepatan Angin

Data kecepatan angin dapat diperoleh di kantor-kantor Badan Meteorologi. Lazimnya data kecepatan dan arah angin (harian atau bulanan) digambar dalam bentuk diagram-kutub (Gambar 3). Arah dan persentase waktu angin berhembus ditunjukkan oleh garis-garis radial dan angka yang tertera pada garis yang bersangkutan. Panjang garis radial menunjukkan kecepatan angin rata-rata pada arah tersebut (dilukis dengan skala kecepatan). Kecepatan angin lazimnya dinyatakan dengan satuan *knot* atau *m/s*. Fenomena angin di laut atau di daratan diklasifikasikan dengan *bilangan Beaufort* (B_n) seperti ditunjukkan pada Tabel 1. Agar umur turbin-angin yang dirancang cukup tangguh sekurang-kurangnya sepuluh tahun, maka *wind design speed* diambil pada B_N = 10 (l.k. 26 m/s). Untuk pemasangan sampai ketinggian 15 meter, kecepatan angin praktis tidak banyak bervariasi.

2.3 Energi Angin yang Tersedia

Energi angin tersedia atau *available wind energy* tergantung pada kecepatan angin yang berhembus. PLTAn mulai menghasilkan daya pada kecepatan V_m yang disebut *"cut-in speed"*. Pada kecepatan ini daya yang dihasilkan sama dengan daya tanpa beban. Selanjutnya jika kecepatan angin bertambah dan mencapai V_N = *rated wind speed*, barulah PLTAn menghasilkan daya nominal yang dirancang. Pada kecepatan > V_N daya yang dihasilkan akan dipertahankan konstan dengan pertolongan sistem kendali.

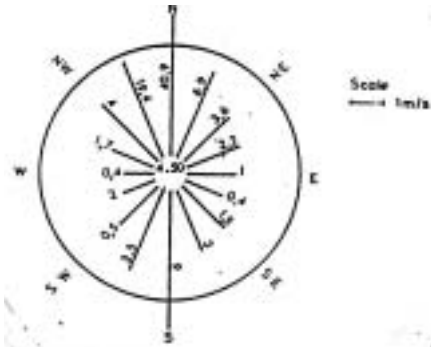
Menurut Gourieres (1982:25) *faktor pola* penggunaan energi atau *usable energy pattern factor* K_u dapat ditentukan dengan persamaan:

$$K_u = \frac{V_N^3(t_2 - t_1) + \int_{t_2}^{t_3} V^3 dt}{\overline{V}^3 t} \quad (1)$$

di mana V = kecepatan angin sesaat, V_N = kecepatan rata-rata, $\overline{V}$ = kecepatan rata-rata tahunan, dan

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

Pada rumus (1), t_1 = waktu dalam setahun di mana kecepatan angin > V_M (= kecepatan angin saat badai, B_N >10, turbin 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*). Data kecepatan angin diperoleh dari Badan Meteorologi. Jika data kecepatan angin untuk suatu daerah tidak tersedia, maka perlu diupayakan informasi dari penduduk setempat atau mengadakan pengu- kuran sendiri.



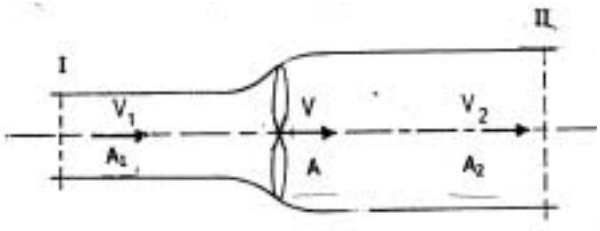
Gambar 3: Peta Kecepatan dan Arah Angin

2.4 Teori Betz.

A. Betz dalam bukunya *"Die Windmuhlen im Lichte neurer Forschung. Die Naturwissenschaft."* (1927) dianggap sebagai sarjana yang perta ma 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. Juga diasumsikan bahwa, aliran udara di depan dan di belakang rotor memiliki kecepatan yang seragam (aliran laminar).

Jika V_1 = kecepatan angin di depan rotor, V_2 = kecepatan angin di belakang rotor dan V = kecepatan angin pada saat melalui rotor (Gambar 4) maka berdasarkan persamaan kontinuitas:

$$A_1V_1 = A.V = A_2V_2 \qquad (2)$$



Gambar 4. Asumsi Teori Betz

Selanjutnya berdasarkan teorema Euler, gaya yang bekerja pada rotor sama dengan:

$$F = \rho.A.V(V_1 - V_2) \qquad (3)$$

karenanya daya kinetik angin yang diserap oleh rotor:

$$P = F.V = \rho AV^2(V_1 - V_2) \qquad (4)$$

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

$$\ddot{A}P = \frac{1}{2}\rho AV\left(V_1^2 - V_2^2\right) \qquad (5)$$

Persamaan (P.04) adalah sama de- ngan persamaan (P.05) sehingga dari kedua persamaan itu diperoleh harga:

$$V = \frac{V_1 + V_2}{2}$$

Jika hasil *V* tersebut disubsitusikan ke dalam (3) dan (4) akan meng- hasilkan persamaan:

$$F = \frac{1}{2}\rho A\left(V_1^2 - V_2^2\right) \qquad (6)$$

dan

$$P = \frac{1}{4}\rho A(V_1^2 - V_2^2)(V_1 + V_2) \qquad (7)$$

Untuk kecepatan V_1 tertentu dapat dikaji besar *P* sebagai fungsi dari V_2 dengan mendeferensiasi persamaan (7):

$$\frac{dP}{dV_2} = d\left[\frac{1}{4}\rho A(V_1^3 + V_1^2V_2 - V_2^2V_1 - V_2^3)\right]$$

$$\frac{dP}{dV_2} = \frac{1}{4}\rho A\left(V_1^2 - 2V_1V_2 - 3V_2^2\right)$$

pada $\frac{dP}{dV_2} = 0$ diperoleh dua akar per- samaan: $V_2 = -V_1$ yang berarti udara dalam keadaan tenang (B_N = 0), dan $V_2 = \frac{V_1}{3}$ yang merupakan harga yang menghasilkan daya maksimum. Dengan demikian daya maksimum yang diperoleh:

$$P_{maks} = \frac{8}{27}\rho AV_1^3 \qquad (8)$$

Persamaan (8) 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.

2.5 Penerapan Teori Betz pada Vertical-Axis Differential Drag Windmill

Penerapan teori Betz pada turbin-angin Savonius (Gambar 1a) perlu memperhatikan penyimpangan-penyimpangan dari asumsi-asumsi yang digunakan oleh Betz. *Pertama*, Betz mengasumsikan jumlah sudu-sudu turbin tak-terhingga, sedangkan pada turbin Savonius jumlah sudu-sudu hanya dua buah. *Kedua*, Betz mengasumsikan aliran udara laminar, sedangkan dalam kenyataannya, terutama pada kecepatan angin pada $B_N \geq 10$ aliran udara diperkirakan tidak sepenuhnya laminar sehingga pengaruh bilangan Reynold perlu diperhatikan. Di samping bentuk sudu-sudu, bilangan Reynold akan menentukan besar-kecilnya *koefisien hambatan* C_d (*drag coefficient*). Jika sudu-sudu berbentuk *setengah-bola*, C_d = 1,42 kalau angin berhembus pada sisi cekung dan C_d = 0,34 jika angin berhembus pada sisi cembung (bilangan

Reynold $10^4 < N_R < 10^6$) (Hughes & Brighton, 1967:85). Untuk sudu-sudu berbentuk setengah-silinder, harga-harga itu sama dengan 2,3 dan 1,2 (Le Gourieres, 1982:122; F.M. White, 1979:343). *Ketiga,* jika jumlah sudu-sudu sedikit (seperti halnya pada turbin Savonius) putaran rotor kurang stabil. Untuk mengatasi kelemahan ini dalam rancangan *vertical-axis differential drag windmill* ini jumlah sudu-sudu (setengah-silinder) tiga buah, berjarak masing-masing 120^0 (Gambar 5b).

Karena adanya perbedaan koefisien hambatan pada sudu-sudu, maka penerapan teori Betz 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. Dengan demikian daya yang dihasilkan dapat dinyatakan dengan persa-maan:

$$P = -\frac{1}{2}\rho A[C_{d1}(V - C.\cos 60^0 - C.\cos 60^0]C - C_{d2}(V + C)^2 C]$$

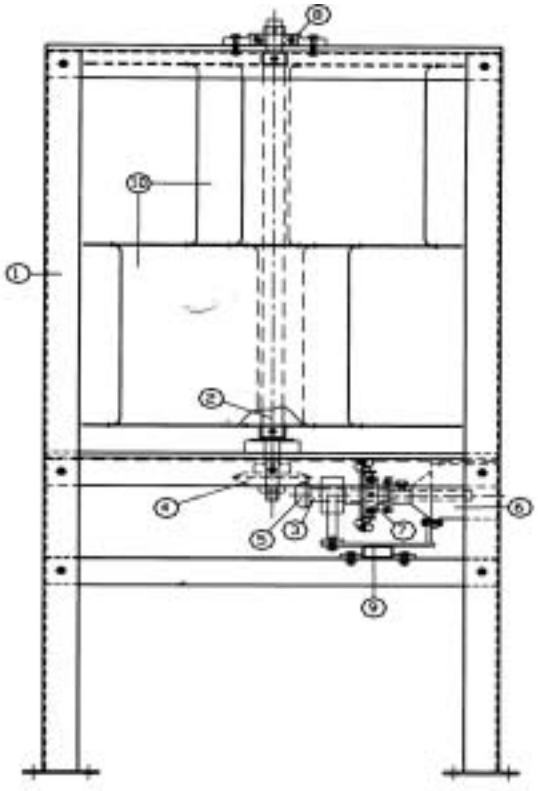
$$P = -\frac{1}{2}\rho A[C_{d1}(V - C)^2 C - C_{d2}(V - C)^2 C] \quad (9)$$

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

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

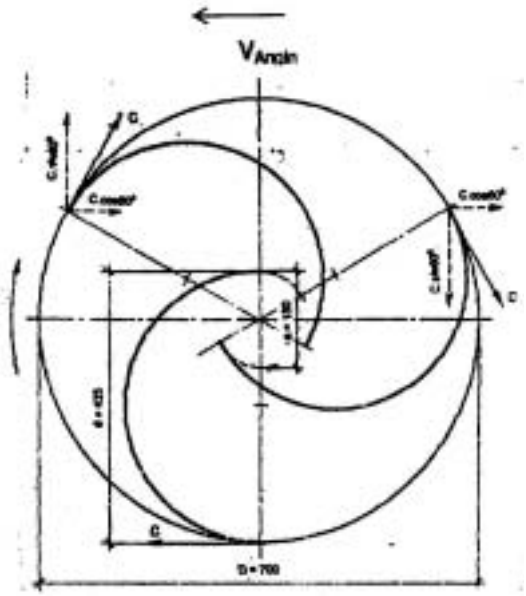
$$P = -\frac{1}{2}\rho A[C_{d1}(V^2 C - 2vC^2 + C^3) - C_{d2}(V^2 C + 2VC^2 + C^3]$$

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



Keterangan: (1)Rangka; (2) Poros Kincir; (3) Poros Kopling; (4)+(5) Rodagigi Transmisi; (6) Alternator; (7) Kopling; (8) Bantalan Peluru; (9) Dudukan Alternator; (10) Sudu-Sudu Kincir.

(a)



Keteranagan: Diameter rotor, D = 400 mm. Diameter sudu-sudu, d = 250 mm. Tinggi rotor, H = 2 x 300 mm. Offset, e = 100 mm (untuk mencegah terjadinya Turbulensi dalam sudu-sudu).

(b)

Gambar 5. Turbin-Angin Deferensial Sumbu Vertikal dengan Tiga Sudu-Sudu

Jika A dibuat sebanding dengan $(C_{d1} + C_{d2})$ dan D sebanding dengan $(C_{d1} – C_{d2})$, maka persamaan (10) memperoleh bentuk:

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

Diferensiasi $\frac{dP}{dC} = 0$ atas persamaan (11) memberikan harga optimal untuk C:

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

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

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

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

Jika dibuat $A = 1{,}5D^2$ dan disubsitusikan ke dalam persamaan (12) diperoleh:

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

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

Persamaan (13) akan memberikan harga $C_{optimal}$ jika $6D^2 - 3 = 0$ atau $D = 0{,}7m$ sehingga $C_{1,2} = 0{,}7V$. Dengan cara yang sama untuk $A = D^2$ memberikan $D = 0{,}87m$ dan $C_{1,2} = 0{,}58V$; demikian juga untuk $A = 2D^2$ memberikan $D = 0{,}43m$ dan $C_{1,2} = 0{,}58V$. Dengan demikian daya optimal diperoleh pada $A = 1{,}5D^2$.

3. Rancangbangun

3.1 Dimensi-Dimensi Utama

Berdasarkan uraian di atas, maka untuk mendapatkan daya teoretis sebesar 1000 *Watt* pada B_N 9 ($V = 22\ m/s$) diperoleh dimensi-dimensi utama se- bagai berikut:

Jumlah sudu-sudu	:	3
Diameter rotor	:	400 *mm*
Diameter sudu-sudu	:	250 *mm*
Tinggi rotor	:	600 *mm*
Offset *e*	:	100 *mm*
Jumlah tingkat	:	1
Massa jns. udara (20^0C):		1,204 kg/m^3
Bilangan Reynold	:	10^6
Koefisien hambatan	:	$C_{d1} = 2{,}3$
		$C_{d2} = 1{,}2$
Kecepatan maksimum	:	26 m/s

3.2 Daya Teoretis yang dihasilkan

Daya teoretis dihitung pada kecepatan angin B_N = 2 s/d 10, atau 2,5 m/s s/d 26 m/s. Untuk menghindari kerusakan, pada kecepatan $B_N > 10$, turbin harus dihentikan. Perhitungan daya dilakukan dengan menggunakan persamaan (9) dengan memasukkan harga-harga ρ, C dan A sehingga diperoleh persamaan daya teoretis:

$$P = -\frac{1}{2}\rho A[C_{d1}(V-C)^2 C - C_{d2}(V+C)^2 C] \qquad (14)$$

di mana $C = 0{,}7V$; $A = hD = 0{,}6 \times 0{,}4 = 0{,}24m^2$; $\rho = 1{,}204\ kg/m^3$,

$\frac{1}{2}\rho A = 0{,}5.1{,}204.0{,}24 = 0{,}144$

jika dimasukkan ke dalam persamaan (14) diperoleh persamaan daya:

$$P = -0{,}144\left[C_{d1}(V-C)^2 C - C_{d2}(V+C)^2 C\right]$$

Selanjutnya dengan memasukkan nilai-nilai: $C_{d1} = 2{,}3$: $C_{d2} = 1{,}2$ dan $C = 0{,}7V$ diperoleh:

$$P = -0{,}144.\left(0{,}483V^3 - 1{,}428V^3\right)$$

$$P_{Teoritis} = 0{,}136V^3 \qquad (15)$$

Hasil perhitungan daya teoretis ditabulasi pada Tabel 2. Perhitungan rancangbangun didasarkan pada daya maksimum, pada $V = 26\ m/s$. Konstruksi turbin ditunjukkan pada Gambar 5 (b). (Catatan: perhitungan rancangbangun tidak disertakan pada naskah ini).

3.3 Daya Efektif

Daya efektif diperoleh dari pengukuran saat percobaan di perbukitan sekitar Cimahi Selatan selama bulan Januari s/d Maret 2004 di mana terjadi angin dengan kecepatan 4,25 s/d 19,0 m/s (atau B_N =3 s/d 8). Percobaan pada B_N = 9 s/d 10) dilakukan dengan hembusan udara bertekanan (Tabel 2 kolom 4).

3.4 Efisiensi Mekanik

Efisiensi mekanis diperoleh dengan membandingkan daya teoretis dengan daya efektif dari percobaan dengan rumus:

$$\eta_m = \frac{P_{aktual}}{P_{teoretis}} \qquad (16)$$

Hasil perhitungan ditabulasi pada Tabel 2 kolom 5 dengan efisiensi mekanis rata-rata = 0,76.

Tabel 1. Tabel Kecepatan dan Fenomena Angin

Bilangan Beaufort	Kecepatan Angin		Deskripsi Fenomena Angin
	knot	m/s	
0	1	0 – 0,4	Calm
1	1 – 3	0,5 – 1,5	Light air
2	4 – 5	2,0 – 3,0	Light breeze
3	7 – 10	3,5 – 5,0	Gentle breeze
4	11 – 16	5,5 – 8,0	Moderate breeze
5	17 – 21	8,1 – 10,9	Fresh breeze
6	22 – 27	11,4 – 13,9	Strong breeze
7	28 – 33	14,1 – 16,9	Near gale
8	34 – 40	17,4 – 20,4	Gale
9	41 – 47	20,5 – 23,9	Strong gale
10	48 – 55	24,4 – 28,0	Storm
11	56 – 63	28,4 – 32,5	Violent storm
12	64 – 71	32,6 – 35,9	Hurricane
13	72 – 80	36,9 – 40,4	
14	81 – 89	40,1 – 45,4	
15	90 – 99	45,5 – 50,0	
16	100 – 108	50,1 – 54,0	
17	109 – 118	54,1 – 60,0	

Dikutip dari Le Gourieres, *Wind Power Plant*, Pergamon Press, 1982.

Tabel 2. Hasil Perhitungan Daya Teoretis pada B_N = 2 s/d 10

Kecepatan Angin		Kec. Rotor,	Daya Teoretis, P (*Watt*)	Daya Efektif,	Efisiensi Mekanik, η_m
B_N	V (*m/s*)	$C = 0{,}7V$		P_{eff} (*Watt*)	
2	2,50	1,750	2,18	0	0
3	4,25	2,975	10,44	0	0
4	6,75	4,725	41,82	28,0	0,670
5	9,50	6,650	116,60	76,0	0.652
6	12,60	8,820	272,05	201,0	0,739
7	15,50	10,850	506,45	410,0	0,81
8	19,00	13,300	932,82	772,0	0,828
9	22,00	15,400	1448,0	1210,0	0,836

10	26,00	18,200	2390,0	2010,0	0,841
					Σ = 5,376
			Efisiensi mekanik rata-rata:		5,376/7 = 0,768

Catatan: Dari catatan meteorologi PLLU Lanud Husein Sastranegara, kecepatan angin rata-rata berada pada B_N = 4 s/d 6. Kondisi ini biasa didapatkan pada udara terbuka di pedesaan dan perbukitan, sedangkan di daerah pantai bisa mencapai B_N = 7 – 8.

4. Kesimpulan

Dengan efisiensi mekanik = 0,76 dan kecepatan angin $V_{rata\text{-}rata}$ = 15 *m/s* diperoleh daya efektif k.l. 400 *Watt* yang diperkirakan cukup menerangi untuk satu rumah sederhana (*Catatan*: Untuk RSS, PLN mengalokasikan 450 *Watt/rumah*).

Desain sedang disempurnakan untuk menghasilkan efisiensi mekanik yang lebih baik.

Daftar Pustaka

1. EHMF, Two-Day Seminar on "*Effective Energy System for Sustainable Development*", Jakarta, May 2004.

2. Hughes, W.F., Brighton, J.A., *Fluid Dynamics*, Schaum's Outline Series, McGraw-Hill Book Co., New York, 1967.

3. Gourieres, Desire Le, *Wind Power Plants – Theory and Design*, Pergamon Press, Ltd., Oxford OX3 OBW, England, 1982.

4. White, Frank M., *Fluid Mechanics*, McGraw-Hill Kogakusha Ltd., Tokyo, 1979.