

ANALISIS DESAIN, TEKNOLOGI DAN PRESTASI TURBIN ANGIN 10 KW

Dines Gintng
Peneliti Pusat Teknologi Dirgantara Terapan, LAPAN

ABSTRACT

Small-scale wind energy conversion systems have been developed and utilized for rural electric generation. Performance and success of the systems strongly depend on available wind power as well as the design and technologies. Recently, that alternative energy technology is more important to support the electric supply and to anticipate continuously increase of electric needs. In order to increase the use of that renewable energy technology, a 10 kW wind turbine has been chosen to be developed. Analysis of the, wind turbine shows that the design, technologies, and performances are specific and limited to the application and wind power availability. The adaptation and improvement is needed for developing the more effective use of the wind turbine.

ABSTRAK

Sistem konversi energi angin skala kecil telah lama dikembangkan dan digunakan untuk pembangkit listrik pedesaan. Prestasi dan keberhasilan sistem tersebut sangat tergantung pada tenaga angin yang tersedia serta desain dan teknologinya. Belakangan ini teknologi energi alternatif itu semakin penting guna mendukung penyediaan listrik pedesaan danantisipasi kebutuhan yang terus meningkat. Dalam upaya peningkatan pemanfaatan teknologi energi terbarukan itu, telah ditetapkan untuk mengembangkan turbin angin kapasitas 10 kW. Analisis turbin angin tipikal menunjukkan bahwa desain dan teknologi serta prestasinya adalah spesifik dan terbatas pada penerapan dan ketersediaan tenaga angin. Adaptasi dan penyempurnaan dibutuhkan guna menghasilkan penggunaan turbin angin yang lebih efektif.

Kata kunci: *Energi angin, Energi terbarukan, Turbin angin*

1 PENDAHULUAN

Kebutuhan energi dan biaya listrik serta harga bahan bakar fosil terutama minyak yang terus meningkat telah mendorong pengembangan sumber energi alternatif seperti energi angin. Terwujudnya teknologi energi itu tidak mudah dan berlangsung lama. Eksperimen sudah dilakukan sejak akhir abaci ke-19, tetapi tahapan komersial dicapai setelah tahun 70-an; itu pun skala kecil. Dan sepuluh tahun kemudian baru terwujud pembangkit listrik tenaga angin skala besar. Belakangan ini tenaga angin telah menjadi sumber energi penting di sejumlah negara.

Pengembangan dan pemanfaatan turbin angin skala kecil telah dilakukan

di Indonesia guna mendukung penyediaan listrik pedesaan. Berbagai ukuran turbin angin kecil telah dioperasikan dan dimanfaatkan untuk kebutuhan masyarakat desa utamanya untuk penerangan dan pemompaan air. Pengembangan turbin angin kecil tidak semata-mata mempertimbangkan nilai ekonomi seperti halnya skala besar, tetapi lebih pada independensi dan stabilitas harga energi, dan kontribusi terhadap lingkungan yang lebih bersih.

Keberhasilan turbin angin sangat tergantung pada potensi angin yang tersedia serta desain dan teknologinya. Teknologi energi angin pertama kali menggunakan rotor sudu majemuk soliditas tinggi, lalu dikembangkan rotor

aerodinamik yang lebih efisien. Kini desain turbin angin didominasi oleh teknologi rotor aerodinamik soliditas rendah dengan dua atau tiga sudu dari *fibreglass*. Teknologi turbin angin tergolong spesifik dan efektif jika karakteristiknya sesuai dengan kondisi dan kecepatan angin.

Dalam upaya pengembangan dan pemanfaatan teknologi energi angin, telah ditetapkan untuk mengembangkan turbin angin kapasitas 10 kW. Pengembangan didasarkan pada turbin angin tipikal dan telah dioperasikan di Indonesia. Desain, teknologi dan prestasi turbin angin itu kemudian dianalisis untuk dikembangkan lebih lanjut sesuai dengan sistem penerapan, ketersediaan tenaga angin dan lingkungan di Indonesia.

2 PENGEMBANGAN TURBIN ANGIN

2.1 Pilihan Kapasitas

Kapasitas (daya *rated* atau daya maksimum) turbin angin yang lebih kecil daripada 40 kW dan atau diameter rotor lebih kecil daripada 12 m digolongkan skala kecil. Dalam upaya pengembangan dan pemanfaatan turbin angin pedesaan, telah ditetapkan untuk mengembangkan prototipe turbin angin sumbu datar kapasitas 10 kW. Pemilihan turbin angin tersebut didasarkan atas pertimbangan berikut.

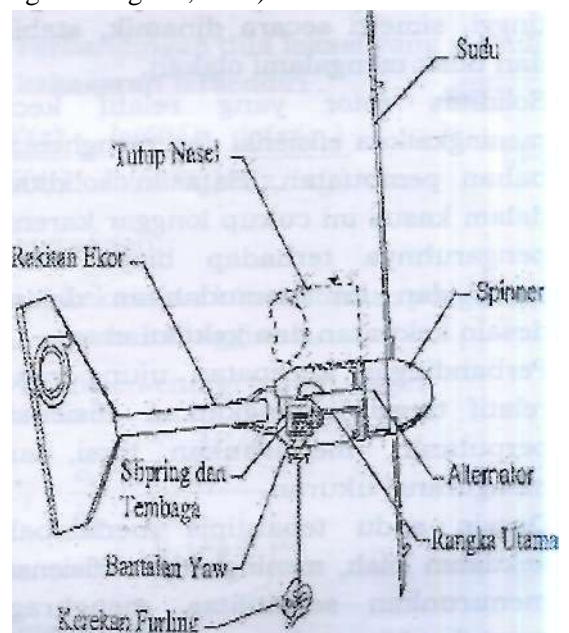
- Biaya turbin angin yang sangat kecil mahal karena ada batas minimum servis/perawatan; biaya servis/perawatan dapat menyita biaya setara dengan keluaran listrik sebulan.
- Biaya satuan energi menurun jika ukuran turbin angin relatif besar, kebutuhan lahan berkurang (jarak antar turbin angin proporsional dengan diameter).
- Resiko teknik lebih rendah daripada skala menengah/besar, dan untuk investasi tertentu lebih banyak unit kecil yang dapat dibuat, dan lebih banyak pengalaman untuk penyempurnaan.
- Pengangkutan dan instalasi relatif mudah, keandalan dan modularitas

lebih tinggi, dan relatif murah (dapat menggunakan komponen standar otomotif untuk sistem *yaw*, rem, dan sebagainya).

2.2 Langkah Pengembangan

Pengembangan didasarkan pada desain dan teknologi turbin angin komersial yang tipikal dan telah dioperasikan di Indonesia (Gambar 2-1). Turbin angin didesain beroperasi pada kecepatan angin rata-rata tahunan di atas 5 m/s dan dapat menghasilkan energi mencapai 16.000 kWh/tahun.

Meningkatkan kecepatan angin rata-rata tahunan yang dominan di Indonesia lebih rendah daripada 5 m/s, pengembangan turbin angin yang lebih efektif menjadi prioritas. Pengembangan mengutamakan simplifikasi, keandalan tinggi, tanpa mengabaikan efisiensi. Yang potensial dikembangkan: rotor, *airfoil* sudu, komposit untuk sudu, sistem generator kecepatan variabel, dan menara. Hal lain yang perlu diperhatikan adalah kontrol kualitas dalam pembuatan (sudu, sambungan pada akar sudu, pengelasan bagian-bagian, dsb).



Gambar 2-1: Sketsa turbin angin 10 kW yang tipikal

2.3 Konsep Desain dan Teknologi

Konsep desain dan teknologi turbin angin bervariasi. Turbin angin

pedesaan didesain dengan mengutamakan pendckatan simplifikasi dan sasaran pada ketahanan terhadap beban angin dan keandalan tinggi tanpa mengabaikan efisiensi dan prestasi.

Komponen utama turbin angin terdiri atas rotor, transmisi daya, generator, sistem *yaw*, dan menara. Setiap pilihan komponen berpengaruh terhadap komponen lain.

Komponen tambahan (baterei penyimpan energi, inverter, sumber tenaga pendukung, dan sistem monitoring, dan seterusnya) tergantung pada penggunaan.

3 ANALISIS TURBIN ANGIN

3.1 Desain dan Teknologi

3.1.1 Rotor

Komponen utama dan yang terpenting untuk turbin angin pedesaan ini mempunyai desain dan teknologi sebagai berikut.

- Rotor yang mengutamakan kesederhanaan dan keandalan paling banyak menggunakan rotor arus hulu dengan tiga sudu. Dalam kasus ini efisiensi tinggi, simetri secara dinamik, stabil, dan tidak mengalami olakan.
- Soliditas rotor yang relatif kecil meningkatkan efisiensi dan menghemat bahan pembuatan. Batasan soliditas dalam kasus ini cukup longgar karena pengaruhnya terhadap biaya sudu kecil, dan ini memudahkan dalam desain kekuatan dan kekakuan-
- Perbandingan kecepatan ujung yang relatif tinggi meningkatkan efisiensi, perputaran, menurunkan torsi, dan mengurangi ukuran.
- Desain sudu tebal-tipis menambah kekuatan lelah, meningkatkan efisiensi, menurunkan sensitifitas, mengurangi berat dan biaya, dan menyempurnakan sambungan akar sudu.
- Naf rotor tiga sudu rigid jauh lebih sederhana ketimbang naf *teetered* untuk dua sudu.

3.1.2 Bahan sudu dan naf

Dipertimbangkan terutama terhadap biaya dan berat yang sangat berpengaruh terhadap konstruksi turbin angin.

- Bahan *fibreglass* diperkuat poliester (GRP) atau diperkuat epoksi (GRE) kini digunakan pada hampir semua turbin angin.
- Bahan spar sudu dari fiber-karbon beratnya hanya sepersepuluh spar baja yang ekuivalen.
- Bahan naf selalu dari baja tempa, tuang, atau las.

3.1.3 Kontrol kecepatan

Kontrol kecepatan ditentukan berdasarkan kecepatan operasi, konstan atau variabel.

- Kontrol *pitch* variabel pasif yang memanfaatkan deformasi sudu elastik pada turbin angin tipikal menghasilkan *twist* sudu pada *run* optimum, membantu *start* pada kecepatan angin rendah dan meningkatkan efisiensi. Tetapi kontrol mutu haruslah sangat ketat, kalau tidak, akan terjadi ketidakstabilan dinamik yang serius dan kegagalan pada sambungan akar sudu.
- Kontrol *yaw-pasif pitch-tetep* dengan ekor berengsel yang dikombinasikan dengan orientasi turbin angin relatif sederhana dan paling banyak digunakan pada turbin angin kecil.

3.1.4 Transmisi

Transmisi daya, poros dan kotak gigi (opsi), memindahkan daya poros ke generator.

- Kotak gigi meningkatkan perputaran poros, mengurangi ukuran generator, tetapi menurunkan efisiensi dan keandalan.
- Desain penggerak-langsung menambah ukuran generator, tetapi meningkatkan efisiensi, memperkecil kapasitas generator atau diameter turbin angin. Sistem ini mendominasi turbin angin pedesaan.

3.1.5 Peralatan keamanan

Peralatan keamanan untuk mencegah kecepatan lebih (akibat kerusakan kontrol, transmisi, dan sebagainya) adalah sebagai berikut.

- Kombinasi rem mekanik dan rem dinamik (generator juga berfungsi sebagai rem listrik) digunakan pada beberapa turbin angin kecil.
- Peralatan keamanan yang lebih sederhana yang mendominasi turbin angin kecil adalah mekanisme yaw (manual) serta rem dinamik yang sederhana.

3.1.6 Nasel dan yaw

Sebagai tempat dan pelindung komponen dari pengaruh langsung alam/cuaca digunakan nasel berikut.

- Nasel kerangka lebih sederhana dari gondola, tapi kurang ringkas/kompak.
- Sebaliknya, nasel gondola ringkas/kompak, dan juga digunakan pada turbin angin tipikal.

3.1.7 Subsistem listrik

Generator turbin angin dipilih berdasarkan penerapan dan keluaran listrik yang diinginkan

- Generator magnet permanen paling banyak digunakan pada turbin angin pedesaan. Sistem listrik DC digunakan untuk pengisian baterai.
- Transmisi tenaga listrik dan data ke permukaan melalui nasel yang berorientasi menggunakan *slip ring* atau 'kabel-lebih'.
- Kabel-lebih memerlukan pembebasan berkala puntiran kabel akibat orientasi nasel, sedangkan *slip ring* memerlukan perawatan atau penggantian berkala.

3.1.8 Menara dan fondasi

Menara turbin angin kecil dipilih terutama berdasarkan harga dan kondisi lapangan.

- Menara yang paling banyak digunakan adalah tipe latis atau tubular dengan penguat.

- Penggunaan menara yang relatif tinggi menguntungkan apabila biaya produksi energi menurun.
- Menara ditumpu di atas fondasi beton untuk menjamin agar tidak roboh atau terguling.

3.2 Analisis Prestasi

3.2.1 Perhitungan

Prestasi atau energi yang dihasilkan turbin angin dalam setahun dipengaruhi berbagai faktor, kecepatan angin, ketinggian dan kekasaran permukaan. Perhitungan dilakukan pada sejumlah lokasi pengukuran, dan didasarkan pada persamaan berikut.

- Model matematik profil kecepatan angin

$$\frac{V(z)}{V(z_r)} = \frac{\ln(z/z_o)}{\ln(z_r/z_o)} \quad (3-1)$$

Keterangan:

$V(z)$ = kecepatan angin pada ketinggian z (m/s)

$V(z_r)$ = kecepatan angin pada ketinggian $z_r=10$ m (m/s)

z_o = kekasaran permukaan (m).

- Perbandingan dua lokasi yang memiliki kekasaran tersendiri

$$\frac{V(z)}{V(z_r)} = \frac{\ln(60/z_{or}) \ln(z/z_o)}{\ln(60/z_o) \ln(z_r/z_{or})} \quad (3-2)$$

Keterangan:

z_{or} = kekasaran lokasi stasiun pengukuran pada ketinggian z_r .

- Koefisien energi turbin angin

$$C_E = \frac{E_o}{E_w} = \frac{\int_{year} P_o dt}{\int_A \left(\int p_w dt \right) dA} \quad (3-3)$$

Keterangan:

C_E = koefisien energi

E_o = prestasi

E_w = energi angin yang melewati rotor

P_o = keluaran daya sistem (W)

A = luas sapuan rotor (m²)

p_w = densitas daya angin (W/m²)

Densitas daya angin tahunan

$$p_{wa} = \frac{0,5\rho}{8760} \int_{year} V^3 dt \quad (3-4)$$

Keterangan:

p_{wa} = densitas daya angin rata-rata tahunan (W/m^2)

ρ = densitas udara (kg/m^3)

t = waktu

Densitas energi angin tahunan

$$e_w(z) = \int_{year} p_w(z) dt \quad (3-5)$$

$$= 0,5\rho \int_0^V V^3 f_w(z) dV$$

Keterangan:

e_w = densitas energi tahunan pada ketinggian z , ($Wh/m^2/y$)

t = waktu (h)

f_w = fungsi distribusi frekuensi kecepatan angin pada ketinggian z , $[(h/y)/(m/s)]$

- Kecepatan angin rata-rata tahunan dalam bentuk faktor Weibul

$$\bar{V} = C_R \Gamma(1+1/k_R) \quad (3-6)$$

$$\approx (0,90 \pm 0,01) C_R$$

Keterangan:

\bar{V} = kecepatan angin rata-rata pada ketinggian 10 m (m/s)

C_R = faktor skala Weibul empirik pada ketinggian 10 m (m/s)

$\Gamma()$ = fungsi gamma (Γ)

k_R = faktor bentuk Weibul empirik pada 10 m

- Densitas daya angin p_w untuk kecepatan angin rata-rata \bar{V} , dapat dinyatakan dengan persamaan

$$p_w = k_E 0,5\rho \bar{V}^3 \quad (W) \quad (3-7)$$

Keterangan:

k_E = faktor pola energi

- Keluaran energi turbin angin

$$E_o = kA\bar{V}^3 T \quad (3-8)$$

Keterangan:

k = konstanta karakteristik prestasi

T = periode waktu

3.2.2 Data perhitungan

Data kecepatan angin rata-rata (di atas 3 m/s) ditunjukkan dalam Tabel 3-1. Data teknis turbin angin tipikal ditunjukkan dalam Tabel 3-2. Karakteristik prestasi turbin angin ditunjukkan dalam Tabel 3-3. Estimasi biaya sistem turbin angin dan menara (opsi) diberikan dalam Tabel 3-4 (asumsi \$1 = Rp. 9.000). Data kekasaran permukaan lokasi ditunjukkan dalam Tabel 3-5 (didasarkan pada lokasi pengukuran dan berbagai kondisi permukaan)

Tabel 3-1: DATA PENGUKURAN KECEPATAN ANGIN DI ATAS 3 M/S

No.	Lokasi Pengukuran	Ketinggian (m)	Kec. Angin (m/s)
1	Selayar, Sulsel	10	4.1
		24	5.0
2	SBSPJ-LAPAN, Sulsel	15	4.3
3	Giligede, NTB	10	4.1
		15	4.2
4	Papagarang, NTT	10	3.7
		24	4.0
5	Bulak Baru, Jateng	10	3.6
		24	4.4
6	Nangalili, NTT	10	3.6
		24	4.4
7	Parang, Jateng	15	3.7
8	Maubesi, NTT	10	3.5
		24	4.0
9	Tembere, NTB	10	3.4
		24	4.0
10	Nangadoro, NTB	10	3.3
		24	4.1

Tabel 3-2: DATA TEKNIS TURBIN ANGIN TIPIKAL

Prestasi	
Kecepatan Angin <i>Start</i>	3,1 m/s
Kecepatan Angin <i>Cut-in</i>	3,5-4,5 m/s
Kecepatan Angin <i>Rated</i>	12,4 m/s
Kecepatan Angin <i>Cut-out</i>	tidak ada
Kecepatan Angin <i>Furling</i>	15,7 m/s
Kecepatan Angin <i>Max</i>	54 m/s
Daya <i>Rated</i>	7-8,5 kW
Daya Maksimum	10kW
Kecepatan Rotor	0-350 rpm
Mekanik	
Type	Arus hulu
Diameter Rotor	7 m
Berat	463 kg
Kontrol Pitch Sudu	Powerflex
Proteksi Kecepatan Lebih	Autofurl
Tranmisi	Penggerak
	Langsung
Range Temperatur	-40-60" C
Listrik	
Bentuk Keluaran	48, 120, VDC
Generator	PMG
Sistem Kontrol Keluaran	VCS-10

Tabel 3-3: KARAKTERISTIK TURBIN ANGIN (REFERENSI)

Ketinggian (m)	Kec.Angin (m/s)	Prestasi (kWh/tahun)
18	4.8	11.000
24	5,0	12.200
30	5,2	13.300
37	5,3	14.300
43	5,4	15.000
49	5,5	15.700

Tabel 3-6: KECEPATAN ANGIN MENURUT KETINGGIAN DAN KEKASARAN

Ketinggian (m)	Kecepatan Angin (m/s)							
	Referensi $z_0=0,02$	Selayar $z_0=0,2$	Jepara Alt. 1 $z_0=0,2$	Alt. 2 $z_0=0,4$	Alt.-3 $z_0=0,3$	Alt. 4 $z_0=0,05$	Alt. 5 $z_0=0,02$	Alt. 6 $z_0=0,01$
10	4,4	4,1	3,6	3,3	3,4	3,9	4,0	4,1
18	4,8	4,7	4,2	3,9	4,0	4,3	4,4	4,5
24	5,0	5,0	4,4	4,2	4,3	4,5	4,6	4,7
30	5,2	5,2	4,6	4,5	4,5	4,7	4,8	4,8
37	5,3	5,4	4,8	4,7	4,7	4,8	4,9	4,9
43	5,4	5,6	4,9	4,8	4,9	4,9	5,0	5,0
49	5,5	5,7	5,0	5,0	5,0	5,0	5,1	5,1

Tabel 3-4: BIAYA SISTEM TURBIN ANGIN

No.	Sistem Turbin Angin	Biaya Sistem (1000)
1	Turbin Angin	Rp133.155
2	Menara (Ops):	
	18 m	Rp36.450
	24 m	40.950
	30 m	47.250
	37 m	55.350

Tabel 3-5: VARIASI KEKASARAN

Permukaan Dataran	Kekasaran n (m)
Lahan pepohonan	0,4
Lahan banyak pepohonan,	0,3
Pepohonan sedang	0,2
Pepohonan jarang	0,1
Lahan tanaman rendah, semak	0,05
Lahan rumput liar	0,02
Lapangan rumput	0,01
Kawasan pesisir pantai rata	0,005

3.2.3 Hasil perhitungan

Hasil perhitungan kecepatan angin menurut ketinggian dan kekasaran permukaan ditunjukkan dalam Tabel 3-6. Hasil perhitungan prestasi dan biaya satuan energi untuk referensi dan Selayar ditunjukkan dalam Tabel 3-7. Dan hasil perhitungan prestasi dan biaya satuan energi pada lokasi alternatif masing-masing ditunjukkan dalam Tabel 3-8 dan 3-9.

Tabel 3-7: PRESTASI DAN BIAYA ENERGI TURBIN ANGIN (REFERENSI DAN SELAYAR)

Ketinggian (m)	Prestasi (kWh/tahun)		Biaya Satuan Energi (Rp/kWh/tahun)		Penurunan Biaya (%/)	
	Referensi $z_0 \approx 0,02$	Selayar $z_0 \approx 0,2$	Referensi $z_0 \approx 0,02$	Selayar $z_0 \approx 0,2$	Referensi $z_0 \approx 0,02$	Selayar $z_0 \approx 0,2$
18	11.000	10.300	14.517	15.505	-	-
24	12.000	12.000	13.684	13.684	5,7	11,7
30	13.300	13.300	12.820	12.820	11,7	17,3
37	14.300	15.000	12.490	11.907	14,0	23,2

Tabel 3-8: PRESTASI TURBIN ANGIN PADA LOKASI ALTERNATIF

Ketinggian (m)	Prestasi (kWh/tahun)					
	Jepara $z_0 \approx 0,2$	Alt. 2 $z_0 \approx 0,4$	Alt. 3 $z_0 \approx 0,3$	Alt. 4 $z_0 \approx 0,05$	Alt. 5 $z_0 \approx 0,02$	Alt. 6 $z_0 \approx 0,01$
18	7.300	5.900	6.300	7.900	8.500	9.100
24	8.500	7.300	7.900	9.100	9.700	10.300
30	9.700	9.100	9.100	10.300	11.000	11.000
37	11.000	10.300	10.300	11.000	11.500	11.500

Tabel 3-9: BIAYA ENERGI PADA LOKASI ALTERNATIF

Ketinggian (m)	Biaya Satuan Energi (Rp/kWh/tahun)					
	Jepara $z_0 \approx 0,2$	Alt. 2 $z_0 \approx 0,4$	Alt. 3 $z_0 \approx 0,3$	Alt. 4 $z_0 \approx 0,05$	Alt. 5 $z_0 \approx 0,02$	Alt. 6 $z_0 \approx 0,01$
18	20.216	27.069	25.50	20.216	18.789	17.550
24	19.318	22.494	20.785	18.045	16.934	15.942
30	17.578	18.737	18.737	16.554	15.500	15.500
37	16.237	17.340	17.340	16.237	15.531	15.531

4 PEMBAHASAN DAN HASIL

4.1 Desain dan Teknologi

Rotor dipilih arus hulu, jumlah sudu tiga, soliditas kecil, dan perbandingan kecepatan tinggi, sehingga sederhana, efisiensinya tinggi, dan stabil. Pemanfaatan deformasi elastik untuk peningkatan efisiensi pada turbin angin tipikal relatif kompleks sehingga tidak perlu dipertimbangkan. Sebagai alternatif diterapkan desain sudu tebal-tipis dan airfoil khusus sehingga prestasi tetap tinggi, kekuatan lelah meningkat, sambungan akar sudu lebih baik, sensitifitas dan biaya berkurang. Bahan sudu dipilih fiberglas, menggunakan naf rigid yang dibuat dari baja tempa, tuang, atau las.

Kontrol kecepatan menerapkan yaw-pasif, yang dominan pada turbin angin kecil. Sistem yang tidak membutuhkan mekanisme/bantalan untuk perubahan *pitch* ini mengurangi biaya dan memudahkan pemeliharaan.

Desain penggerak langsung (tanpa kotak gigi) dipilih sehingga efisiensi meningkat, sederhana dan perawatan berkurang.

Peralatan keamanan dengan menerapkan mekanisme *yaw* atau *furling* (manual) dan kontrol dinamik. Nasel menggunakan bentuk gondola sehingga lebih ringkas/kompak daripada bentuk kerangka. Gabungan kontrol *yaw*, orientasi pasif dan pengamanan manual dengan sistem daun ekor paling

banyak digunakan pada turbin angin ke-¹¹.

Generator menggunakan tipe magnet permanen dan sistem listrik DC untuk pengisian baterai. Transmisi tenaga listrik dan data ke permukaan melalui nasel yang berorientasi menggunakan *slip ring* atau kabel-lebih.

Menara turbin angin menggunakan tipe latis atau tubular berpenguat dengan ketinggian optimum. Penggunaan menara *tilt-down* dapat dipertimbangkan apabila tidak tersedia *crane*.

4.2 Prestasi Turbin Angin

Prestasi turbin angin sangat ditentukan oleh kecepatan angin. Kecepatan angin dipengaruhi oleh ketinggian dan kekasaran permukaan (Tabel 3-5). Sebagai contoh, peningkatan ketinggian dari 10 m menjadi 49 m menghasilkan peningkatan kecepatan angin mencapai 51 % pada kekasaran tertinggi dan sekitar 21 % pada kekasaran terendah. Perbedaan kekasaran yang relatif kecil tidak menimbulkan perbedaan kecepatan angin yang berarti.

Prestasi turbin angin di Selayar (tabel 3-6 dan 3-7) pada ketinggian 24 dan 30 m sama dengan referensi, dan pada ketinggian 37 m prestasi sedikit meingkat (sekitar 5 %). Prestasi terbesar dan biaya satuan energi terkecil (masing-masing Rp12.490 untuk referensi dan Rp. **11.907** terdapat pada ketinggian 37 m.

Prestasi dan biaya satuan energi pada lokasi alternatif (Tabel 3-6 dan 3-7), misalnya peningkatan ketinggian dari 18 m menjadi 37 m untuk Jepara menghasilkan peningkatan kecepatan angin sekitar 14 % dan peningkatan prestasi sekitar 50 %. Dalam kasus ini biaya sistem meningkat dari sekitar Rp160 juta menjadi Rp179 juta (sekitar 12 %), dan biaya satuan energi menurun dari sekitar Rp. 20.220 menjadi Rp. 16.240 (sekitar 20 %). Biaya satuan energi terkecil terdapat pada ketinggian 30 m dan kekasaran terkecil, besarnya Rp.15.500 selama satu tahun. Gambaran selengkapnya analisis prestasi tersebut

dapat dilihat dalam tabel-tabel hasil perhitungan.

Tampak jelas bahwa terdapat perbedaan prestasi dan biaya satuan energi yang signifikan bila turbin angin ditempatkan di Selayar dengan Jepara dan lokasi alternatif. Dengan demikian, jelas pula bahwa pengembangan atau penyempurnaan desain dan teknologi menjadi prioritas. Pengembangan potensial untuk mendapatkan turbin angin yang lebih efektif penggunaannya pada kondisi dan kecepatan angin dominan adalah sepeksi yang diuraikan di atas.

5 KESIMPULAN

Penggunaan turbin angin tipikal di Selayar menghasilkan prestasi mendekati referensi. Pada ketinggian optimum biaya satuan energi adalah sekitar Rp.1.000/kWh. Akan tetapi, pada kecepatan angin yang relatif rendah, prestasi turbin angin menurun signifikan dan biaya satuan energi pada ketinggian optimum mencapai sekitar Rp.1.250/kWh. Perbedaan biaya ini relatif besar.

Untuk mengembangkan turbin angin yang lebih efektif penggunaannya untuk lokasi yang dominan relatif rendah kecepatan anginnya adalah dengan menerapkan konfigurasi rotor arus hulu, tiga sudu dari *fibreglass*, P^{en}gerak langsung, kontrol kecepatan *yaw/furling* pasif dan orientasi dengan daun ekor. Adaptasi dan penyempurnaan rotor dengan desain bentuk sudu tebal-tipis dan airfoil khusus menghasilkan efisiensi yang tetap tinggi, kecepatan *start* rendah, dan yang terpenting teknologinya lebih sederhana.

DAFTAR RUJUKAN

- Anonim, 2000. *Data Angin Sejumlah Lokasi di Indonesia*, Laporan Intern Lapan, Jakarta.
- Bergey, M.L.S., 1993. *Wind Energy for Bulk Power and Rural Electrification in Indonesia*, Proceedings, Opportunities for Renewable Energy Development in Indonesia Workshop, Jakarta.

- Burton, T., at all., 2002. *Wind Energy Handbook*, John Wiley & Sons, Ltd.
- Ginting, D., 1997. *Kajian Prestasi Turbin Angin Kecil untuk Pembangkit Listrik di Pedesaan*, Proceeding Teknologi Dirgantara, Lap an, Jakarta.
- Gipe, P., 1995. *Wind Energy Comes of Age*, John Wiley & Sons, Ltd.
- Justus, C.G., dkk, 1976. *Reference Wind Speed Distibutions and Height Profiles for Wind Turbine Design and Performance Evaluation Applications*, George Institute of Technology, Atlanta, Georgia.
- Nielsen, P., 1993. *Development of Wind Energy in Denmark*, Proceedings, Wind Power Conference, AWEA, Washington, DC.
- Spera, D. A., 1994. *Wind Turbine Technology - Fundamental Concepts of wind Turbine Engineering*, ASME Press, New York.
- Spera, D.A., 1991. *Analysis of the Diurnal Cycle of Wind Shear at Clayton, New Mexico*, DASCONE Engineering, Cleveland, Ohio.
- Tresher, R. W., at all, 1993. *Advanced Technology for theYear 2000*, Proceedings, Wind Power Conference, AWEA, Washington, DC.
- Wegley, H. L. dkk, 1980. *A Sitting Handbook for Small Wind Energy Conversion Systems*, Battelle Pacific Nortwest Laboratory, Wind Books, Washington.