

RANCANGAN AWAL DAN ANALISIS BENTUK SUDU TURBIN ANGIN 50 KW

Dines Ginting

Peneliti Pusat Teknologi Dirgantara Terapan, LAPAN
e-mail: dinesginting@yahoo.co.id

ABSTRACT

Wind turbine blade design is done through the process of aerodynamic optimization involving wind speed, blades number and profile, solidity and rotor speed. Three options of 50 kW wind turbine blade shape the will be analyzed, the optimum shape, taper and rectangular. Each blade shape has the distinct complexity and characteristics so that the handling and manufacture, the performance characteristic, the diameter and speed of blades is also different. Maximum performance of the optimum blade shape is higher than the tapered or rectangular shapes so that the diameter of the optimum blade shape is smaller than the tapered or rectangular shapes. On the contrary, handling and manufacture blades with square shape easier than with any shape optimum or taper. The different blade shapes will not cause any disadvantage as far as handling and manufacture of blades that means the blade cost to compensate for this blade shapes effect. The taper blade shape is selected for the wind turbine.

Key words: Aerodynamic design, Wind turbine blade shape, Performance characteristics

ABSTRAK

Rancangan sudu turbin angin dilakukan melalui proses optimisasi aerodinamik yang menyertakan kecepatan angin, jumlah dan profil sudu, soliditas dan kecepatan rotor. Tiga opsi bentuk sudu turbin angin 50 kW dianalisis, yaitu bentuk optimum, taper dan empat persegi panjang. Masing-masing sudu memiliki kompleksitas dan karakteristik yang berbeda sehingga penanganan dan pembuatan, karakteristik prestasi, diameter dan kecepatan sudu juga berbeda. Prestasi maksimum bentuk sudu optimum lebih tinggi daripada bentuk taper atau pun empat persegi panjang sehingga diameter bentuk sudu optimum lebih kecil daripada bentuk taper atau pun empat persegi panjang. Sebaliknya, penanganan dan pembuatan bentuk sudu empat persegi panjang lebih mudah daripada bentuk taper atau pun bentuk optimum. Bentuk sudu yang berbeda tidak akan menimbulkan kerugian sejauh penanganan dan pembuatan, yang berarti biaya sudu, dapat mengimbangi pengaruh bentuk sudu tersebut. Bentuk sudu taper dipilih untuk sudu turbin angin tersebut.

Kata kunci: Rancangan aerodinamik, Bentuk sudu turbin angin, Karakteristik prestasi

1 PENDAHULUAN

Sudu merupakan perangkat keras utama yang terpenting pada turbin angin dan berfungsi untuk mengonversikan sebagian tenaga angin menjadi tenaga mekanik berguna. Efisiensi aerodinamik proses konversi tersebut disebut koefisien prestasi yang didefinisikan sebagai perbandingan tenaga mekanik poros dengan tenaga angin melalui luas

sapan sudu rotor turbin angin. Nilai optimum ideal koefisien prestasi atau 'batas Betz' adalah $16/27 \approx 0,59$ yang dapat didekati bila turbin angin beroperasi pada kecepatan ujung desain. Koefisien prestasi dipengaruhi oleh parameter aerodinamik, utamanya kecepatan ujung desain, kualitas airfoil dan jumlah sudu.

Desain atau rancangan sudu dilakukan dengan proses optimisasi

aerodinamik dengan batasan aspek struktur, rigiditas dan praktek pembuatan sudu. Desain diawali dengan diameter rotor untuk tenaga rated yang diharapkan, lalu dilanjutkan dengan parameter kecepatan angin rated dan kecepatan rotor, yang tergantung pada kecepatan angin. Kemudian ditentukan profil airfoil, ketebalan *chord*, bentuk sudu, distribusi sudut *twist* dan jumlah sudu, yang akan menentukan prestasi rotor. Tidak semua opsi konseptual dapat diimplementasikan karena adanya batasan dalam desain dan pembuatan seperti jumlah, rigiditas dan kelangsingan sudu.

Makin banyak jumlah sudu makin rendah kecepatan operasinya. Turbin angin tiga sudu dapat mencapai koefisien prestasi mendekati 0,50 sementara turbin angin dua sudu lebih rendah atau sekitar 0,46. Untuk diameter yang sama turbin angin dua sudu lebih ringan dari pada tiga sudu, tetapi untuk tenaga yang sama berat untuk dua sudu bisa sama dengan tiga sudu. Dewasa ini perkembangan turbin angin didominasi oleh turbin angin tiga sudu; turbin angin dua sudu relatif sedikit dan yang satu sudu masih dalam eksperimen.

Geometri sudu ideal mempunyai distribusi *chord* dan sudut *twist* yang kompleks. Dalam praktek dilakukan penyederhanaan yang memberikan kompleksitas dan karakteristik sudu yang berbeda. Desain sudu termasuk parameter, karakteristik dan kecenderungan perkembangannya diuraikan lebih dulu, lalu dibahas formulasi dan perhitungan desain sudu dan kemudian dianalisis pilihan bentuk sudu. Sesuai dengan judul, makalah ini membahas rancangan awal dan analisis bentuk sudu turbin angin 50 kW guna menentukan spesifikasi awal dan bentuk sudu yang akan dikembangkan.

2 RANCANGAN SUDU

2.1 Parameter Desain Aerodinamik

Rancangan sudu merupakan proses optimisasi aerodinamik yang

menyertakan parameter desain sebagai berikut (Harrison et al., 2000; Wilson et al., 1976),

- Pertama kali harus diperhitungkan kecepatan angin rata-rata tahunan \bar{V} guna menentukan kecepatan angin operasional (V_{ci} , V_R dan V_{co}) dan tenaga *rated* P_R . Kekuatan struktur diperhitungkan pada kecepatan angin maksimum/badai ($V_{max} = 50 - 60 \text{ m/s}$).
- Rancangan dimulai dengan diameter sudu D yang berkaitan dengan skala dan hukum 'kuadrat-kubik' (produksi energi E bervariasi menurut D^2 sementara pembebanan/biaya meningkat menurut D^3) yang bisa menghasilkan dis-ekonomi skala. Namun peningkatan ukuran D akan meningkatkan ketinggian naf H , \bar{V} dan juga E . \bar{V} bervariasi menurut $H^{1/7}$ sementara E bervariasi menurut \bar{V}^3 . Untuk H setara dengan D , E akan bervariasi menurut $D^{2.4}$.
- Jumlah sudu, B berpengaruh terhadap karakteristik. Rotor tiga sudu stabil dan mempunyai koefisien prestasi C_P yang lebih tinggi daripada dua sudu, sementara rotor dua sudu lebih ringan, tetapi tidak balans.
- Perbandingan gaya angkat dan tahanan airfoil, C_l/C_d mempengaruhi C_P . Nilai C_l/C_d airfoil modern 120-130 untuk bilangan Reynold Re sekitar 3 juta dan antara 140-150 untuk $Re = 5-6$ juta. Insensitifitas airfoil penting untuk kekuatan struktur. Ketebalan airfoil hingga 40 % pada pangkal sudu dibutuhkan untuk mereduksi berat. Penurunan C_l yang tidak terlalu tajam serta peningkatan C_d yang cepat pasca *stall* dibutuhkan untuk aplikasi kontrol *stall* dan untuk ini NACA 63 dan 64 paling banyak digunakan.
- Perbandingan kecepatan ujung, λ (perbandingan kecepatan ujung sudu dengan kecepatan angin) berpengaruh terhadap koefisien prestasi sudu.

- Soliditas sudu, S (perbandingan luas sudu total frontal arah datangnya angin dan luas sapuan rotor) yang menurun dibutuhkan untuk koefisien prestasi yang optimum. Soliditas berkaitan dengan jumlah sudu; pembuatan sudu yang sangat langsing (soliditas terlalu kecil) sulit dan tidak praktis.

2.2 Karakteristik dan Perkembangan Sudu

Karakteristik sudu (bentuk, prestasi dan material) serta kecenderungan perkembangan dapat diuraikan sebagai berikut (Djojodihardjo dan Molly, 1983; Harrison et al., 2000; Spera, 1994; Tresher et al., 1993),

- Kurva sudu ideal mempunyai geometri (distribusi *chord* dan sudut *twist*) yang kompleks. Dalam praktek dilakukan penyederhanaan dengan mempertimbangkan batasan aerodinamik, struktur dan pembuatan sudu. Terhadap distribusi *chord*, dilakukan pendekatan yang lebih hati-hati pada separuh sudu bagian luar yang berkontribusi lebih dari 70 persen. Dan untuk sudut *twist*, dapat diterapkan pendekatan distribusi linear.
- Bentuk sudu (distribusi *chord*) cenderung berkembang dalam tiga opsi: bentuk optimum dengan distribusi

chord hiperbolis; bentuk taper dengan distribusi *chord* linear dan sudu dengan distribusi *chord* empat persegi panjang.

- Koefisien prestasi aerodinamik C_p (perbandingan tenaga poros dan tenaga angin melalui luasan sapuan sudu rotor) mempunyai nilai optimum ideal $C_{popt} = 16/27 \approx 0,59$ yang dapat didekati bila beroperasi pada perbandingan kecepatan ujung desain λ_d . C_p dipengaruhi oleh λ_d , kualitas airfoil C_l/C_d (perbandingan gaya angkat dan tahanan) dan jumlah sudu B . Koefisien prestasi maksimum C_{pmax} dalam praktek mendekati 0,5 untuk rotor tiga sudu dan sekitar 0,46 untuk rotor dua sudu.
- Karakteristik material sudu ditunjukkan dalam Tabel 2-1 yang mencakup kekuatan, berat dan biaya pembuatan sudu. Berat dan biaya sudu berkaitan dengan kekuatan dan biaya pembuatan; sudu yang sangat berat men 'drive' desain naf, poros utama dan mekanisme yaw turbin angin sehingga menjadi relatif berat dan mahal. Sudu merupakan bagian komponen yang relatif mahal dari turbin angin (sekitar $27\% \pm 6\%$ dari biaya total turbin angin). Perkembangan material sudu cenderung didominasi fiberglass.

Tabel 2-1: KARAKTERISTIK MATERIAL SUDU TURBIN ANGIN

Material	Kekuatan ijin σ_{adm} [Mpa]	Densitas ρ_m [kg/m ³]	$\rho_m/\sigma_{adm} \times 10^{-6}$ [kg/Pa.m ³]	Biaya pembuatan spesifik [Rp/kg]
Steel	110	7800	71	66000-96000
Glass-polyester	45	1800	40	120000-144000
Glass-epoxy	56	2000	33,3	144000-216000
Carbon-epoxi	200	1500	7,5	360000-600000
Wood-epoxi	12	550	45,8	120000-180000

3 FORMULASI DAN PERHITUNGAN

3.1 Ukuran Diameter

Ukuran diameter sudu turbin angin D dapat diperoleh dengan persamaan (Harrison, 2000),

$$D = \sqrt{\frac{P_R}{\frac{\pi}{8} \rho V_R^3 \eta_{Total}}} \quad (3-1)$$

dengan:

P_R = tenaga *rated*,

V_R = kecepatan angin *rated*,

ρ =rapat massa udara (= 1,25 kg/m³) dan

η_{Total} = efisiensi total turbin.

Kecepatan angin operasional (V_{ci} , V_R dan V_{co}) untuk keluaran energi yang optimum dapat ditentukan berdasarkan kecepatan angin rata-rata tahunan \bar{V} dengan hubungan

$$V_{ci} = 0,7\bar{V}; V_R = (1,5-2)\bar{V} = 1,8\bar{V} \text{ (untuk rotor tiga sudu) dan } V_{co} > 2\bar{V} \quad (3-2)$$

Efisiensi total turbin angin mencakup koefisien prestasi aerodinamik maksimum sudu rotor C_{Pmax} dan efisiensi *power train* η_{PT} dan dinyatakan dengan persamaan

$$\eta_{Total} = C_{Pmax} \eta_{PT} \quad (3-3)$$

Dalam penelitian ini ditetapkan

- $P_R = 50$ kW, sama dengan kapasitas turbin angin yang sedang dikembangkan;

- $\bar{V} = 5$ m/s pada ketinggian naf; maka diperoleh $V_R = 9$ m/s, $V_{ci} = 3,5$ m/s, $V_{co} = 20$ m/s ($\approx 4\bar{V}$) $V_{max} = 50$ m/s (kecepatan angin maksimum survival).

- $\eta_{PT} = 0,8$ (sistem penggerak langsung);

Nilai C_{Pmax} tergantung pada jumlah sudu, penampang airfoil, bentuk sudu dan perbandingan kecepatan ujung desain λ_d yang ditentukan berikut ini.

3.2 Koefisien Prestasi Maksimum

Jumlah sudu dan penampang airfoil ditentukan berdasarkan koefisien

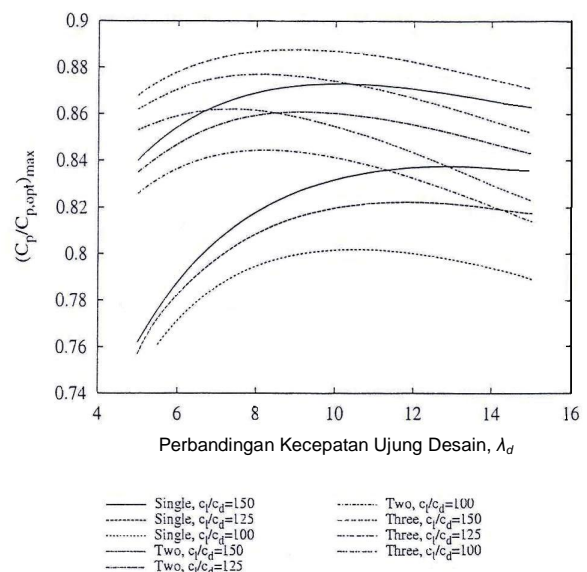
prestasi maksimum yang dinyatakan oleh persamaan (Jansen dan Smulders, 1997)

$$\frac{C_{pmax}}{C_{popt}} = \left[1 - \frac{0,416}{B\lambda_d} \right]^2 \left[\exp\left[-\frac{0,35}{\lambda_d^{1,29}} \right] - \lambda_d \frac{c_d}{c_l} \right] \quad (3-4)$$

dengan

- suku pertama menyatakan kerugian ujung yang disebabkan oleh kecepatan induksi pada bidang rotor yang tidak seragam-menurun dengan meningkatnya jumlah sudu B dan perbandingan kecepatan ujung desain λ_d ;
- suku kedua menyatakan kerugian tahanan profil aerodinamik yang menurunkan torsi poros - minimum pada koefisien gaya angkat dan tahanan minimum atau pada sudut serang optimum;
- suku ketiga menyatakan kerugian komponen kecepatan tangensial akibat gaya tangensial sudu pada aliran udara (kerugian *wake swirl*) - menurun untuk nilai λ_d yang meningkat.

Dalam Gambar 3-1 ditunjukkan koefisien prestasi maksimum sebagai fungsi perbandingan kecepatan ujung desain λ_d untuk jumlah sudu B dan c_l/c_d yang berbeda.



Gambar 3-1: Koefisien prestasi maksimum sebagai fungsi perbandingan kecepatan ujung desain

3.3 Jumlah dan Airfoil Sudu

Jumlah dan penampang airfoil sudu dapat ditentukan berdasarkan karakteristik koefisien prestasi yang ditunjukkan dalam Gambar 3-1. Jumlah sudu turbin angin ditentukan tiga sudu dengan pertimbangan berikut.

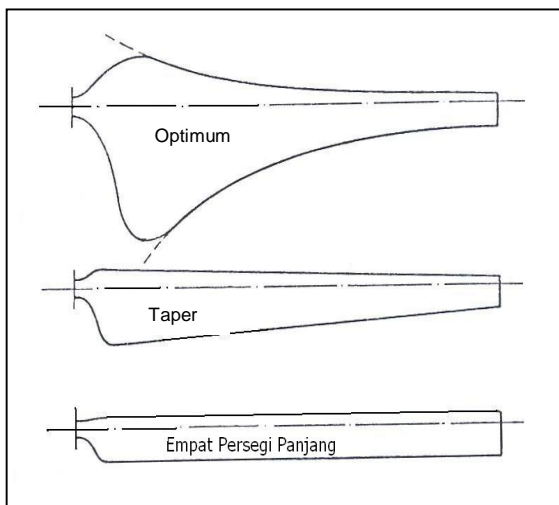
- koefisien prestasi relatif tinggi,
- stabil dan relatif sederhana,

Penampang airfoil sudu dipilih NACA 63 atau 64 dengan pertimbangan berikut.

- perbandingan gaya angkat dan tahanan relatif tinggi,
- c_l tidak terlalu tajam menurun sedangkan c_d meningkat tajam pasca *stall*,
- sesuai dengan aplikasi kontrol *stall* pada turbin angin 50 kW,
- insensitifitas terhadap pengaruh permukaan sudu kotor.

3.4 Opsi Bentuk Sudu

Tiga bentuk sudu yang dipilih dalam penelitian ini, yaitu bentuk sudu optimum, sudu *taper* dan sudu empat persegi panjang yang diilustrasikan dalam Gambar 3-2. Pemilihan bentuk sudu didasarkan pada kecenderungan perkembangan bentuk sudu turbin angin dewasa ini.



Gambar 3-2: Ilustrasi tiga opsi bentuk sudu

3.5 Perbandingan Kecepatan Ujung dan Prestasi Sudu

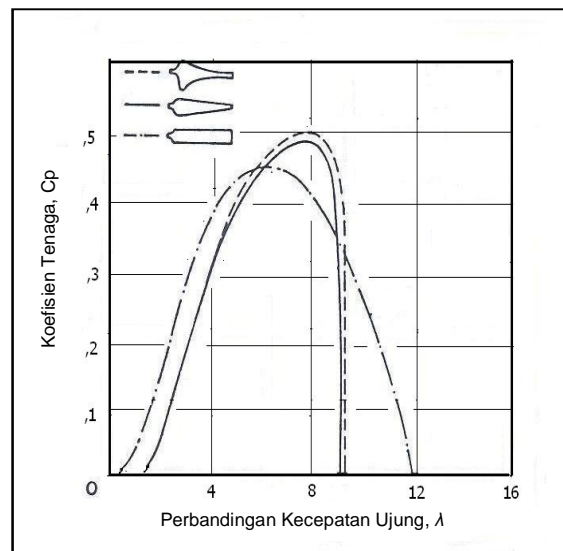
Perbandingan kecepatan ujung desain dan prestasi maksimum setiap bentuk sudu dapat diperoleh berdasarkan karakteristik prestasi (kurva C_p vs λ) yang ditunjukkan dalam Gambar 3-3.

Nilai perbandingan kecepatan ujung desain λ_d setiap bentuk sudu diperoleh sebagai berikut.

- sudu optimum, $\lambda_{dopt} \approx 8$
- sudu *taper*, $\lambda_{dtap} \approx 7,6$
- sudu empat persegi panjang, $\lambda_{drect} \approx 7$

Nilai koefisien prestasi maksimum C_{Pmax} setiap bentuk sudu diperoleh sebagai berikut.

- sudu optimum, $C_{Pmaxopt} \approx 0,50$,
- sudu *taper*, $C_{Pmax tap} \approx 0,48$,
- sudu empat persegi panjang, $C_{Pmax rect} \approx 0,45$.



Gambar 3-3: Karakteristik prestasi (C_p vs λ) untuk tiga opsi bentuk sudu

3.6 Diameter Sudu dan Kecepatan Sudu

Diameter setiap bentuk sudu dapat diperoleh berdasarkan nilai koefisien prestasi maksimumnya dengan persamaan (3-1), hasilnya diperoleh sebagai berikut.

- sudu optimum, $D_{opt} \approx 18,7$ m
- sudu *taper*, $D_{tap} \approx 19,1$ m
- sudu empat persegi panjang, $D_{rect} \approx 19,7$ m

Berdasarkan nilai perbandingan kecepatan ujung desain λ_d dan diameter setiap bentuk sudu, dapat diperoleh kecepatan ujung V_T dan kecepatan rotasi n dengan persamaan

$$\lambda_d = \frac{\Omega D}{2V_R} = \frac{V_T}{V_R} \quad (3-5)$$

Diperoleh hasilnya sebagai berikut.

- sudu optimum, $V_{Topt} = 72$ m/s dan $n_{opt} = 74$ rpm
- sudu taper, $V_{Ttap} = 68$ m/s dan $n_{tap} = 68$ rpm
- sudu empat persegi panjang, $V_{Trect} = 63$ m/s dan $n_{rect} = 61$ rpm

3.7 Soliditas

Soliditas S mendekati konstan sebesar 8/9 pada saat ekstraksi tenaga optimum dan dapat dinyatakan dengan persamaan berikut (Harrison et al., 2000),

$$C_{D,ax} \propto S\lambda_d^2 \quad (3-6)$$

Hubungan soliditas dan perbandingan kecepatan ujung desain (kurva S vs λ_d) ditunjukkan dalam Gambar 3-4. Dan berdasarkan kurva S vs λ_d dapat diperoleh soliditas setiap bentuk sudu sebagai berikut.

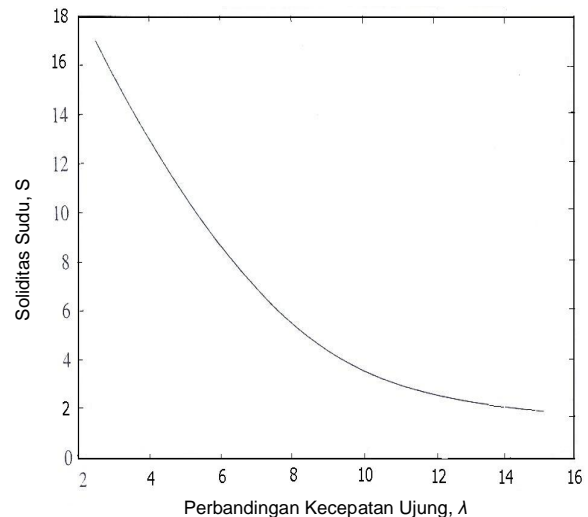
- soliditas sudu optimum dengan $\lambda_{dopt} \approx 8$: $S_{opt} = 5,3$ (%)
- soliditas sudu taper dengan $\lambda_{dtap} \approx 7,6$: $S_{tap} = 6$ (%)
- soliditas sudu empat persegi panjang dengan $\lambda_{direct} \approx 7$: $S = 7$ (%)

3.8 Prestasi Sudu

Keluaran tenaga rated turbin angin untuk ketiga bentuk sudu rotor telah ditetapkan sama mengikuti variasi koefisien prestasi maksimum dan diameter sudu, yaitu $P_R = 50$ kW. Dalam hal ini keluaran tenaga mekanik sudu/rotor turbin angin P_S dapat dinyatakan dengan persamaan

$$P_S = \frac{1}{2} \rho_a C_p V^3 \pi \frac{D^2}{2} \quad (3-7)$$

Nilainya adalah $P_S = 62,5$ kW.



Gambar 3-4: Hubungan soliditas dan perbandingan kecepatan ujung

Keluaran energi mekanik sudu selama setahun (8760 jam), E_{Sy} adalah integral produk tenaga $P_S(V)$ dan frekuensi kecepatan angin menurut distribusi Weibull $\Phi(V)$ dan dapat dinyatakan dengan persamaan

$$E_{Sy} = 8760 \int_{v_{in}}^{v_{out}} P_S(V) \Phi(V) dV \quad (3-8)$$

Keluaran energi mekanik akan menentukan produksi energi listrik dan dapat diperoleh berdasarkan kurva P_S vs V hasil pengujian lapangan. Besarnya bisa berbeda untuk setiap bentuk sudu karena produksi energi tidak hanya tergantung pada kurva karakteristik prestasi sudu, tetapi juga pada kecepatan operasi turbin angin apakah konstan atau variabel serta strategi kontrol tenaga yang diterapkan, *pitch* tetap atau *pitch* variabel. Meskipun koefisien prestasi maksimum sudu empat persegi panjang relatif rendah, tapi dengan karakteristik prestasi energi yang relatif luas (lihat Gambar 3-3), produksi energinya bisa relatif besar. (Pembahasan rinci masalah ini di luar lingkup tulisan ini).

3.9 Berat Sudu

Berat sudu tergantung pada kekuatan spesifik material ρ_m/σ_{adm}

(perbandingan rapat massa dan kekuatan ijin material sudu), kecepatan angin rated V_R , dan perbandingan kecepatan ujung desain λ_d yang dapat dinyatakan dengan persamaan berikut (Harrison, et al., 2000),

$$W_b \propto \rho_a V_R^2 \frac{\rho_m}{\sigma_{adm}} \left[\frac{1+t}{t} \right] D^3 \lambda_d^2 \quad (3-9)$$

dengan ketebalan profil t , diameter sudu D dan rapat massa udara ρ_a . Persamaan berat sudu dapat disederhanakan kedalam bentuk fungsi diameter dan perbandingan kecepatan ujung desain sebagai berikut.

$$W_b \propto k_{wb} D^3 \lambda_d^2 \quad (3-10)$$

Dengan menggunakan material sudu yang sama (fiberglass), maka konstanta karakteristik berat sudu k_{wb} dapat diasumsikan sama. Dengan demikian berat relatif sudu dapat diperoleh sebagai berikut.

- berat sudu optimum, $W_{bopt} \approx 1,04 W_{btap}$;
- berat sudu empat persegi panjang, $W_{brect} \approx 0,94 W_{btap}$; atau $W_{bopt} > W_{btap} > W_{brect}$.

4 ANALISIS BENTUK SUDU

Analisis pengaruh bentuk sudu dilakukan berdasarkan hasil-hasil untuk setiap opsi bentuk sudu tersebut yang

dirangkum dalam Tabel 4-1 sebagai berikut.

- Nilai perbandingan kecepatan ujung desain sudu optimum yang relatif besar memberikan pengaruh kerugian aerodinamik yang relatif kecil sehingga nilai koefisien prestasi maksimum sudu optimum relatif tinggi dibandingkan dengan sudu taper atau pun sudu empat persegi panjang, tetapi sebaliknya untuk nilai soliditas.
- Dengan nilai koefisien prestasi sudu optimum yang relatif tinggi, ukuran diameter sudu optimum relatif kecil dibandingkan dengan ukuran diameter sudu taper atau pun ukuran diameter sudu empat persegi panjang relatif besar.
- Nilai perbandingan kecepatan ujung desain sudu optimum yang relatif besar dan ukuran diameter sudu optimum relatif kecil menghasilkan kecepatan ujung dan kecepatan rotasi sudu optimum yang relatif tinggi dibandingkan dengan sudu taper atau pun sudu empat persegi panjang.
- Dengan asumsi konstanta karakteristik berat sama untuk setiap opsi bentuk sudu, dan massa sudu adalah pangkat tiga diameter sudu dan kuadrat perbandingan kecepatan ujung sudu, maka sudu optimum relatif berat dibandingkan dengan sudu taper atau pun sudu empat persegi panjang.

Tabel 4-1: RANGKUMAN HASIL PERHITUNGAN SETIAP BENTUK SUDU TURBIN ANGIN

No.	Parameter	Opsi Bentuk Sudu		
		Optimum	Taper	Empat Persegi Panjang
1.	Perb. kecepatan ujung desain, λ_d	8,0	7,6	7,0
2.	Koefisien prestasi maksimum, C_{Pmax}	0,50	0,48	0,45
3.	Diameter sudu, D (m)	18,7	19,1	19,7
4.	Kecepatan ujung, V_T (m/s)	72	68	63
5.	Kecepatan rotasi, n (rpm)	74	68	61
6.	Soliditas, S (%)	5,3	6,0	7,0
7.	Berat sudu (relatif), W	$1,04 W_{tap}$	W_{tap}	$0,93 W_{tap}$

5 KESIMPULAN

Dalam tulisan ini dapat diperoleh kesimpulan sebagai berikut.

- Sudu turbin angin 50 kW dirancang menghasilkan prestasi maksimum pada kecepatan angin rata-rata tahunan 5 m/s dan mulai menghasilkan tenaga pada kecepatan angin 3,5 m/s, mencapai tenaga rated pada kecepatan angin 9 m/s dan dibatasi beroperasi hingga kecepatan angin 20 m/s.
- Jumlah sudu dipilih tiga sehingga mempunyai perbandingan kecepatan ujung desain yang relatif rendah, koefisien prestasi yang relatif tinggi, konstruksi naf yang relatif sederhana dan tingkat kebisingan yang relatif rendah dibandingkan dengan dua sudu.
- Perbandingan kecepatan ujung sudu optimum relatif tinggi dibandingkan dengan sudu taper atau pun sudu empat persegi panjang sehingga koefisien prestasi maksimumnya relatif tinggi. Akan tetapi pembebanan dan berat sudu optimum relatif tinggi dibandingkan dengan sudu taper atau pun sudu empat persegi panjang.
- Dengan nilai koefisien prestasi maksimum sudu optimum yang relatif tinggi, ukuran diameter sudu optimum relatif kecil dibandingkan dengan sudu taper atau pun sudu empat persegi panjang.
- Kecepatan rotasi sudu dengan bentuk optimum yang relatif tinggi dibandingkan dengan sudu taper atau pun sudu empat persegi panjang akan menghasilkan torsi yang relatif rendah dan berarti akan mereduksi ukuran fisik generator.

- Bentuk sudu optimum relatif kompleks sehingga penanganan dan pembuatan sudu bentuk optimum juga yang relatif sulit dibandingkan dengan bentuk sudu taper atau pun sudu empat persegi panjang.

DAFTAR RUJUKAN

- Djojodihardjo, H, Molly, J. P., 1983. *Wind Energy Systems*, Penerbit Alumni, Bandung.
- Nielsen, P., 1993, *Development of Wind Energy in Denmark*, Proceedings, Wind Power Conference, AWEA, Washington, DC.
- Harrison R., at all, 2000. *Large Wind Turbine – Design and Economics*, John Wiley & Sons, Ltd.
- Jansen, W.A.M. and Smulders, P.L., 1997. *Rotor Design for Horizontal Axis Windmills*, SWD, Amersfoort, Netherland.
- Milborrow, D.J., 1986. *Toward Lighter Wind Turbine*, Proc. 8th BWEA Conf. Cambridge Mechanical Engineering Publications.
- Spera, D. A., 1994. *Wind Turbine Technology-Fundamental Concepts of wind Turbine Engineering*, ASME Press, New York.
- Tresher, R. W., at all, 1993. *Advanced Technology for the Year 2000*, Proceedings, Wind Power Conference, AWEA, Washington, DC.
- Wilson, R. E., at all, 1976. *Aerodynamics Performance of Wind Turbine*, ERDA/NSF, Oregon State University, Corvallis.
- www.nrel.gov/wind
www.en.wikipedia.org/wind_turbine
www.responsiblewind.org