

## KARAKTERISTIK PENGAWALAN TURBIN ANGIN BERPOROS HORIZONTAL BERBILAH RASIO KECEPATAN UJUNG DESAIN RENDAH

Sigit Iswahyudi<sup>1</sup>, Wandi Arnandi<sup>1</sup>, Trisma Jaya Saputra<sup>1</sup>  
Prodi D3 Teknik Mesin, Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik Universitas Tidar  
Email: sigit.iswahyudi@untidar.ac.id

### ABSTRAK

Kemampuan pengawalan suatu turbin angin berporos horizontal dipengaruhi oleh desain *planform* bilah. Desain rasio kecepatan ujung rendah cenderung menghasilkan torsi awal yang lebih besar dari pada desain rasio kecepatan ujung tinggi. Untuk mempelajari potensi desain bilah dengan desain rasio kecepatan ujung rendah diterapkan di daerah dengan kelas daya angin rendah, di dalam makalah ini disajikan alternatif desain bilah turbin angin. Geometri bilah tersebut dirancang menggunakan teori momentum elemen bilah, berpenampang NACA 4412, beradius 3,5 m dan memiliki daya maksimum 10 kW pada kecepatan angin 10 m/s. Rasio kecepatan ujung desain sampel dipilih 3, 3,5, 4, dan 4,5. Hasil analisis memperlihatkan bahwa semakin rendah nilai rasio kecepatan ujung desain maka semakin lebar geometri bilah, semakin tinggi torsi untuk pengawalan, namun semakin rendah koefisien daya maksimum dan koefisien gaya dorong aksial maksimumnya.

**Kata kunci :** Turbin angin, poros horizontal, rasio kecepatan ujung, kelas daya angin, torsi

### ABSTRACT

*The starting capability of a horizontal axis wind turbine is influenced by the blade planform design. A low tip speed ratio design tend to produce greater starting torque than a high tip speed ratio designs. In order to study the design potential of blades with low tip speed ratio design applied in areas with low wind power classes, this paper presents an alternative design of wind turbine blades. The blade geometry was designed using the blade element momentum theory, with NACA 4412 cross section, 3.5 m radius and a maximum power of 10 kW at a wind speed of 10 m / s. The sample design tip speed ratios were 3, 3.5, 4, and 4.5. The results show that the lower the design tip speed ratio, the wider the blade geometry, the higher the starting torque, but the lower the maximum power coefficient and maximum axial thrust coefficient.*

**Keyword:** Wind turbine, horizontal shaft, tip speed ratio, wind power class, torque.

### PENDAHULUAN

Energi kinetik aliran udara dari angin dapat dimanfaatkan sebagai sumber energi baru dan terbarukan. Pengembangan sistem energi angin di dunia didorong untuk mengurangi emisi gas rumah kaca dan menghambat pemanasan global. Sebagai negara kepulauan, Indonesia memiliki potensi energi angin cukup besar. Di Jawa dan Sulawesi, potensi angin untuk dikembangkan mencapai 950 MW [1]. Pengembangan sistem energi

angin tersebut diarahkan untuk ketenagalistrikan berbasis potensi daerah [2]. Pengembangan sistem energi angin di Indonesia dilakukan di daerah dengan kecepatan angin rata-rata tahunan antara 3 hingga 6 m/s [3]. Daerah-daerah tersebut termasuk ke dalam kelas daya angin antara 1 hingga 4 (Tabel 1). Potensi energi angin yang ideal untuk dikembangkan adalah daerah yang memiliki kelas daya angin mulai dari 4. Kelas daya angin 3 sesuai untuk rotor yang dipasang pada menara tinggi sementara kelas daya angin 2 akan menghasilkan daya yang

rendah dan kelas daya angin 1 kurang sesuai untuk pengembangan sistem energi angin [4].

Tabel 1. Pembagian kelas daya angin di Amerika [4]

| Kelas daya angin | 10 m   |                           | 30 m   |                           | 50 m   |                           |
|------------------|--|---------------------------|--|---------------------------|--|---------------------------|
|                  | Kecepatan angin rata-rata dalam satu tahun (m/s) | Densitas daya ( $W/m^2$ ) | Kecepatan angin rata-rata dalam satu tahun (m/s) | Densitas daya ( $W/m^2$ ) | Kecepatan angin rata-rata dalam satu tahun (m/s) | Densitas daya ( $W/m^2$ ) |
| 1                | 0-4,4  | 0-100                     | 0-5,1  | 0-160                     | 0-5,6  | 0 - 200                   |
| 2                | 4,4-5,1  | 100-150                   | 5,1-5,8  | 160-240                   | 5,6-6,4  | 200-300                   |
| 3                | 5,1-5,6  | 150-200                   | 5,8-6,5  | 240-320                   | 6,4-7,0  | 300-400                   |
| 4                | 5,6-6,0  | 200-250                   | 6,5-7,0  | 330-400                   | 7,0-7,5  | 400-500                   |
| 5                | 6,0-6,4  | 250-300                   | 7,0-7,4  | 400-480                   | 7,5-8,0  | 500-600                   |
| 6                | 6,4-7,0  | 300-400                   | 7,4-8,2  | 480-640                   | 8,0-8,8  | 600-800                   |
| 7                | 7,0-9,4  | 400-1000                  | 8,2-11,0   | 640-1600                  | 8,8-11,9   | 800-2000                  |

Pengembangan sistem energi angin di kelas daya di bawah 4 membutuhkan penangan khusus terutama untuk turbin angin berskala kecil. Turbin angin kecil biasanya tidak memiliki mekanisme pengaturan sudut *pitch* sehingga akan sulit mulai berputar pada kecepatan angin rendah. Rasio kecepatan ujung desain yang ideal antara 5,24 hingga 5,45 [5] atau dengan kriteria rasio luncur *airfoil* dan kecepatan ujung maksimum antara 6,25 hingga 7,55 [6] tidak dapat digunakan karena akan menghasilkan bilah yang sempit dan bilangan Reynolds yang rendah. Kondisi desain ideal tersebut akan menghasilkan bilah yang sulit mulai berputar pada kecepatan angin rendah.

Melalui artikel ini penulis membahas desain bilah turbin angin berskala kecil yang memiliki rasio kecepatan ujung rendah untuk ekstraksi energi angin di daerah yang memiliki kelas daya 2 atau 3.

## METODE

### Desain Bilah

Desain bilah turbin angin dalam diskusi ini didasarkan pada teori momentum elemen bilah. Distribusi panjang *chord* ( $c$ ) dan sudut *twist* ( $\beta$ ) bilah dihitung berdasarkan distribusi Schmitz (Persamaan 1 dan 2) [7]. Penampang bilah berbentuk *airfoil* NACA 4412 (Gambar 1). Parameter masukan perhitungan desain bilah secara detail ditampilkan di dalam Tabel 2. Rotor didesain

memiliki jejari ( $R$ ) 3,5 m dan jumlah bilah ( $B$ ) 3 untuk menghasilkan daya maksimum ( $P_{rated}$ ) 10 kW pada kecepatan angin *rated* ( $V_{rated}$ ) 10 m/s. Rasio kecepatan ujung desain ( $X_D$ ) untuk masing-masing sampel ialah 3, 3,5, 4 dan 4,5. Sudut serang desain ( $\alpha_D$ ) dan koefisien gaya angkat desain ( $C_{l,D}$ ) *airfoil* didasarkan pada bilangan Reynolds *airfoil* ( $Re$ ) rata-rata. Bilangan Reynolds lokal dihitung menggunakan kecepatan relatif lokal ( $V_{rel}$ ) (Persamaan 3) dan viskositas kinematik udara ( $\nu$ ) pada suhu 25 °C. Interferensi aksial ( $a$ ) ditentukan 1/3 untuk menghitung kecepatan relatif lokal pada sudut kecepatan relatif lokal ( $\varphi$ ) (Persamaan 4 dan 5). Hasil perhitungan distribusi *chord* dan *twist* sebagai fungsi posisi radial ( $r$ ) beserta tampilan geometri bilah disajikan di dalam Gambar 2 dan 3.

$$c(r) = \frac{1}{B} \frac{16\pi r}{C_{l,D}} \sin^2 \left( \frac{1}{3} \arctan \left( \frac{R}{X_D r} \right) \right) \quad (1)$$

$$\beta(r) = \frac{2}{3} \arctan \frac{R}{X_D r} - \alpha_D \quad (2)$$

$$Re(r) = \frac{V_{rel}(r)c(r)}{\nu} \quad (3)$$

$$\varphi(r) = \frac{2}{3} \arctan \frac{R}{X_D r} \quad (4)$$

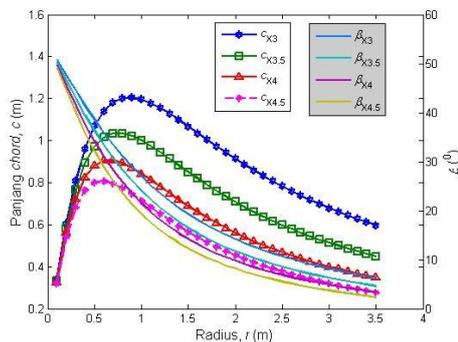
$$V_{rel}(r) = \frac{(1-a)}{\sin\phi(r)}, a = \frac{1}{3} \quad (5)$$



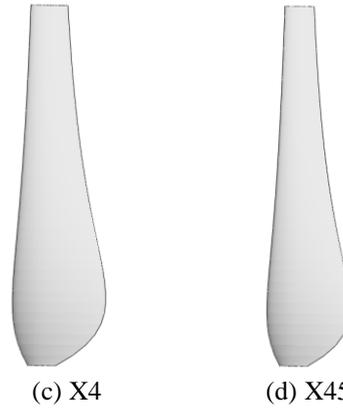
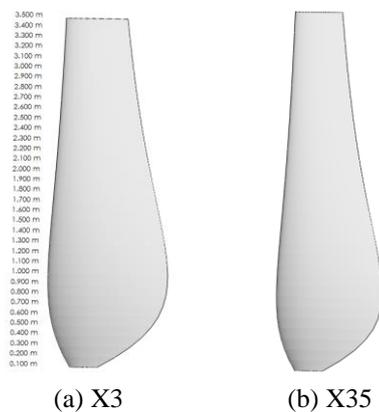
Gambar 1. NACA 4412.

Tabel 2. Data desain sampel bilah turbin

| Sampel | $\alpha_D(^{\circ})$ | $C_{l,D}$ | $Re$     |
|--------|----------------------|-----------|----------|
| X3     | 6                    | 1,126     | 9,92E+05 |
| X3,5   | 6                    | 1,122     | 8,82E+05 |
| X4     | 6                    | 1,121     | 7,92E+05 |
| X4,5   | 6                    | 1,121     | 7,17E+05 |



Gambar 2. Distribusi panjang *chord* dan sudut *twist* sampel.



Gambar 3. Tampilan sampel.

### Analisis Aerodinamika Rotor

Kinerja aerodinamik rotor dianalisis menggunakan perangkat lunak sumber terbuka QBlade v0.963. Analisis difokuskan pada karakteristik rotor pada kecepatan angin rendah. Kecepatan angin yang dipilih ialah 1, 2 dan 3 m/s. Hasil analisis disajikan dalam bentuk fungsi kinerja nondimensional koefisien daya ( $C_p$ ) dan koefisien gaya dorong aksial ( $C_t$ ) sebagai fungsi rasio kecepatan ujung ( $X$ ). Koefisien daya didefinisikan sebagai rasio antara daya yang dihasilkan rotor ( $P$ ) pada kecepatan angin tertentu dengan daya aliran udara di dalam angin tersebut (Persamaan 6), koefisien gaya dorong aksial dihitung dari rasio antara gaya aksial ( $T$ ) yang dialami oleh rotor dengan gaya aksial yang dialami oleh daerah tersapu rotor (Persamaan 7), dan rasio kecepatan ujung ditentukan dari kecepatan ujung bilah ( $\omega R$ ) dibagi kecepatan angin (Persamaan 8).

$$C_p = \frac{P}{\frac{1}{2}\rho V_{\infty}^3 \pi R^2} \quad (6)$$

$$C_t = \frac{T}{\frac{1}{2}\rho V_{\infty}^2 \pi R^2} \quad (7)$$

$$X = \frac{\omega R}{V_{\infty}} \quad (8)$$

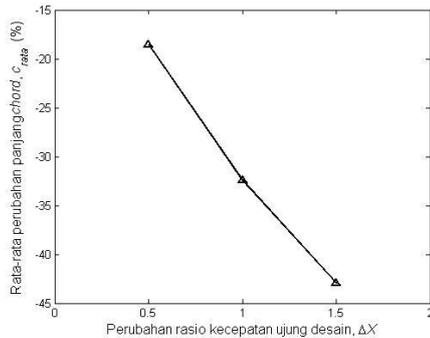
Perhitungan kinerja rotor melibatkan koreksi *Prandtl Tip Loss*, *Prandtl Root loss*, *3D Correction*, *Reynolds Drag Correction* dan *Foil Interpolation*. Dalam komputasi ini,

bilah didiskretisasi menjadi 40 elemen, konvergensi ditentukan maksimum 0,001, jumlah iterasi maksimum dibatasi 100 dengan memasukkan faktor relaksasi 0,35, densitas udara  $1,184 \text{ kg/m}^3$  dan viskositas kinematik  $1,56 \text{ E}+05 \text{ m}^2/\text{s}$ .

## HASIL DAN PEMBAHASAN

### Geometri Bilah

Geometri bilah turbin angin sangat dipengaruhi oleh pemilihan rasio kecepatan ujung desain. Semakin tinggi rasio kecepatan ujung desain, semakin pendek panjang *chord* pada penampang bilah. Gambar 4 memperlihatkan perubahan rata-rata panjang *chord* terhadap perubahan pemilihan rasio kecepatan ujung dengan sample X3 sebagai basis geometri. Sampel X35, X4, X45 berturut-turut memberikan penurunan panjang *chord* rata-rata 18,57%, 32,41%, dan 42,95%. Pemilihan rasio kecepatan ujung desain ini sangat penting karena terkait dengan jumlah material yang dibutuhkan untuk membuat bilah.



Gambar 4. Perubahan panjang *chord* terhadap perubahan rasio kecepatan ujung desain.

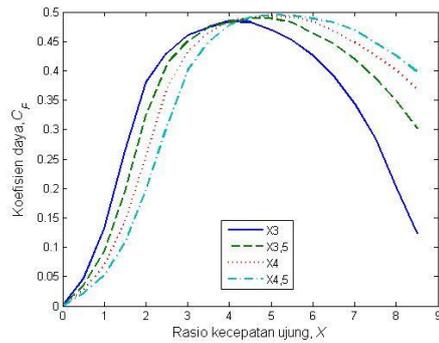
### Kinerja Aerodinamik dan Torsi Pengawasan

Hasil perhitungan koefisien daya dan koefisien gaya dorong aksial sebagai fungsi rasio kecepatan ujung ditampilkan di dalam Gambar 5 dan 6. Hasil perhitungan torsi pada saat turbin akan bergerak (kecepatan putaran mendekati nol) untuk kecepatan angin 1, 2 dan 3 m/s ditampilkan di dalam Gambar 7.

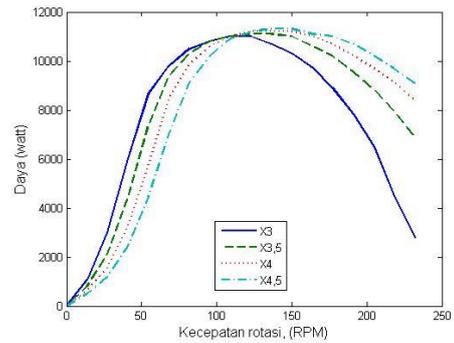
Gambar 5 memperlihatkan hasil-hasil sebagai berikut. Rotor dengan bilah X3 memberikan hasil perhitungan koefisien daya tertinggi mulai di dalam rentang rasio kecepatan ujung 0 hingga mendekati rasio kecepatan ujung 3. Sementara itu, rotor dengan bilah X4,5 menghasilkan koefisien daya lebih rendah pada kondisi tersebut. Hal ini menunjukkan bahwa pada kecepatan putaran rendah (dalam hal ini  $X < 3$ , rotor dengan rasio kecepatan ujung desain rendah mampu menghasilkan daya lebih tinggi dari pada rotor dengan rasio kecepatan ujung desain tinggi. Namun, pada kecepatan putaran atas ( $X > 3$ ), rotor dengan desain kecepatan ujung desain di atas 3 menghasilkan koefisien daya yang lebih tinggi dari pada rotor X3.

Hasil perhitungan koefisien daya terhadap perubahan operasi rasio kecepatan ujung memberikan kecenderungan yang sama dengan hasil perhitungan koefisien gaya aksial sebagai fungsi dari rasio kecepatan ujung (Gambar 6). Jika daerah operasional rotor ditentukan pada rasio kecepatan ujung maksimum sama dengan 5, maka gaya dorong aksial maksimum dari keempat sampel memiliki nilai yang hampir sama. Dengan demikian, desain menara untuk keempat desain tersebut dapat dibuat sama.

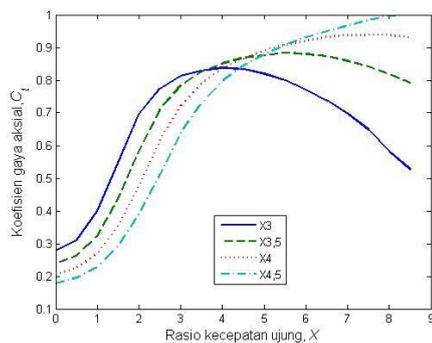
Torsi rotor saat kecepatan rotasi mendekati nol menentukan kemampuan rotor untuk mulai berputar. Desain rotor X3 menghasilkan torsi tertinggi dari desain rotor lainnya. Namun, rotor X3 memiliki geometri paling lebar. Jika semua rotor tersebut dibuat dari bahan yang sama maka rotor X3 akan memiliki kelembaman paling tinggi, sehingga kemampuan untuk memulai berputar belum tentu lebih baik dari pada rotor dengan rasio kecepatan ujung desain lebih tinggi. Pemilihan bilah rotor untuk daerah dengan kelas daya angin rendah perlu penelitian lebih lanjut dengan mempertimbangkan ketersediaan bahan baku dan biaya produksi bilah rotor.



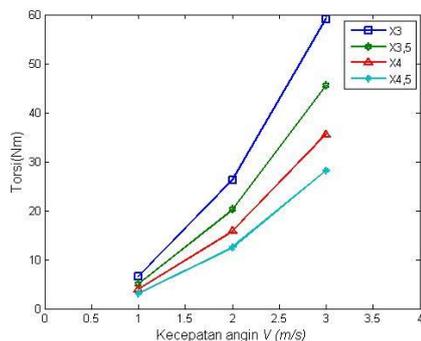
Gambar 5. Karakteristik koefisien daya terhadap perubahan operasi rasio kecepatan ujung.



Gambar 8. Hasil perhitungan daya pada kecepatan angin 10 m/s pada berbagai kecepatan putaran rotor.



Gambar 6. Karakteristik koefisien gaya aksial terhadap perubahan operasi rasio kecepatan ujung



Gambar 7. Torsi rotor saat mulai berputar.

Gambar 8 memperlihatkan hasil perhitungan daya sebagai fungsi kecepatan putaran rotor pada kecepatan angin *rated* 10 m/s. Rotor dapat beroperasi optimal pada saat berputar pada kecepatan antara 100 hingga 150 RPM. Kecepatan putaran tersebut penting untuk menentukan penggunaan roda gigi yang akan dihubungkan ke generator. Roda gigi dibutuhkan untuk menaikkan putaran poros sehingga sesuai dengan kecepatan poros generator listrik yang dipasangkan. Keempat sampel di atas memiliki kecepatan putaran optimal yang hampir sama sehingga perbandingan kecepatan roda gigi yang sama dapat digunakan.

## SIMPULAN

Pembahasan kemungkinan pemanfaatan bilah turbin angin dengan rasio kecepatan ujung desain rendah di atas menghasilkan simpulan sebagai berikut.

1. Desain bilah turbin angin dengan rasio kecepatan ujung rendah menghasilkan geometri bilah yang lebar.
2. Kemampuan pengawalan bilah dengan rasio kecepatan ujung desain rendah tergantung pada torsi awal yang dihasilkan dan kelembaman dari rotor.
3. Penggunaan bilah dengan rasio kecepatan ujung desain rendah membutuhkan roda gigi untuk menaikkan putaran poros sehingga

sesuai dengan putaran poros generator listrik.

4. Penelitian lebih lanjut terkait dengan kelembaman rotor dan penggunaan roda gigi untuk menaikkan putaran poros turbin dibutuhkan sebelum menerapkan desain ini.

#### DAFTAR PUSTAKA

- [1] S. Said, *Rencana Strategis Kementerian Energi Dan Sumber Daya Mineral 2015-2019*. Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia, 2015, p. 275.
- [2] *Kebijakan Energi Nasional*. 2014.
- [3] D. E. Nasional, "Laporan Dewan Energi Nasional 2014," 2014.
- [4] J. F. Manwell, J. G. McGowan, and A. L. Rogers, *Wind Energy Explained: Theory, Design and Application*, 2nd. John Wiley & Sons, Ltd., 2009.
- [5] M. Ragheb and A. M. Ragheb, "Wind Turbines Theory - The Betz Equation and Optimal Rotor Tip Speed Ratio," in *Fundamental and Advanced Topics in Wind Power*, R. Carriveau, Ed. CC BY-NC-SA 3.0 license, 2011.
- [6] S. Iswahyudi, Sutrisno, and Prajitno, "Tip Speed Ratio Selection of Three Bladed Small Scale Horizontal Axis Wind Turbine," in *The 8th Annual Basic Science International Conference*, 2018, pp. 22–27.
- [7] S. Gundtoft, *Wind Turbines*. University College of Aarhus, 2009.