

Desain *Micro Scale Horizontal Axis Wind Turbine Blade* Untuk Karakteristik Angin Di Muara Gembong Bekasi

Adi Surjosatyo^{1,*} dan Ahmad Dien Warits²

^{1,2}Departemen Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Indonesia, Kampus Baru UI, Depok, 16424, Indonesia

*adisur@eng.ui.ac.id

Abstrak

Energi angin dapat dimanfaatkan untuk membangkitkan listrik dengan menggunakan *horizontal axis wind turbine* seperti TSD-500 di Muara Gembong, Bekasi. Namun, produksi listrik TSD-500 belum optimal karena tidak didesain sesuai dengan karakteristik angin di lokasi. Untuk itu dilakukan pendesainan *blade* sebagai improvisasi TSD-500 di lokasi. Berdasarkan data angin di lokasi dan dengan metode *Blade Element Momentum Theory* (BEMT) dihasilkan desain *blade* baru. Desain baru *blade* turbin angin ini memiliki radius 1 m, menggunakan *airfoil* SD 7032 (*low Reynolds number airfoil*) dengan *chord* yang dilinearisasi. *Blade* memiliki C_p sebesar 0,38 yang stabil di *tip speed ratio* ± 7 . Kapasitas turbin angin TSD-500 dapat meningkat dari 500 Wp menjadi 1.400 Wp. *Blade* desain baru ini diprediksi dapat memanfaatkan angin di lokasi sebesar 26%, lebih besar dari *blade* sebelumnya yang hanya 19,76%.

Kata Kunci : *wind characteristics, wind turbine blade, blade element momentum theory, low Reynolds number airfoi, Tip Speed Ratio*

Pendahuluan

Sumber energi bagi pembangkitan listrik yang memiliki sustainabilitas tinggi dan ramah lingkungan adalah sumber energi terbarukan (*renewable energy*). Beberapa di antaranya adalah energi matahari, angin, air, dan arus laut. Sumber energi terbarukan sudah bukan lagi sebagai sumber energi alternatif, namun harus sebagai sumber energi utama. Pembangkitan listrik di Indonesia harus menggunakan sumber energi terbarukan. Pemerintah Indonesia telah memiliki target terhadap pemanfaatan energi terbarukan. Sebagaimana yang disampaikan Presiden Republik Indonesia [1], yang tertuang dalam Peraturan Pemerintah tentang Kebijakan Energi Nasional pasal 9f ayat 1, bahwa pada tahun 2025 peran energi baru dan energi terbarukan paling sedikit 23% dan pada tahun 2050 paling sedikit 31% sepanjang keekonomiannya terpenuhi. Dengan demikian teknologi pembangkitan listrik dari sumber energi terbarukan harus terus dikembangkan dan diaplikasikan di masyarakat.

Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB) atau kincir angin, dalam teks ini selanjutnya disebut turbin angin, adalah teknologi pembangkitan listrik dari sumber energi angin. Di Kampung Bungin, Muara Gembong, Bekasi telah diimplementasikan turbin angin skala mikro sebagai pemenuh kebutuhan listrik masyarakat. Implementasi tersebut menggunakan turbin angin produksi Jepang, *The Sky Dancer* (TSD-500) yang dapat menghasilkan listrik *peak* sebesar 500 W ketika kecepatan angin 12 m/s. Turbin angin ini masuk ke dalam kategori *Horizontal Axis Wind Turbine* (HAWT) karena memiliki sumbu poros yang horisontal. Selain itu, berdasarkan Karthikeyan [2], turbin angin ini juga masuk ke dalam kategori *micro scale wind turbine* karena memiliki kapasitas *peak* di bawah 1 kW.

Namun, setelah melakukan pengamatan dan pengambilan data, ternyata performa turbin angin TSD-500 di Muara Gembong masih belum optimal. Hal ini disebabkan tidak

sesuai desain TSD-500 dengan karakteristik angin di Muara Gembong. Sehingga dilakukan pengembangan turbin angin yang sudah diimplementasikan melalui *aerodynamic design* untuk menghasilkan *blade* baru.

Metode Penelitian

Metode penelitian secara ringkas terlihat pada Gambar 1.

Pengukuran Kecepatan Angin. Menurut Burton et. al. [3], angin adalah gerakan aliran udara yang timbul akibat energi matahari dan rotasi bumi. Untuk mengetahui karakteristik angin serta besarnya potensi energi angin di lokasi perlu dilakukan pengukuran kecepatan angin secara langsung di lokasi. Menurut Baseer et. al. [4], pengukuran dengan menggunakan *anemometer cup* dalam konteks lintas tahun akan menghasilkan data kecepatan angin rata-rata, median, dan standar deviasi yang secara umum stabil di nilai yang sama. Oleh karena itu di lokasi akan digunakan *anemometer cup* di ketinggian 10 m. Instalasi anemometer terlihat pada Gambar 2. Selain itu besarnya energi angin dari suatu kecepatan angin adalah seperti pada Pers. 1.

$$P_{\text{angin}} = \frac{1}{2} \rho A U_{\infty}^3 \quad (1)$$



Gambar 2. Instalasi Anemometer Cup di Lokasi

Pengolahan Data Kecepatan Angin. Untuk mendesain *blade* turbin angin perlu disesuaikan dengan karakteristik angin di lokasi. Karakteristik angin yang dimaksud adalah karakteristik kecepatan angin secara statistik. Berdasarkan Jianzhou et. al. [5], karakteristik statistik angin ini memiliki

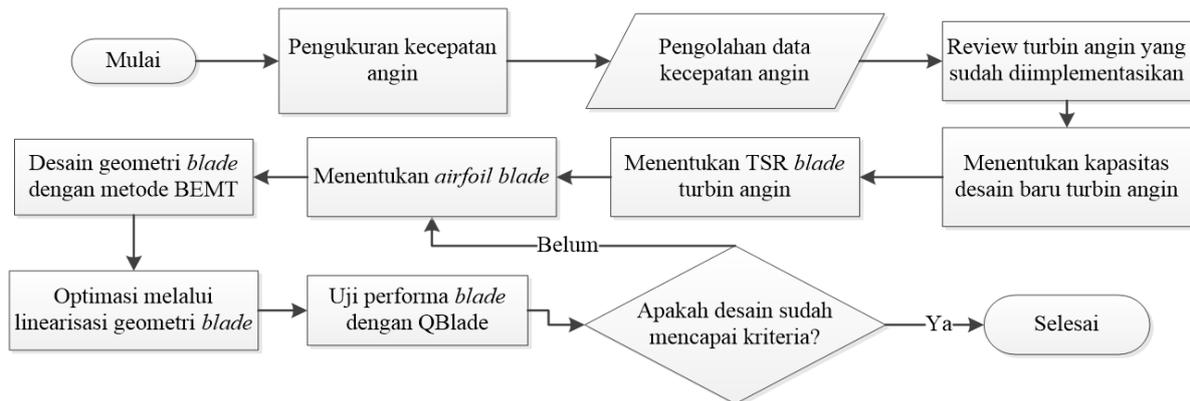
banyak kegunaan seperti *assessment* potensi energi lokasi, *input* bagi desain *wind farm* dan turbin angin, serta operasi dan manajemen turbin angin. Karakteristik statistik tersebut disajikan dalam *Probability Density Function* (PDF) dari kecepatan angin di lokasi.

Review Turbin Angin TSD-500. Turbin angin yang diimplementasikan di Muara Gembong adalah TSD-500. Turbin ini termasuk ke dalam kategori *micro scale horizontal axis wind turbine*. Gambar dari implementasi TSD-500 di Muara Gembong dapat dilihat pada Gambar 3.



Gambar 3. Implementasi TSD-500 di Muara Gembong

Selain karakteristik angin, parameter penting lainnya yang dibutuhkan dalam pendesainan *blade* adalah sistem turbin angin. Oleh karena desain *blade* baru ini ditujukan sebagai *improvement* terhadap TSD-500, maka sistem turbin angin yang digunakan akan mengacu kepada TSD-500. Oleh karena itu, beberapa spesifikasi turbin TSD-500 dibutuhkan, yaitu seperti pada Tabel 1.



Gambar 1. Metodologi Penelitian Desain *Blade* bagi *Micro Scale Horizontal Axis Wind Turbine*

Tabel 1. Spesifikasi Turbin Angin TSD-500

No	Spesifikasi	Keterangan
1	Kapasitas Maksimum	500 Wp at 12 m/s
2	Generator Type	Permanent magnet (Coggingless tech.) 2000 kW
3	Electrical Controller	Maximum Power Point Tracking
3	Tinggi Tower	10 m
4	Jenis Blade	Tapered
5	Jumlah Blade	3
6	Diameter Blade	1,72 m
7	Airfoil	Clark Y
8	Chord	0,12m - 0,05m
9	Twist	12,4° - 4,04°
10	TSR	6,5

Selain spesifikasi di atas diperlukan juga informasi komponen-komponen TSD-500. Salah satunya adalah informasi efisiensi masing-masing komponen. Efisiensi ini digunakan sebagai analisis produksi listrik turbin angin TSD-500 dan prediksi produksi listrik dari turbin jika menggunakan desain *blade* baru. Dari hasil *review* ini juga akan ditentukan kapasitas turbin angin untuk desain *blade* baru.

Tabel 2. Efisiensi Komponen Turbin Angin TSD-500

η_{blade}	$\eta_{generator}$	$\eta_{controller}$	$\eta_{sistem\ turbin}$
0,29	0,85	0,85	0,21

Menentukan TSR Desain *Blade* Baru. *Tip Speed Ratio* (TSR) atau λ adalah perbandingan antara kecepatan *tip* dari *blade* turbin angin terhadap angin yang datang, yaitu menurut Piggot [6]. Parameter λ dalam *blade* turbin angin adalah parameter yang sangat penting. Dalam turbin angin λ harus dijaga pada nilai yang konstan agar memiliki *Coefficient of Power* (C_p) yang konstan juga.

$$\lambda = \frac{\omega R}{U_{\infty}} \quad (2)$$

TSR *blade* turbin angin akan ditentukan berdasarkan jenis turbin angin, jumlah *blade*, dan C_p dari *blade*. Menurut Lopez et. al. [7], untuk jenis turbin angin 3 *blade* yang paling sesuai adalah $\lambda = 7$. Sebab $\lambda = 7$ akan menghasilkan C_p yang paling optimum. Oleh karena itu dalam desain *blade* baru ini akan menggunakan $\lambda = 7$.

Penentuan *Airfoil*. *Blade* turbin angin membutuhkan *airfoil* yang memiliki nilai c_l berbanding c_d (c_l/c_d) yang besar di nilai *angle of attack* (α) tertentu. Hal ini dibutuhkan untuk mendapatkan *lift* yang besar. Untuk itu diperlukan simulasi pada beberapa jenis *airfoil* guna mengetahui *airfoil* yang cocok untuk suatu pendesainan

blade. Simulasi akan menggunakan XFOIL.

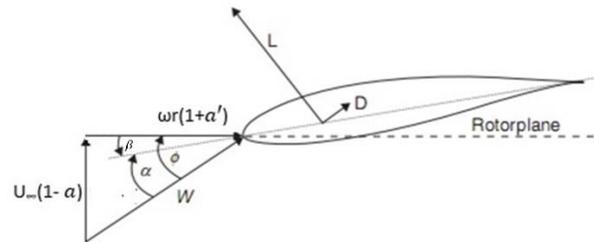
Namun sebelum melakukan simulasi, perlu diprediksi besarnya *Reynolds number* operasi turbin angin. Menurut Hansen [8], persamaan *Reynolds number* untuk turbin angin adalah seperti pada Pers. 3. Penentuan ini dapat dilakukan dengan menggunakan hasil pengolahan data angin serta beberapa referensi terkait geometri *blade*. *Reynolds number* sangat berpengaruh pada besarnya nilai c_l dan c_d airfoil. Menurut Wood [9], Untuk turbin angin *micro*, *range Reynolds number*-nya adalah $10^3 - 10^6$.

$$Re = c \frac{U_\infty}{\nu} \quad (3)$$

Desain Geometri *Blade*. Dalam menentukan geometri desain *blade* yang baru akan digunakan *Blade Element Momentum Theory* (BEMT). Teori ini menyajikan analisis *blade* turbin angin dengan pendekatan dua dimensi *airfoil* pada masing-masing elemen *blade* di sepanjang radius. Asumsinya adalah bahwa gaya dari masing-masing elemen *blade* terhadap angin akan menyebabkan perubahan momentum pada angin yang melalui turbin angin. Perubahan momentum tersebut akan menghasilkan perbedaan tekanan pada udara sebelum dan sesudah melalui *blade* yang mengindikasikan ekstraksi energi oleh *blade*.

Menurut Bak [10], dikarenakan angin memberikan gaya pada elemen *blade*, maka elemen *blade* pun memberikan gaya yang sama besar namun berlawanan arah terhadap angin. Gaya tersebut sama besar dengan gaya *lift* namun berlawanan arah. Dari komponen gaya tersebut akan memberikan efek terhadap angin datang dan *headwind* (angin yang sama besar dengan kecepatan putar *blade* namun berlawanan arah). Angin datang mengalami penurunan sebesar pengali *axial induction factor* (a). Sedangkan *headwind* mengalami

penambahan kecepatan sebesar pengali *radial induction factor* (a'). Hasil dari angin datang dan *headwind* adalah angin resultan W yang menyebabkan gaya *drag* dan *lift*.



Gambar 4. Analisis Gaya pada Elemen *Blade*

Selain itu terdapat suatu sudut antara kecepatan angin relatif dengan *rotorplane*, yaitu *flow angle* (ϕ). Jika dianalisis kembali ternyata besarnya *flow angle* ditentukan berdasarkan λ yang merupakan perbandingan antara angin datang dengan kecepatan putar *blade* atau *headwind*. *Flow angle* sendiri terdiri dari dua buah sudut, yaitu α dan β . Dimana β adalah *twist* dari *blade* atau puntiran *blade* terhadap *rotorplane*. Dengan ditentukannya α berdasarkan pemilihan *airfoil*, maka dapat ditentukan besarnya *twist* dari desain *blade*. Berikut persamaan BEMT.

Flow angle:

$$\phi = \arctan \left(\frac{(1-a) U_\infty}{(1+a') \omega r} \right) \quad (4)$$

Twist:

$$\beta = \phi - \alpha \quad (5)$$

Koefisien gaya normal dan tangensial:

$$c_y = c_l \cos \phi + c_d \sin \phi \quad (6)$$

$$c_x = c_l \sin \phi - c_d \cos \phi \quad (7)$$

Axial dan radial induction factor:

$$a = \frac{1}{\left(\frac{4F \sin^2 \phi}{\sigma c_y} \right) + 1} \quad (8)$$

$$a' = \frac{1}{\left(\frac{4F \sin \phi \cos \phi}{\sigma c_x}\right)^{-1}} \quad (9)$$

Solidity:

$$\sigma = \frac{cB}{2\pi r} \quad (10)$$

Prandtl tipp loss:

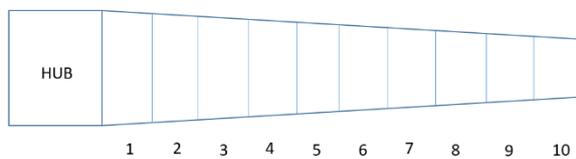
$$F = \frac{2}{\pi} \arccos(e^{-f}) \quad (11)$$

$$f = \frac{B}{2} \frac{R-r}{r \sin \phi} \quad (12)$$

Chrod distribution:

$$c = 4\pi r \sin^2 \phi F \frac{1}{c_y} \frac{1}{B} \quad (13)$$

Kemudian persamaan-persamaan tersebut diaplikasikan kepada masing-masing elemen *blade* untuk mendapatkan geometri dari *blade*. Awalnya *blade* dibagi menjadi beberapa bagian 10 bagian sama besar senilai r . Pada setiap bagian tersebut, persamaan-persamaan tersebut harus diselesaikan dengan secara iterasi sebab seluruh parameter saling *dependent*. Untuk mempermudah kalkulasi digunakan bantuan *software spreadsheet* yaitu Microsoft Excel.



Gambar 5. Metode Pembagian Elemen *Blade*

Terdapat beberapa parameter tambahan dalam pendesainan *blade*. λ_r merupakan *tip speed ratio* parsial yang nilainya sesuai dengan radius masing-masing elemen. Kemudian, dalam metode iterasi harus ada suatu nilai yang ditebak di awal. Metode ini biasa disebut *initial guess*. Menurut Ingram [11], pada kasus pendesaianan *blade* ini

dapat digunakan tebakan awal pada parameter *twist* dengan menggunakan Pers. 13. Sedangkan iterasi untuk satu nilai radius r berakhir jika $\Delta a' < 0,001$. Setelah itu maka didapat geometri *chord* dan *twist* dari setiap elemen.

Tip Speed Ratio Parsial:

$$\lambda_r = \frac{r_i}{R} \lambda \quad (14)$$

Flow Angle (Initial Guess):

$$\phi = \frac{2}{3} \tan^{-1} \frac{1}{\lambda_r} \quad (15)$$

Delta Radial Induction Factor:

$$\Delta a' = a_i - a_{i+1} \quad (16)$$

Optimasi Melalui Linearisasi Geometri *Blade*. *Chord* dan *twist* yang didapatkan melalui perhitungan BEMT adalah tidak linear. Hal ini menyulitkan untuk proses manufaktur. Oleh karena itu, menurut Liu et. al. [12], perlu dilakukan linearisasi untuk distribusi *chord* dan *twist* yang didapat dari BEMT untuk mempermudah proses manufaktur.

Sebagaimana yang dijelaskan oleh Azad et. al. [13], bahwa ekstraksi energi terbesar dari *blade* turbin angin terjadi di setengah radius bagian luar *blade*. Oleh karena itu linearisasi akan dilakukan berdasarkan referensi *chord* maupun *twist* di setengah bagian terluar *blade*. Untuk melakukan hal ini digunakan fungsi *trendline* pada *spreadsheet* Microsoft Excel. Caranya adalah dengan melakukan plot grafik pada radius terluar *blade* kemudian dilakukan *trendline* hingga hub *blade*.

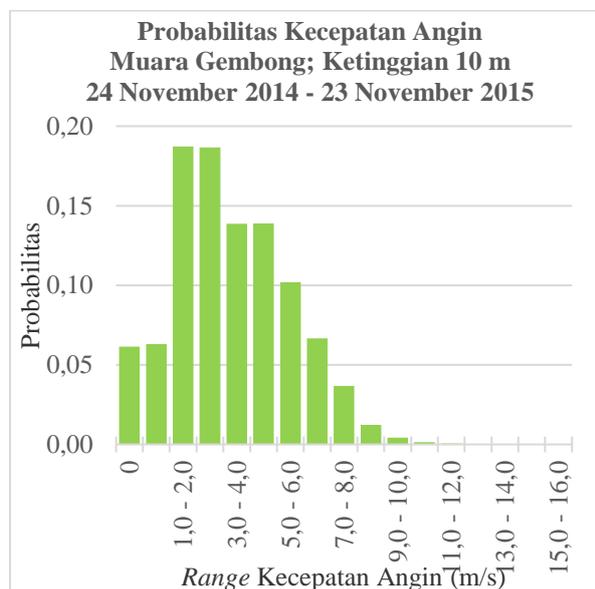
Uji Performa *Blade*. Pengujian performa *blade* masih dalam koridor menggunakan BEMT. Hanya saja untuk mendapatkan informasi mengenai performa *blade* akan menggunakan bantuan *software* QBlade. Berdasarkan Marten et. al. [14], QBlade adalah suatu *software opensource* yang

merupakan hasil pengembangan Berlin Technical University Department of Experimental Fluid Mechanics.

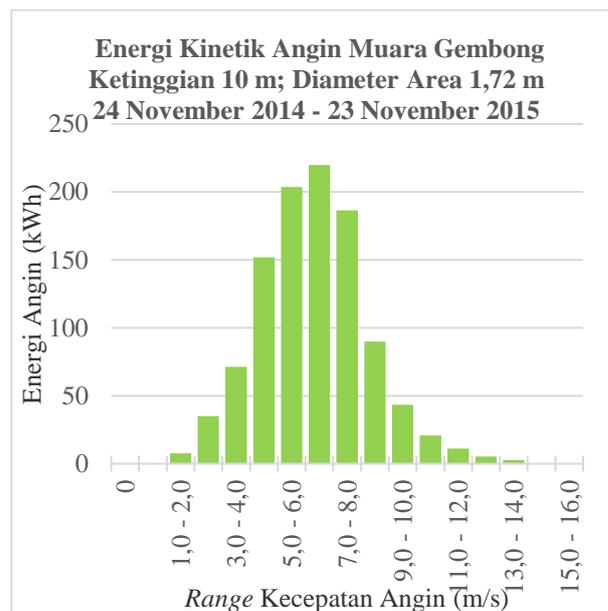
Hasil dan Pembahasan

Data Kecepatan Angin. Data kecepatan angin di Muara Gembong selama satu tahun disajikan dalam grafik pada gambar 6. Probabilitas terbesar adalah pada *range* kecepatan 1 – 2 m/s yaitu 0,19. Sedangkan rata-rata kecepatan angin adalah 3,26 m/s. Berdasarkan Marosaputro et. al. [15], daerah ini *equivalent* dengan kategori potensi *good* di ketinggian 50 m. Untuk mengetahui besarnya energi angin serta parameter *input* bagi desain *blade* perlu dianalisis jumlah energi di lokasi.

Data Energi Angin. Data besarnya energi angin di Muara Gembong selama satu tahun disajikan dalam grafik pada gambar 7. Data ini didapat dengan menggunakan Pers. 1 dan data kecepatan angin.



Gambar 6. Grafik Probabilitas Kecepatan Angin Muara Gembong



Gambar 7. Data Energi Angin di Muara Gembong

Dari data tersebut, total energi angin yang tersedia adalah 1,05 MWh. Sumbangan energi terbesar dari *range* kecepatan 6 – 7 m/s yaitu sebesar 219,76 kWh walaupun probabilitas kemunculannya hanya 0,07. Sedangkan kecepatan angin di *range* 1 – 2 m/s yang memiliki probabilitas kemunculan tertinggi hanya menyumbangkan 7,6 kWh.

Dari grafik ini dapat dipahami bahwa desain *blade* harus bisa memaksimalkan ekstraksi energi di kecepatan 6,5 m/s. Selain itu besarnya energi pada kecepatan angin di *range* 13 – 14 m/s perlu dipertimbangkan. Sehingga *blade* akan memiliki kecepatan desain di 14 m/s, meningkat dari sebelumnya yaitu 12 m/s.

Data Produksi TSD-500. Data ini didapat dengan mengetahui bahwa TSD-500 memiliki efisiensi sistem sebesar 21%. Selain itu informasi terkait spesifikasi TSD-500 bahwa produksi listrik terjadi di kecepatan angin 3 – 12 m/s, di luar *range* tersebut, TSD-500 tidak memproduksi listrik. Dari data tersebut, total produksi listrik TSD-500 adalah sebesar 207,38 kWh. Ini berarti ekstraksi energi angin hanya sebesar 19,76% dari total energi angin tersedia, yaitu 1,05 MWh.

Penentuan Kapasitas Desain Turbin Angin. Untuk meningkatkan jumlah energi angin tersedia, maka radius *blade* perlu ditingkatkan. Namun peningkatan radius *blade* yang terlalu besar akan menyebabkan besarnya produksi torsi dari hasil ekstraksi daya angin. Sehingga dibutuhkan *transmission gear* dalam turbin angin sebab generator lebih membutuhkan putaran yang tinggi. Untuk menghindari hal tersebut maka desain *blade* baru akan ditingkatkan radiusnya menjadi 1 m, tidak jauh perbedaannya dari *blade* sebelumnya yaitu 0,86 m.

Dengan radius *blade* 1 m dan kecepatan desain 14 m/s maka kapasitas desain turbin angin dapat ditentukan. Jika ditargetkan *improvement* hingga 2 – 3 kali kapasitas sebelumnya, yaitu 500 W, maka besarnya kapasitas desain turbin angin adalah sebesar 1000 – 1500 W. Dari kapasitas ini dapat diketahui kriteria bagi desain *blade*, yaitu efisiensi atau *Coefficient of Power* dari *blade*. Dalam menentukan menentukan target estimasi C_p *blade* desain baru diperlukan pertimbangan komponen lain dari TSD-500. Seperti pada tabel 3, target C_p dari desain *blade* adalah di *range* 0,35 – 0,39.

Tabel 3. Kapasitas Desain Turbin Angin dan C_p dari Desain Blade

P (W)	$\eta_{\text{generator}}$ or	$\eta_{\text{controller}}$	η_{sistem}	η_{blade}
1500	0,85	0,85	0,28	0,39
1000	0,85	0,85	0,26	0,35

Penentuan Reynolds Number. Berdasarkan Pers. 3, maka untuk mengetahui besarnya *Reynolds number* perlu diketahui geometri *chord blade* dan kecepatan angin. Dalam tahap ini geometri *chord blade* desain *blade* belum diketahui. Oleh karena itu akan digunakan estimasi melalui referensi hasil pendesainan lain. Hasil desain *micro scale blade* oleh Kale *et. al.* [16] menyatakan bahwa dengan radius *blade* 0,8 m maka geometri dari hub ke *tip* adalah sebesar 135 – 35 mm. Sebagaimana diketahui sebelumnya bahwa ekstraksi energi angin terjadi di setengah radius terluar *blade*. Oleh karena itu dalam menentukan *Reynolds number* digunakan *chord length* di radius 75% dari hub yaitu 110 mm.

Sedangkan dalam menentukan kecepatan angin dalam persamaan *Reynolds number* dapat digunakan data angin terukur. Bahwa sumbangan energi terbesar ada di *range* 6 – 7 m/s. Oleh karena itu digunakan kecepatan angin sebesar 6,5 m/s dalam menentukan *Reynolds number*. Artinya *blade* akan didesain untuk mengoptimalkan ekstraksi energi di *range* 6 – 7 m/s.

Dari parameter tersebut didapat *Reynolds number* desain sebesar 47.667. Selain *Reynolds number* desain tersebut, perlu diketahui juga *range Reynolds number* operasi dari desain turbin angin. Hasil perhitungan *Reynolds number* ada pada Tabel 4.

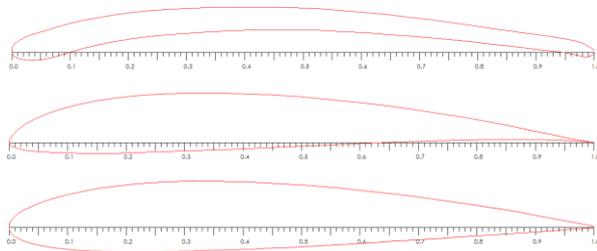
Dari parameter tersebut didapat *Reynolds number* desain sebesar 47.667. Selain *Reynolds number* desain tersebut, perlu diketahui juga *range Reynolds number* operasi dari desain turbin angin. Hasil perhitungan *Reynolds number* ada pada Tabel 4.

Tabel 4. Estimasi Reynolds Number Turbin Angin

Chord Length (mm)	Wind Speed (m/s)	Reynolds Number
35	3	7000
110	6,5	47.667
135	14	126.000

Penentuan Airfoil Blade. Berdasarkan data *Reynolds number* dapat diambil kesimpulan bahwa turbin angin beroperasi dalam *low Reynolds number*. Oleh karena itu dibutuhkan *airfoil* yang cocok untuk karakter *low Reynolds number*. Berdasarkan Giguere *et. al.* [17], ada beberapa jenis *airfoil* yang memiliki performa baik di *Reynolds number* rendah: NACA 2412, SD7032, dan BW3. Dari referensi tersebut maka perlu dilakukan simulasi pada kondisi *Reynolds number*

desain blade baru. *View airfoil* tersebut disajikan dalam gambar 8.



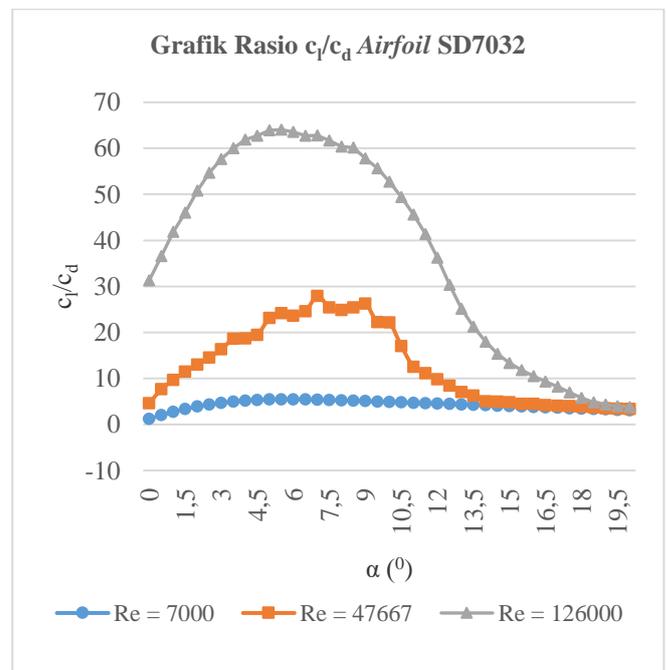
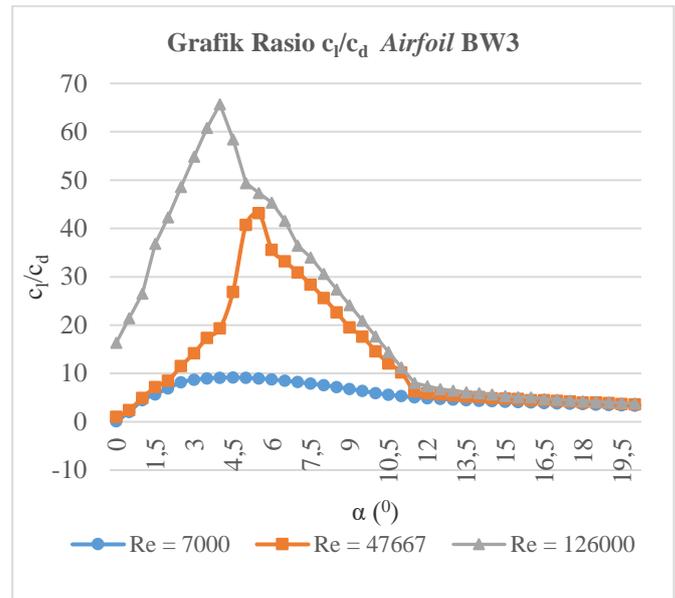
Gambar 8. Airfoil BW3, SD 7032, dan NACA 2412 (Urut dari Atas ke Bawah)

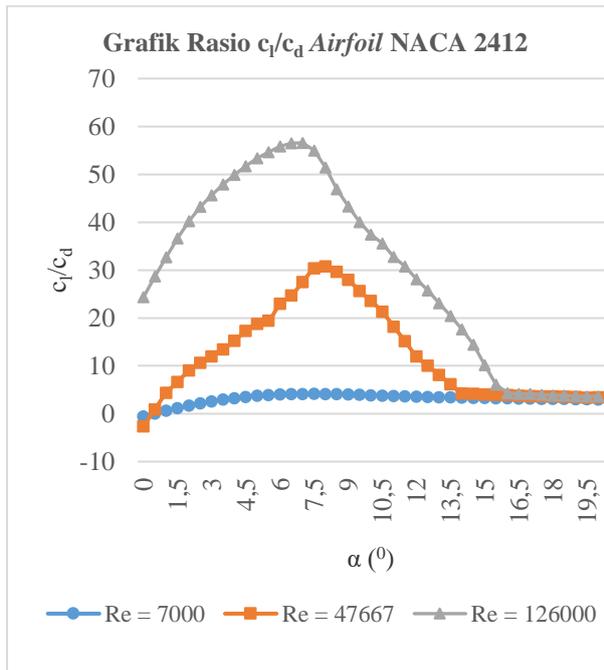
Hasil simulasi dari masing-masing *airfoil* disajikan dalam gambar 9. Dalam mempertimbangkan *airfoil* ditentukan α desain terlebih dahulu dari hasil simulasi. Oleh karena *Reynolds* desain adalah 47667, maka α desain didapat dari nilai yang c_l/c_d maksimum di simulasi $Re = 47667$. Kemudian dari α desain ini dilihat kestabilan dan besarnya pada masing-masing *range Reynolds number*.

Airfoil BW3 memiliki nilai c_l/c_d yang tidak stabil di nilai α (grafik curam). Namun besarnya c_l/c_d untuk $\alpha = 5,5^\circ$ di $Re = 47667$ dan $Re = 126000$ cukup besar yaitu 43,16 dan 47,36. *Airfoil* SD 7032 memiliki nilai c_l/c_d yang stabil di $\alpha = 7^\circ$ untuk $Re = 47667$ sebesar 27,87 dan $Re = 126000$ sebesar 62,81. Begitu juga dengan *airfoil* NACA 2412 memiliki nilai c_l/c_d yang stabil di $\alpha = 8^\circ$ untuk $Re = 47.667$ sebesar 30,80 dan $Re = 126000$ sebesar 51,41.

Hasil Desain Geometri Blade. Hasil perhitungan BEMT melalui iterasi disajikan dalam hasil geometri desain *blade* pada tabel 5 – 7.

Hasil Simulasi C_p Blade. Hasil performa *blade* BW3 terlihat pada gambar 10 yang pertama. Dapat dilihat bahwa grafik *ideal blade* memiliki C_p yang lebih tinggi di $\lambda = 7$.





Gambar 9. Hasil Simulasi Airfoil pada Range Reynolds Number Turbin Angin Tabel 5. *Ideal Blade* dan *Optimized Blade* Menggunakan Airfoil BW3

r (m)	c _l (m)	β _l (°)	c _o (m)	β _o (°)
0,14	0,148	24,36	0,089	6,52
0,2	0,128	17,97	0,082	5,78
0,3	0,099	11,41	0,075	5,04
0,4	0,078	7,58	0,068	4,30
0,5	0,064	5,12	0,061	3,57
0,6	0,054	3,43	0,054	2,83
0,7	0,047	2,19	0,047	2,09
0,8	0,040	1,25	0,040	1,35
0,9	0,032	0,51	0,033	0,61
0,99	0,012	-0,02	0,026	-0,12

Tabel 6. *Ideal Blade* dan *Optimized Blade* Menggunakan Airfoil SD 7032

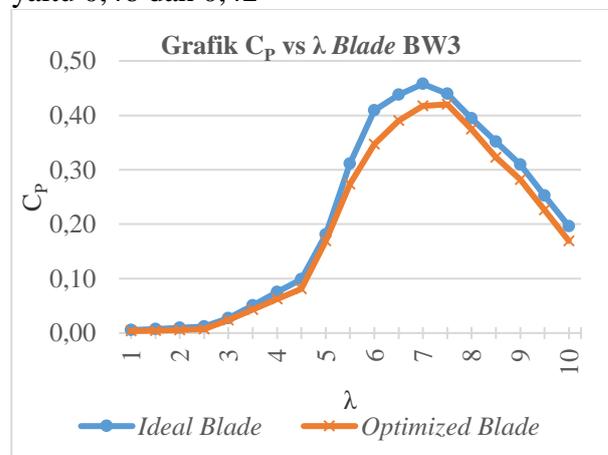
r (m)	c _l (m)	β _l (°)	c _o (m)	β _o (°)
0,14	0,151	22,96	0,091	6,34
0,2	0,131	16,53	0,084	5,40
0,3	0,101	9,94	0,077	4,46
0,4	0,080	6,10	0,070	3,52
0,5	0,066	3,64	0,062	2,58
0,6	0,056	1,94	0,055	1,63
0,7	0,048	0,70	0,048	0,69
0,8	0,041	-0,24	0,041	-0,25
0,9	0,033	-0,98	0,034	-1,19

0,99	0,012	-1,52	0,026	-2,13
------	-------	-------	-------	-------

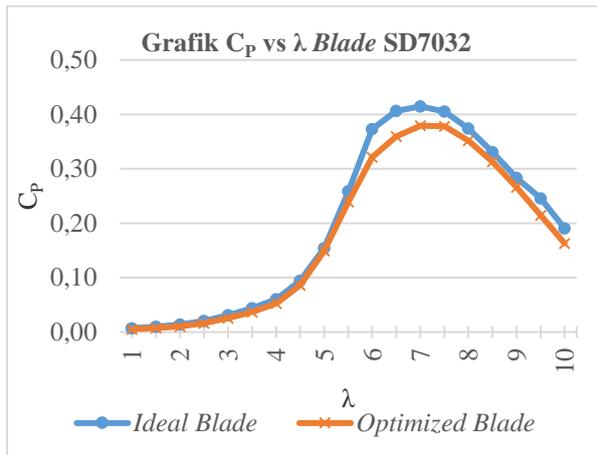
Tabel 7. *Ideal Blade* dan *Optimized Blade* Menggunakan Airfoil NACA 2412

r (m)	c _l (m)	β _l (°)	c _o (m)	β _o (°)
0,14	0,160	21,93	0,097	5,34
0,2	0,139	15,51	0,089	4,40
0,3	0,107	8,93	0,082	3,46
0,4	0,085	5,09	0,074	2,52
0,5	0,070	2,63	0,067	1,57
0,6	0,059	0,93	0,059	0,63
0,7	0,051	-0,31	0,051	-0,31
0,8	0,044	-1,25	0,044	-1,25
0,9	0,035	-1,98	0,036	-2,19
0,99	0,013	-2,52	0,029	-3,13

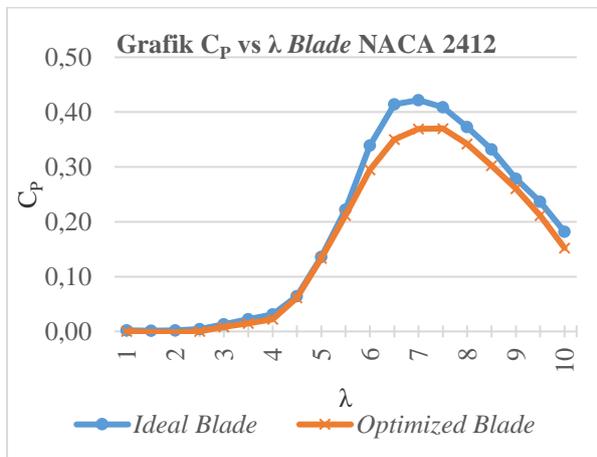
Grafik C_p di nilai maksimum tidak terlalu landai atau pun curam terhadap λ. Dibandingkan kedua desain blade lainnya, nilai C_p blade BW3 baik yang *ideal* maupun *optimized* memiliki nilai tertinggi yaitu 0,46 dan 0,42



(a)



(b)



(c)

Gambar 10. Hasil Simulasi C_P vs λ Desain Blade (a), (b) dan (c)

Hasil performa *blade* SD7032 terlihat pada gambar 10 kedua. Dapat dilihat bahwa grafik *ideal blade* memiliki C_P yang tertinggi di $\lambda = 7$ yaitu sebesar 0,41. Sedangkan *optimized blade* sebesar 0,38. Grafik C_P *ideal blade* dan *optimized blade* cenderung lebih landai dibandingkan kedua *blade* lainnya. Berdasarkan perbandingan C_P , *blade* SD7032 memiliki C_P yang lebih rendah dari *blade* BW3, lebih tinggi dari *blade* NACA 2412.

Hasil performa *blade* NACA 2412 terlihat pada gambar 12 yang ketiga. Dapat dilihat bahwa grafik *ideal blade* memiliki C_P tertinggi di $\lambda = 7$ yaitu sebesar 0,42. Sedangkan *optimized blade* sebesar 0,37. Grafik C_P *ideal blade* memiliki distribusi

yang lebih curam dibandingkan *optimized blade*.

Dari hasil grafik performa tersebut, *blade* terbaik adalah *optimized blade* SD7032. Sebab memiliki grafik C_P sebesar 0,38 yang relatif stabil di $\lambda = \pm 7$. Pertimbangan kestabilan nilai grafik ini sangat penting, sebab *controller* turbin angin memerlukan *time response* untuk

menjaga nilai kecepatan putar *blade* jika terjadi perubahan kecepatan angin. Apabila nilai C_P tidak stabil, jika terjadi sedikit perubahan kecepatan angin, maka sebelum *controller* dapat merespon, besarnya C_P dari turbin angin akan menurun. Sebetulnya *ideal blade* SD7032 pun memiliki kestabilan nilai C_P . Namun *blade ideal* tersebut memiliki geometri yang sulit untuk dimanufaktur. Sehingga pemilihan lebih berat kepada *optimized blade* SD7032. Dengan C_P sebesar 0,38 artinya sudah memenuhi estimasi C_P *blade*. Artinya juga memenuhi estimasi kapasitas turbin angin. Sehingga turbin angin dapat ditingkatkan kapasitasnya menjadi 1400 W di kecepatan angin 14 m/s.

Kesimpulan

- Kecepatan angin rata-rata Kampung Bungin, Muara Gembong adalah 3,26 m/s.
- Kecepatan angin dengan probabilitas kemunculan tertinggi adalah 1 – 2 m/s yaitu 0,19. Namun sumbangan energinya hanya 7,6 kWh.
- Distribusi produksi energi adalah normal. Dengan nilai tertinggi disumbang oleh kecepatan angin 6 – 7 m/s sebesar 219,76 kWh walaupun probabilitas kemunculannya hanya 0,07.
- Jumlah seluruh energi angin Kampung Bungin, Muara Gembong pada ketinggian 10 m dan diameter sapuan area 1,72 m adalah 1,05 MWh.

- *Airfoil* yang cocok untuk *micro scale horizontal axis wind turbine blade* adalah BW3, SD7032, dan NACA 2412. Sebab memiliki c_l/c_d yang maksimum di *low Reynolds number*.
- Desain blade dengan C_P tertinggi adalah *ideal blade* dengan *airfoil* BW3 yaitu 0,46. Namun memiliki C_P yang tidak stabil terhadap nilai λ . Selain itu secara geometri *airfoil* maupun geometri *blade* sulit untuk dimanufaktur
- *Blade* optimal dari segi performa dan kemudahan manufaktur adalah *optimized blade* SD7032. *Blade* tersebut memiliki kestabilan nilai C_P sebesar 0,38 di $\lambda = \pm 7$.
- *Optimized blade* SD 7032 dapat diprediksi bahwa turbin akan menghasilkan 373,66 kWh selama satu tahun. Lebih tinggi dari sebelumnya 207,38 kWh.
- Ekstraksi energi angin tersedia pun meningkat dari 19,76% menjadi 26,33%.

Daftar Referensi

- [1] Presiden Republik Indonesia. (2014). *Peraturan pemerintah republik indonesia nomor 79 tahun 2014 tentang kebijakan energi nasional*. Jakarta: Author
- [2] Karthikeyan, N et al. (2014). *Review of aerodynamic developments on small horizontal axis wind turbine blade*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 42, 801-822
- [3] Burton, T et al. (2001). *Wind energy handbook*. Chichester: John Wiley & Sons, Ltd.
- [4] Baseer, M.A., Meyer, J.P., Rehman, S., Alam, Md.M., Al-Hadhrani, L.M., & Lashin, A. (2016). *Performance evaluation of cup-anemometers and wind speed characteristics analysis*. Renewable Energy, 86, 733-744
- [5] Jianzhou, W., Jianming, H., Kailiang, M., (2016). *Wind speed probability distribution estimation and wind energy assessment*. Renewable and sustainable energy reviews, 60, 881-899
- [6] Piggot, H. (2000). *Windpower workshop*. England: Center for alternative technology publications
- [7] Lopez, M. & Vanier, J.C. (2009). *Stand-alone wind energy conversion system with maximum power transfer control*. Ingeniare. Rev. chil.ing., Arica, vol.17, n.3, pp: 329-336.
- [8] Hansen, M.O.L. (2000). *Aerodynamics of wind turbines*. London: James & James (Science Publishers) Ltd.
- [9] Wood, D. (2011). *Small wind turbines analysis, design, and application*. London: Springer
- [10] Bak, C. (2010). *Aerodynamic design of wind turbine rotors*. In Brøndsted, P. & Nijssen, R.P.L., J.N., *Advances in wind turbine blade design and materials* (p. 59). Cambridge: Woodhead.
- [11] Ingram, G. (2011, 10 18). *Wind Turbine Analysis using the blade element momentum method*. Retrieved from Creative Commons Attribution: <http://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/>
- [12] Liu, X., Wang, L., & Tang, X. (2013). *Optimized linearization of chord and twist angle profiles for fixed-pitch fixed-speed wind turbine blades*. Renewable Energy, 57, 111-119