

RANCANG BANGUN ROTOR TURBIN ANGIN 10 KW UNTUK MEMPEROLEH DAYA OPTIMUM PADA VARIASI JUMLAH DAN DIAMETER SUDU

Sulistyo Atmadi^{*)}, Ahmad Jamaludin Fitroh^{**)}

^{*)} Peneliti Pusat Teknologi Dirgantara Terapan, LAPAN

^{**)} Peneliti Bidang Keahlian Aerodinamika, LAPAN

ABSTRACT

This research is part of research activities to search for new design of rotor blade 10 kW Wind Turbine. Rotor rotational speed is adjusted to the design rotational speed of 270 rpm. At design speed of 10m/sec the rotor is designed to produce around 12 kW power. The research is conducted by varying the number of blade and diameter of the rotor using CFD. The result of the calculation shows that the maximum power generated by the rotor decreases as the number of blade increases. On the other hand, increases the rotor diameter does not always result in the increase of the max power generated by the turbine. At one particular number of blade, there will be an optimal diameter length which will produce an optimal power. For the particular rotor turbine under study here, the maximum power of 12 kW can be produced by using two blades with diameter of 9.2 to 11.2m.

Key words: *SKEA 10 kW, Blade number, Rotor diameter*

ABSTRAK

Penelitian ini merupakan bagian dari kegiatan penelitian untuk mendapatkan rancangan baru sudu rotor Turbin Angin 10 kW. Putaran rotor disesuaikan dengan putaran rancangan generator, yaitu 270 rpm. Pada kecepatan angin 10 m/det, rotor diharapkan mampu menghasilkan daya sekitar 12 kW. Penelitian dilakukan dengan memvariasikan jumlah sudu dan diameter rotor. Dengan menggunakan *Computational Fluid Dynamic* serta memperhitungkan pengaruh jumlah sudu dan diameter sudu, hasil perhitungan menunjukkan bahwa semakin banyak jumlah sudu, maka daya maksimum yang dapat dihasilkan rotor akan semakin kecil. Selain itu penambahan diameter rotor tidak selalu menghasilkan kenaikan daya. Pada jumlah sudu tertentu terdapat diameter optimal yang menghasilkan daya maksimum. Penelitian ini memberikan kesimpulan bahwa rotor akan menghasilkan daya lebih besar dari 12 kW bila menggunakan jumlah sudu sama dengan dua dengan diameter rotor antara 9,2 hingga 11,2 m.

Kata kunci: *SKEA 10 kW, Jumlah sudu, Diameter rotor*

1 PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Salah satu kegiatan penelitian yang sedang dilakukan oleh LAPAN adalah pengembangan SKEA 10 kW. Keunggulan SKEA 10 kW tersebut dibandingkan dengan Turbin Angin 10 kW dari negara lain adalah memiliki kecepatan angin rancangan (*rated wind speed*) lebih kecil. Hal tersebut dikarenakan kecepatan angin rata-rata

di Indonesia lebih kecil daripada kecepatan angin rata-rata di negara-negara benua Eropa maupun Amerika.

Turbin Angin berkapasitas 10 kW ini dirancang agar mampu menghasilkan daya 10 kW pada kecepatan angin (*rated wind speed*) sama dengan 10 m/det. Apabila SKEA 10 kW ini tidak menggunakan sistem roda gigi (*gear box*), maka putaran rotor sama dengan putaran generator. Putaran rotor dibatasi oleh gaya-gaya aerodinamika sedangkan

putaran generator magnet permanen dibatasi oleh geometri dan magnet yang digunakan.

Hasil pengujian generator menunjukkan bahwa daya keluaran generator sebesar 10 kW dicapai pada putaran sekitar 270 rpm. Daya masukan yang diperlukan adalah sekitar 12 kW. Dengan demikian rotor harus dirancang sedemikian rupa agar mampu menghasilkan daya sebesar 12 kW pada kecepatan angin 10 m/det dan pada putaran 270 rpm.

Permasalahan yang dihadapi dalam penelitian ini adalah tingginya harga *TSR* (*Tip Speed Ratio*). Pada kondisi 12 kW, 10 m/det, dan 270 rpm, maka *TSR* yang akan diperoleh bisa mencapai harga 10 atau lebih. Harga *TSR* yang terlalu tinggi menyebabkan efisiensi aerodinamika rotor menjadi rendah. Efisiensi rotor biasanya dinyatakan dalam *coeficient of power*, C_P . Harga C_P yang rendah mengisyaratkan untuk menambah diameter rotor agar daya yang diinginkan dapat tercapai. Penambahan diameter rotor menyebabkan harga *TSR* juga semakin besar sehingga harga C_P menurun, demikian selanjutnya berulang terus menerus.

1.2 Tujuan

Penelitian ini dilakukan untuk dua tujuan, yaitu:

- Mendapatkan jumlah sudu yang sesuai/optimal.
- Memperoleh estimasi diameter rotor yang diperlukan.

Kedua tujuan tersebut diarahkan agar pada akhirnya diperoleh rancangan sudu baru untuk SKEA 10 kW.

1.3 Batasan Masalah

Beberapa batasan masalah dan asumsi yang digunakan dalam penelitian ini antara lain:

- Perhitungan dan analisis hanya dilakukan pada kondisi *rated*, yaitu

pada kecepatan angin 10 m/det dan pada putaran 270 rpm.

- Distribusi *chord* yang dipilih adalah linier dengan *chord* di pangkal dan di ujung masing-masing sebesar 30 cm dan 15 cm.
- Penampang sudu yang dipilih adalah *airfoil* LS-0417. Karakteristik *airfoil* tersebut dianalisis menggunakan salah satu perangkat lunak berbasis *CFD*.
- Diameter pangkal rotor disesuaikan dengan geometri generator, yaitu sebesar 70 cm.
- Untuk memperoleh harga C_P yang sebesar mungkin, maka digunakan kondisi *Betz*, yaitu *slip stream* berharga konstan sebesar 0,33 di sepanjang sudu.

Selain batasan masalah dan asumsi tersebut terdapat juga beberapa asumsi tambahan, misalnya tidak ada turbulensi yang berlebihan atau semua parameter bersifat *steady*.

2 TEORI DASAR

Sebuah turbin angin secara umum mempunyai dua komponen utama, yaitu rotor dan generator. Rotor mempunyai beberapa parameter utama, antara lain (De Renzo DJ, 1979; Tony Burton et al):

- Daya rancangan (*rated power*)
- Koefisien daya, C_P
- Kecepatan angin rancangan (*rated wind speed*)
- Putaran rancangan
- Kecepatan angin *start - up*
- Kecepatan angin *cut - in*
- Diameter
- Jumlah sudu

Perpaduan antara *rated wind speed*, putaran rancangan, dan diameter rotor menghasilkan parameter baru, yaitu *Tip Speed Ratio* (*TSR*). Secara definisi *TSR* merupakan rasio antara kecepatan tangensial di ujung sudu terhadap kecepatan angin. Secara

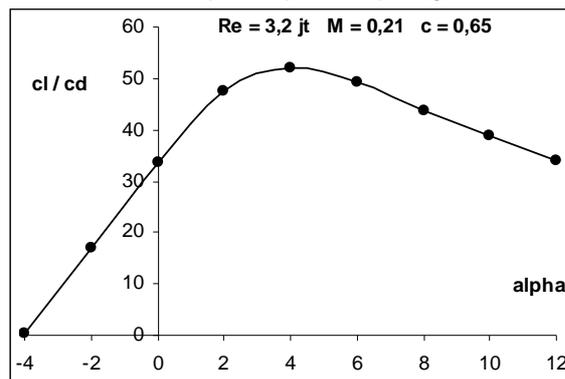
matematika *TSR* dapat dituliskan sebagai berikut (De Renzo DJ., 1979; Tony Burton et al):

$$\lambda = \frac{V_{tip}}{V_{rated}} = \frac{1/2 \Omega D}{V_{rated}} \quad (2-1)$$

Keterangan:

- λ = *TSR*
- V_{tip} =kecepatan tangensial di ujung sudu (m/det)
- V_{rated} =*rated wind speed* (m/det)
- Ω =putaran (rad/det)
- D =diameter (m)

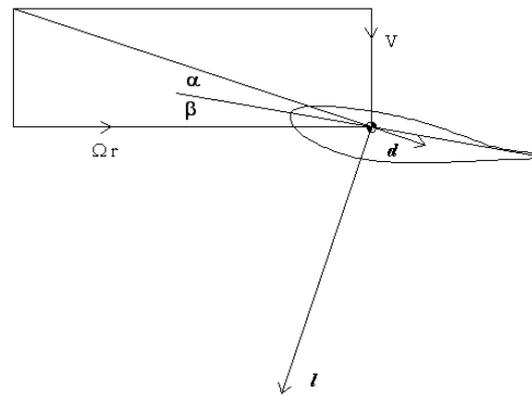
Harga *TSR* secara tidak langsung mempengaruhi prestasi rotor. Harga *TSR* yang terlalu rendah menyebabkan sudut serang aliran menjadi besar, demikian juga sebaliknya. Sudut serang yang terlalu kecil maupun yang terlalu besar biasanya mempunyai rasio gaya angkat terhadap gaya hambat (c_l/c_d) yang tidak optimal sehingga torsi yang dihasilkan juga menjadi tidak optimal. Gambar 2-1 menunjukkan contoh hubungan antara sudut serang aliran dan c_l/c_d pada *airfoil* NACA 4412. Gambar 2-2 menunjukkan sketsa arah kecepatan dan gaya aerodinamika pada penampang sudu.



Gambar 2-1:Contoh kurva $\alpha - c_l/c_d$ pada NACA 4412

Keterangan:

- c_l = koefisien gaya angkat
- c_d = koefisien gaya hambat
- α = sudut serang ($^\circ$)
- M = bilangan Mach
- Re = bilangan Reynolds
- c = *chord*



Gambar 2-2:Sketsa arah kecepatan dan gaya (Glauert H., 1935; Larrabee EE., 1979)

Keterangan:

- L = gaya angkat
- d = gaya hambat
- β = sudut sudu
- V = kecepatan angin
- r = posisi atau radius dihitung dari sumbu putar rotor

Selisih refleksi gaya angkat dan gaya hambat dalam arah tangensial merupakan sumber torsi. Perkalian antara torsi dan putaran menghasilkan daya. Beberapa persamaan penghasil daya tersebut dituliskan secara singkat sebagai berikut (Anderson, John D. Jr., 1985; Glauert, H., 1935; Larrabee EE., 1979; Tony Burton et al):

$$dF = l \sin \varphi - d \cos \varphi \quad (2-2)$$

$$\varphi = \alpha + \beta \quad (2-3)$$

$$dQ = rdF \quad (2-4)$$

$$Q = B \int dQ \quad (2-5)$$

$$P = Q\Omega \quad (2-6)$$

Keterangan:

- φ = sudut aliran
- dF = gaya tangensial lokal
- dQ = torsi lokal
- Q = torsi total
- B = jumlah sudu
- P = daya

Selain dinyatakan dalam besaran daya yang dihasilkan, prestasi rotor juga bisa dinyatakan dalam bentuk c_p . Secara definisi c_p merupakan rasio antara daya angin yang mampu diserap oleh rotor

terhadap daya yang disediakan oleh angin untuk diameter rotor tertentu. Secara matematika c_p dapat dituliskan sebagai berikut (De Renzo DJ, 1979; Tony Burton et al):

$$c_p = \frac{P}{\frac{1}{2}\rho V^2 AV} = \frac{P}{\frac{1}{8}\rho\pi D^2 V^3} \quad (2-7)$$

Keterangan:

c_p = koefisien daya

ρ = kerapatan udara

A = luas sapuan rotor

Apabila *slip stream* ikut diperhitungkan, maka kecepatan angin efektif menjadi lebih kecil daripada kecepatan angin aliran bebas (Anderson, John D. Jr., 1985; Larrabee EE., 1979; Mc. Cormick, Barnes W., 1995; Tony Burton et al). Dengan kata lain,

$$V_{eff} = V(1-a) \quad (2-8)$$

Keterangan:

V_{eff} = kecepatan angin efektif

a = *slip stream*

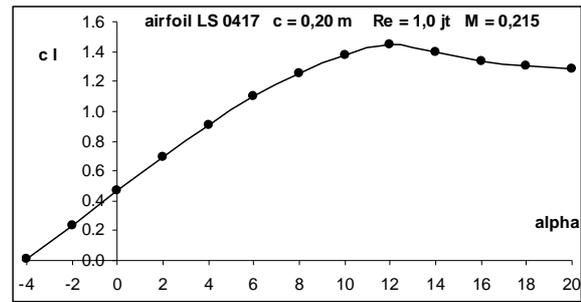
Selanjutnya persamaan lainnya disesuaikan dengan persamaan (2-8). Selain itu diagram kecepatan dan gaya juga perlu disesuaikan.

3 RANCANGAN

3.1 Karakteristik Airfoil

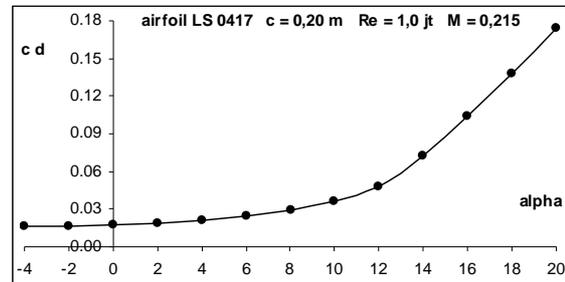
Penampang sudu biasanya berbentuk *airfoil* agar diperoleh rasio gaya angkat terhadap gaya hambat yang cukup untuk menghasilkan torsi. Dalam penelitian ini penampang sudu dipilih menggunakan *airfoil* LS-0417.

Karakteristik *airfoil* diperlukan untuk menghitung torsi lokal tiap segmen. Karakteristik tersebut meliputi hubungan antara a , c_l , dan c_d . Perhitungan c_l dan c_d dilakukan secara simulasi menggunakan salah satu perangkat lunak berbasis *CFD*. Hubungan antara ketiga parameter tersebut disajikan dalam beberapa kurva berikut:



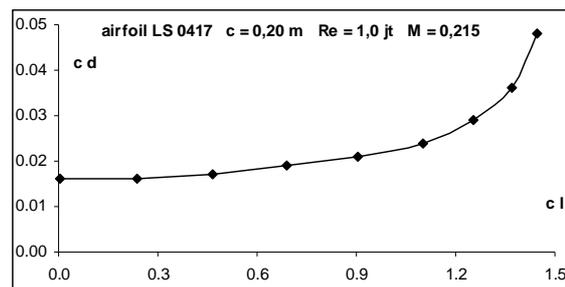
Gambar 3-1a: Kurva $\alpha - c_l$

Gambar 3-1a menunjukkan hubungan antara α dan c_l . Simulasi dilakukan pada variasi α mulai dari -4° hingga 20° dengan selisih kenaikan sebesar 2° . Hasil simulasi menunjukkan bahwa c_l menjadi semakin besar seiring dengan kenaikan α sampai dengan 12° .



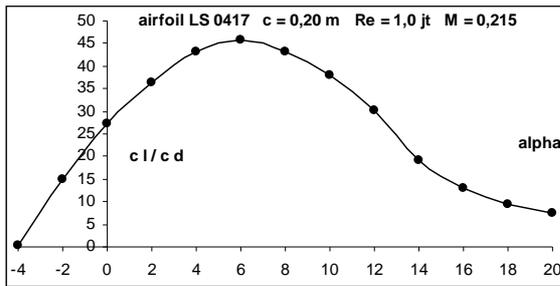
Gambar 3-1b: Kurva $\alpha - c_d$

Gambar 3-1b menunjukkan hubungan antara α dan c_d . Pada gambar tersebut dapat dilihat bahwa semakin besar α maka semakin besar pula c_d yang dihasilkan. Kenaikan c_d menjadi semakin signifikan pada α lebih besar dengan sama dengan 12° .



Gambar 3-1c: Kurva $c_l - c_d$

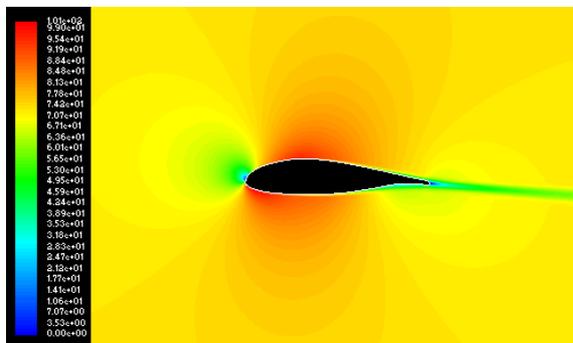
Hubungan antara c_l dan c_d ditunjukkan dalam Gambar 3-1c. Dalam gambar tersebut dapat dilihat bahwa kenaikan harga c_l diikuti dengan kenaikan harga c_d . Kenaikan gaya hambat tersebut mulai menjadi signifikan pada c_l sekitar 1,4. Berdasarkan Gambar 3-1a, harga tersebut bersesuaian pada α sekitar 12° .



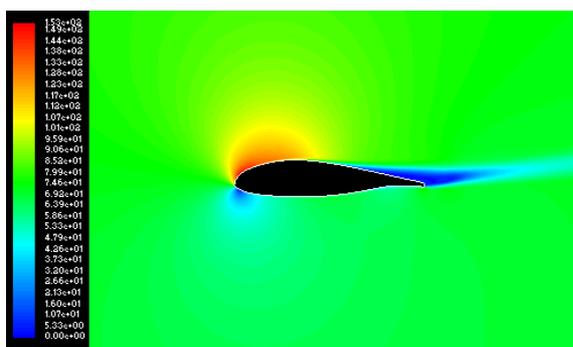
Gambar 3-1d: Kurva $\alpha - C_l / C_d$

Sebagai penghasil torsi sudu, prestasi *airfoil* dilihat dari perbandingan antara gaya angkat terhadap gaya hambatnya. Semakin besar harga C_l/C_d , maka semakin besar torsi yang dihasilkan. Gambar 3-1d menunjukkan hubungan antara α dan C_l/C_d . Harga C_l/C_d maksimum terjadi pada α sekitar 6° .

Secara umum Gambar 3-1 menunjukkan bahwa pada kondisi yang tertera pada kurva, *airfoil* LS-0417 mempunyai α maks. sekitar 12° , C_l maks. sekitar 1,5, dan (C_l/C_d) maks. sekitar 45 pada α sekitar 16° . Selain disajikan dalam bentuk C_l dan C_d , hasil simulasi juga dapat ditunjukkan dalam bentuk profil aliran seperti pada Gambar 3-2 di bawah ini.



Gambar 3-2a: Profil aliran *airfoil* LS-0417 pada $\alpha = -4^\circ$



Gambar 3-2b: Profil aliran *airfoil* LS-0417 pada $\alpha = 12^\circ$

Gambar 3-2b menunjukkan bahwa pada $\alpha = 12^\circ$ terjadi separasi aliran yang cukup banyak pada permukaan atas. Hal tersebut mengakibatkan gaya angkat yang dihasilkan menjadi berkurang.

3.2 Prestasi Rotor

Dalam penelitian ini terdapat dua parameter rotor yang divariasikan, yaitu jumlah sudu dan diameter rotor. Jumlah sudu divariasikan dari dua hingga enam buah. Hasil perhitungan juga disajikan dalam tiga parameter rotor lainnya, yaitu *TSR*, daya rotor, dan C_p rotor. *Tip Speed Ratio* dihitung menggunakan persamaan (2-1). Daya rotor dihitung menggunakan alur persamaan yang telah terintegrasi dalam satu program perhitungan. Koefisien daya, C_p dihitung menggunakan persamaan (2-7).

Meskipun pengaruhnya tidak signifikan, diameter pangkal (*hub*) juga dimasukkan dalam perhitungan. Diameter *hub* disesuaikan dengan kondisi generator, yaitu sebesar 70 cm.

Dalam penelitian ini distribusi *chord* yang digunakan mengacu pada sudu SKEA 10 kW sebelumnya, yaitu sebesar 30 cm di pangkal dan 15 cm di ujung sudu dengan distribusi linier. Hasil perhitungan disajikan dalam Tabel 3-1.

Tabel 3-1a: JUMLAH SUDU, $B = 6$

Diameter (m)	<i>TSR</i>	Rotor (kW)	C_p
6,000	8,48	4,10	0,240
6,400	9,04	3,94	0,203
6,800	9,61	3,59	0,163
7,200	10,17	2,99	0,121
7,600	10,74	2,12	0,077
8,000	11,30	0,93	0,031

Tabel 3-1b: $B = 4$

Diameter (m)	<i>TSR</i>	Rotor (kW)	C_p
6,000	8,48	5,71	0,335
6,400	9,04	6,02	0,309
6,800	9,61	6,22	0,283
7,200	10,17	6,28	0,254
7,600	10,74	6,17	0,224
8,000	11,30	5,88	0,193
8,400	11,87	5,37	0,159
8,800	12,43	4,62	0,125
9,200	13,00	3,58	0,089
9,600	13,56	2,24	0,051
10,000	14,13	0,55	0,011

Tabel 3-1c: $B = 3$

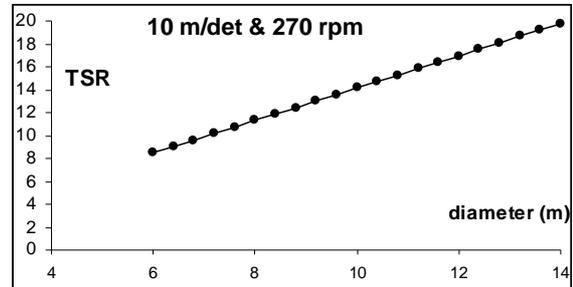
Diameter (m)	TSR	Rotor (kW)	C_P
6,000	8,48	6,53	0,382
6,400	9,04	7,07	0,363
6,800	9,61	7,55	0,343
7,200	10,17	7,95	0,322
7,600	10,74	8,24	0,299
8,000	11,30	8,41	0,275
8,400	11,87	8,43	0,250
8,800	12,43	8,28	0,224
9,200	13,00	7,95	0,196
9,600	13,56	7,39	0,168
10,000	14,13	6,59	0,138
10,400	14,70	5,53	0,107
10,800	15,26	4,16	0,075
11,200	15,83	2,47	0,041
11,600	16,39	0,42	0,007

Tabel 3-1d: $B = 2$

Diameter (m)	TSR	Rotor (kW)	C_P
6,000	8,48	7,23	0,424
6,400	9,04	8,02	0,412
6,800	9,61	8,79	0,400
7,200	10,17	9,53	0,386
7,600	10,74	10,23	0,372
8,000	11,30	10,87	0,356
8,400	11,87	11,44	0,340
8,800	12,43	11,92	0,322
9,200	13,00	12,30	0,304
9,600	13,56	12,55	0,285
10,000	14,13	12,67	0,265
10,400	14,70	12,63	0,244
10,800	15,26	12,42	0,222
11,200	15,83	12,01	0,200
11,600	16,39	11,38	0,177
12,000	16,96	10,52	0,152
12,400	17,52	9,40	0,128
12,800	18,09	8,00	0,102
13,200	18,65	6,29	0,075
13,600	19,22	4,25	0,048
14,000	19,78	1,87	0,020

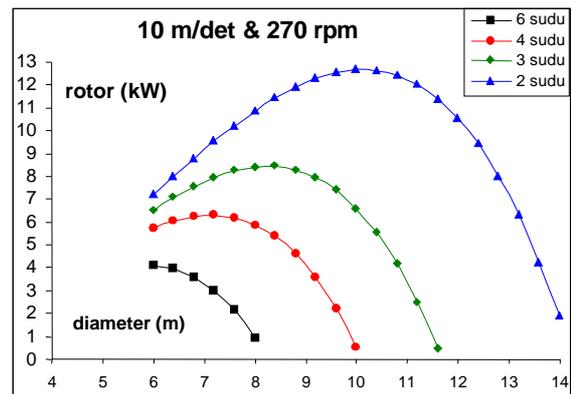
Hasil dalam Tabel 3-1d yang di blok/di arsir merupakan kondisi yang menghasilkan daya rotor lebih besar dari 12 kW. Kondisi tersebut dicapai dengan dua buah sudu dan diameter yang bersesuaian adalah antara 9,2 hingga 11,2 m. Pada diameter rotor sama dengan 9,2 dan 11,2 m, harga TSR , daya,

dan C_P yang bersesuaian masing-masing adalah 12,30 dan 15,83, 12,30 kW dan 12,01 kW, dan 0,304 dan 0,200. Selain disajikan dalam bentuk tabel, hasil perhitungan juga dapat disajikan dalam beberapa kurva sebagai berikut:



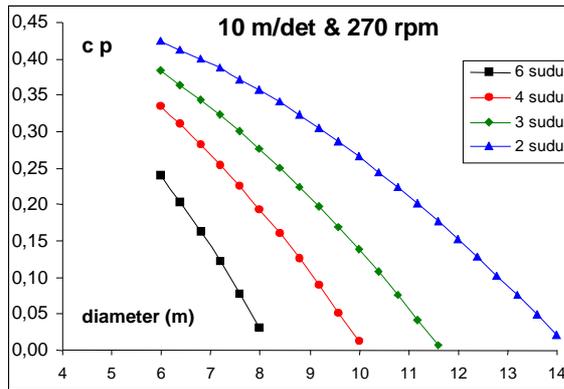
Gambar 3-3a: Kurva Diameter – TSR

Pada kecepatan angin dan putaran yang sama, kenaikan harga TSR berbanding lurus dengan kenaikan diameter. Hal tersebut sesuai dengan persamaan (2-1).

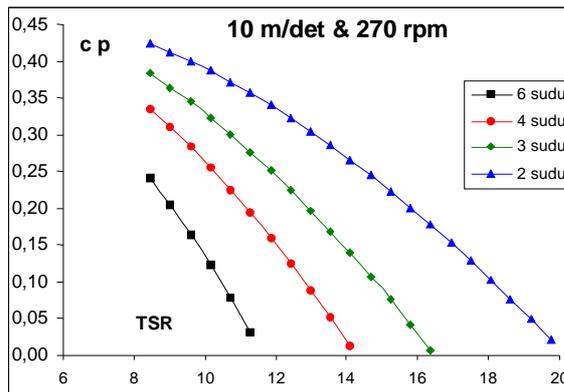


Gambar 3-3b: Kurva Diameter – daya

Gambar 3-3b menunjukkan bahwa diameter rotor dan jumlah sudu merupakan dua parameter yang sangat mempengaruhi daya yang dihasilkan rotor. Tentunya dengan bentuk sudu, kecepatan angin, dan putaran yang sama. Dengan diameter yang sama, semakin banyak jumlah sudu yang digunakan maka daya yang dihasilkan semakin kecil. Untuk jumlah sudu tertentu terdapat diameter optimal yang menghasilkan daya maksimal. Semakin banyak jumlah sudu, maka diameter optimalnya menjadi semakin kecil.

Gambar 3-3c: Kurva Diameter – C_p

Gambar 3-3c menunjukkan hubungan antara diameter dan C_p . Untuk kecepatan angin, putaran, dan jumlah sudu yang sama, penambahan diameter rotor menghasilkan C_p yang semakin kecil. Untuk diameter yang sama, penambahan jumlah sudu juga menghasilkan C_p yang semakin kecil.

Gambar 3-3d: Kurva $TSR - C_p$

Gambar 3-3d menunjukkan hubungan antara TSR dan C_p untuk setiap jumlah sudu yang bervariasi. Pada TSR tertentu, penambahan sudu menghasilkan C_p yang semakin kecil. Hal yang sama juga berlaku untuk kenaikan harga TSR .

3.3 Hasil Rancangan

Hasil perhitungan menunjukkan bahwa untuk menghasilkan daya sebesar 12 kW, rotor SKEA 10 kW harus berdiameter antara 9,2 hingga 11,2 m dengan dua buah sudu. Kondisi operasional dan geometri selengkapnya dapat disusun ulang sebagai berikut:

Kondisi operasional:

- Daya maksimum SKEA = 10 kW
- Daya rancangan rotor = 12 kW
- Kecepatan angin *rated* = 10 m/det
- Putaran rancangan = 270 rpm

Geometri rotor atau sudu:

- Diameter rotor = 9,2 – 11,2 m
- Diameter pangkal = 0,7 m
- Jumlah sudu = 2 buah
- Penampang sudu = *airfoil* LS-0417
- *Chord* di pangkal = 30 cm
- *Chord* di ujung = 15 cm
- Distribusi *chord* = linier

4 PEMBAHASAN

Sesuai dengan tujuan penelitian, maka parameter yang akan dibahas adalah jumlah sudu dan diameter rotor. Efek kedua parameter tersebut terhadap parameter lainnya juga akan dibahas dalam Bagian Pembahasan ini. Selain itu karakteristik *airfoil* LS-0417 sebagai penampang sudu juga akan sedikit dibahas. Dengan demikian materi pembahasan ini dapat disusun ulang sebagai berikut:

- Pembahasan karakteristik *airfoil* LS-0417, meliputi :
 - $a - C_l$
 - $a - C_d$
 - $C_l - C_d$
 - $a - C_l / C_d$
 - kondisi separasi dan *stall*
- Analisis prestasi rotor, meliputi:
 - Efek penambahan diameter terhadap TSR .
 - Hubungan antara diameter dan daya yang mampu dihasilkan rotor.
 - Pengaruh jumlah sudu terhadap daya yang dihasilkan.
 - Efek penambahan diameter terhadap C_p rotor.
 - Pengaruh penambahan jumlah sudu terhadap penurunan C_p rotor.

Analisis dilakukan pada setiap bagian permasalahan agar menjadi lebih terarah. Pembahasan selengkapnya diuraikan dalam beberapa paragraf di bawah ini.

4.1 Analisis Karakteristik *Airfoil* LS-0417

4.1.1 Analisis $\alpha - c_l$

Hubungan antara α dan c_l telah disajikan dalam Gambar 3-1a. Pada gambar tersebut dapat dilihat bahwa kenaikan c_l linier terhadap kenaikan α pada α mulai dari -4° hingga sekitar 8° dengan kemiringan sekitar $5,96/\text{rad}$. Kemiringan tersebut hampir sama dengan kemiringan kurva $\alpha - c_l$ *airfoil* pada umumnya, yaitu sekitar $2\pi/\text{rad}$ untuk *airfoil* tipis (Abbot, Ira H, Von Doenhoff, Albert E, 1959; Anderson, John D., Jr, 1985). Dengan demikian hasil simulasi prestasi *airfoil* masih cukup valid untuk digunakan.

Kenaikan sudut serang menyebabkan luas aliran di permukaan atas *airfoil* semakin besar sehingga kecepatan lokalnya juga semakin tinggi. Dengan tekanan total yang dianggap sama antara permukaan atas dan permukaan bawah *airfoil*, maka tekanan statik permukaan atas menjadi lebih kecil sehingga terbentuk gaya angkat. Dengan demikian kenaikan sudut serang menghasilkan kenaikan gaya angkat (Anderson, John D., Jr, 1985).

4.1.2 Analisis $\alpha - c_d$

Kenaikan sudut serang menyebabkan tekanan statik pada permukaan bawah juga naik sehingga resultan gaya dalam arah tegak lurus *chord* juga akan naik. Apabila kenaikan sudut serang dan resultan gaya tersebut dikonversi dalam arah angin, maka akan menghasilkan kenaikan gaya hambat (Anderson, John D., Jr, 1985). Dengan demikian kenaikan sudut serang akan menyebabkan kenaikan gaya hambat seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3-1b.

Pada Gambar 3-1b tersebut dapat dilihat bahwa kenaikan gaya hambat menjadi signifikan pada sudut serang sekitar 12° . Hal tersebut dikarenakan pada sudut serang sekitar 12° mulai terjadi separasi aliran pada permukaan atas bagian belakang (*trailing edge*).

4.1.3 Analisis $c_l - c_d$

Kurva $c_l - c_d$ merupakan gabungan antara kurva $\alpha - c_l$ dan kurva $\alpha - c_d$. Pada Gambar 3-1c dapat dilihat bahwa kenaikan gaya angkat menyebabkan kenaikan gaya hambat. Kenaikan gaya angkat secara langsung disebabkan oleh kenaikan sudut serang. Pada paragraf sebelumnya telah dijelaskan bahwa kenaikan sudut serang menyebabkan kenaikan gaya hambat. Dengan demikian hal tersebut menjelaskan penyebab kenaikan gaya hambat akibat kenaikan gaya angkat.

4.1.4 Analisis $\alpha - c_l/c_d$

Kenaikan sudut serang menyebabkan kenaikan gaya angkat dan gaya hambat. Pada sudut serang kecil, kenaikan sudut serang menyebabkan kenaikan gaya angkat yang signifikan seperti pada Gambar 3-1a. Di lain pihak pada daerah sudut serang yang sama, kenaikan gaya hambat akibat kenaikan sudut serang menjadi tidak signifikan seperti pada Gambar 3-1b. Dengan demikian pada sudut serang kecil, kenaikan α menyebabkan kenaikan c_l/c_d .

Pada daerah sudut serang tinggi, kenaikan sudut serang menyebabkan gradien gaya angkat terhadap sudut serang menjadi semakin kecil. Pada daerah sudut serang yang sama, kenaikan sudut serang menyebabkan kenaikan gaya hambat yang signifikan. Dengan demikian pada daerah sudut serang besar, kenaikan α justru menyebabkan penurunan c_l/c_d . Gambar 3-1d menunjukkan bahwa sudu akan menghasilkan torsi yang maksimal pada sudut serang sekitar 8° .

4.1.5 Analisis kondisi separasi dan *stall*

Gambar 3-1a menunjukkan bahwa pada sudut serang sekitar 8° mulai terjadi penurunan gradien gaya angkat terhadap sudut serang. Hal tersebut dikarenakan mulai terjadi separasi aliran pada permukaan atas bagian belakang (*trailing edge*). Permukaan yang mengalami

separasi aliran akan memperoleh tekanan statik yang lebih besar sehingga gaya angkat yang dihasilkan menjadi tidak optimal.

Pada sudut serang yang lebih besar lagi gaya angkat yang dihasilkan justru menjadi lebih kecil. Kondisi tersebut disebut sebagai *stall*, yaitu kondisi dimana terjadi separasi aliran yang cukup besar sehingga gaya angkat menjadi berkurang drastis (Abbot, Ira H, Von Doenhoff, Albert E, 1959; Anderson, John D., Jr, 1985). Kondisi tersebut ditunjukkan dalam Gambar 3-2b.

4.2 Analisis Prestasi Rotor

Beberapa parameter rotor yang berkaitan dengan pembahasan ini antara lain jumlah sudu, diameter rotor, *TSR*, daya, dan c_p . Semua parameter tersebut berkaitan satu sama lain. Untuk lebih memperjelas analisis, maka pembahasan dilakukan terhadap hubungan setiap dua parameter rotor.

4.2.1 Efek penambahan diameter terhadap *TSR*

Hubungan antara diameter dan *TSR* secara langsung ditunjukkan oleh persamaan (2-1). Dalam persamaan tersebut dapat dilihat bahwa pada kecepatan angin dan putaran yang sama, kenaikan *TSR* berbanding lurus dengan penambahan diameter rotor. Kurva linier tersebut disajikan dalam Gambar 3-3a.

Pada umumnya sebuah rotor dirancang untuk *TSR* antara 6 hingga 10 (De Renzo, D.J., 1979). Dengan harga *TSR* tersebut biasanya sudu akan mempunyai sudut serang yang optimal, yaitu sudut serang dengan c_l/c_d yang maksimal. Apabila diameter rotor terus ditambah, maka secara langsung harga *TSR* juga naik. Jika harga *TSR* tersebut melebihi angka 10, maka efisiensi rotor menjadi berkurang.

4.2.2 Efek diameter terhadap daya

Efek diameter terhadap daya yang mampu dihasilkan rotor disajikan dalam

Gambar 3-3b. Seperti yang telah dijelaskan pada paragraf sebelumnya bahwa penambahan diameter secara langsung akan menaikkan harga *TSR*. Nilai *TSR* yang terlalu tinggi menyebabkan sudut serang sudu menjadi tidak optimal sehingga c_l/c_d yang dihasilkan juga tidak maksimal. Hal tersebut ditunjukkan dalam Gambar 3-1d.

Besar c_l/c_d lokal di setiap segmen sudu secara langsung menentukan besar torsi yang dapat dihasilkan seperti pada persamaan (2-2) hingga persamaan (2-5). Dengan putaran tertentu, maka daya yang dihasilkan rotor merupakan fungsi dari torsi saja.

Di lain pihak penambahan diameter menyebabkan luas sapuan rotor semakin besar sehingga energi angin yang diterima rotor juga semakin besar. Jika efisiensi rotor (c_p) tetap, maka penambahan diameter akan menghasilkan daya rotor yang semakin besar pula seperti pada persamaan (2-7). Namun apabila diameter rotor terlalu besar, maka harga *TSR* juga dapat menjadi terlalu besar sehingga efisiensi rotor (c_p) akan berkurang. Penurunan c_p tersebut secara langsung menyebabkan penurunan daya sesuai dengan persamaan (2-7). Dengan demikian penambahan diameter belum tentu akan dapat menaikkan daya rotor, tergantung dari geometri sudu dan *TSR*.

4.2.3 Efek jumlah sudu terhadap daya

Secara umum penambahan jumlah sudu akan menghasilkan kenaikan daya rotor karena torsi total yang dihasilkan juga semakin besar. Di lain pihak jumlah sudu yang terlalu banyak menyebabkan rotor putarannya menjadi lebih lambat. Sesuai dengan persamaan (2-6), maka daya rotor merupakan perkalian antara torsi dan putaran. Penambahan jumlah sudu memang akan membesar torsi yang dihasilkan masing-masing sudu, namun akan membuat putaran rotor melambat. Dengan demikian penambahan jumlah sudu belum tentu akan memperbesar

daya rotor. Hubungan antara jumlah sudu dan daya rotor disajikan dalam Gambar 3-3b.

Pada bagian Batasan Masalah disebutkan bahwa perhitungan dilakukan pada kondisi *rated*, yaitu pada 10 m/det dan 270 rpm sehingga daya rotor merupakan fungsi dari torsi saja. Semakin besar torsi sudu, maka semakin besar daya yang dihasilkan rotor. Selain itu disebutkan pula bahwa distribusi *chord* adalah linier dengan *chord* di pangkal dan di ujung masing-masing sebesar 30 dan 15 cm. Untuk menghasilkan daya yang maksimal maka digunakan kondisi *Betz*, yaitu menggunakan *slip stream* berharga konstan di sepanjang sudu sebesar 0,333 (De Renzo, D.J., 1979; Larrabee, E. E., 1979; Tony Burton, et al.). Dengan demikian keluaran dari perhitungan adalah distribusi puntiran dan daya rotor.

Dari Gambar 3-3b dapat dilihat bahwa pada diameter rotor sama dengan enam atau lebih, penambahan jumlah sudu justru menghasilkan daya yang lebih kecil. Sesuai dengan Gambar 3-3a, maka diameter rotor sama dengan enam atau lebih bersesuaian dengan *TSR* sama dengan delapan atau lebih. Dengan demikian dapat disimpulkan bahwa untuk *TSR* yang tinggi, penggunaan jumlah sudu yang sedikit akan menghasilkan prestasi rotor yang lebih baik.

4.2.4 Efek diameter terhadap C_P rotor

Seperti yang telah dijelaskan sebelumnya bahwa untuk kecepatan angin dan putaran tertentu, penambahan diameter rotor secara langsung menghasilkan *TSR* yang lebih tinggi sesuai dengan persamaan (2-1) dan Gambar 3-3a. Harga *TSR* yang terlalu tinggi menyebabkan sudut serang efektif lokal di setiap segmen sudu menjadi tidak optimal sesuai dengan sketsa pada Gambar 2-2.

Sudut serang yang tidak optimal menghasilkan C_l/C_d yang tidak maksimal seperti yang ditunjukkan dalam hasil

simulasi pada Gambar 3-1d. Penurunan C_l/C_d menghasilkan gaya tangensial yang lebih kecil sehingga torsi yang dihasilkan juga lebih kecil. Dengan demikian penambahan daya akibat penambahan diameter lebih kecil daripada energi angin yang diberikan sehingga koefisien daya, C_P rotor menjadi berkurang.

4.2.5 Efek jumlah sudu terhadap C_P rotor

Pada Bagian 4.2.3 telah dijelaskan hubungan antara jumlah sudu dan daya yang mampu dihasilkan rotor. Untuk *TSR* yang tinggi, penggunaan jumlah sudu yang sedikit akan menghasilkan daya rotor yang lebih baik. Sesuai dengan persamaan (2-7) maka dengan diameter dan kecepatan angin yang sama, daya berbanding lurus terhadap C_P . Dengan demikian untuk *TSR* yang tinggi, pengurangan jumlah sudu akan meningkatkan C_P rotor.

5 KESIMPULAN

Beberapa kesimpulan yang dapat ditarik dari penelitian ini antara lain:

- *Airfoil* LS-4017 yang digunakan sebagai penampang sudu memiliki α_{stall} sekitar 12° . Harga $(C_l/C_d)_{maks.}$ sekitar 45 dicapai pada α sekitar 6° .
- Untuk kondisi dengan harga *TSR* yang tinggi, penggunaan jumlah sudu yang lebih sedikit akan menghasilkan daya rotor yang lebih baik.
- Penambahan diameter rotor belum tentu akan menghasilkan daya yang lebih besar.
- Untuk kondisi dengan harga *TSR* yang terlalu tinggi, penambahan diameter rotor justru akan menurunkan koefisien daya, C_P rotor.
- Pada kondisi 10 m/det, 270 rpm, *chord* di pangkal dan di ujung masing-masing sebesar 30 dan 15 cm terdistribusi linier, dan dengan menerapkan kondisi *Betz*, maka daya SKEA sebesar 10 kW atau daya rotor sebesar 12 kW dicapai dengan 2 buah sudu berdiameter antara 9,2 hingga 11,2 m.

- Rancangan baru rotor SKEA 10 kW, yaitu menggunakan 2 buah sudu berdiameter 9,2 hingga 11,2 m dapat dipertimbangkan. Penggunaan 2 buah sudu biasanya menimbulkan ketidakstabilan (*balancing*) pada saat berputar dibandingkan dengan menggunakan 3 buah sudu sehingga perlu diperhatikan pada saat pembuatan sudu.

DAFTAR RUJUKAN

- Abbot, Ira H, Von Doenhoff, Albert E, 1959. *Theory of Wing Section*, Dover Publications Inc., New York.
- Anderson, John D., Jr. 1985. *Fundamentals of Aerodynamics*, Mc. Graw Hill company, Singapore.
- De Renzo, D.J., 1979. *Wind Power (Recent Development)*, Noyes Data Corporation, Park Ridge, New Jersey, U.S.A.
- Glauert, H., 1935. *Airplane Propellers. Div. Vol IV of Durand's "Aerodynamics Theory"*, Dover Publications, New York.
- Gostelow, 1984. *Cascade Aerodynamics*, Pergamon Press, Sidney.
- Larrabee, E. E., 1979. *Design of Propellers for Motorsoares*, NASA CP-2085, Part I.
- Mc. Cormick, Barnes W., 1995. *Aerodynamics, Aeronautics, and Flight Performance*, John Wiley & Sons, Canada.
- Tony Burton, et al., *Wind Energy Hand Book*, John Wiley & Sons.