

BANCANGAN DAN ANALISIS AERODINAMIKA SUDUTURBINANGINKAPASITAS300KW

Sullstyo Atmadl, Ahmad Jamaludin Filtroh
Peneliti PusatTeknologi DirgantaraTerapan, LAPAN

ABSTRACT

This particular research is the part of design activities of SKEA 300 kW. The turbine is designed for 45 m diameter with 3 blades. NACA airfoil 4424, 4418 and 4412 are used consecutively from root to tip. The aerofoil performances are calculated using CFD with consideration of Reynold and Mach number effects. Blade geometry with 15° twist is selected. By taking into accounts losses from rotor to generator, the blade should result in 350 kW power at nominal wind speed of 10 m/sec. This condition is achieved at blade setting angle of 2° at rotational speed of 35 rpm and tip speed ratio of $X = 8,24$.

Keywords : *Wind Turbin 300 kW*

ABSTRAK

Penelitian ini merupakan bagian dari kegiatan Perancangan SKEA 300 kW. Rotor dirancang dengan diameter 45 m dengan jumlah sudu tiga buah. Penampang sudu berbentuk airfoil NACA 4424, 4418, dan 4412 berurutan dari pangkal hingga ujung. Prestasi airfoil dihitung dengan simulasi secara *CFD* dengan mempertimbangkan efek bilangan *Reynolds* dan bilangan *Mach*. Geometri sudu mempunyai puntiran sebesar 15°. Dengan memperhitungkan rugi-rugi antara rotor dan generator, maka sudu akan mampu menghasilkan 350 kW pada kecepatan angin nominal 10 m/det dengan sudut pasang sudu sebesar 2° pada putaran 35 rpm dan tip *speed ratio* $X = 8,24$.

Kata kunci: *Turbicin Angin 300 kW*

1 PENDAHULUAN

LAPAN telah mengembangkan turbin angin sampai dengan kapasitas 50 kW dan telah dibuat prototipenya yang umumnya merupakan turbin angin yang berdiri sendiri atau hybrid dengan solar sel atau dengan diesel. Namun dengan meningkatnya kebutuhan listrik serta makin mahal dan langkanya minyak dunia, diperlukan pengembangan sumber energi alternatif yang bisa dihubungkan secara interkoneksi dengan listrik PLN. Untuk itu LAPAN mulai mengembangkan dan merancang turbin angin dengan kapasitas 300 kW yang dapat dihubungkan interkoneksi dengan jaringan PLN.

Rancangan meliputi sudu, generator, sistem kontrol, dan sistem mekanika.

Makalah ini berisi tentang hasil rancangan aerodinamika sudu untuk SKEA 300 kW. Sudu untuk SKEA 300 kW ini mempunyai profil penampang sudu yang tidak homogen. Dalam hal ini dipilih tiga macam airfoil sebagai penampang sudu, yaitu NACA 4424, 4418, dan 4412 berurutan dari pangkal hingga ujung.

Sesuai dengan judul makalah, maka tujuan utama penelitian ini adalah merancang aerodinamika sudu SKEA 300 kW. Salah satu spesifikasi teknis SKEA ini adalah adanya mekanisme variabel *pitch*. Dengan demikian tujuan lain dari penelitian ini adalah mengetahui efek pemasangan dan sudut pasang sudu terhadap daya keluaran pada kondisi desain.

Ruang lingkup rancangan ini antara lain :

- Airfoil yang digunakan sebagai penampang sudu terdiri dari tiga macam, yaitu NACA 4424, 4418, dan 4412 disusun berurutan dari pangkal hingga ujung.
- Prestasi airfoil diperoleh dengan simulasi CFD dengan turut memperhitungkan efek bilangan Reynolds dan bilangan Mach, khususnya pada kondisi *on-design*.

Penelitian ini juga mengasumsikan bahwa tidak ada defleksi di sepanjang sudu, baik defleksi aksial maupun perubahan puntiran.

2 TIN JAUAN TEORI

Untuk merancang sebuah rotor, maka terdapat empat variabel sebagai parameter awal, yaitu :

- Daya keluaran rotor
- Kecepatan angin nominal
- Kecepatan putar nominal
- Diameter rotor

Hubungan antara daya keluaran, kecepatan angin nominal, dan diameter rotor ditunjukkan dalam persamaan berikut: (De Renzo, D. J., 1979 & Tony Burton, et al., 2001)

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

Keterangan(dalam satuan SI):

P = daya

ρ = kerapatan udara

D = diameter rotor

V = kecepatan angin

c_p = koefisien daya

Koefisien daya, c_p menggambarkan persentase jumlah daya angin yang dapat dikonversi oleh rotor menjadi daya listrik. Secara teoritis harga c_p maksimum adalah 0,593, namun pada kenyataannya hanya berkisar antara 0,30 sampai dengan 0,40 (De Renzo, D. J., 1979 & Tony Burton, et al., 2001). Harga c_p sangat tergantung dari teknik perancangan, kualitas pembuatan, dan prestasi airfoil.

Kecepatan putar nominal rotor sangat dipengaruhi oleh kecepatan angin nominal dan diameter rotor. Hubungan

antara ketiga parameter tersebut biasanya dinyatakan dalam bentuk *Tip Speed Ratio (TSR)*, yaitu perbandingan antara kecepatan tangensial di ujung rotor terhadap kecepatan angin. Secara matematika *TSR* dinyatakan sebagai berikut (De Renzo, D. J., 1979 & Tony Burton, et al., 2001):

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

Keterangan (dalam satuan SI):

V_{tip} = kecepatan tangensial di ujung

ω = kecepatan putar

Pemilihan nilai λ secara langsung dipengaruhi oleh besarnya puntiran dan sudut serang lokal sudu. Turbin angin tipe horisontal biasanya menggunakan $\lambda = 6 - 10$. Pemilihan nilai λ kurang dari 6 atau lebih dari 10 biasanya akan mengurangi daya maksimal yang dapat dihasilkan oleh rotor (De Renzo, D. J., 1979).

Sebagian energi angin yang dikonversi menjadi energi kinetik putar oleh rotor selanjutnya diteruskan ke generator, yang akan mengubah energi kinetik putar menjadi energi listrik. Mekanisme perpindahan energi tersebut tentunya akan mengakibatkan rugi-rugi daya (*losses*). Dengan demikian, daya yang dihasilkan sudu harus lebih besar dari daya keluaran SKEA.

Penampang sudu biasanya berbentuk airfoil. Keuntungannya dibandingkan bentuk lainnya adalah torsi yang dihasilkan lebih besar dan peluang terjadinya *stall* yang jauh lebih kecil. Biasanya dipilih airfoil yang tebal untuk daerah pangkal sudu agar dapat menambah kekuatan struktur pangkal sudu. Airfoil dengan prestasi aerodinamika yang baik biasanya digunakan sebagai penampang bagian ujung sudu untuk menghasilkan torsi atau daya yang sebesar mungkin.

Prestasi airfoil secara umum dipengaruhi oleh dua hal, yaitu (Abbort, Ira H., Von Doenhoff, Albert E., 1959) :

- Geometri airfoil itu sendiri

- Kondisi operasional, dalam hal ini adalah bilangan *Reynolds* dan bilangan *Mach*. Kedua parameter tersebut secara matematika masing - masing dinyatakan dalam bentuk :

$$Re = \frac{\rho Vc}{\mu} \quad (2-3)$$

$$M = \frac{V}{a} \quad (2-4)$$

$$M = \frac{V}{a} \quad (2-4)$$

Keterangan (dalam satuan SI):

Re = bilangan *Reynolds*

c = *chord*

u = viskositas udara

M = bilangan *Mach*

A = kecepatan suara

Beban bending aksial yang harus mampu ditahan oleh pangkal rotor (*hub*) adalah akumulasi dari bending aksial di sepanjang sudu. Selain menggunakan penampang sudu yang tebal, pangkal rotor (*hub*) dapat juga diperkuat dengan cara menggunakan sudu dengan puntiran.

3 HASIL PENELITIAN

3.1 Parameter Utama

Hubungan antara daya keluaran, kecepatan angin nominal, kecepatan putar nominal rotor, dan diameter rotor secara eksplisit telah ditunjukkan dalam persamaan (2-1) dan (2-2). Asumsi yang digunakan untuk menyusun parameter awal dalam penelitian ini antara lain :

- Koefisien daya, $cp = 0,3 - 0,4$
- *Tip Speed Ratio*, $A = 6 - 10$
- Rugi - rugi daya sekitar 14 % sehingga daya rotor yang diperlukan menjadi sekitar 350 kW

Dengan menggabungkan kedua persamaan dan ketiga asumsi tersebut, maka parameter utama rotor 350 kW dapat dilihat pada Tabel 3-1 :

Tabel 3-1: PARAMETER UTAMA ROTOR

Kec. Angin Rancangan	Diameter	Kec. Putar Rancangan
(m/det)	(m)	(RPM)
6	92 - 106	6 - 12
8	60 - 69	13 - 26
10	43 - 49	23 - 45
12	32 - 37	37 - 71

Kecepatan angin rata-rata di Indonesia tergolong cukup kecil sehingga kecepatan angin rancangan sebaiknya dipilih serendah mungkin. Konsekuensinya adalah turbin angin akan memerlukan diameter rotor yang sangat besar. Dengan mempertimbangkan kedua aspek tersebut, maka kecepatan angin rancangan dipilih sebesar 10 m/det.

Seperti yang telah dijelaskan dalam Parameter Utama bahwa rugi-rugi daya (*losses*) dipilih sebesar 14% sehingga daya rotor sebenarnya bukan 300 kW melainkan 350 kW. Tabel 3-1 menunjukkan bahwa untuk menghasilkan daya 350 kW pada kecepatan angin 10 m/det, maka diameter rotor yang bersesuaian adalah antara 43 sampai dengan 49 m. Dalam kegiatan perancangan ini diameter rotor dipilih sebesar 45 m.

Kecepatan angin rancangan dan diameter rotor mempengaruhi daerah kerja kecepatan putar rotor. Tabel 3-1 menunjukkan bahwa daerah kerja kecepatan putar rotor rancangan adalah 23 sampai dengan 45 RPM. Dalam penelitian ini kecepatan putar rancangan dipilih sebesar 35 RPM. Kecepatan putar rotor dipilih agak tinggi untuk meminimalisasi perbandingan antara kecepatan putar rotor dan generator.

Kesimpulan ketiga paragraf di atas dapat ditulis ulang sebagai berikut :

- Kecepatan angin rancangan,
- $V = 10$ m/det,
- Kecepatan putar nominal,
- $a = 35$ RPM,
- Diameter rotor,
- $D = 45$ m,
- *Tip Speed Ratio*,
- $A = 8,24$,

Hasil rancangan berupa geometri sudu selengkapnya disajikan dalam paragraf selanjutnya.

3.2 Geometri Sudu

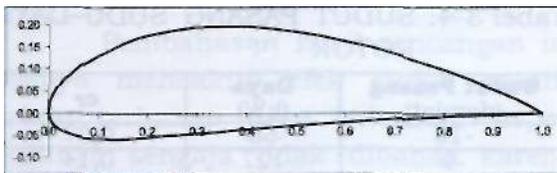
Geometri sudu untuk SKEA 300 kW dalam perancangan ini dipilih sebagai berikut:

- Jumlah sudu, $B = 3$,
- Diameter rotor, $D = 45$ m,
- Diameter pangkal, $D_{hub} \sim 11$ m,
- Panjang *chord* di pangkal, $c_{roof} = 1,5$ m,
- Panjang *chord* di ujung, $c_{tip} = 0,5$ m (distribusi *chord* linier),
- Puntiran (linier) = 15 derajat,
- Penampang
NACA 4424 (bagian pangkal sudu)
NACA 4418 (bagian *midspan*)
NACA 4412 (bagian ujung sudu)

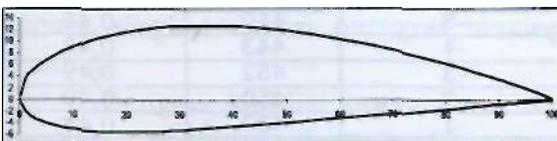
Dalam penelitian ini geometri sudu sengaja dipilih terlebih dahulu. Setelah prestasi airfoil dihitung atau disimulasi, maka dengan memvariasikan sudut pasang sudu akan diketahui apakah sudu mampu menghasilkan 350 kW atau tidak.

3.3 Airfoil

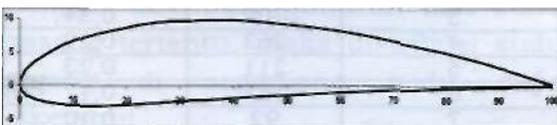
Seperti yang telah disebutkan pada Geometri Sudu bahwa airfoil yang digunakan sebagai penampang sudu adalah NACA 4424, 4418, dan 4412. Bentuk ketiga airfoil tersebut dapat dilihat dalam Gambar 3-1, 3-2, dan 3-3.



Gambar 3-1: Geometri NACA 4424



Gambar 3-2: Geometri NACA 4418



Gambar 3-3: Geometri NACA 4412

Dengan menggunakan persamaan (2-3) dan (2-4) dan dengan menggunakan hasil dari Parameter Utama dan Geometri Sudu, maka distribusi airfoil, bilangan *Reynolds*, dan bilangan *Mach* di sepanjang sudu dapat disusun sebagai berikut :

Tabel 3-2: DISTRIBUSI AIRFOIL, BILANGAN *REYNOLDS*, DAN BILANGAN *MACH*

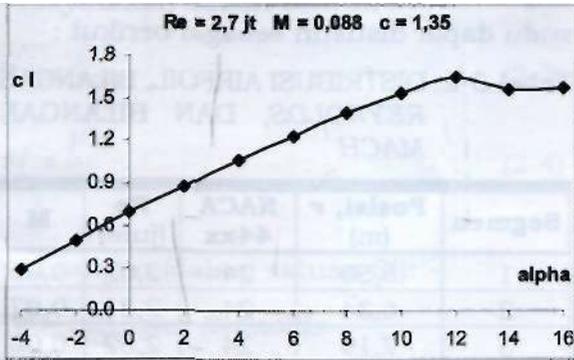
Segmen	Posisi, r (m)	NACA 44xx	Re (juta)	M
1	5,50	24	2,07	0,06
2	6,34	24	2,31	0,07
3	7,19	24	2,52	0,08
4	8,04	24	2,72	0,09
5	8,89	24	2,90	0,10
6	9,74	24	3,05	0,10
7	10,59	24	3,19	0,11
8	11,44	18	3,30	0,12
9	12,30	18	3,39	0,13
10	13,15	18	3,46	0,14
11	14,00	18	3,51	0,15
12	14,85	18	3,54	0,16
13	15,70	18	3,54	0,17
14	16,55	18	3,53	0,18
15	17,40	12	3,49	0,19
16	18,25	12	3,43	0,20
17	19,10	12	3,35	0,21
18	19,95	12	3,25	0,21
19	20,80	12	3,13	0,22
20	21,65	12	2,99	0,23
21	22,50	12	2,82	0,24

Prestasi ketiga airfoil di atas dihitung sesuai dengan kondisi operasionalnya. Seperti yang telah dijabarkan dalam Tabel 3-2, maka airfoil NACA 4424 digunakan untuk segmen 1- 7, NACA 4418 untuk segmen 8 - 14, dan NACA 4412 untuk segmen 15 - 21. Kondisi operasional airfoil dipilih di setiap pertengahan segmennya (Tabel 3-3).

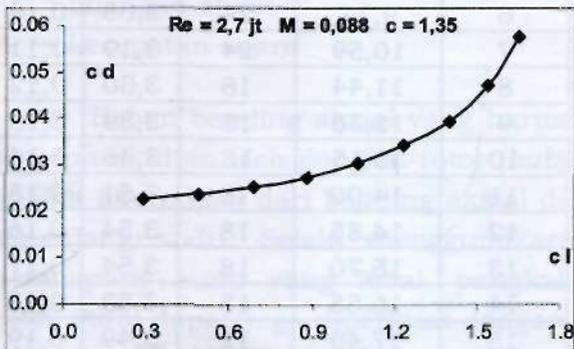
Tabel 3-3: PEMILIHAN KONDISI OPERASIONAL AIRFOIL

Airfoil	Segmen	Posisi, r(m)	Re (juta)	M
NACA 4424	4	8,04	2,72	0,09
NACA 4418	11	14,00	3,51	0,15
NACA 4412	18	19,95	3,25	0,21

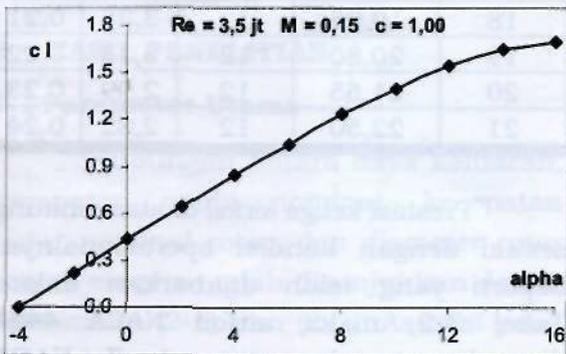
Prestasi airfoil dihitung dan disimulasikan menggunakan salah satu perangkat lunak berbasis CFD. Hasilnya seperti pada Gambar 3-4a, 3-4b, 3-5a, 3-5b, 3-6a, dan 3-6b.



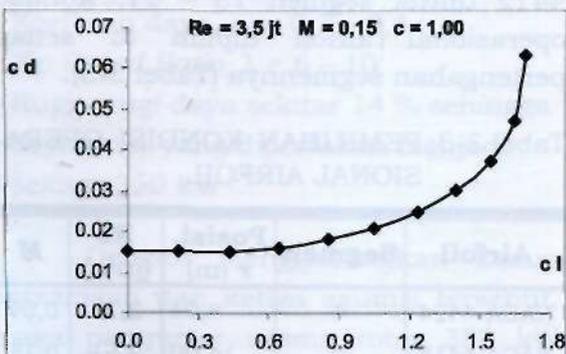
Gambar 3-4a: Kurva $\alpha - c_l$ NACA 4424



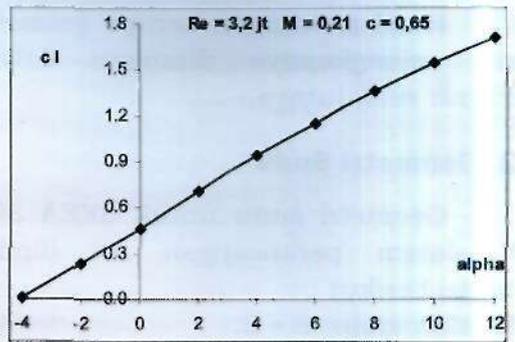
Gambar 3-4b: Kurva $c_l - c_d$ NACA 4424



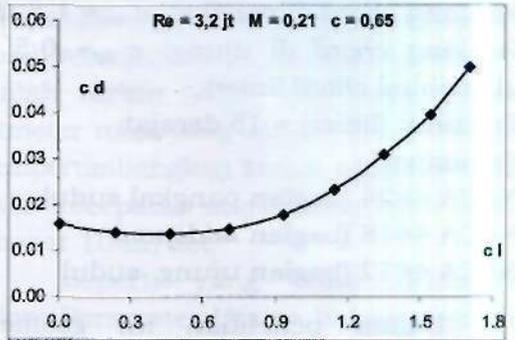
Gambar 3.5.a : Kurva $\alpha - c_l$ NACA 4418



Gambar 3-5b: Kurva $c_l - c_d$ NACA 4418



Gambar 3-6a: Kurva $\alpha - c_l$ NACA 4412



Gambar 3-6b: Kurva $c_l - c_d$ NACA 4412

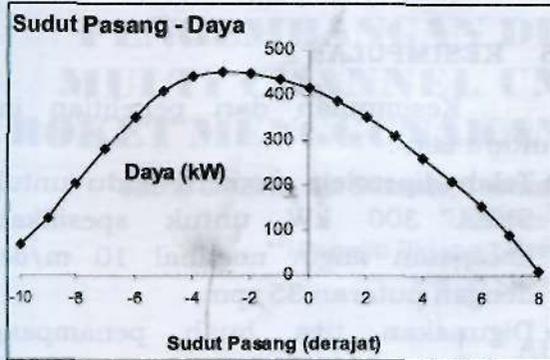
Karakteristik aerodinamika airfoil digunakan untuk menghitung daya dan karakteristik sudu.

3.4 Sudut Pasang Sudu

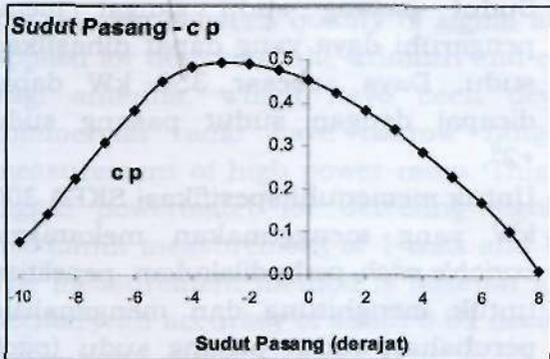
Setelah kondisi operasional dan geometri sudu ditentukan, dan setelah karakteristik aerodinamika airfoil dihitung, maka sudut pasang sudu dapat dihitung. Hubungan sudut pasang sudu terhadap daya yang dapat dihasilkan oleh rotor ditunjukkan dalam Tabel 3-4 dan Gambar 3-7a, dan 3-7b.

Tabel 3-4: SUDUT PASANG SUDU-DAYA ROTOR

Sudut Pasang (derajat)	Daya (kW)	C_p
-10	68	0,07
-9	127	0,14
-8	203	0,22
-7	281	0,31
-6	351	0,38
-5	410	0,45
-4	443	0,48
-3	452	0,49
-2	450	0,49
-1	437	0,48
0	416	0,45
1	386	0,42
2	351	0,38
3	309	0,34
4	263	0,29
5	211	0,23
6	155	0,17
7	92	0,10
8	10	0,01



Gambar 3-7a: Sudut pasang - daya rotor



Gambar 3-7b: Sudut pasang - CP rotor

Berdasarkan Tabel 3-4 dan Gambar 3-7a, dan 3-7b terlihat bahwa daya rotor sebesar 350 kW dapat dicapai dengan sudut pasang sudu sebesar -6 dan +2 derajat. Sudut pasang sudu yang besar dapat menghasilkan torsi awal yang besar pula sehingga rotor mempunyai kemampuan *start - up* yang semakin baik. Dengan demikian dipilih sudut pasang sudu sebesar +2 derajat.

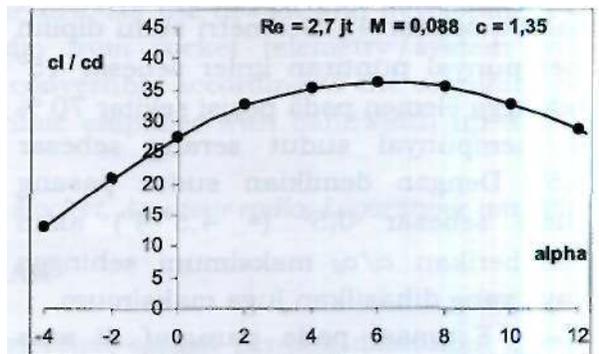
4 PEMBAHASAN

Pembahasan hasil rancangan ini hanya mencakup efek sudut pasang sudu terhadap daya keluaran. Aspek lainnya sengaja tidak dibahas karena sebagian besar merupakan parameter yang ditentukan dan telah dijelaskan secara singkat dalam paragraf masing-masing.

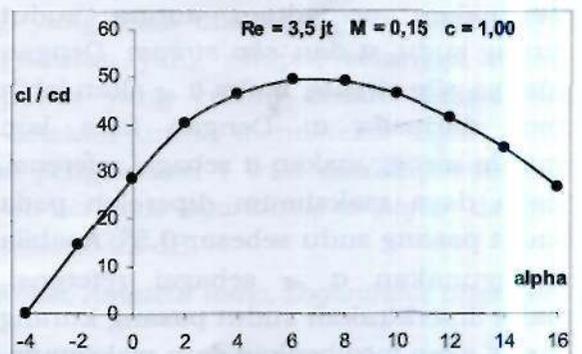
Dengan kondisi operasional dan geometri tertentu, daya sudu sangat dipengaruhi oleh sudut pasang sudu. Dengan distribusi puntiran dan sudut pasang tertentu, maka distribusi sudut serang di sepanjang sudu dapat diketahui.

Pada kecepatan angin dan kecepatan putar tertentu, torsi yang dihasilkan sudu sangat dipengaruhi oleh prestasi airfoil sebagai penampang sudu. Semakin besar perbandingan antara gaya angkat dan gaya hambat (c_l/c_d) di setiap airfoil, maka torsi yang dihasilkan juga akan semakin besar.

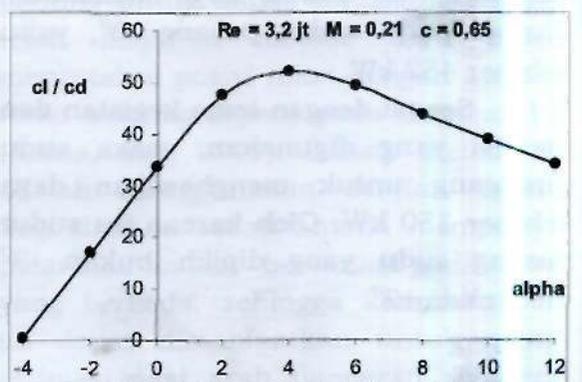
Pada bilangan *Reynolds* dan bilangan *Mach* tertentu, airfoil mempunyai daerah sudut serang, α tertentu yang menghasilkan c_l/c_d yang maksimal. Hubungan antara α dan c_l/c_d untuk NACA 4424, 4418, dan 4412 dapat diperoleh, dan hasilnya ditunjukkan pada Gambar 4-4, 4-5, dan 4-6.



Gambar 4-4: Kurva α - c_l/c_d NACA 4424



Gambar 4-5: Kurva α - c_l/c_d NACA 4418



Gambar 4-6: Kurva α - c_l/c_d NACA 4412

Dari ketiga kurva di atas dapat dilihat bahwa setiap airfoil mempunyai daerah a tertentu yang dapat menghasilkan c_j/c_d yang tinggi.

Analisis sudu dapat dimulai secara 2-D. Prestasi di setiap elemen di sepanjang sudu dapat diwakilkan oleh prestasi pada sebuah elemen, yaitu elemen yang berada pada posisi sekitar 70% dari jari-jari rotor (Glauert, H., 1935; Gostelow, 1984]. Tabel 3-2 menunjukkan bahwa elemen tersebut adalah elemen nomor 15 dimana profilnya adalah NACA 4412.

Pada kondisi operasional airfoil NACA 4412 mempunyai c_i/c_d maksimum pada a sekitar 4° . Geometri sudu dipilih mempunyai puntiran linier sebesar 15° sehingga elemen pada posisi sekitar 70 % R mempunyai sudut serang sebesar $4,5^\circ$. Dengan demikian sudut pasang sudu sebesar $0,5^\circ$ ($= 4,5^\circ - 4^\circ$) akan memberikan c_i/c_d maksimum sehingga daya yang dihasilkan juga maksimum.

Estimasi pada paragraf di atas masih belum memperhitungkan adanya *slip stream*. Sudut serang efektif, a_{eff} merupakan perpaduan antara sudut serang sudu, a dan *slip stream*. Dengan adanya *slip stream*, maka a_{eff} akan lebih kecil daripada a . Dengan kata lain apabila menggunakan a sebagai referensi, maka daya maksimum diperoleh pada sudut pasang sudu sebesar $0,5^\circ$. Apabila menggunakan a_{eff} sebagai referensi, maka diperkirakan sudut pasang kurang dari 0° akan memberikan daya maksimum. Hasil perhitungan dan lam Tabel 3-4 menunjukkan bahwa daya maksimum dicapai pada sudut pasang -3° , yaitu sebesar 452 kW.

Sesuai dengan tema kegiatan dan asumsi yang digunakan, maka sudu dirancang untuk menghasilkan daya sebesar 350 kW. Oleh karena itu sudut pasang sudu yang dipilih bukan -3° melainkan $+2^\circ$.

5 KESIMPULAN

Kesimpulan dari penelitian ini antara lain :

- Telah diperoleh geometri sudu untuk SKEA 300 kW untuk spesifikasi kecepatan angin nominal 10 m/det dengan putaran 35 rpm,
- Digunakan tiga buah penampang airfoil dengan distribusi penampang di sepanjang sudu,
- Sudut pasang sudu sangat mempengaruhi daya yang dapat dihasilkan sudu. Daya sebesar 350 kW dapat dicapai dengan sudut pasang sudu $+2^\circ$,
- Untuk memenuhi spesifikasi SKEA 300 kW yang menggunakan mekanisme *variable pitch*, perlu dilakukan penelitian untuk menghitung dan menganalisis perubahan sudut pasang sudu (*pitch angle*) yang diperlukan pada kondisi kecepatan putar konstan dengan kecepatan angin yang bervariasi

DAFTAR RUJUKAN

- Abbort, Ira H., Von Doenhoff, Albert E., 1959. *Theory of Wing Section*, Dover Publications Inc., New York.
- Anderson, John D., 1985. *Fundamentals of Aerodynamics*, Mc. Grawhill 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.
- Tony Burton, et. al. 2001. *Wind Energy Hand Book*, John Willey & Sons.
- Manual *GAMBIT*.
- Manual *FLUENT*