

PENELITIAN DAN RANCANGAN OPTIMAL TURBIN PENGGERAK TEROWONGAN ANGIN SUBSONIK SIRKUIT TERBUKA LAPAN

Sulistyo Atmadi
Peneliti Pusat Teknologi Dirgantara Terapan. LAPAN

ABSTRACT

i

In an effort to improve flow condition and flow speed up to 50 m/s inside LAPAN Subsonic Wind Tunnel, an existing power system and turbine has to be redesigned. Specifications for these requirements have been determined and calculated for the required power and aerofoil type and their dimensions. A method based "free vortex design" was used to get optimal result. The optimisation result produced a turbine with 3 m diameter, with 10 blades, 1.5 m hub diameter. A D RAF PROPELLER aerofoil type was used to produce 230 HP power and 1824 Nm torque, with an efficiency 89 %. This result was considered both technically and economically.

ABSTRAK

Untuk memperbaiki kondisi aliran serta meningkatkan kecepatan aliran di terowongan angin subsonik LAPAN agar mencapai kecepatan 50 m/det, akan dilakukan rancangan kembali sistem daya serta turbin yang akan digunakan, untuk itu dilakukan penelitian untuk memperoleh daya yang dibutuhkan serta tipe *airfoil* yang digunakan serta dimensi turbin lainnya, sehingga diperoleh hasil yang optimal. Turbin diletakkan pada posisi diameter dinding terowongan 3.1 m. Metoda perancangan yang digunakan adalah metoda *free vortex design*. Dengan diameter turbin 3 m, jumlah sudu 10 dan diameter hub 1.5 m (0.5 diameter turbin), dan airfoil yang digunakan tipe D RAF Propeler, diperoleh power yang dibutuhkan 230 HP dengan torsi 1824 Nm, dan dengan efisiensi akhir 89 %, Hasil ini adalah hasil optimal dari sisi teknis maupun ekonomis.

1 PENDAHULUAN

Perancangan turbin penggerak terowongan angin merupakan proses analisis dengan prosedur iterasi.

Perancangan dimulai dengan asumsi konfigurasi geometri dan asumsi nilai beberapa parameter yang tidak diketahui.

Parameter rancangan lainnya ditentukan berdasarkan teori yang digunakan dan relasi persamaan-persamaan fisik yang berlaku di bidang rekayasa dan perancangan.

Asumsi perancangan bertujuan untuk memodelkan sistem yang akan dirancang dan meminimalisasi parameter-parameter yang tidak signifikan terhadap konfigurasi rancangan akhir.

Penentuan asumsi perancangan didasarkan atas rekomendasi literatur dan pengalaman-pengalaman empirik di bidang perancangan turbin penggerak terowongan angin.

Untuk menganalisis aliran pada terowongan angin yang akan dirancang, digunakan pendekatan geometri dua dimensi. Pendekatan dua dimensi ini dinilai telah cukup dalam perancangan terowongan angin dan telah terbukti cukup akurat.

Asumsi yang lain adalah efisiensi turbin penggerak dan diameter *hub* terowongan angin. Efisiensi yang akan dirancang diasumsikan konstan 96%. Nilai 96% ditentukan dengan anggapan bahwa penentuan efisiensi rancangan harus setinggi mungkin dengan harapan

efisiensi sebenarnya juga dapat dicapai setinggi mungkin.

Diameter *hub* sebesar 0.5 diameter dinding terowongan angin pada posisi turbin penggerak diletakkan, ditentukan berdasarkan atas pertimbangan efisiensi, ekonomi, dan rekomendasi data literatur.

Secara teoritis, efisiensi maksimum turbin penggerak terowongan angin dicapai pada diameter *hub* 0.6 kali diameter turbin penggerak. Pada diameter *hub* ini kecepatan masuk turbin penggerak akan relatif lebih tinggi sehingga dibutuhkan RPM motor yang tinggi juga untuk mengimbangi laju aliran masuk udara.

Makin tinggi RPM, makin kecil gaya sentrifugal yang akan terjadi. Hal ini menyebabkan asumsi teori perancangan turbin penggerak yang akan digunakan hampir dapat dipenuhi. Kelemahan dari diameter *hub* yang besar ini adalah diperlukan konstruksi *nacelle* dan *hub* yang besar sehingga biaya yang diperlukan akan tinggi.

Berdasarkan pertimbangan di atas, maka ditentukan diameter yang digunakan adalah 0.5 diameter turbin penggerak. Pada diameter ini, gaya sentrifugal yang terjadi akan tetap kecil dan juga ruang yang dibutuhkan untuk konstruksi root dari sudu turbin penggerak relatif cukup.

2 DATA PENELITIAN DAN RANCANGAN

2.1 Data Terowongan Angin Subsonik

Terowongan angin Subsonik yang akan diperbaiki kondisi aliran dan kecepatan udaranya adalah terowongan angin subsonik yang ada di LAPAN, dengan konfigurasi seperti terlihat pada Gambar 2-1, 2-2, 2-3 dan 2-4.

Kondisi saat ini terowongan angin dalam keadaan rusak, kecepatan udara di dalam terowongan sebelum rusak 30 m/det. Dalam rancangan ini akan di tingkatkan kecepatannya menjadi 50 m/det.

2.2 Data Rancangan

Berdasarkan asumsi-asumsi perancangan yang telah dijabarkan sebelumnya, maka diperlukan data pendukung yang

dibutuhkan dalam perancangan geometri sudu terowongan angin. Data pendukung ini adalah data geometri *airfoil* yang digunakan beserta grafik karakteristik aerodinamiknya.

Penentuan *airfoil* yang akan digunakan dalam perancangan turbin penggerak terowongan angin ditentukan berdasarkan nilai efisiensi yang dikehendaki. Nilai efisiensi berhubungan dengan nilai *Lift to Drag Ratio (L/D)* dan nilai *advance ratio* yang dapat dilihat dari grafik pada Gambar 2-5.

Pembahasan sebelumnya menetapkan efisiensi turbin penggerak yang akan dicapai adalah 96%. Berdasarkan grafik di atas, efisiensi 96% dapat dicapai pada kondisi nilai *L/D* diatas 50. Nilai *L/D* di atas 50 hanya dapat dicapai oleh *Infinite Airfoil* (*Airfoil* dengan *span* tidak terhingga) dan bergeometri tipis. Kondisi ini dapat terpenuhi oleh *airfoil* jenis RAF Propeller. Syarat *infinite span* dapat didekati dengan membuat *end-plate* sudu turbin penggerak. Kondisi *end-plate* ini menyebabkan pengaruh tiga dimensi sudu dapat direduksi menjadi dua dimensi.

Koordinat *airfoil* Type D RAF Propeller dapat dilihat pada Tabel 2-1.

Tabel 2-1: KOORDINAT AIRFOIL TYPE DRAF PROPELLER

X koordinat	Y koordinat	i
0.000	0.014	
0.013	0.037	
0.025	0.054	
0.050	0.078	
0.075	0.093	
0.100	0.103	j
0.150	0.117	
0.200	0.125	I
0.300	0.129	!
0.400	0.127	
0.500	0.122	
0.600	0.112	!
0.700	0.096	
0.800	0.074	
0.900	0.047	
0.950	0.033	
1.000	0.010	

Geometri airfoil Type D RAF Propeller dapat dilihat pada Gambar 2-6 Sedangkan karakteristik aerodinamika pada beberapa bilangan Reynolds dapat dilihat pada Gambar 2-7.

3 METODOLOGI PERANCANGAN

Metode perancangan turbin penggerak terowongan angin yang akan dijabarkan merupakan metode berdasarkan *free vortex design*. Metode ini merupakan metode yang dijabarkan pertama kali oleh Wallis tahun 1944.

Teori ini merupakan pendekatan perancangan turbin penggerak terowongan angin secara dua dimensi. Teori ini mengasumsikan tidak adanya celah antara ujung sudu dan dinding terowongan angin serta tidak adanya aliran arah radial akibat adanya gaya sentrifugal turbin penggerak.

Dengan adanya asumsi ini, maka akan ada penurunan efisiensi turbin penggerak pada keadaan sesungguhnya. Penurunan ini berkisar antara 3% hingga 5%.

Pembahasan rinci penurunan persamaan teori vortex dan perancangan sudu turbin penggerak (Alan Pope, John Harper, 1966, dan G.N. Patterson, July 1944). Pada bagian ini hanya akan dibahas langkah demi langkah penentuan nilai parameter perancangan sudu turbin penggerak terowongan angin. Langkah-langkah tersebut adalah sebagai berikut:

- a. menentukan efisiensi (TK) yang diinginkan dan kecepatan maksimum yang akan dicapai;
- b. menentukan nilai *advance ratio* dan *Lift to Drag Ratio* yang sesuai dengan nilai efisiensi (η_f) yang telah ditetapkan dari grafik pada Gambar 2-5 dan;
- c. menghitung nilai n dari hubungan persamaan sebagai berikut:

$$n = \frac{u}{jD} \dots\dots\dots (3-1)$$

Keterangan:

- u = kecepatan masuk turbin penggerak
- D = diameter terowongan angin pada posisi turbin penggerak diletakkan

Kecepatan udara masuk turbin penggerak terowongan angin dapat diperoleh dari persamaan kontinuitas yang dirumuskan sebagai berikut:

$$A_s V_s = A_f V_f \dots\dots\dots (3-2)$$

Keterangan:

- s = seksi Uji
- f = turbin penggerak

Setelah nilai n diperoleh, nilai kecepatan sudut dan kecepatan pada ujung turbin penggerak dapat dihitung dengan persamaan sebagai berikut:

$$\Omega = 2\pi n \dots\dots\dots (3-3)$$

$$V_{tip} = \Omega R \dots\dots\dots (3-4)$$

Keterangan:

- Ω = putaran sudut
- V_{tip} = kecepatan pada ujung sudu turbin penggerak.
- R = jari-jari dinding terowongan angin pada posisi turbin penggerak diletakkan

Kecepatan pada ujung turbin penggerak diusahakan tidak melebihi bilangan mach 0.3 untuk menghindari pengaruh kompressibilitas.

Perhitungan terhadap koefisien energi *losses* sesuai dengan persamaan berikut:

$$k = \frac{\eta_t}{ER} \left(\frac{A_f - A_b}{A_i} \right)^2 \dots\dots\dots (3-5)$$

Keterangan:

- k = koefisien *losses*
- η_t = efisiensi terowongan angin, atau untuk kasus terowongan angin terbuka efisiensi terowongan angin memiliki nilai yang sama dengan efisiensi turbin penggerak
- ER = energi Rasio

Penentuan nilai energi rasio Terowongan Angin Subsonic LAPAN, dibahas pada dokumen penelitian lain yang telah dilakukan.

Langkah selanjutnya adalah penentuan geometri sudut *pitch* dan distribusi panjang *chord* sepanjang *span* sudu sesuai dengan posisi seksi airfoil yang ditentukan. Dalam perancangan turbin penggerak terowongan angin Lapan, sudu turbin penggerak dibagi atas enam seksi airfoil, di mana tiap seksi airfoil ini adalah: 0.5D, 0.6D, 0.7D, 0.8D, 0.9D, D.

Gambar rinci penampang airfoil tiap seksi dapat dilihat pada Gambar 3-1 dan pembagian seksi airfoil sudu turbin penggerak, dapat dilihat pada Gambar 3-2.

Untuk penentuan geometri sudu yang berupa distribusi sudut *pitch* dan distribusi panjang *chord*, diterapkan persamaan-persamaan berikut ini pada tiap seksi airfoil yang telah ditetapkan sebelumnya.

Nilai *x* pada tiap posisi penampang airfoil ditentukan dengan persamaan:

$$x = \frac{r}{R} \tag{3-6}$$

Keterangan:

r = jari-jari posisi penampang airfoil yang akan dianalisis.

Sesuai dengan posisi *x* yang telah ditetapkan sebelumnya, maka dapat ditulis kembali nilai *x*, yaitu 0.5D, 0.6D, 0.7D, 0.8D, 0.9D, dan D (D= diameter Turbin penggerak).

Berikutnya, nilai *advance ratio* lokal (*j*) ditentukan dengan persamaan berikut:

$$j = \frac{J_{sp}}{x} \tag{3-7}$$

Keterangan:

J_{sp} = Nilai *j* yang ditetapkan pada awal iterasi perancangan.

Nilai *e* ditentukan dengan persamaan berikut:

$$e = \frac{kj}{2\pi\eta_1} \tag{3-8}$$

Keterangan:

e = rotasi (elemen kecepatan arah *y*)

Nilai *L/D* ditentukan dengan persamaan berikut:

$$\eta_f = \frac{\frac{j}{\pi} \left(\frac{L}{D} - \frac{j}{\pi} \right) + \frac{1}{2} \frac{ej}{\pi} \left(1 - \frac{1}{2} \frac{ej}{\pi} \right)}{\frac{L}{D} \frac{j}{\pi} + 1 - \frac{1}{2} \frac{ej}{\pi}} \tag{3-9}$$

Nilai ϕ ditentukan dengan persamaan berikut:

$$\tan \phi = \frac{j}{\pi} \frac{1}{\left(1 - \frac{1}{2} \frac{ej}{\pi} \right)} \tag{3-10}$$

Keterangan:

ϕ = Sudut pasang root sudu

Menentukan nilai *c_f* perkiraan dari grafik Gambar 3-3.

Gunakan nilai *L/D* yang telah diperoleh dan Bilangan *Re* perkiraan. Untuk bilangan *Re* perkiraan dapat digunakan pendekatan sebagai berikut :

$$c_{\text{perkiraan}} = \frac{\pi D_f}{2N} \tag{3-11}$$

$$v = \sqrt{u^2 + \omega R} \tag{3-12}$$

$$Re_{\text{perkiraan}} = \frac{\rho v c_{\text{perkiraan}}}{\mu} \tag{3-13}$$

Keterangan:

N : Jumlah sudu yang ditetapkan

ρ : Kerapatan udara (Sea level = 1.225 kg/m³)

μ : Viskositas udara

v : Kecepatan udara melalui sudu

Menentukan nilai *gradient thrust* $\left(\frac{dT_c}{dx} \right)$

dengan persamaan berikut :

$$\frac{dT_c}{dx} = (k + k_s - e^2)x \tag{3-14}$$

Menentukan nilai bilangan Reynods yang lebih teliti dengan persamaan sebagai berikut:

$$\frac{dT_c}{dx} = \frac{yC_i}{\sin^2 \phi} \dots\dots\dots (3-15)$$

$$y \cong \frac{yC_i}{c_{lapprox} \cos \phi} \dots\dots\dots (3-16)$$

$$c_{lapprox} = \frac{\pi Ry_{approx}}{N} \dots\dots\dots (3-17)$$

$$RN = \left(\frac{\rho}{\mu} \right) cW \dots\dots\dots (3-18)$$

Keterangan:

W : Kecepatan udara melewati sudu

Dengan nilai L/D dan Re yang lebih teliti, tentukan kembali nilai c_l , c_d , dan α_0 dari grafik.

Menentukan nilai koefisien thrust (C_t) dan koefisien torsi (C_x) dari persamaan berikut :

$$C_t = c_l \cos \phi - c_{d0} \sin \phi \dots\dots\dots (3-19)$$

$$C_x = c_l \sin \phi + c_{d0} \cos \phi \dots\dots\dots (3-20)$$

Menentukan nilai lebar chord sudu (c) dengan persamaan berikut :

$$c = \frac{\pi Ry}{N} \dots\dots\dots (3-21)$$

Keterangan:

$$y = \frac{dT_c}{dx} \frac{\sin^2 \phi}{C_i} \dots\dots\dots (3-22)$$

Menentukan besar sudut pitch (β) dengan persamaan berikut :

$$\beta = \phi + \alpha_0 \dots\dots\dots (3-23)$$

Menentukan besar koefisien Torsi (Q_c) dengan persamaan berikut :

$$Q_c = \left(\frac{kJ}{\pi \eta_f} \right) (1 - x_0^2) \dots\dots\dots (3-24)$$

Keterangan:

x_0 = Rasio Jari-jari root terhadap jari-jari turbin penggerak.

J = Advance ratio pada ujung sudu

Menentukan Daya luaran (Power Output) dan torsi yang dibutuhkan dari persamaan berikut ini :

$$PowerOutput = udT + \frac{1}{2} \omega dQ \dots\dots\dots (3-25)$$

Keterangan:

$$dT = \frac{1}{2} \rho W^2 c dr NCt \dots\dots\dots (3-26)$$

$$dQ = NC_x \frac{1}{2} \rho W^2 c dr r \dots\dots\dots (3-27)$$

Dari power out yang diperoleh, dapat ditentukan power input yang dibutuhkan :

$$\eta_f = \frac{Power_out}{Power_in} \dots\dots\dots (3-28)$$

Nilai Torsi yang dibutuhkan dapat diperoleh dari persamaan sebagai berikut:

$$Q = \frac{Power_in}{2\pi n} \dots\dots\dots (3-29)$$

4 HASIL DAN PEMBAHASAN

Metodologi perhitungan di atas selanjutnya dapat dikembangkan menjadi sebuah program dengan menggunakan MS Exel atau MATLAB.

Hasil perhitungan geometri sudu *airfoil* yang sesuai dengan metodologi diatas dapat direpresentasikan dengan distribusi sudut *pith* dan distribusi *chord* sepanjang *span* seperti terlihat pada Gambar 4-1.

Dari perhitungan, diperoleh daya yang dibutuhkan adalah 230 Hp. Sedangkan nilai Torsi yang dibutuhkan adalah 1824 Nm.

5 KESIMPULAN

Dengan pemasangan motor penggerak dan turbin pada posisi diameter terowongan angin 3.1 m, maka daya motor 230 Hp dan penggunaan *airfoil* tipe D RAF pada konfigurasi sudu turbin seperti terlihat pada Gambar 5-1 serta diameter hub 0.5 diameter turbin, merupakan hasil rancangan yang optimal baik dari sisi teknis maupun ekonomis untuk memperoleh kecepatan angin rencana 50 m/det.

Efisiensi akhir 89 % adalah efisiensi yang diperoleh dalam lingkup/daerah seperti halnya pada perancangan-perancangan turbin terowongan angin pada umurnya

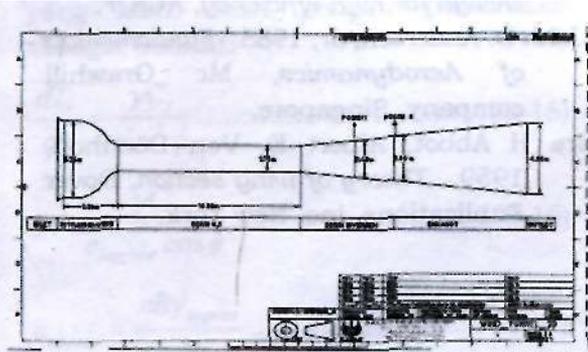
DAFTAR RUJUKAH

Alan Pope, John J. Harper, 1966. *Low Speed Wind Tunnel Testing*, John Wiley & Sons. Inc, New York.

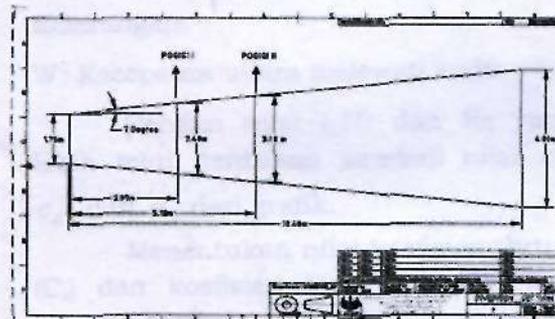
G.N. Patterson, July 1944. *Ducted Fans, Design for high efficiency*, ACA 7.

John D. Anderson, Jr, 1985. *Fundamentals of Aerodynamics*, Mc Grawhill company, Singapore.

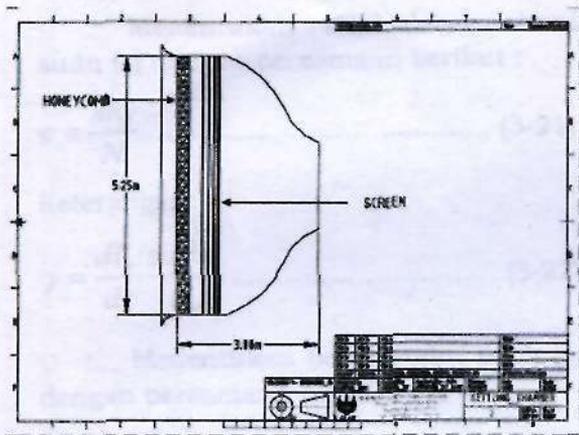
Ira H Abbot, Albert E. Von Doenhoff, 1959. *Theory of wing section*, Dover Publications, inc, New York.



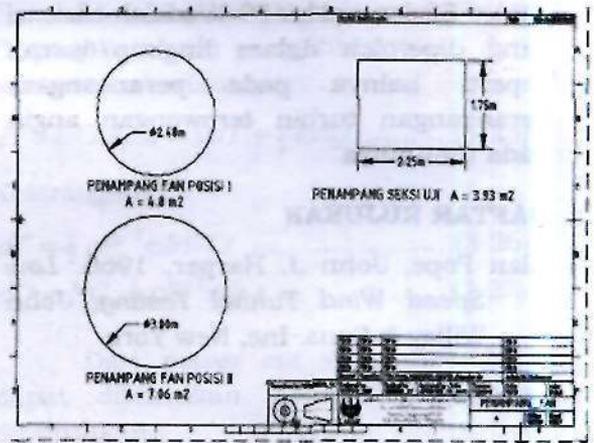
Gambar 2-1: Terowongan angin subsonic LAPAN



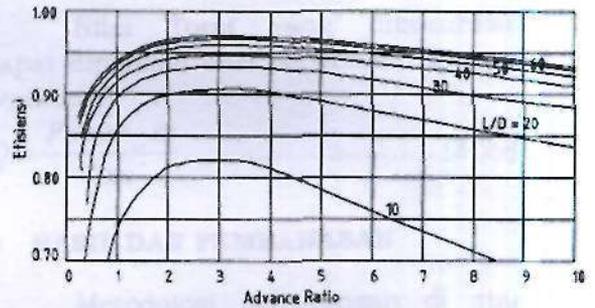
Gambar 2-2: Lokasi penempatan motor dan turbin penggerak



Gambar 2-3: Screen dan Honeycomb pada settling chamber

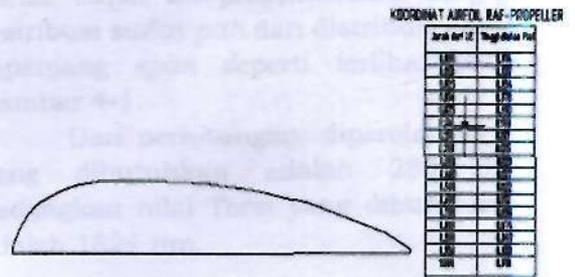


Gambar 2-4: Penampang lokasi penempatan turbin penggerak

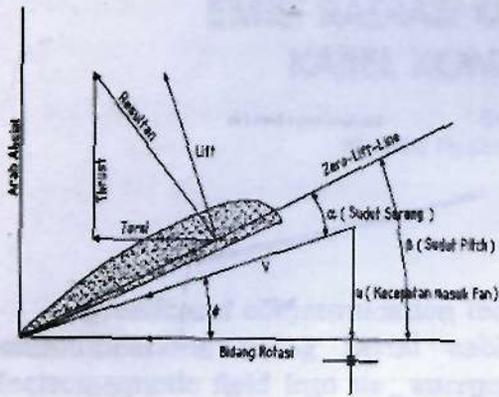


Gambar 2-5: Grafik advance ratio dan lift to drag ratio dengan nilai efisiensi

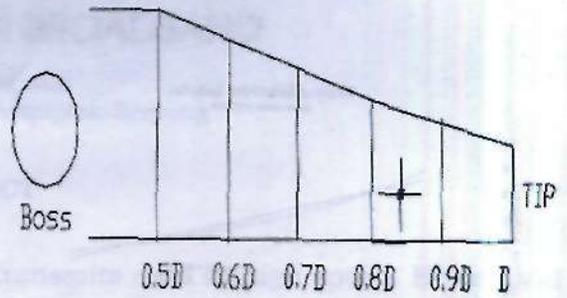
GEOMETRI AIRFOIL RAF PROPELLER TYPE D



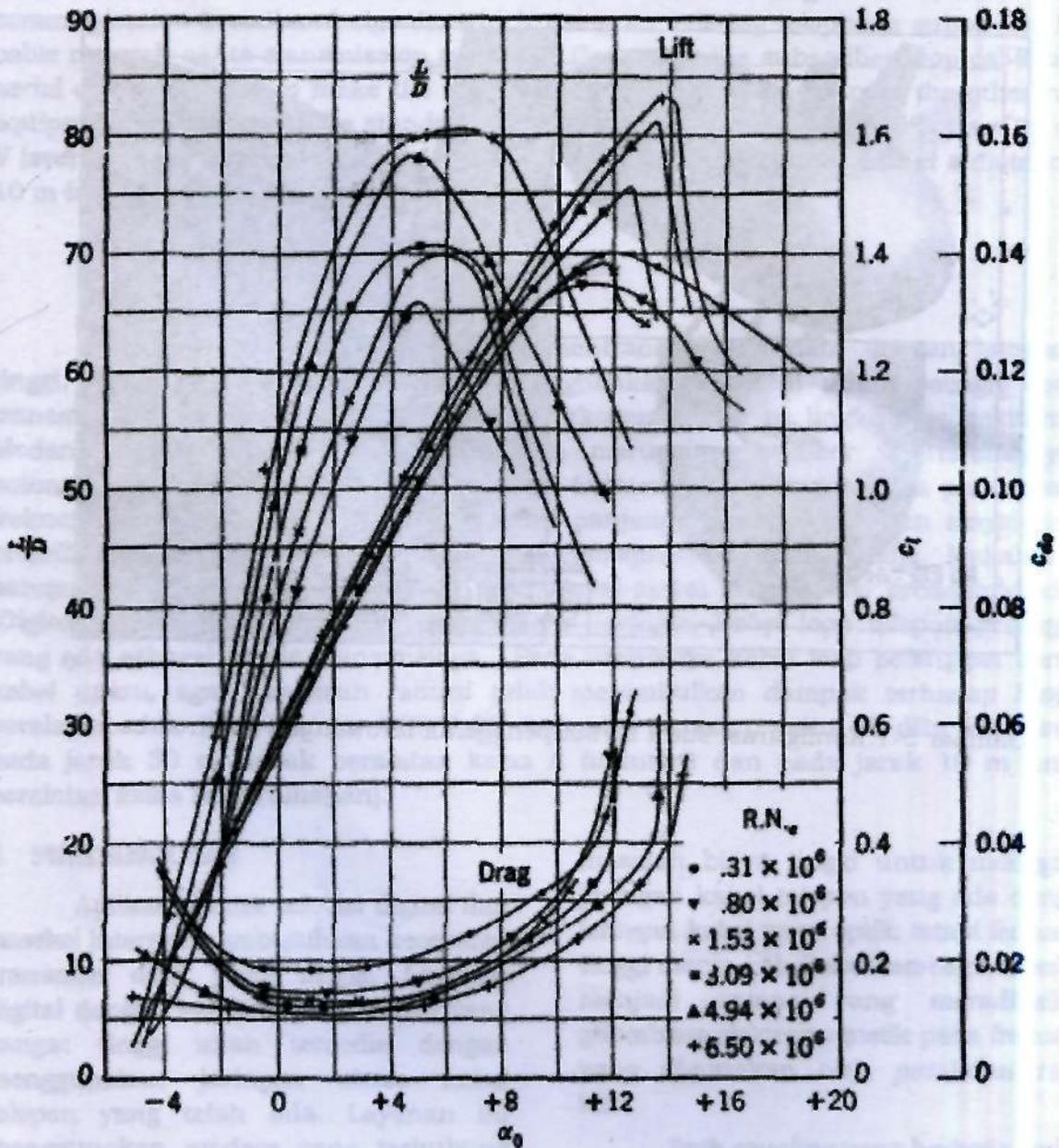
Gambar 2-6: Geometri airfoil RAF propeller tipe D



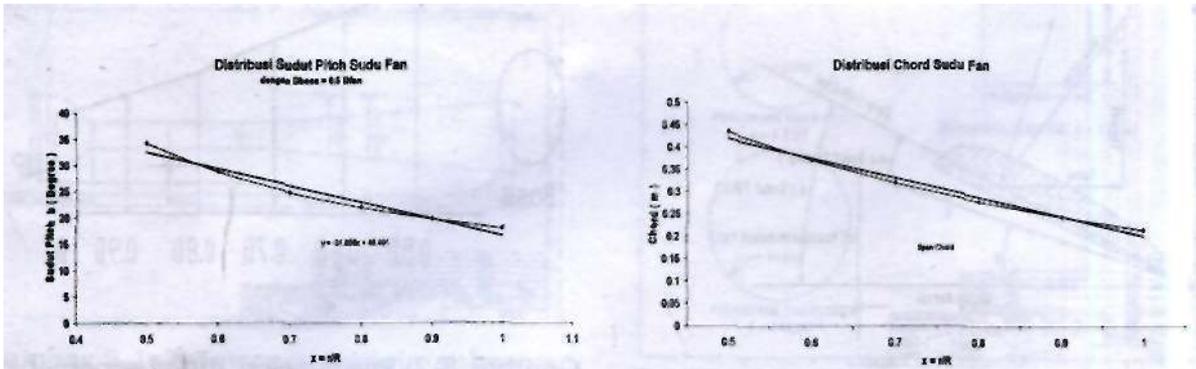
Gambar 3-1: Gambar rinci penampang *airfoil* tiap seksi



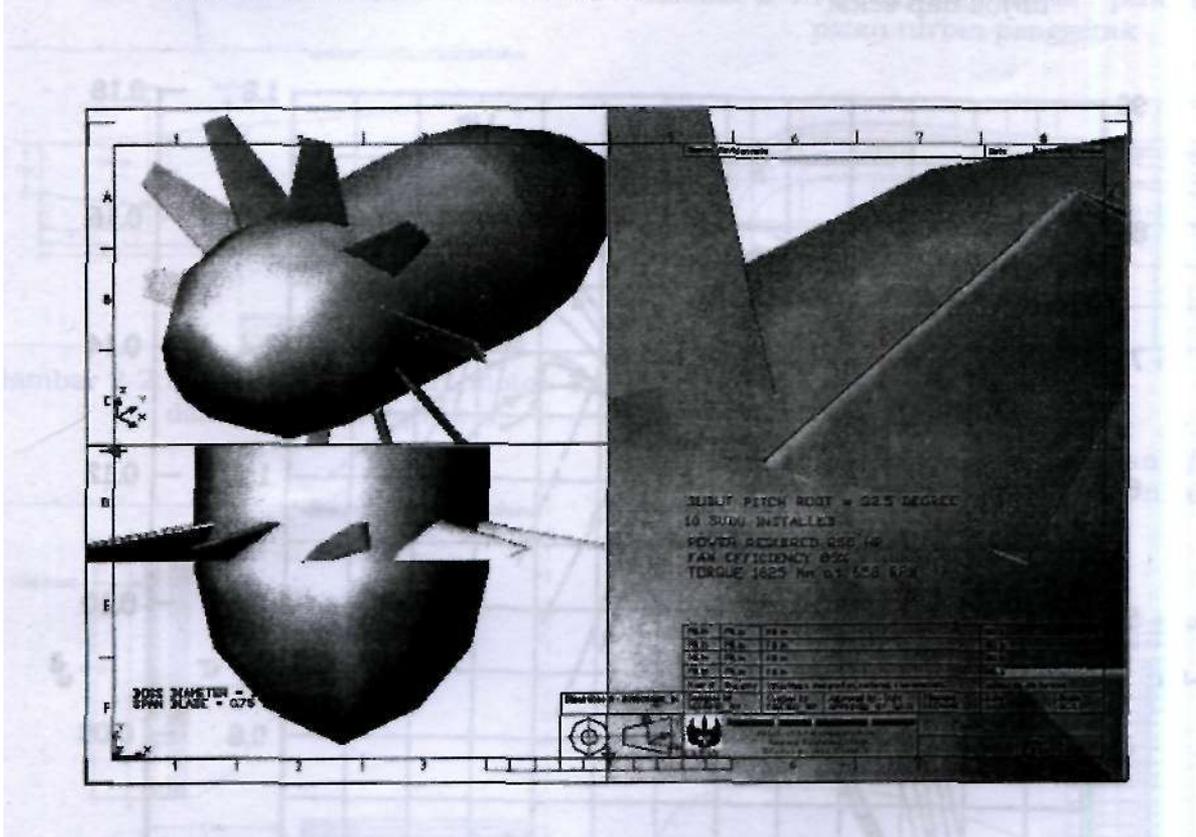
Gambar 3-2: Posisi seksi *airfoil* sepanjang span diameter



Gambar 3-3 : Grafik karakteristik aerodinamik *airfoil* pada beberapa bilangan Reynold



Gambar 4-1 : Distribusi sudut *pitch* dan *chord* turbin penggerak



Gambar 5-1: Konfigurasi sudu turbin penggerak terowongan angin subsonik