

**STUDI AWAL PERANCANGAN  
TURBIN ANGIN HORIZONTAL 3 BLADE 450 WATT  
YANG OPTIMAL UNTUK KONDISI ANGIN DI INDONESIA**

**Sulistyo Atmadi<sup>\*)</sup>  
Bambang Basuno<sup>\*\*)</sup>  
Rachmat Eka Pambudi<sup>\*\*\*)</sup>**

## RINGKASAN

Untuk memperoleh konfigurasi rotor blade yang optimal untuk kondisi angin di Indonesia dikembangkan perangkat lunak perancangan turbine angin. Perangkat dikembangkan dengan mengacu pada power output dan kondisi angin sebagai input dan geometri blade sebagai output. Sebagai studi awal perancangan turbin, perancangan dilakukan dengan mengintroduksi 3 tipe airfoil dan tiga tipe variasi sudut serang efektif sepanjang span sebagai variabel perancangannya. Hasil perancangan yang diperoleh menunjukkan jenis airfoil dan bentuk distribusi sudut serang sangat menentukan prestasi turbin. Hasil ini memberikan landasan yang baik di dalam perancangan turbin angin yang lebih optimal.

## 1. PENDAHULUAN.

Untuk mendapatkan turbin angin yang efisien dalam interval range kecepatan angin yang relatif lebar turbin angin tersebut dilengkapi dengan blade yang mampu mengekstrak energi kinetik semaksimal mungkin dalam range kecepatan tersebut. Banyak faktor geometri dari konfigurasi blade yang sangat berpengaruh atas kemampuan blade tersebut didalam mengekstrak energi kinetik tersebut. Bila kecepatan angin dan kecepatan putaran dari rotor turbin telah dispesifikasikan maka, prestasi turbin angin dari pertimbangan konfigurasi rotor dipengaruhi oleh : jumlah blade, diameter, bentuk platform, distribusi pitch, dan bentuk profil penampang melintangnya [Ref. 1]. Penentuan konfigurasi rotor turbin angin tanpa memberikan cukup banyak batasan, akan membuat penentuan konfigurasi rotor memerlukan banyak proses iterasi. Untuk menghindari hal tersebut, digunakan besaran tip speed ratio  $\lambda$  sebagai salah satu besaran desainya. Untuk keperluan ini digunakan tip speed ratio desain  $\lambda_{des} = 6$ . Dalam pengertian teknologi turbin angin, tip speed ratio  $\lambda_{des} = 6$  termasuk dalam katagori tip speed ratio tinggi. Dalam katagori tersebut, jumlah blade turbin angin horizontal idealnya tidak lebih dari tiga [Ref. 2]. Dasar ini menjadi titik tolak dalam perancangan turbin angin yang dikembangkan, yaitu dengan jumlah blade relatif kecil diharapkan sistem pembangkit menjadi ringan sehingga memperkecil biaya pembuatan menara penyangga turbin. Implikasi lain dari tip speed ratio tinggi, adalah kecepatan efektif aliran yang melalui blade menjadi relatif tinggi. Ini berarti pemanfaatan gaya angkat sebagai komponen gaya utama dalam proses ekstraksi energi kinetik menjadi lebih efisien dibandingkan dengan gaya tahan. Hal ini dapat dipahami, mengingat komponen gaya angkat yang dihasilkan oleh suatu

<sup>\*)</sup> Kepala Pusat Raket dan Satelit. LAPAN

<sup>\*\*)</sup> Staf Lab Aerodinamika - PAU. ITB

<sup>\*\*\*)</sup> Staf Bidang Teknologi Dirgantara Terapan - PUSROSAT. LAPAN

aliran melalui permukaan dengan penampang airfoil dapat memiliki order puluhan kali dibandingkan dengan komponen gaya tahan ( drag ) yang terjadi [ Ref. 3 ].

Prosedure perancangan konfigurasi rotor turbin dilakukan dengan karakteristik aerodinamik 2-D dari masing masing penampang blade diketahui dan distribusi sudut serang efektif sepanjang blade dispesifikasikan. Pendekatan ini akan memberikan hasil distribusi pitch dan chord sepanjang span blade.

Dalam studi perancangan awal ini turbin angin horisontal 3 blade dengan power output 450 watt, berdasarkan 6 design option. Keenam option tersebut sebagai hasil adanya 3 variasi jenis airfoil dan 3 model distribusi sudut serang efektif yang diharapkan terjadi disepanjang span blade propeler. Ketiga jenis airfoil yang digunakan adalah airfoil 23015, 23012 dan 23018. Sedang 3 model distribusi sudut serang efektifnya sebagai : (1) distribusi sudut serang seragam sepanjang span pada kondisi ratio  $\left[ \frac{C_L}{C_D} \right]_{\text{optimum}}$ , (2) distribusi  $[\alpha]_{\text{optimum}}$  seragam dari tip sampai dengan jarak tertentu, kemudian meningkat secara linear ke posisi hub dan (3) distribusi linear dari minimum di tip dan maximum di hub.

Hasil analisis prestasi turbin lebih lanjut yang direpresentasikan dalam besaran koefisien daya  $C_p$ .vs. $\lambda$ , menunjukkan untuk tipe airfoil 23015 dengan distribusi sudut serang bervariasi linear merupakan hasil terbaik dari ke enam kemungkinan konfigurasi turbin yang dikaji. Beberapa design option lainnya dapat dikembangkan lebih lanjut dengan, sebagai misalnya, penggunaan airfoil yang tidak uniform, atau penggunaan airfoil yang dilengkapi flap atau divergent trailing edge. Studi mengenai hal tersebut sedang dilaksanakan dan hasilnya akan dipresentasikan dalam publikasi LAPAN berikutnya.

## PENGARUH PARAMETER GEOMETRI DAN KONDISI ALIRAN ATAS PRESTASI TURBIN

Kemampuan suatu turbin angin horisontal untuk mengekstrak energi kinetik angin sehingga memberikan daya yang dapat dimanfaatkan, dipengaruhi oleh beberapa parameter<sup>4</sup>, yaitu :

- Kecepatan angin operasional  $U_x$
- Tip speed ratio  $\lambda$
- Jumlah blade turbin  $N_b$
- Penampang melintang blade ( airfoil section )
- Geometri blade yang meliputi distribusi chord, ketebalan profil dan distribusi twist.

Kecapatan angin merupakan faktor yang penting karena mengidentifikasikan ukuran besarnya energi yang tersedia. Seperti diketahui besarnya energi angin sebanding dengan pangkat tiga kecepatan angin. Bila kecepatan rendah berarti semakin besar luas cakupan turbin angin untuk memperoleh energi seperti dispesifikasikan. Ringkasnya kecepatan angin operasional menentukan besar kecilnya diameter blade turbin angin.

Tip speed ratio sebagai bilangan tak berdimensi yang menggambarkan perbandingan antara kecepatan angular di tip terhadap kecepatan angin operasional. Semakin tinggi tip speed ratio berarti semakin tinggi kecepatan efektif aliran yang bekerja pada masing masing section blade. Pengalaman menunjukkan jumlah blade  $N_b$  yang optimal untuk konfigurasi rotor blade sebagai fungsi dari tip speed ratio  $\lambda$ . seperti dalam tabel berikut<sup>41</sup>.

No	$\lambda$	$N_b$
1	1	8 --> 24
2	2	6 --> 12
3	3	3 --> 6
4	4	2 --> 4
5	$\geq$	2 --> 3

Besarnya daya yang diekstrak oleh blade propeler dari energi kinetik angin adalah sama dengan besarnya torsi dikalikan dengan kecepatan rotasi turbin angin. Sedangkan Torsi sebanding dengan komponen gaya aerodinamik yang bekerja pada bidang putar. Gaya aerodinamik ini merupakan hasil kontribusi komponent gaya angkat dan gaya tahan. Sikap penampang airfoil pada suatu section blade bila diatur sedemikian rupa dapat dipilih sehingga komponen gaya angkat sebagai kontributor utamanya. Pilihan ini logis mengingat order of magnitude gaya angkat dapat mencapai puluhan kali gaya tahan.

### 3. PROSEDURE PERANCANGAN TURBIN ANGIN HORIZONTAL

Dalam paper ini perancangan turbin angin horisontal yang dilakukan dengan besaran parameter turbin diberikan harganya. Besaran besaran yang diasumsikan diketahui meliputi besaran :

- tip speed ratio  $\lambda_{des}$
- kecepatan angin operasional  $U_x$
- power output turbin  $P$  watts
- data karakteristik aerodinamik airfoil.  $C_L, C_d$  .vs.  $\alpha$
- Jumlah blade  $N_b$
- Distribusi variasi sudut serang efektif sepanjang span  $\alpha(r)$

Dengan data seperti di atas, jari jari rotor blade  $R_B$  dan kecepatan rotasi rotor  $\Omega$  dapat ditentukan, masing masing dengan :

$$R_B = 125 \frac{P}{U_x^3}$$

$$\Omega = \frac{\lambda_{des}}{U_x} R_B \frac{rad}{dt}$$

1-1

1-2

Estimasi jari jari blade Pers. ( 1 - 1 ) mengikuti seperti yang digunakan oleh Gourileca dalam ref. 4. Dengan variasi sudut serang efektif sepanjang span  $\alpha(r)$  diberikan, maka distribusi pitch  $\beta(r)$  untuk setiap section blade sepanjang span dapat ditentukan yaitu :

$$\beta(r) = \phi(r) - \alpha(r) \quad 1-3a$$

dengan

$$\phi(r) = \text{arc tg} \left( \frac{U_x}{\Omega r} \right) \quad 1-3b$$

Selanjutnya dengan karakteristik aerodinamika di setiap penampang blade diketahui, maka untuk  $\alpha(r)$  diketahui, harga koefisien gaya angkat  $C_L(\alpha(r))$  dan koefisien gaya tahan  $C_d(\alpha(r))$  diperoleh. Bila dalam hal penentuan platform blade digunakan konsep koefisien power lokal maximum, variasi chord sepanjang span  $c(r)$  didapatkan sebagai<sup>4</sup>:

$$C_L(r) N_b c(r) = \frac{8\pi r (1 - k) \cos \epsilon \sin^2 l}{(1 + k) \cos(l - \epsilon)} \quad 1-4$$

dimana :  $\epsilon = \frac{C_d(r)}{C_L(r)} \quad 1-5a$

$$l = \lambda \frac{1 + h}{1 + k} \quad 1-5b$$

$$\lambda = \frac{\Omega R_b}{U_x} \quad 1-5c$$

$$k = \sqrt{\lambda^2 + 1} \cos \theta \quad 1-5d$$

$$\theta = \frac{1}{3} \text{arc tg} \lambda + \frac{\pi}{3} \quad 1-5e$$

$$h = \sqrt{1 + \frac{1 - k^2}{\lambda^2}} \quad 1-5f$$

Dengan telah diperolehnya distribusi chord sepanjang span dan diketahuinya distribusi pitch, maka prestasi turbin dapat diestimasi dengan lebih teliti berdasarkan metoda estimasi prestasi turbin seperti yang dikembangkan oleh Jamani et. al.<sup>5</sup> atau Wilson [ Ref. 6 ]. Metoda Wilson<sup>6</sup> dikembangkan lebih lanjut oleh Snyder<sup>7</sup> dengan tambahan faktor koreksi di hub dan tip digunakan dalam penelitian ini. Pengalaman numerik untuk berbagai konfigurasi didapatkan, jari jari blade persamaan 1-1, cenderung memberikan power output hasil estimasi lebih besar dibandingkan dengan power output yang diharapkan dalam perancangan. Dengan

kata lain persamaan 1-1. memberikan jari jari blade yang melebihi perkiraan. Hasil analisis memberikan estimasi power output seperti yang diharapkan bila. persamaan 1-1 dimodifikasi menjadi:

$$R_B = 1.16 \frac{P}{U_x^3}$$

1-6

## 4. HASIL DAN KESIMPULAN

### 4.1 Besaran besaran parameter perancangan turbin.

Dalam studi perancangan awal turbin angin horisontal ini, besaran parameter turbin angin ditetapkan sebagai berikut:

1. kecepatan angin  $U_\infty = 5 \text{ m/dt}$
2. tip speed ratio desain  $\lambda_{des} = 6$
3. power output  $P = 450 \text{ watt}$
4. tipe profil seragam sepanjang span

Sedang parameter yang diambil sebagai parameter yang bervariasi adalah tipe airfoil dan distribusi sudut serang efektif sepanjang span.

Memperhatikan bahwa data aerodinamik airfoil sangat penting, baik dalam perancangan maupun dalam analisis turbin angin, maka untuk keperluan ini digunakan data airfoil yang telah tersedia, yaitu untuk airfoil Naca 23012, 23015 dan 23018.

### 4.2 Data aerodinamik airfoil

Data airfoil ketiga jenis airfoil Naca tersebut di atas dalam besaran  $C_L$ ,  $C_d$ ,  $\frac{C_L}{C_d}$  sebagai fungsi sudut  $\alpha$  seperti diperlihatkan berturut turut dalam Tabel A.1, Tabel A.2 dan Tabel A.3. Appendix A.

Dari tabel tersebut tampak bahwa sudut serang optimum  $\alpha_{opt}$  yaitu sudut serang pada harga  $\left[ \frac{C_L}{C_d} \right]_{max}$  untuk masing-masing seperti diketengahkan dalam Tabel 1.1 berikut.

Naca	$\left[ \frac{C_L}{C_d} \right]_{\max}$	$\alpha_{\text{opt}}$
23015	81.2	10°
23018	75.6	9°
23024	38.2	8°

Tabel 1-1. Data  $\alpha_{\text{opt}}$  dan  $\left[ \frac{C_L}{C_d} \right]_{\max}$

#### 4.3. Distribusi sudut serang efektif sepanjang span

Seperti yang diuraikan sebelum, prosedur perancangan yang dikembangkan memerlukan informasi distribusi sudut serang efektif. Untuk keperluan ini, dipilih tiga tipe distribusi sudut serang yaitu:

1. Distribusi seragam sepanjang span pada  $\alpha_{\text{opt}}$ .
2. Dari tip sampai dengan  $r = 0.75 R_b$  pada  $\alpha_{\text{opt}}$ , kemudian membesar secara linear sampai di hub dengan  $\alpha_{\text{hub}} = \alpha(C_{L \max})$
3. Sudut serang efektif tip  $\alpha_{\text{tip}} = 5^\circ$ , kemudian meningkat linear ke hub dengan  $\alpha_{\text{hub}} = 12.5^\circ$

Untuk kemudahan dalam analisis, variasi sudut serang tersebut diatas berturut turut disebut sebagai alfa mode 1, 2 dan 3.

#### 4.4. Hasil Hasil Perancangan

Dengan kondisi desain seperti diketengahkan dalam sub bab 4.1, penggunaan tiga airfoil untuk kondisi distribusi sudut serang efektif seragam masing masing pada  $\alpha_{\text{opt}}$ , memberikan hasil distribusi pitch dan distribusi chord sepanjang span seperti diperlihatkan pada Gambar 1.1 dan 1.2. Dari gambar 1.1 tampak bahwa penggunaan airfoil Naca 23024 mengakibatkan blade perlu memperoleh sudut twist yang cukup besar. Kondisi ini tentunya akan mengakibatkan kesulitan didalam proses pembuatan blade yang dimaksudkan. Dari ketiga airfoil tersebut dengan memperhatikan kemampuan koefisien power dan daya yang dihasilkan [Gambar 1.3 dan 1.4] menunjukkan penggunaan airfoil 23015 lebih baik dibandingkan dengan airfoil-airfoil lainnya.

Hasil ini memberikan landasan lebih lanjut untuk melakukan perancangan turbin dengan airfoil Naca 23015 sebagai airfoil dari blade yang digunakannya. Selanjutnya tiga tipe distribusi sudut serang seperti yang diketengahkan dalam Sub bab 4.3 digunakan sebagai variabel desainnya.

Perbandingan kurva variasi sudut serang seperti diperlihatkan pada Gambar 1.5. Hasil dari studi ini berturut turut seperti diketengahkan dalam Gambar 1.6 s/d 1.9. Dari keempat gambar tersebut variasi sudut serang alfa mode 3 memberikan hasil koefisien daya maupun power output lebih baik dibandingkan dengan dua alfa mode lainnya. Di samping itu juga alfa mode 3 dengan variasi linear sudut serang dengan  $\alpha_{Tip} = 5^\circ$  dan  $\alpha_{Tip} = 12.5^\circ$ . memberikan chord relatif lebih besar dibandingkan dengan lainnya.

## 5. KESIMPULAN

Perangkat lunak perancangan turbin angin telah berhasil dikembangkan. Hasil perancangan menunjukkan konfigurasi rotor blade yang diperoleh cukup realistis. Penggunaan airfoil Naca 23015 sebagai profil blade menunjukkan untuk selang interval harga tip speed ratio cukup lebar masih mampu mempertahankan kemampuan dalam menghasilkan koefisien power yang cukup tinggi. Memperhatikan data aerodinamik airfoil yang digunakan, upaya untuk menggunakan airfoil lain yang memiliki ratio  $\left[ \frac{C_L}{C_d} \right]_{max}$  tinggi dengan  $\alpha_{opt}$ . rendah perlu dilakukan. Kedua hal ini diperkirakan akan memberikan prestasi turbin yang lebih baik dan memperkecil sudut twist. Hal terakhir penting karena akan memberikan kemudahan dalam proses pembuatannya.

## 6. DAFTAR PUSTAKA

1. Kussman A. "Some Aspect of Wind Rotor Design: Rotor Blade Aerodynamics." Wind Energy System LAPAN - DFVLR Workshop. March 3 - 5. 1981
2. Hunt D. "Wind Turbines" Van Nostrand, Amsersfoot, Netherland, 1976
3. Eppler R. "Airfoil Design and Data" Springer Verlag, Berlin. 1990
4. Le Gouries D. "Wind Power Plants : Theory and Design", Pergamon Press, UK, 1982
5. Yamani T. et. al. "The Aerodynamics Performance of a Horizontal Axis Wind
6. Turbines in Large Induced Velocity State " Fourth International Symp. On Wind Energy System, Sept., 1982
7. Wilson R.E. et. al. " Aerodynamics of Wind Turbines ". RANN National Sciences Foundations NSF/RA-760228, June 1976
8. Snyder Melvin H. " Users Manual for Wind : Wind Energy Conversion Devices", Lecture Serie 1981-8, Von Karman Institute for Fluid Dynamics, Belgium, 1981

Tabel A-1 Data karakteristik airfoil Naca Serie 23015.

No	Alfa(deg)	Cl	Cd	Cd/Cl	No	Alfa(deg)	Cl	Cd	Cd/Cl
1	-25	-1.4812	0.0358	0.0241	26	0	0.1	0.0071	0.0706
2	24	-1.4812	0.0358	0.0241	27	1	0.21	0.007	0.0333
3	-23	-1.4812	0.0358	0.0241	28	2	0.32	0.0071	0.0221
4	-22	-1.4812	0.0358	0.0241	29	3	0.43	0.0073	0.017
5	-21	-1.4812	0.0358	0.0241	30	4	0.54	0.0076	0.0141
6	-20	-1.4812	0.0358	0.0241	31	5	0.65	0.0081	0.0125
7	-19	-1.4812	0.0358	0.0241	32	6	0.76	0.0087	0.0115
8	-18	-1.4812	0.0358	0.0241	33	7	0.87	0.0095	0.0109
9	-17	-1.4812	0.0358	0.0241	34	8	0.98	0.0103	0.0106
10	-16	-1.4812	0.0358	0.0241	35	9	1.09	0.0114	0.0104
11	-15	-1.4812	0.0358	0.0241	36	10	1.1992	0.0125	0.0104
12	-14	-1.5	0.0381	0.0254	37	11	1.3308	0.021	0.0158
13	-13	-1.4812	0.0358	0.0241	38	12	1.4248	0.0294	0.0206
14	-12	-1.4248	0.0294	0.0206	39	13	1.4812	0.0358	0.0241
15	-11	-1.3308	0.021	0.0158	40	14	1.5	0.0381	0.0254
16	-10	-1.1992	0.0125	0.0104	41	15	1.4812	0.0358	0.0241
17	-9	-0.89	0.0096	0.0108	42	16	1.4812	0.0358	0.0241
18	-8	-0.78	0.0089	0.0113	43	17	1.4812	0.0358	0.0241
19	-7	-0.67	0.0082	0.0123	44	18	1.4812	0.0358	0.0241
20	-6	-0.56	0.0077	0.0138	45	19	1.4812	0.0358	0.0241
21	-5	-0.45	0.0073	0.0163	46	20	1.4812	0.0358	0.0241
22	-4	-0.34	0.0071	0.0209	47	21	1.4812	0.0358	0.0241
23	-3	-0.23	0.007	0.0305	48	22	1.4812	0.0358	0.0241
24	-2	-0.12	0.007	0.0586	49	23	1.4812	0.0358	0.0241
25	-1	-0.01	0.0072	0.7199	50	24	1.4812	0.0358	0.0241
					51	25	1.4812	0.0358	0.0241

$$\alpha_{opt} = 10^{\circ} \quad \text{dan} \quad \alpha_{C_{Lmax}} = 14.0^{\circ} \cdot \left[ \frac{C_L}{C_d} \right]_{opt} = 81.2$$



Tabel A-2 Data Karakteristik aerodinamik Naca 23018

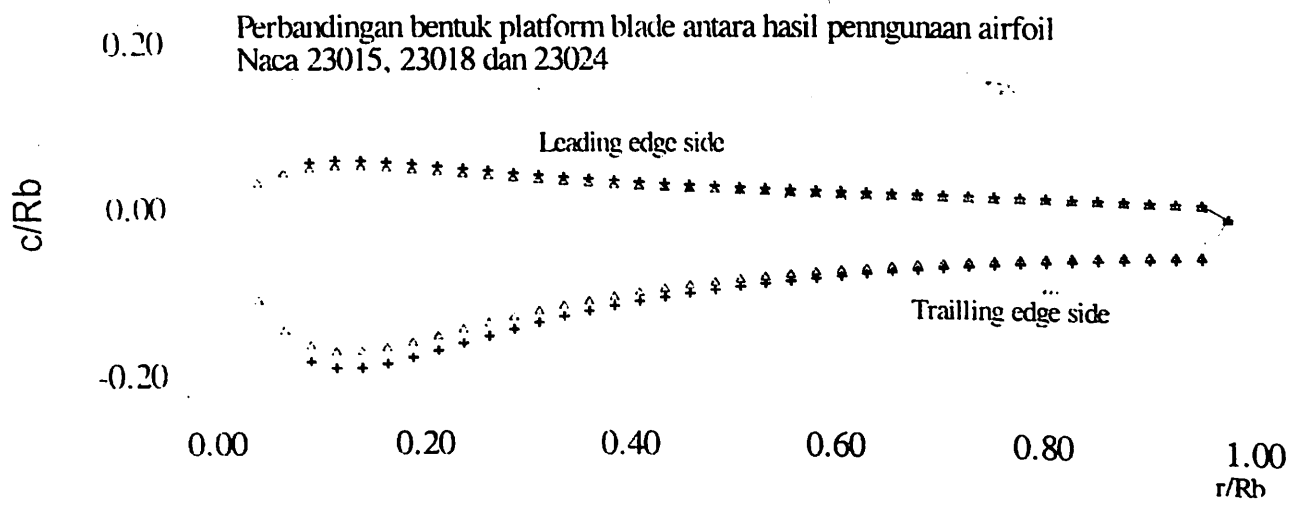
No	Alfa(deg)	Cl	Cd	Cd/Cl	No	Alfa(deg)	Cl	Cd	Cd/Cl
1	-25	-0.92	0.2704	0.2939	26	0	0.0917	0.0051	0.0551
2	-24	-0.9122	0.2462	0.2699	27	1	0.1682	0.0052	0.0308
3	-23	-0.9047	0.2229	0.2464	28	2	0.2446	0.0054	0.022
4	-22	-0.8974	0.2003	0.2232	29	3	0.3211	0.0057	0.0176
5	-21	-0.8907	0.1785	0.2004	30	4	0.3975	0.006	0.0151
6	-20	-0.8848	0.1575	0.1781	31	5	0.474	0.0064	0.0136
7	-19	-0.8798	0.1374	0.1562	32	6	0.5504	0.0069	0.0126
8	-18	-0.8762	0.1182	0.1349	33	7	0.6269	0.0075	0.012
9	-17	-0.8743	0.0999	0.1143	34	8	0.7033	0.0081	0.0116
10	-16	-0.8746	0.0825	0.0944	35	9	0.7798	0.0089	0.0114
11	-15	-0.8776	0.0661	0.0753	36	10	0.8562	0.0097	0.0113
12	-14	-0.8842	0.0506	0.0572	37	11	0.9326	0.0105	0.0113
13	-13	-0.8952	0.0361	0.0403	38	12	0.912	0.0226	0.0248
14	-12	-0.8256	0.0226	0.0274	39	13	0.8952	0.0361	0.0403
15	-11	-0.7492	0.0086	0.0114	40	14	0.8842	0.0506	0.0572
16	-10	-0.6727	0.0079	0.0117	41	15	0.8776	0.0661	0.0753
17	-9	-0.5963	0.0073	0.0122	42	16	0.8746	0.0825	0.0944
18	-8	-0.5198	0.0067	0.0129	43	17	0.8743	0.0999	0.1143
19	-7	-0.4434	0.0062	0.0141	44	18	0.8762	0.1182	0.1349
20	-6	-0.3669	0.0059	0.016	45	19	0.8798	0.1374	0.1562
21	-5	-0.2905	0.0055	0.0191	46	20	0.8848	0.1575	0.1781
22	-4	-0.214	0.0053	0.0247	47	21	0.8907	0.1785	0.2004
23	-3	-0.1376	0.0051	0.0372	48	22	0.8974	0.2003	0.2232
24	-2	-0.0612	0.005	0.0821	49	23	0.9047	0.2229	0.2464
25	-1	0.0153	0.005	0.3271	50	24	0.9122	0.2462	0.2699
					51	25	0.92	0.2704	0.2939

$$\alpha_{opt} = 10^{\circ} \quad \text{dan} \quad \alpha_{C_{Lmax}} = 11.0^{\circ} \quad , \quad \left[ \frac{C_L}{C_d} \right]_{opt} = 75.6$$

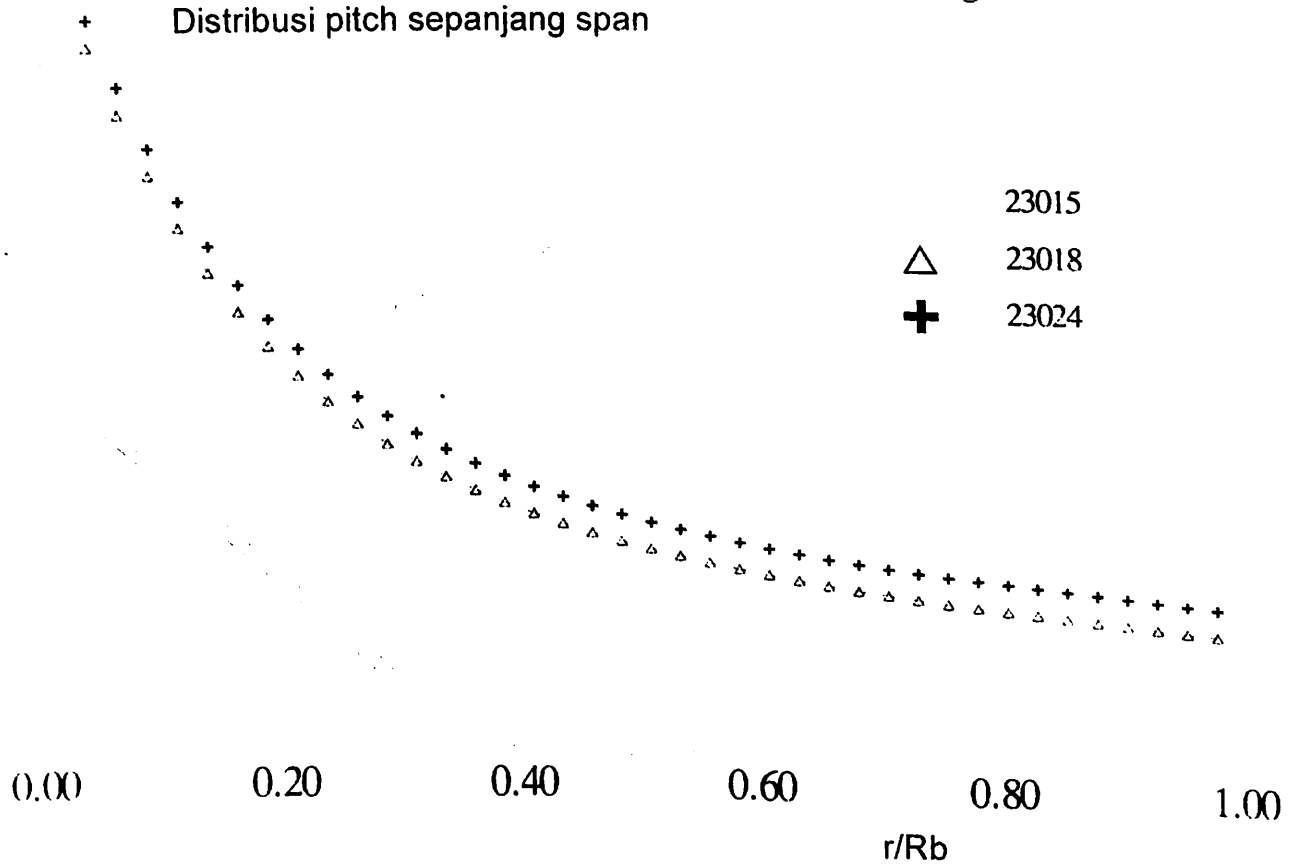
Label A 3 Data karakteristik airfoil Naca Serie 23024.

No	Alfa(deg)	Cl	Cd	Cd/Cl	No	Alfa(deg)	Cl	Cd	Cd/Cl
1	-25	-0.8832	0.6004	0.6798	26	0	0.1006	0.01	0.0994
2	-24	-0.861	0.557	0.6469	27	1	0.184	0.0103	0.0559
3	-23	-0.8377	0.5129	0.6123	28	2	0.2697	0.0107	0.0397
4	-22	-0.8133	0.4681	0.5756	29	3	0.358	0.0113	0.0315
5	-21	-0.7878	0.4227	0.5366	30	4	0.4479	0.0119	0.0266
6	-20	-0.7613	0.3766	0.4948	31	5	0.5367	0.0127	0.0236
7	-19	-0.7336	0.3299	0.4497	32	6	0.6205	0.0135	0.0217
8	-18	-0.7049	0.2825	0.4008	33	7	0.6957	0.0144	0.0207
9	-17	-0.6751	0.2344	0.3473	34	8	0.7605	0.0153	0.0202
10	-16	-0.8473	0.1857	0.2192	35	9	0.8178	0.0194	0.0238
11	-15	-0.8822	0.1363	0.1545	36	10	0.8869	0.0234	0.0264
12	-14	-0.8957	0.0862	0.0963	37	11	0.8836	0.0275	0.0311
13	-13	-0.8955	0.0355	0.0397	38	12	0.8889	0.0315	0.0354
14	-12	-0.8768	0.0315	0.0359	39	13	0.8955	0.0355	0.0397
15	-11	-0.8244	0.0275	0.0333	40	14	0.8957	0.0862	0.0963
16	-10	-0.7672	0.0234	0.0306	41	15	0.8822	0.1363	0.1545
17	-9	-0.6986	0.0194	0.0278	42	16	0.8473	0.1857	0.2192
18	-8	-0.618	0.0175	0.0283	43	17	0.6751	0.2344	0.3473
19	-7	-0.528	0.0158	0.03	44	18	0.7049	0.2825	0.4008
20	-6	-0.4329	0.0144	0.0333	45	19	0.7336	0.3299	0.4497
21	-5	-0.3367	0.0132	0.0392	46	20	0.7613	0.3766	0.4948
22	-4	-0.2425	0.0122	0.0503	47	21	0.7878	0.4227	0.5366
23	-3	-0.152	0.0114	0.0748	48	22	0.8133	0.4681	0.5756
24	-2	-0.0655	0.0108	0.1641	49	23	0.8377	0.5129	0.6123
25	-1	0.0181	0.0103	0.5696	50	24	0.861	0.557	0.6469
					51	25	0.8832	0.6004	0.6798

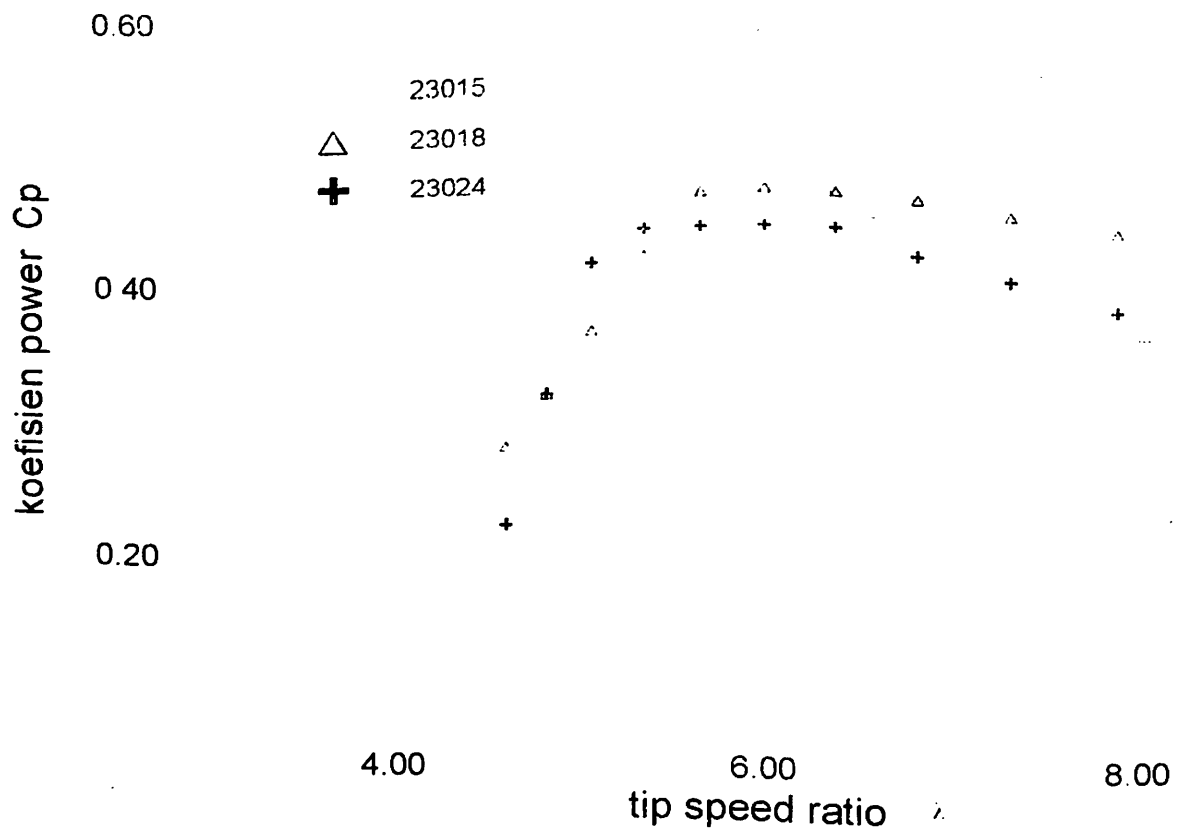
$\alpha_{opt} = 8^\circ$  dan  $\alpha_{C_{Lmax}} = 14.0^\circ$  .  $\left[ \frac{C_L}{C_d} \right]_{opt} = 38.1$



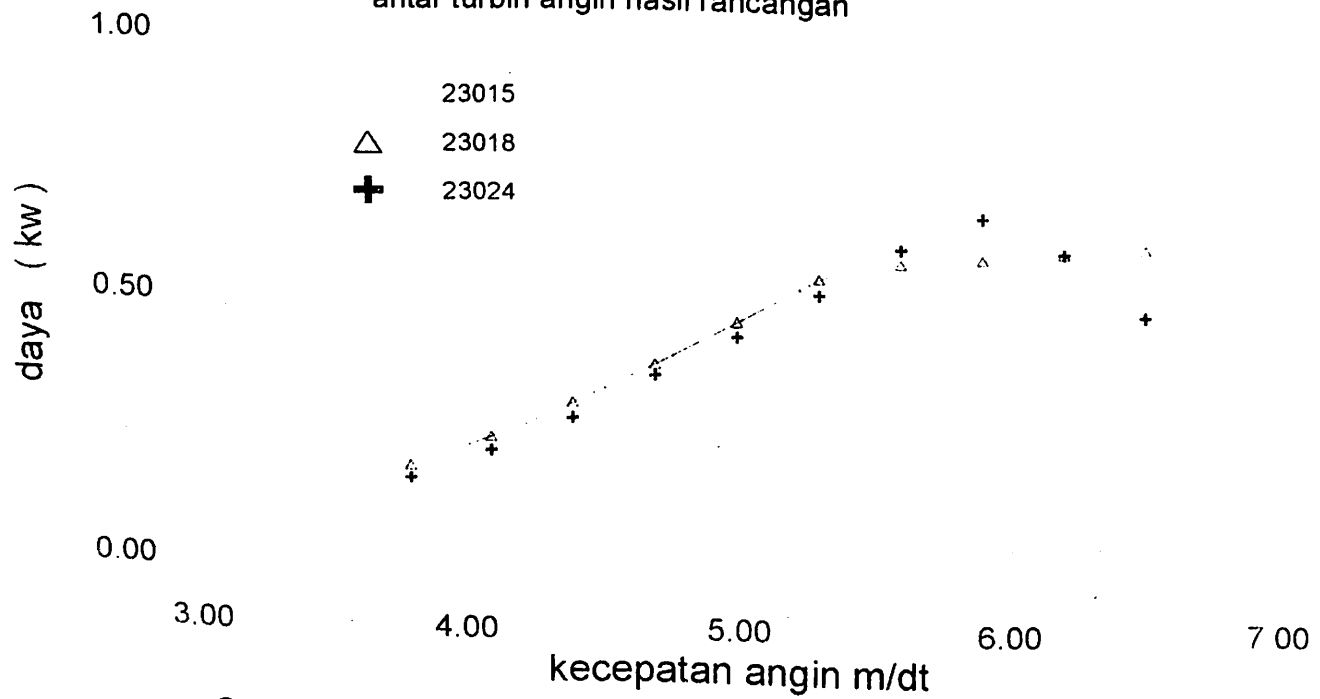
Gambar 1.1 Perbandingan bentuk platform blade hasil rancangan Distribusi pitch sepanjang span



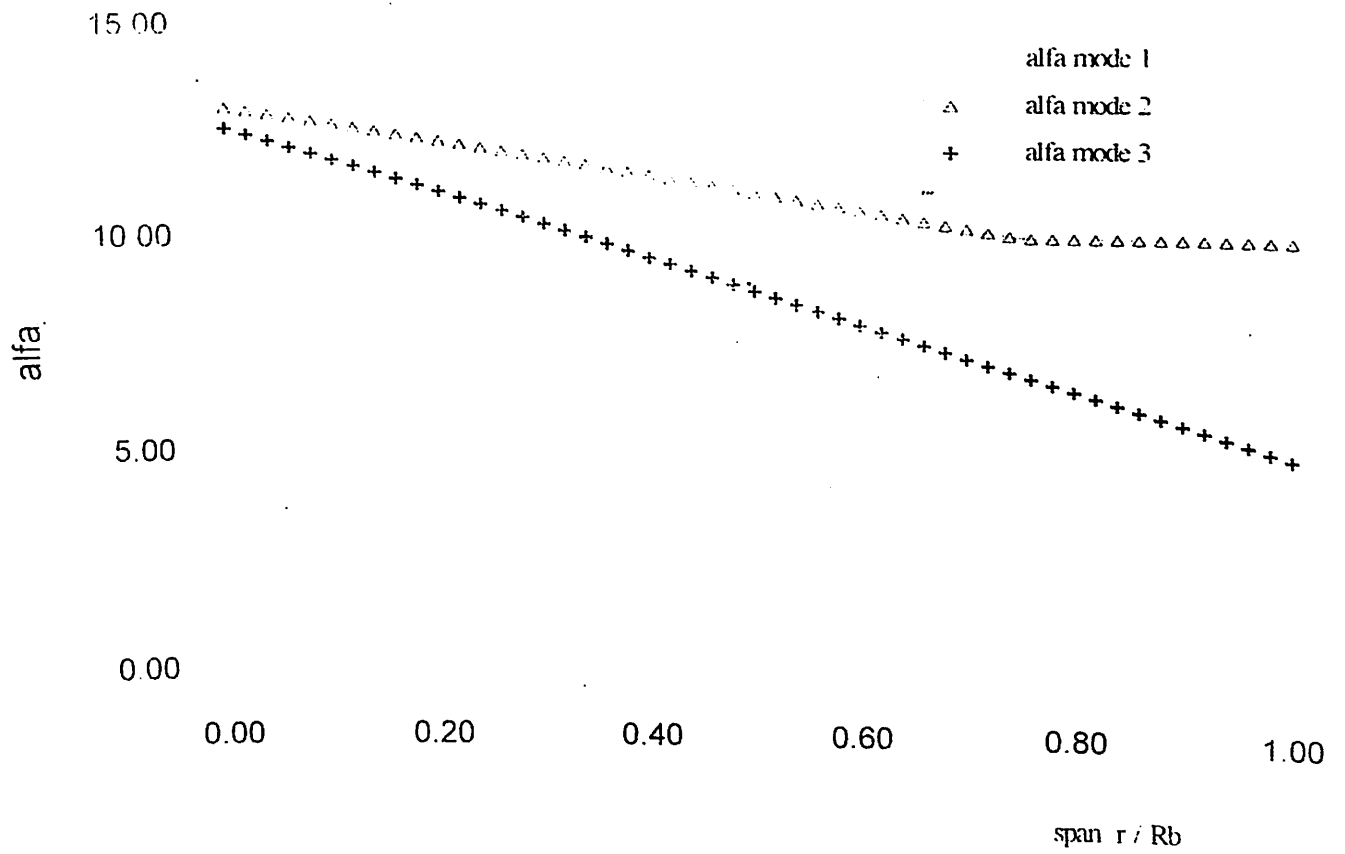
Gambar 1.2 Perbandingan dalam besaran distribusi pitch sepanjang span



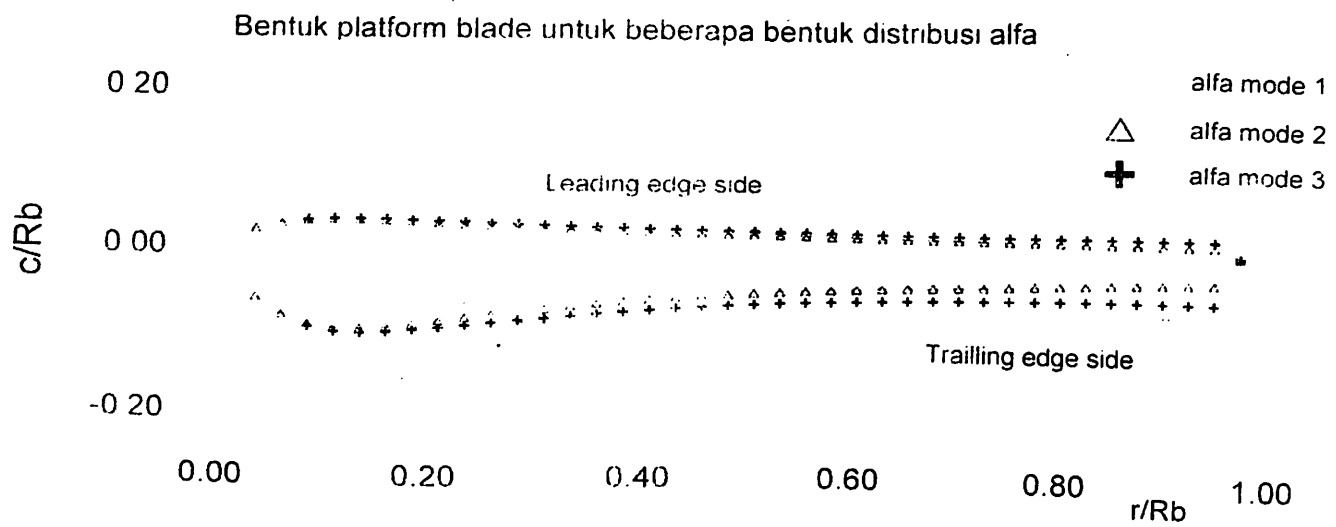
Gambar 1.3 Perbandingan koefisien daya  $C_p$  sebagai fungsi dari tip speed ratio antar turbin angin hasil rancangan



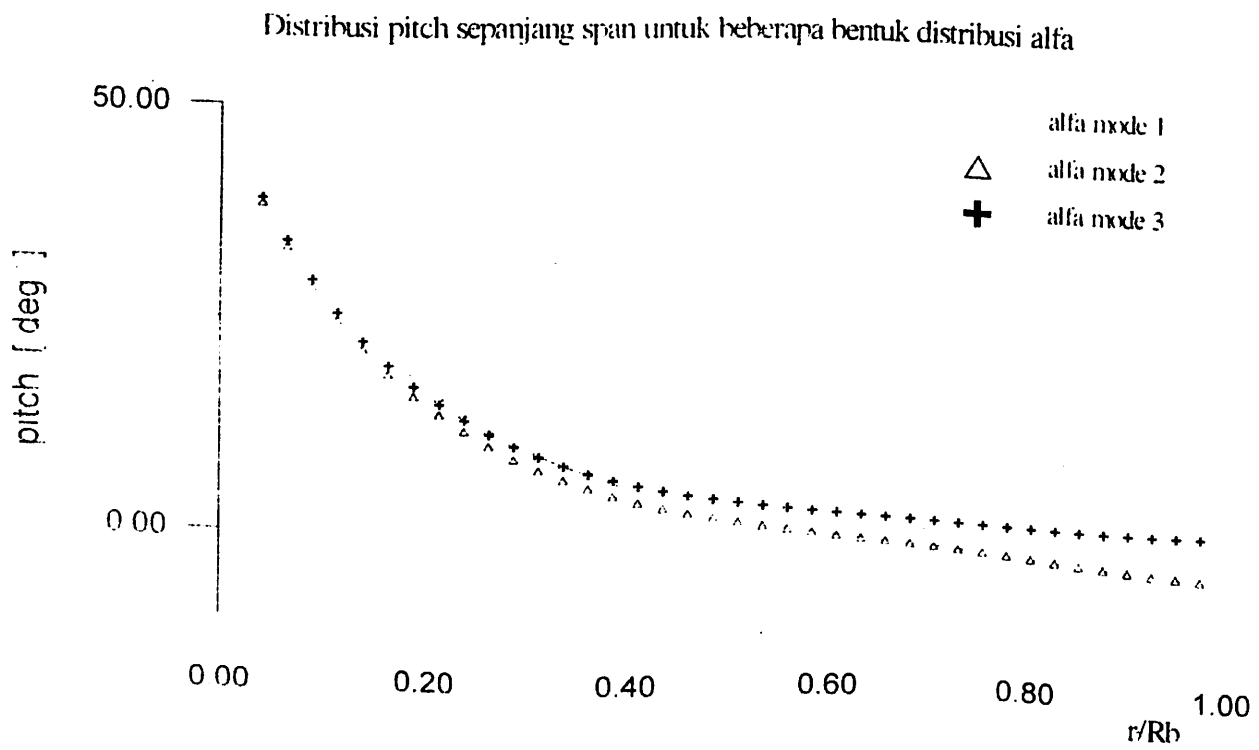
Gambar 1.4 Perbandingan dalam besaran daya sebagai fungsi kecepatan angin



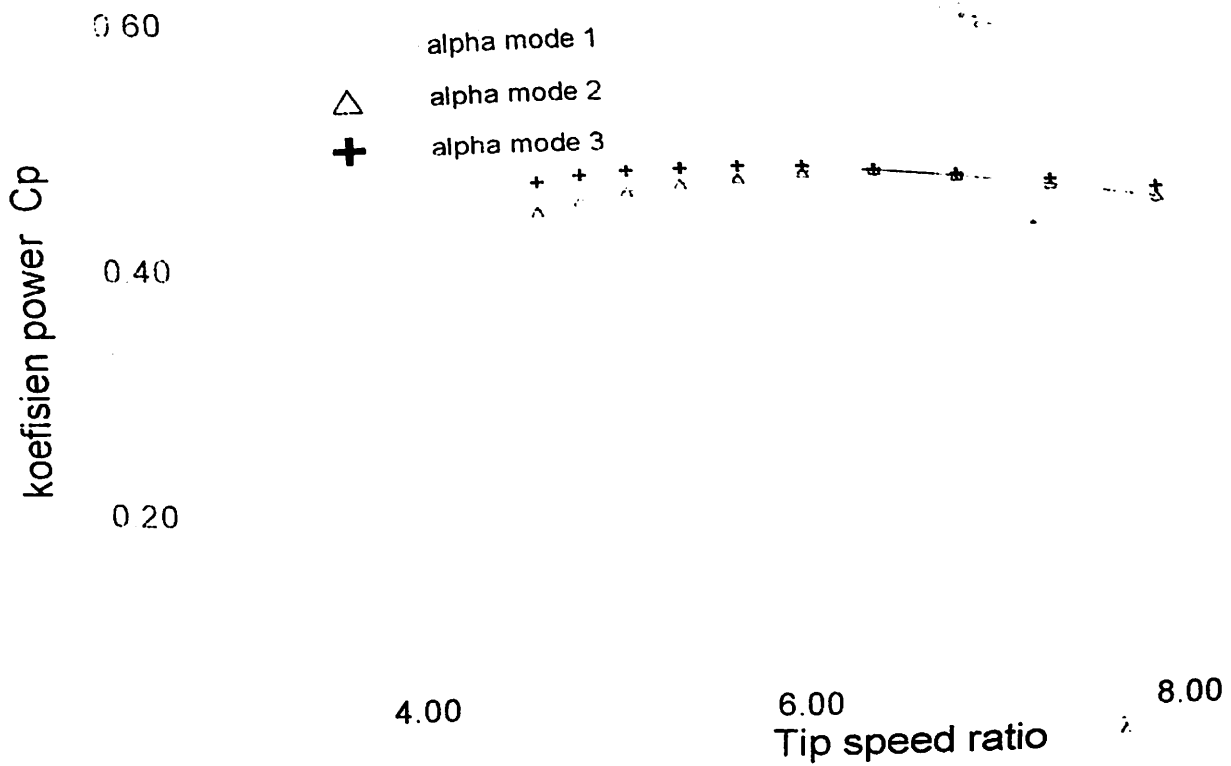
Gambar 1.5 Input distribusi sudut serang efektif sepanjang span dalam proses desain turbin angin



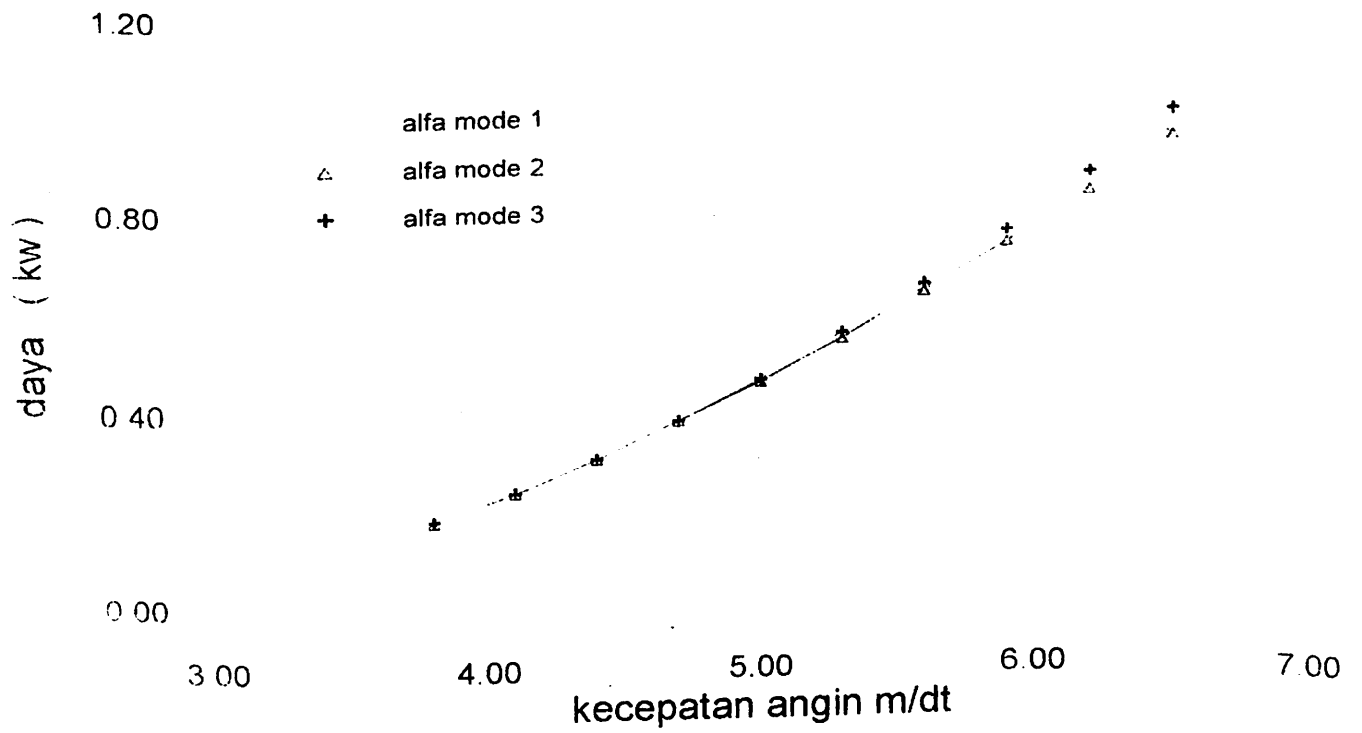
Gambar 1.6 Perbandingan bentuk platform sebagai hasil variasi dalam distribusi sudut serang



Gambar 1.7 Perbandingan distribusi pitch akibat variasi dalam distribusi sudut serang



Gambar 1.8 Perbandingan pengaruh distribusi sudut serang



Gambar 1.9 Perbandingan pengaruh sudut serang sepanjang span