

PENURUNAN MODEL MATEMATIK TURBIN ANGIN SUMBU DATAR SUDUT PITCH SUDU VARIABEL

Eko Budi Purwanto^c

ABSTRAK

Untuk tujuan pengaturan kecepatan putar suatu turbin angin, pada penelitian ini dilakukan penurunan model matematis turbin angin sumbu datar dengan sudut pitch sudu variabel jenis aeroman 10 kW. Dari model matematis yang diperoleh, selanjutnya diubah ke dalam bentuk persamaan keadaan dan persamaan keluaran. Hasil yang diperoleh menunjukkan bahwa pada model turbin angin sumbu datar dengan sudut pitch sudu variabel terdapat dua parameter penting takgayut waktu (time invariant). Parameter tersebut adalah penentu faktor kekakuan (stiffness) dan penentu faktor redaman (damping) yang mempunyai nilai tidak konstan. Dilihat dari nilai eigen matrik A , sistem dalam keadaan stabil apabila kedua parameter adalah positif.

1. PENDAHULUAN

Kajian yang dilakukan dalam penelitian ini adalah penurunan model matematis turbin angin jenis aeroman 10 kW. Turbin angin tersebut adalah salah satu jenis turbin angin sumbu datar (Horizontal Axis Wind Turbine) dengan sudut pitch sudu variable yang dipunyai oleh LAPAN.

Untuk mendapatkan persamaan matematik turbin angin tersebut dilakukan penelusuran terhadap persamaan fisika yang berlaku pada gerak putar rotor turbin angin. Dengan model matematik yang diperoleh dalam bentuk persamaan keadaan dan persamaan keluaran selanjutnya dapat dilakukan pengaturan sudut pitch sudu agar kecepatan putaran turbin relatif konstan. Pada tulisan ini pokok bahasan dibatasi pada penurunan persamaan keadaan dan persamaan keluaran. Sedangkan pencarian nilai parameter dilakukan pada tulisan berikutnya secara off line dalam bentuk simulasi komputer sebelum rekayasa perangkat kerasnya

1.1. Latar Belakang

Dalam unit turbin angin terdapat beberapa komponen yang masing-masing mempunyai model matematis tersendiri [8]. Untuk tujuan rancang bangun sebuah turbin angin dengan hasil yang optimal, keberadaan model matematis sangat dibutuhkan. Ditinjau dari sistem kontrol yang dipakai pada turbin angin, secara garis besar dibedakan menjadi dua yaitu [5]

- 1 turbin angin dengan sudut pitch sudu tetap
- 2 turbin angin dengan sudut pitch sudu variabel

Pada penelitian ini penurunan model dilakukan pada turbin angin sumbu datar dengan sudut pitch sudu variabel. Perlu diketahui bahwa penurunan model dibatasi pada sistem putaran rotor dan untuk penerapan nantinya digunakan sensor putaran.

Pengontrolan kecepatan putar turbin angin dengan sudut pitch sudu tetap membutuhkan komponen daun samping dan/atau ekor pengarah guna merubah luas bidang sapuan rotor terhadap arah angin. Pada turbin angin dengan kapasitas 10 kW atau lebih dimensi kedua komponen adalah relatif besar dan keberadaannya akan membebani konstruksi menara. Sehingga untuk turbin angin skala 10 kW atau lebih, sistem kontrol kecepatan putar yang sesuai adalah menggunakan sudut pitch variabel.

1.2. Tujuan

Memperoleh model matematis dari turbin angin sumbu datar dengan sudut pitch sudu variabel jenis aeroman 10 kW dalam bentuk persamaan keadaan dan persamaan keluaran.

1.3. Metoda Yang Digunakan

Untuk mendapatkan model matematik turbin angin aeroman, langkah yang diambil adalah dengan menurunkan persamaan dasar sistem putaran sehingga diperoleh persamaan diferensial sistem. Selanjutnya dari persamaan tersebut dirubah menjadi persamaan keadaan sistem putaran rotor turbin angin dengan menggunakan transformasi Laplace.

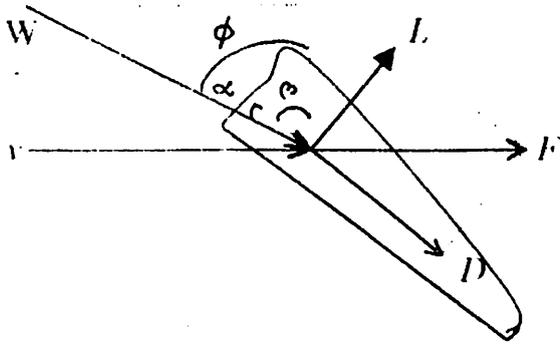
Pada rotor turbin angin beberapa gaya bekerja secara simultan, tetapi tidak semua gaya-gaya tersebut mempunyai pengaruh langsung terhadap kecepatan putar rotor turbin angin. Oleh karena itu dalam penurunan model matematik dari sistem pada tulisan ini hanya dipertimbangkan gaya-gaya yang berhubungan dengan kecepatan putar turbin angin.

2. PENURUNAN MODEL MATEMATIS

Langkah awal yang dilakukan dalam merealisasi tujuan di atas adalah mengetahui karakteristik turbin angin lewat parameter-parameternya. Uraian tentang gaya-gaya yang bekerja pada elemen rotor dan gaya-gaya yang bekerja pada bidang sapuan rotor [4] diberikan pada bagian ini. Dari uraian gaya-gaya tersebut, selanjutnya dapat diturunkan model matematis tiap-tiap komponen gaya yang berpengaruh terhadap putaran rotor turbin angin.

2.1. Gaya Angkat dan Gaya Hambat

Gaya angkat (lift) dan gaya hambat (drag) adalah gaya-gaya yang bekerja pada elemen sudu. Resultan kedua gaya mengakibatkan terjadinya putaran rotor turbin angin [4]. Keberadaa kedua gaya pada penampang lintang sudu seperti disajikan pada Gambar 2.1



Gambar 2.1 VEKTOR GAYA PADA PENAMPANG LINTANG SUDU

di mana

W = resultan kecepatan angin dan kecepatan airfoil (u)

L = gaya angkat

D = gaya hambat

F = resultan gaya

v = kecepatan angin

α = sudut sentuh (angle of attack)

β = sudut acuan (setting angle)

ϕ = sudut pitch (pitch angle)

Formulasi gaya angkat dan gaya hambat diberikan oleh persamaan :

$$dL = C_l \frac{1}{2} \rho W^2 c dr \quad (2.1)$$

$$dD = C_d \frac{1}{2} \rho W^2 c dr \quad (2.2)$$

Resultan kedua gaya adalah

$$dF_r = \frac{1}{2} \rho W^2 [C_l \cos \phi - C_d \sin \phi] c dr \quad (2.3)$$

Torsi pada sudu yang ditimbulkan diberikan dalam bentuk :

$$dM_t = \frac{1}{2} \rho W^2 [C_l \cos \phi - C_d \sin \phi] c r dr \quad (2.4)$$

di mana

c = panjang cord

r = jari-jari rotor

C_l = koefisien gaya angkat

C_d = koefisien gaya hambat

$\rho = 1.29 \text{ kg/m}^3$. rapat massa udara

2.2. Gaya Aksial

Gaya aksial (gaya dorong) mempunyai kontribusi terhadap putaran rotor karena gaya tersebut bekerja pada luas bidang sapuan rotor. Arah gaya aksial sejajar dengan arah kecepatan angin dan diberikan oleh persamaan :

$$F_{ak} = \frac{1}{2} \rho c_t A_r v^2 \quad (2.5)$$

untuk arah angin yang membentuk sudut yaw sebesar δ , gaya aksial diberikan oleh persamaan

$$F_{ak} = \frac{1}{2} \rho c_t A_r v^2 \cos \delta \quad (2.6)$$

di mana .

A_r = luas sapuan rotor

c_t = koefisien aksial

v = kecepatan angin sebenarnya

Gaya tersebut mengakibatkan torsi pada bidang sapuan rotor yaitu :

$$M_{ak} = F_{ak} \cdot r \quad (2.7)$$

2.3. Model Matematis Turbin Angin Sumbu Datar

Untuk mendapatkan model matematis digunakan hukum Newton II untuk torsi sebagai berikut :

$$\sum M = I \frac{\partial^2 \theta}{\partial t^2} \quad (2.8)$$

Torsi yang diakibatkan oleh gaya angkat, hambat dan aksial adalah :

$$I \frac{\partial^2 \theta}{\partial t^2} + b \frac{\partial \theta}{\partial t} + k \theta = dM_l + M_{ak} \quad (2.9)$$

di mana :

I = momen inersia rotor

k = penentu faktor kekakuan (stiffness)

b = penentu faktor redaman (damping)

θ = sudut yang ditempuh

M_l = torsi akibat gaya angkat, hambat

M_{ak} = torsi akibat gaya aksial

Dapat diterangkan bahwa k dan b disebut penentu karena tidak dapat ditentukan nilainya dengan pasti. Di mana parameter b berkaitan dengan beban turbin, parameter k berkaitan dengan adanya turbulensi (olakan) aliran angin baik di hulu maupun di hilir.

3. PERHITUNGAN NILAI PARAMETER

Salah satu turbin angin sumbu datar dengan sudut pitch sudu variabel adalah aeroman 10 kW. Dalam tulisan ini turbin angin tersebut digunakan sebagai studi kasus dan dilakukan identifikasi dan pengukuran nilai parameternya. Namun demikian hasil penurunan model matematik ini dapat diterapkan untuk turbin angin lain yang sejenis (sudut pitch sudu variabel) walaupun kapasitas turbin berbeda. Hal ini dapat dilakukan dengan cara menggantikan nilai parameter yang diperoleh dari pengukuran atau menggunakan metode identifikasi parameter [6] terhadap turbin angin dimodelkan.

3.1. Perhitungan Momen Angkat

Momen angkat adalah momen yang ditimbulkan oleh gaya angkat pada sudu turbin. Perhitungan torsi yang diakibatkan oleh gaya angkat dan gaya hambat didasarkan pada persamaan (2.4) dan tabel (3.1) di mana turbin angin aeroman mempunyai tipe sudu curved plate with tube on concave side [1].

Tabel 3.1. HARGA KOEFISIEN BERBAGAI TIPE AIR FOIL

Tipe Airfoil	C_L/C_D	α	C_L
Flat plate	0,10	5°	0,80
Curve plate (10 % curvature)	0,02	3°	1,25
Curved plate with tube on concave side	0,03	4°	1,10
Curved plate with tube on convex side	0,20	14°	1,25
Airfoil NACA 4412	0,01	4°	0,80

Panjang cord sebagai fungsi r diberikan oleh persamaan :

$$c = \frac{8\pi}{B \cdot C_L} r(1 - \cos\phi) \quad (3.1)$$

di mana B adalah jumlah sudu = 2. Dengan memasukkan nilai parameter yang diketahui ke dalam persamaan (3.1) diperoleh :

$$c = 4,6 r \quad (3.2)$$

Substitusi persamaan (3.2) dan data dari tabel 3.1 ke dalam persamaan (2.4) menghasilkan momen akibat gaya angkat dan hambat berbentuk :

$$M_L = 109,57W^2(\sin\phi - 10^{-2}\cos\phi) \quad (3.3)$$

3.2. Perhitungan Momen Aksial

Momen aksial adalah momen yang diakibatkan oleh gaya aksial. Nilai momen aksial dapat dihitung jika koefisien gaya aksial (c_t) sudah diperoleh. Sementara itu untuk mendapatkan koefisien gaya aksial (c_t) harus ditentukan terlebih dahulu rasio kecepatan ujung (λ) menggunakan persamaan berikut :

$$\lambda_i = \frac{2\pi R n_i}{v_i} \quad (3.4)$$

di mana :

$R = 5,3$ m, panjang sudu

$i = 17$; yaitu perbandingan antara putaran rotor 88 rpm dan putaran generator 1500 rpm

$v_i = 3,5$ m/det, kecepatan cut-in

$n_i =$ putaran generator pada saat kecepatan cut-in dihitung dengan persamaan :

$$\frac{n_i}{v_i} = \frac{n_r}{v_r} \quad (3.5)$$

$n_r = 1500$ rpm

$v_r = 7$ m/det, kecepatan angin rata-rata di lokasi.

Dengan data di atas diperoleh nilai,

$$n_i = 750 \text{ rpm} = 12,5 \text{ rps} \quad (3.6)$$

selanjutnya diperoleh rasio kecepatan ujung sebesar,

$$\lambda = 6,99598364 = 7,0 \quad (3.7)$$

dengan rasio kecepatan ujung tersebut koefisien gaya aksial dapat dilihat pada tabel 3.2. berikut, lihat pustaka [2] :

Tabel 3.2. KOEFISIEN GAYA AKSIAL UNTUK BEBERAPA NILAI λ

λ	c_t	c_q	c_p
1,00	0,1444	0,0054	0,0054
2,00	0,1604	0,0019	0,0036
3,00	0,2041	0,0108	0,0325
4,00	0,3485	0,0467	0,0868
5,00	0,5366	0,0703	0,3516
6,00	0,6749	0,0736	0,4413
7,00	0,7568	0,0658	0,4614
8,00	0,8187	0,0567	0,4537
9,00	0,8647	0,0466	0,4194
10,00	0,6377	0,0284	0,2843
11,00	0,5336	0,0160	0,2123
12,00	0,5038	0,0137	0,1600
13,00	0,3519	0,0107	0,1399
14,00	0,3498	0,0088	0,1226
15,00	0,3465	0,0070	0,1048

Pada rasio kecepatan ujung 7 m/dt diperoleh $c_t = 0,7568$. Substitusi nilai c_t ke dalam persamaan (2.7) diperoleh momen akibat gaya aksial sebagai fungsi kecepatan angin berbentuk

$$M_{ax} = 212,378 v^3 \text{ Nm} \quad (3.8)$$

Berdasarkan uraian vektor pada Gambar 2.1 dapat dirumuskan bahwa :

$$v = W \cos(90 - \phi) = W \sin \phi \quad (3.9)$$

substitusi persamaan (3.9) ke dalam (3.5) diperoleh :

$$M_{ak} = 212,378 W^2 \sin^2 \phi \quad (3.10)$$

3.3. Perhitungan Momen Inersia

Data sudu untuk menghitung volume yang diperoleh dari pustaka [1] yang dipadukan dengan data hasil pengukuran di lapangan, lihat tabel 3.3 berikut :

Tabel 3.3. DATA SUDU TURBIN ANGIN 10 KW

Model sudu	linier	
Berat Isudu	50 kg	
Tebal fiber	0,8 cm = 0,008 m	
Ukuran sudu	pangkal	ujung
cord	0,5 m	0,2 m
Tebal sudu bagian depan	0,1 m	0,03 m
Tebal sudu bagian belakang	0,02 m	0,01 m

Perhitungan luas penampang sudu didekati dengan model trapesium dan dengan menggunakan data hasil pengukuran dimensi sudu seperti pada tabel 3.3 di atas maka diperoleh :

$$\begin{aligned} \text{Luas bahan sudu pada bagian pangkal} &= 6,77 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2 \\ \text{Luas bahan pada bagian ujung sudu} &= 3,26 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2 \end{aligned}$$

Dimana data ini digunakan untuk menghitung volume dan masa jenis sudu.

Seperti diterangkan pada pustaka [1,2] bahwa model sudu turbin aeroman angin 10 kW adalah linier. Dengan demikian perhitungan luas penampang sudu sebagai fungsi jari-jari dapat didekati dengan persamaan berikut :

$$A(r) = \text{tg } \alpha \cdot r + A_u \quad (3.11)$$

di mana : $A(r)$ = Luas sudu sebenarnya
 A_u = Luas sudu sebenarnya bagian ujung
 r = berjalan antara 0 - 5,3 m

Dengan memasukkan data yang ada diperoleh :

$$A(r) = 6,61 \cdot 10^{-4} r + 3,264 \cdot 10^{-3} \quad (3.12)$$

Selanjutnya momen inersia dihitung menggunakan persamaan :

$$\begin{aligned} I &= \int r^2 dm \\ I &= \int r^2 \rho A(r) dr \end{aligned} \quad (3.13)$$

substitusi persamaan (3.12) ke dalam (3.13) dan penyelesaian integrasinya menghasilkan :

$$I = 0,29 \rho \quad (3.14)$$

Volume sudu dihitung menggunakan persamaan :

$$V = \int A(r) dr \quad (3.15)$$

substitusi persamaan (3.12) ke dalam (3.15) menghasilkan :

$$V = 0,02658 \text{ m}^3 \quad (3.16)$$

momen inersia untuk 2 (dua) sudu adalah :

$$I = 1099,93 \text{ kg m}^2 \quad (3.17)$$

4. PERSAMAAN KEADAAN

Terdapat tiga metoda [3] yang dapat dipergunakan untuk membentuk suatu persamaan keadaan dan persamaan keluaran dari suatu sistem yaitu :

1. Berdasarkan sistem fisisnya
2. Berdasarkan persamaan diferensial sistem
3. Berdasarkan fungsi alih dari sistem

4.1. Metoda Pembentukan Persamaan Keadaan

Metoda pertama, komponen state \underline{x} ditentukan langsung dari tinjauan kita terhadap sistem fisisnya. Prosesnya dilakukan dengan mengambil besaran-besaran yang pada saat permulaan merupakan kondisi mula dari sistem yang bersangkutan (misal pada $t = 0$ diambil nilai $\underline{x} = \underline{x}_0$). Selanjutnya diturunkan persamaan keadaan dan persamaan keluaran sebagai fungsi dari state \underline{x} dan input u , dan diperoleh persamaan berbentuk :

$$\dot{\underline{x}} = A\underline{x} + Bu \quad (4.1)$$

$$y = C\underline{x} \quad (4.2)$$

di mana : A, B, C = matrik
 \underline{x} = vektor matrik

Metoda ini lebih praktis digunakan untuk rangkaian/diagram fisis sistem yang sudah diketahui. Di mana besaran-besaran yang menentukan kondisi mula dipilih sebagai variabel keadaan.

Metoda kedua, membentuk persamaan keadaan dan persamaan keluaran berdasarkan persamaan diferensial sistem. Cara ini digunakan apabila model sistem dinyatakan oleh persamaan diferensial, misalnya berbentuk :

$$y^{(n)} + b_{n-1}y^{(n-1)} + \dots + b_1y^{(1)} + b_0y = u \quad (4.3)$$

Untuk itu variabel-variabel yang pada saat permulaan ($t = 0$) menentukan kondisi awal sistem, dipilih sebagai variabel keadaan. Dari persamaan (4.3) selanjutnya dapat dibentuk suatu persamaan keadaan dan persamaan keluaran seperti pada persamaan (4.1) dan (4.2).

Metoda ketiga. membentuk persamaan keadaan dan persamaan keluaran berdasarkan fungsi alih sistem. Cara ini dilakukan apabila sistem dinyatakan oleh suatu fungsi alih $T(s)$ yang secara umum berbentuk :

$$T(S) = \frac{Y(S)}{U(S)} \quad (4.4)$$

$$T(S) = \frac{a_m S^m + a_{m-1} S^{m-1} + \dots + a_1 S + a_0}{S^n + b_{n-1} S^{n-1} + \dots + b_1 S + b_0}$$

di mana $m < n$

Dengan metoda ini persamaan keadaan dan persamaan keluaran dapat diperoleh dengan 2 cara yaitu cara seri dan paralel *lihat pustaka* [7].

4.2. Persamaan Keadaan Turbin Angin Sumbu Datar

Dengan melakukan perhitungan pada persamaan (3.3), (3.10), (3.17) dan hasilnya disubstitusikan ke dalam persamaan (2.9) diperoleh :

$$1099,93 \frac{\dot{\theta}^2}{\alpha^2} + b \frac{\dot{\theta}}{\alpha} + k\theta = 109,57W^2 [\sin\phi - 10^{-2} \cos\phi] + 212,378W \sin^2\phi \quad (4.5)$$

di mana :

ϕ = sudut pitch sudu

W gangguan putih (white noise) yakni resultan antara kecepatan angin dan kecepatan putar sudu.

Persamaan (4.5) adalah persamaan diferensial gerak rotor turbin angin yang didalamnya sudah terkait dengan sudut pitch sudu. Pada persamaan tersebut masukkan sistem adalah sudut pitch sudu ϕ dan gangguan W , di mana keduanya berada dalam satu suku, oleh karena itu kedua parameter harus dipisahkan.

Pemisahan kedua parameter dilakukan dengan cara pendekatan matematis. Selanjutnya dari Gambar 2.1 dapat dituliskan persamaan :

$$\phi = \alpha + \beta \quad (4.6)$$

Selanjutnya dilakukan penguraian vektor sbb :

$$W = w + w \quad (4.7)$$

$$\phi = \phi + \varphi \quad (4.8)$$

Pendekatan yang diambil adalah :

$$\cos \varphi \approx 1 \quad (4.9)$$

$$\sin \varphi \approx \text{diabaikan} \quad (4.10)$$

$$\beta = \varphi + \varphi \quad (4.11)$$

Dengan pendekatan tersebut dan melakukan perhitungan pada persamaan (4.5), maka diperoleh

$$1099,93\ddot{\theta} + b\dot{\theta} + k\theta = 109,57(\bar{w} + w)^2 [\text{Sin}(\bar{\phi} + \varphi) - 10^{-2} \text{Cos}(\bar{\phi} + \varphi)] + 212,378(\bar{w} + w)^2 \text{Sin}^2(\bar{\phi} + \varphi) \quad (4.12)$$

Dari data yang disajikan pada tabel 3.1 dan didukung dengan data hasil pengukuran di lapangan, hasil perhitungan memberikan nilai-nilai sbb :

$$\begin{aligned} \alpha &= 4^\circ \\ \bar{\varphi} &= 31^\circ \\ \bar{\phi} &= 35^\circ + \varphi \\ w &= 7 \text{ m/det} \end{aligned}$$

Selanjutnya dengan menguraikan tiap-tiap suku, substitusi nilai yang diperoleh dan melakukan pendekatan matematis terhadap persamaan (4.12), diperoleh persamaan :

$$1099,93\ddot{\theta} + b\dot{\theta} + k\theta = 7457,55 + 14317,91u + 2129,96w \quad (4.13)$$

di mana :

$u = \text{Sin } \phi = \text{masukkan}$
 $w = \text{gangguan putih}$

Persamaan di atas dapat ditulis dalam bentuk sbb :

$$\ddot{\theta} + \frac{b}{1099,93}\dot{\theta} + \frac{k}{1099,93}\theta = 6,78 + 13,02u + 1,93w \quad (4.14)$$

Untuk dapat memberikan gambaran yang lebih jelas tentang penentu faktor damping (damping ratio), maka persamaan di atas di kembalikan ke dalam bentuk persamaan dasar orde dua sbb :

$$s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2 = 6,78 + 13,02u + 1,93w \quad (4.15)$$

Dengan membandingkan persamaan (4.14) dan (4.15) diperoleh :

$$\frac{b}{1099,93} = 2\xi\omega_n \quad (4.16)$$

di mana :

$\xi = \text{faktor damping (damping ratio)}$
 $\omega_n = \text{frekuensi pribadi (natural frequency)}$

Keduanya diperoleh dari persamaan berikut :

$$\xi = -\text{Cos}(\angle \log \lambda) \quad (4.17)$$

$$\omega_n = \left| \frac{\log \lambda}{\tau_s} \right| \quad (4.18)$$

di mana : $\lambda = \text{nilai eigen matrik A}$
 $\tau_s = \text{waktu sampling}$

Selanjutnya dengan mengambil

$$\theta = x_1, \dot{\theta} = x_2, \ddot{\theta} = \dot{x}_2$$

maka diperoleh persamaan keadaan turbin angin sumbu datar sudut pitch sudu variabel berbentuk :

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\frac{k}{1099,93} & -\frac{1}{1099,93} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 13,02 \end{bmatrix} u + \begin{bmatrix} 0 \\ 1,93 \end{bmatrix} w \quad (4.19)$$

Persamaan keluaran sistem adalah :

$$y = \begin{bmatrix} 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} \quad (4.20)$$

Di mana b dan k adalah parameter sistem tak gayut waktu. Berkaitan dengan parameter tersebut yang dapat diketahui hanyalah batasan nilai yang diperbolehkan agar sistem stabil (*dilakukan dengan simulasi pada tulisan lain*).

Persamaan (4.19) dan (4.20) adalah persamaan keadaan dan persamaan keluaran dari turbin angin sumbu datar dengan sudut pitch sudu variabel yang **dihasilkan** dalam tulisan ini. Pemakaian kedua persamaan untuk turbin angin dengan kapasitas berbeda dapat dilakukan dengan cara mengganti nilai matrik A, B, C dengan nilai dari identifikasi parameter turbin yang diinginkan.

5. KESIMPULAN

Dari uraian yang telah disajikan diatas dapat diambil beberapa kesimpulan yaitu :

1. Model matematis putaran rotor turbin angin sumbu datar yang diperoleh adalah orde dua.
2. Untuk turbin angin dengan kapaitas ≤ 5 kW, sistem pengaman yang sesuai adalah sudut pitch tetap. Sedangkan untuk turbin angin berkapasitas > 5 kW lebih sesuai menggunakan sistem pengaman dengan sudut pitch sudu variabel.
3. Persamaan (4.19) dan (4.20) yang dihasilkan pada tulisan ini dapat digunakan sebagai acuan untuk pemodelan turbin angin sejenis meskipun kapasitasnya berbeda.
4. Dilihat dari nilai eigen matrik A pada persamaan (4.19), maka sistem dalam keadaan stabil jika nilai k dan b positif.

DAFTAR PUSTAKA

1. Bidang Teknologi Dirgantara Terapan; *Operational Manual of Aeroman Wind Turbine*; LAPAN, Rumpin.
2. Bidang Teknologi Energi & Spin off; *Rancangan Turbin Angin Pembangkit Listrik 10 kW*; LAPAN Rumpin, Juni 1988.

3. Edi Leksono (Katsuhiko Ogata); *Teknik Kontrol Automatik (Sistem Pengaturan, Jilid 2)*. Penerbit Erlangga, Jakarta 1991
4. Eko Budi Purwanto, Soeripno; *Perhitungan Gaya-Gaya Pada Sistem Pengaman Tipe Auxiliary Vane dan Ekor Pengarah Pada Kincir Angin Sudu Majemuk 18 Daun Untuk Pemompaan Air*; Bidang Teknologi Dirgantara Terapan LAPAN, Rumpin 1995.
5. Eko Budi Purwanto; *Rancangan Pengatur Kecepatan Kincir Angin Sudu Majemuk 4 Daun Untuk Pemompaan Air Tambak Garam*; Majalah LAPAN, No 66, Jakarta Juli 1993.
6. Ioan Dore Landau; *System Identification and Control Design*; Prentice-Hall International, Inc. Englewood Cliffs, N.J. 1990.
7. Karl J. Astrom, Bjorn Wittermark; *Computer Controlled Systems "Theory and Design"* Prentice-Hall International, Inc Englewood Cliffs, N.J. 1990.
8. M. J. Grimble; *Horizontal Axis Wind Turbine Control : Comparison of Classical, H_∞ and LQG Designs*; Industrial Control Unit, University of Strathclyde, Glasgow, UK, April 1991.