

Perancangan Pengendali *Knowledge Base MIMO* pada Turbin Angin

Tri Nurwati

Abstrak—Perancangan pengendali *Knowledge Base MIMO* pada turbin angin bersumbu horisontal yang fleksibel terhadap kecepatan angin yang berubah-ubah dengan memperoleh nilai daya yang paling maksimal. Pada turbin angin tanpa pengontrol, apabila kecepatan angin meningkat maka daya yang diperoleh dari baling-baling akan menurun. Agar sistem turbin angin dapat mengkonversi daya maksimal tanpa melebihi kecepatan putar rotor generator maka dilakukan pengontrolan *pitch* baling-baling dan tegangan penguat medan generator dc. Sistem pengendali turbin angin dapat meningkatkan daya yang dikonversi oleh sistem turbin angin sebesar 0% - 50%, bergantung pada kecepatan angin tanpa melebihi kecepatan putar nominal generator dc.

Kata Kunci—Sekitar empat kata kunci atau frasa dalam urutan abjad yang terpisah oleh koma.

I. PENDAHULUAN

TURBIN angin merupakan salah satu mesin konversi energi yang dapat mengubah energi kinetik menjadi energi mekanik, selanjutnya dengan menggunakan generator energi mekanik dapat diubah menjadi energi listrik. Dalam tiap periode misal dalam 1 hari, kecepatan angin tidak selalu konstan, sehingga daya yang dihasilkan generator juga tidak selalu konstan. Padahal pembangkit listrik tenaga angin membuat jaringan distribusi yang kebutuhan dayanya tertentu. Agar kebutuhan listrik konsumen tercukupi secara konstan maka diperlukan baterai yang berguna menyimpan energi listrik. Sehingga jika kecepatan angin kecil maka baterai akan menyalurkan energi listrik ke konsumen.

Pengoperasian turbin angin secara biasa (tanpa pengendali), tidak akan dapat mengubah energi angin secara optimal. Demikian pula pada pengendalian turbin angin untuk mendapatkan kecepatan rotor turbin yang tetap, daya yang dikonversi oleh turbin biasanya hanya akan maksimal jika kecepatan angin sama dengan kecepatan desain. Salah satu cara untuk memperoleh efisiensi daya yang dihasilkan oleh turbin angin dapat optimal untuk setiap kecepatan angin yang berbeda, perlu adanya pengendalian derajat *pitch* dan tegangan medan generator pada sistem turbin angin dengan

pengendalian *Knowledge Base MIMO*.

II. KINCIR ANGIN

A. Model Dinamik

Pada dasarnya turbin angin menyerap daya dari angin ketika baling-baling dilalui oleh aliran udara. Aliran udara yang mengalir melalui permukaan baling-baling menyebabkan timbulnya gaya tangensial akibat adanya gaya angkat (F_{lift}) dan gaya dorong (F_{drag}) pada turbin angin. Arah dari gaya angkat (F_{lift}) yang dihasilkan tegak lurus (vertikal) terhadap arah angin, sementara gaya dorong (F_{drag}) mempunyai arah yang sama dengan arah angin. Derajat *pitch* merupakan sudut antara *chord line* (garis melintang badan baling-baling) dengan bidang putar baling, dan *angle of attack* α merupakan sudut antara *chord line* baling-baling dengan kecepatan relatif. Kecepatan angin relatif merupakan resultan antara kecepatan angin (V_w) yang masuk ke baling-baling dengan komponen kecepatan angin pada arah perputaran baling-baling (V_b).

Daya yang dihasilkan oleh turbin angin dipengaruhi oleh rapat jenis angin dan kecepatan angin, (El-Wakil, 1984) yang dirumuskan sebagai berikut:

$$P_a = \dot{m} \cdot \frac{v^2}{2g} \quad (1)$$

$$\dot{m} = \rho \cdot A \cdot v \quad (2)$$

apabila persamaan 2 disubstitusikan pada persamaan 1, maka diperoleh:

$$P_a = \frac{1}{2g} \cdot \rho \cdot A v^3 \quad (3)$$

Berdasarkan hukum mekanika rotasi (Sears, 1962) daya turbin angin diperoleh:

$$P = T \cdot \omega \quad (4)$$

Untuk daya yang bisa dikonversi oleh turbin angin dari energi yang terdapat di angin dirumuskan sebagai berikut:

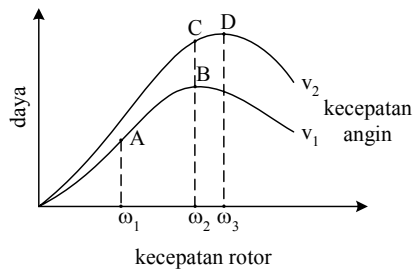
$$P = \frac{1}{2} \cdot C_p \cdot \rho \cdot A v^3 \quad (5)$$

$$A = \pi \cdot R^2 \quad (6)$$

Jika derajat *pitch* konstan, maka C_p hanya bergantung pada nilai λ yang didapat dari rumus berikut:

$$\lambda = \frac{\omega R}{v_{in}} \quad (7)$$

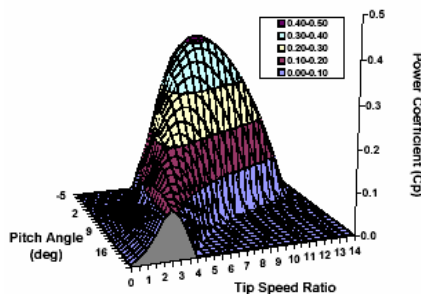
Hubungan antara daya yang dikonversikan oleh turbin angin dengan kecepatan rotor generator dan kecepatan angin ditunjukkan oleh kurva pada gambar 1.



Gambar 1 Hubungan antara kecepatan angin, kecepatan rotor turbin dan daya turbin angin. (Sumber: Mullane, 2001)

Dari Gambar 1 diketahui bahwa jika kecepatan angin v_1 dan turbin beroperasi pada A (untuk kecepatan rotor ω_1), daya maksimal yang bisa diperoleh pada saat kecepatan angin v_1 adalah pada titik kerja A. Sehingga agar daya yang dikonversi bisa maksimal, kecepatan rotor harus diubah menjadi ω_1 sehingga titik kerja turbin menjadi di titik B. Jika kemudian kecepatan angin berubah menjadi v_2 , maka titik kerja turbin akan berpindah ke titik C. perpindahan titik kerja ini menyebabkan daya yang diperoleh menjadi tidak maksimal, daya akan maksimal dengan memindahkan titik kerja turbin angin dari titik C ke titik D dengan cara mengubah kecepatan rotor menjadi ω_2 . Hal ini menunjukkan bahwa untuk mendapatkan daya secara maksimal, kecepatan rotor harus berubah mengikuti perubahan dari kecepatan angin.

Karakteristik turbin angin seperti Gambar 2. memperlihatkan bahwa koefisien daya C_p bervariasi dengan λ dengan derajat *pitch* yang berbeda, dimana $TSR(\lambda)$ adalah perbandingan antara kecepatan baling-baling dengan kecepatan angin yang masuk ke baling-baling.



Gambar 2. Hubungan antara koefisien daya, λ dan derajat *pitch* (Sumber: Mullane, 2001)

Hal tersebut diasumsikan bahwa turbin dioperasikan pada nilai C_p yang tinggi pada setiap waktu. Dengan mengontrol variabel *pitch*, pada saat λ bernilai rendah maka *pitch* dapat diatur supaya C_p bernilai pada maksimal.

Torsi turbin angin dirumuskan sebagai berikut:

$$T_T = \frac{P}{\omega} = \frac{1}{\omega} \cdot \frac{1}{2} C_p \cdot \rho \cdot A v_w^3 \quad (8)$$

pada torsi mengandung koefisien torsi sebagai

$$C_T = \frac{C_p}{\lambda} \quad (9)$$

$$\frac{1}{\omega} = \frac{R}{\lambda \cdot v_w} \quad (10)$$

dari persamaan-persamaan diatas diperoleh torsi turbin yaitu:

$$T_T = \frac{1}{2} \frac{C_p}{\lambda} \frac{R}{v_w} \rho \cdot \pi \cdot R^2 \cdot v_w^3 \quad (11)$$

$$T_T = \frac{1}{2} C_T \rho \cdot \pi \cdot R^3 \cdot v_w^2 \quad (12)$$

Torsi yang bekerja pada rotor merupakan jumlah dari torsi sumber yang dihasilkan oleh turbin angin (T_T), dan torsi beban sebagai akibat dari pembebanan (T_L) yang dilakukan oleh generator dikurangi dengan rugi-rugi akibat gesekan yang dirumuskan sebagai berikut:

$$\sum T = T_T - T_L - b \cdot \omega = J \cdot \alpha = J \cdot \dot{\omega} \quad (13)$$

Persamaan diatas ditransformasikan dengan transformasi Laplace sehingga diperoleh sebagai berikut:

$$T_T - T_L - b \cdot \omega = J \cdot s \cdot \omega \quad (14)$$

dan diperoleh kecepatan rotor

$$\omega = \frac{1}{Js + b} (T_T - T_L) \quad (15)$$

B. Gearbox

Generator tidak terhubung secara langsung dengan sistem turbin angin, tetapi terhubung dengan gearbox. Penggunaan gearbox ini dikarenakan generator membutuhkan kecepatan putar yang jauh lebih besar dari kecepatan rotor turbin, sehingga diperlukan faktor pengali agar kecepatan putar generator bisa lebih tinggi. Pengaruh dari gearbox dengan faktor pengali n terhadap persamaan sistem dirumuskan sebagai berikut:

$$T_s = \frac{T_T}{n} \quad (16)$$

$$\omega_g = \omega_T \cdot n \quad (17)$$

Adanya gearbox juga berpengaruh terhadap momen inersia total yang menjadi beban generator.

Momen inersia yang menjadi beban generator selanjutnya dirumuskan sebagai berikut:

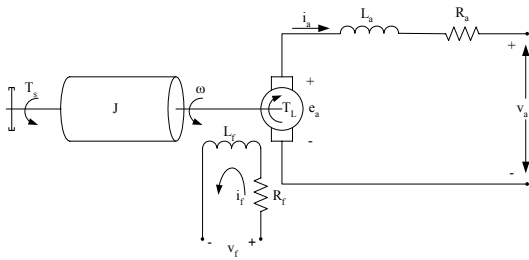
$$J_R = \left(\frac{1}{n} \right)^2 J_T + J_g \quad (18)$$

C. Generator DC dengan Penguat Terpisah

Prinsip kerja generator DC penguat terpisah ditunjukkan pada Gambar 3. Jika kumparan medan generator dc diberi tegangan penguat medan sebesar v_f , maka akan mengalir arus penguat medan sebesar i_f . Arus penguat medan (i_f) yang mengalir melalui kumparan medan menyebabkan timbulnya medan fluksi (Φ_d).

Putaran pada sisi rotor yang dihasilkan oleh torsi sumber T_s memotong medan fluksi (Φ_d) menyebabkan timbulnya tegangan induksi (e_a) pada kumparan jangkar. Dan jika rotor terhubung ke beban, maka akan mengalir arus beban yang besarnya sama dengan arus jangkar (i_a). Adapun arus beban menyebabkan timbul torsi beban T_L yang melawan torsi sumber T_s yang besarnya dirumuskan sebagai berikut:

$$T_L = \frac{e_a \cdot i_a}{\omega} \quad (19)$$



Gambar 3. Prinsip kerja generator dc penguat terpisah
(Sumber: Fitzgerald, 1984)

Persamaan generator dc penguat terpisah dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$v_f = R_f \cdot i_f + L_f \cdot \frac{di_f}{dt} \quad (20)$$

$$v_a = e_a - R_a \cdot i_a - L_a \cdot \frac{di_a}{dt} \quad (21)$$

$$e_a = K_a \cdot \Phi_d \cdot \omega \quad (22)$$

Dengan mengasumsikan generator dc sebagai mesin dc ideal yang mempunyai satu lilitan medan dan kejenuhan magnetiknya diabaikan, maka medan fluksi (Φ_d) berbanding secara linier dengan arus medan i_f sehingga diperoleh persamaan sebagai berikut:

$$e_a = k_f \cdot i_f \cdot \omega \quad (23)$$

$$T_L = k_f \cdot i_f \cdot i_a \quad (24)$$

dimana k_f merupakan konstanta penguatan medan.

Persamaan (21), (22), (24) dan (25) ditulis ulang dalam kawasan frekuensi dengan menggunakan transformasi laplace, sehingga didapat persamaan sebagai berikut:

$$V_f = R_f \cdot I_f + L_f \cdot I_f \cdot s \quad (25)$$

$$V_a = E_a - R_a \cdot I_a - L_a \cdot I_a \cdot s \quad (26)$$

$$E_a = k_f \cdot I_f \cdot \omega \quad (27)$$

$$T_L = k_f \cdot I_f \cdot I_a \quad (28)$$

Pada generator dc dihubungkan dengan baterai, dianggap sebagai beban generator dc berupa resistor murni, maka selanjutnya V_a menjadi:

$$V_a = R_{\text{baterai}} \cdot I_a \quad (29)$$

Apabila persamaan (29) disubstitusikan ke persamaan (27) maka diperoleh persamaan sebagai berikut:

$$E_a = R_{\text{baterai}} \cdot I_a + R_a \cdot I_a + L_a \cdot I_a \cdot s \quad (30)$$

III. PENGENDALI KNOWLEDGE BASED

Basis pengetahuan berisi fakta-fakta tentang objek dalam domain yang telah ditentukan, pikiran, teori dan prosedur praktis serta hubungannya satu sama lainnya. Basis pengetahuan juga merupakan informasi terorganisir dan teranalisis agar bisa lebih mudah dimengerti dan bisa diterapkan pada pemecahan masalah dan pengambilan keputusan.

A. Representasi pengetahuan

Pola representasi pengetahuan menggambarkan aspek-aspek penting dari suatu masalah. Dari pola representasi yang dibuat, kemudian akan dirancang

suatu basis pengetahuan berdasarkan pola tersebut. Representasi diatur agar dapat diakses oleh prosedur pemecahan problema. Bahasa representasi haruslah mampu mengekspresikan basis pengetahuan yang diperlukan untuk mendapatkan solusi permasalahan. Objek, relasi dan inferensi perhitungan yang tersedia dalam basis pengetahuan ditentukan oleh representasi pengetahuan yang dipilih.

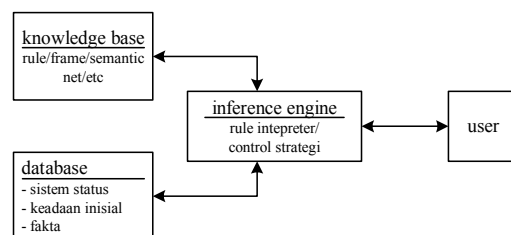
Adalah suatu hal yang penting untuk mempresentasikan fakta dan aturan dengan basis pengetahuan adar mudah mempresentasikan, memanggil, memodifikasi dan meng-*updated* serta sesuai dengan format komputer.

Alternatif untuk mendapatkan pengetahuan melalui perantara manusia yang kemudian diubah ke aturan produksi (production rule) sebelum menggambarkan salah satu pengetahuan untuk membuat rule dari data, pertama menggambarkan komponen dari rule base yang terdiri dari production rule. Beberapa langkah yang diambil adalah sebagai berikut:

1. Identifikasi objek, atribut dan nilainya
2. Menyusun tabel atribut
3. Membuat tabel keputusan (*decision table*)
4. Mengembangkan alternatif decision tree yang lebih sederhana
5. Menyusun rule dari *decision tree*

B. Mekanisme Inferensi

Mekanisme inferensi adalah cara untuk mengarahkan sistem pada kesimpulan, yang diperoleh dari aturan dan fakta yang ada. Dengan pendekatan tertentu, mekanisme inferensi ini melibatkan konversi dari representasi pengetahuan yang ada ke dalam bentuk pendekatan mekanisme inferensi yang dipilih. Misalnya konversi pohon keputusan (decision tree) ke dalam bentuk aturan *If-Then*. Seperti *Knowledge Base*, mesin inferensi terdiri dari rule dan fakta untuk mengontrol dan digunakan dalam strategi pencarian untuk mencari solusi. Dalam sistem pakar, penyelesaian suatu problema dapat digambarkan sebagai berikut:



Gambar 4. Diagram Blok Penyelesaian Masalah Sistem Pakar
(Sumber: Ignizio, 1991)

Mesin inferensi melakukan pelacakan, pengocokan kaidah dalam basis pengetahuan terhadap informasi yang ada di dalam basis data. Bila setiap kaidah bisa merubah isi basis data, maka status masalah akan diperbaiki. Fakta baru tersedia untuk digunakan dalam proses pengambilan keputusan. Selanjutnya, fungsi khusus seperti permintaan penambahan informasi dari user dapat diberikan. Dalam melacak keadaan, rule

interpreter dapat melakukan dua macam pendekatan dasar, yaitu:

1) Forward chaining

Rule interpreter mencocokkan fakta/statement dalam basis data dengan situasi yang dinyatakan dalam bagian sebelah kiri atau kaidah If. Bila fakta itu sudah sesuai dengan kaidah If, maka kaidah atau rule distimulasi.

2) Backward chaining

Rule interpreter mulai dari fakta yang ada dalam basis data, yaitu hipotesis. Rule interpreter kemudian mulai menguji kaidah sebelah kanan, yaitu bagian Then untuk mencari yang sesuai. Mesin inferensi melacak bukti-bukti yang mendukung hipotesa awal. Jika ternyata cocok, maka basis data berfungsi sebagai pencatat kondisi/premis yang diperbaharui yang mendukung kesimpulan yang sesuai.

Basis pengetahuan dianggap terdiri dari basis data (database), aturan-aturan dasar (rulebase), dan representasi pengetahuan yang digunakan adalah representasi dengan sistem rulebase.

Pengendali dengan *knowledge base system* merupakan pengendali yang merelasikan data input/output kontroller yang didapatkan melalui eksperimen dengan menggunakan representasi basis pengetahuan. Untuk data input output dalam bentuk diskrit, digunakan representasi “jika ... , maka ...” yang disebut juga *look up table*. Representasi ini memiliki kekurangan yaitu untuk data yang tidak berada dalam tabel look up table harus menggunakan bantuan interpolasi. Ada kalanya relasi data input output sistem sedemikian sehingga dapat dinyatakan dalam bentuk fungsional dengan menggunakan metode regresi.

Pada penelitian ini, metode yang digunakan dalam menentukan output pengendali pada error tertentu adalah dengan mencari basis data yang merupakan bagian dari basis pengetahuan dengan cara membandingkan respon model yang diinginkan dengan respon plant pada sampling tertentu kemudian dikalikan dengan input step dari plant. Apabila telah mendapatkan data input output pengendali, yang digunakan untuk mencari hubungan fungsional antara input dan output pengendali, maka dilakukan regresi. Regresi yang umum dikenal antara lain:

1) Regresi linier

Pencocokan garis lurus terhadap suatu himpunan pasangan data: $(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_n, y_n)$. Data-data tersebut dapat didekati dengan persamaan sebagai berikut:

$$y = ax + b \quad (31)$$

2) Regresi dengan transformasi variabel

Regresi nonlinier dengan pendekatan linier dengan transformasi variabel.

3) Regresi polinomial

Jika pasangan data (x_i, y_i) , $i = 1..n$, akan didekati dengan fungsi polinomial berderajat m sebagai berikut:

$$y = a_0 + a_1x + a_2x^2 + \dots + a_mx^m \quad (32)$$

nilai koefisien dapat diperoleh dengan menggunakan

matrik sebagai berikut:

$$\begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ \vdots \\ a_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} n & \sum x_i & \cdots & \sum x_i^m \\ \sum x_i & \sum x_i^2 & \cdots & \sum x_i^{m+1} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \sum x_i^m & \sum x_i^{m+1} & \cdots & \sum x_i^{2m} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \sum y_i \\ \sum x_i y_i \\ \vdots \\ \sum x_i^m y_i \end{bmatrix}$$

4) Regresi ganda

Regresi ini digunakan untuk membuat suatu model hubungan antar sebuah variabel terikat (dependent variabel) dengan dua atau lebih variabel bebas. Persamaan dasar polinomialnya sebagai berikut:

$$y = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + \dots + a_mx_m + \epsilon \quad (33)$$

dengan menggunakan *least square estimate*, koefisien persamaan diatas dapat diperoleh dengan persamaan berikut:

$$\begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ \vdots \\ a_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} n & \sum x_{1i} & \cdots & \sum x_{mi} \\ \sum x_{1i} & \sum x_{1i}^2 & \cdots & \sum x_{1i}x_{mi} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \sum x_{mi} & \sum x_{1i}x_{mi} & \cdots & \sum x_{mi}^2 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \sum y_i \\ \sum x_{1i}y_i \\ \vdots \\ \sum x_{mi}y_i \end{bmatrix} \quad (34)$$

Untuk kasus yang mempunyai 2 variabel bebas x_1 dan x_2 ada 4 model regresi ganda yang dapat dibuat, yaitu:

a) model orde 1 dengan tidak ada interaksi antara variabel satu dengan yang lain:

$$y = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + \epsilon \quad (34)$$

b) metode orde 2 dengan tidak ada interaksi antara variabel satu dengan yang lain:

$$y = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + a_3x_1^2 + a_4x_2^2 + \epsilon \quad (35)$$

c) model orde 1 dengan ada interaksi antara variabel satu dengan yang lain:

$$y = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + a_3x_2x_1 + \epsilon \quad (36)$$

d) metode orde 2 dengan ada interaksi antara variabel satu dengan yang lain:

$$y = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + a_3x_1^2 + a_4x_2^2 + a_5x_2x_1 + \epsilon \quad (37)$$

5) Look up table

Untuk pasangan input output suatu pengendali (x_i, y_i) ; $i=1..n$ dengan look up table dapat ditentukan aturan dasar sebagai berikut:

a) jika $x = x_i$, maka $y = y_i$

b) jika $x_i < x < x_{i+1}$, maka $y = \text{interpolasi } (x_i, y_i) \text{ ke } (x_{i+1}, y_{i+1})$

c) jika $x < x_n$, maka $y = \text{ekstrapolasi } (x_{n-1}, y_{n-1}) \text{ dan } (x_n, y_n)$

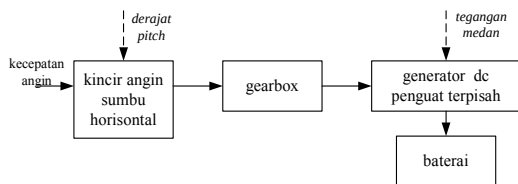
Pengendali didesain sedemikian hingga sistem HAWT tetap beroperasi pada koefisien daya

maksimumnya sehingga sistem HAWT dapat mengkonversi daya secara optimal.

IV. DESAIN DAN SIMULASI SISTEM PENGENDALI

Respon sistem tanpa kontroler dipergunakan sebagai data pembanding terhadap hasil dari sistem kontrol plant. Untuk mengetahui respon sistem tanpa kontroler, sistem turbin angin yang telah dihubungkan dengan generator disimulasikan mempergunakan program Simulink. Pada sistem tanpa kontroler, tegangan penguat medan pada generator DC dan derajat *pitch* pada baling-baling mempunyai nilai yang konstan.

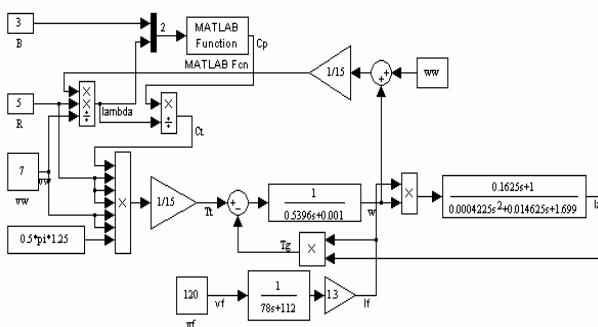
Pada penelitian ini, sistem turbin angin yang diteliti adalah jenis *Horizontal Axis Wind Turbine* (HAWT) yang tersusun dari kincir angin, gearbox, generator dc dan baterai seperti pada Gambar 4, menunjukkan diagram fungsional sistem turbin angin dengan sumbu horizontal.



Gambar 4 Sistem Turbin Angin

Pada awal mensimulasikan plant, terlebih dahulu dicoba nilai tegangan yang berubah ubah dengan nilai derajat *pitch* yang konstan, pada simulasi digunakan nilai derajat *pitch* sebesar 3° dan nilai kecepatan angin pada kecepatan rata-rata sebesar 7 m/s. Nilai tegangan penguat medan didesain sedemikian sehingga plant dapat beroperasi pada kecepatan v_{cut} in.

Hal ini terkait dengan efek pembebanan sebagai akibat dihubungkannya kincir angin dengan generator. Efek pembebanan dapat dilihat dari simulasi dengan kecepatan angin rata-rata = 7 m/s seperti pada Gambar 5.



Gambar 5 Rangkaian Simulasi Turbin Angin $v_w = 7$ m/s, $\beta = 3^\circ$

Dan program yang menghasilkan nilai C_p sebagai berikut:

```
function cp = sad(b,1)
if b<3 & b>0
    b=6-b;
    b=b*1.2-0.59;
    l=1+2.68-1*0.04;
    a=(0.504-0.0167*b)*sin((pi*(1-3))/(15-0.3*b))-0.00184*(1-3)*b;
    if a<=0 cp=0;
    else cp=a;
end
elseif b>=3
```

```
b=b*1.2-0.59;
l=1+2.68-1*0.04;
a=(0.504-0.0167*b)*sin((pi*(1-3))/(15-0.3*b))-0.00184*(1-3)*b;
if a<=0 cp=0;
else cp=a;
end
elseif b>=3
```

Respon hasil simulasi untuk 4 nilai V_f yang berbeda dengan kecepatan angin yang tetap (7 m/s) ditunjukkan pada Tabel 1.

TABEL 1
RESPON SIMULASI RANGKAIAN TURBIN ANGIN DENGAN V_w 7 M/S

V_f (volt)	T_t (N.m)	ω (rad/m)	λ	C_p
50	36	183	8	0,4055
65	48	144	6	0,4153
100	60	76	3	0,2772
220	0	0	0	0

Dari hasil diatas dapat dianalisa, dengan semakin besar nilai tegangan penguat medan maka nilai kecepatan putar rotor (ω) dan TSR(λ) semakin kecil, dan nilai torsi turbin semakin besar dengan batas tertentu (pada $V_f = 220$ V, torsi turbin=0). Torsi turbin akan naik nilainya dan kemudian akan turun sesuai dengan nilai koefisien daya. Nilai koefisien daya terpengaruh dengan karakteristik turbin angin yang digunakan.

Efek dari pembebanan karena dihubungkan dengan generator mempengaruhi nilai torsi generator. Dari torsi generator nilai C_p , lambda dan kecepatan rotor juga berubah sesuai dengan perubahan nilai tegangan penguat medan.

Dari Gambar diatas, respon koefisien daya (C_p) akan mencapai nilai maksimal pada tegangan penguat medan yang semakin kecil dengan batas tertentu, pada jurnal ini dicoba nilai tegangan penguat medan pada 50 volt, 100 volt dan 220 volt. Pada $V_f = 50$ volt nilai $C_p = 0,4003$, pada $V_f = 100$ volt nilai $C_p = 0.2718$, pada $V_f = 220$ volt nilai $C_p = 0$. Dan nilai lambda dan kecepatan rotor juga semakin menurun dengan naiknya nilai tegangan penguat medan. Namun pada nilai torsi turbin, $V_f = 50$ volt nilai $T_t = 37$, pada $V_f = 100$ volt nilai $T_t = 60,5$, pada $V_f = 220$ volt nilai $T_t = 0$. Pada simulasi, untuk mendapatkan nilai C_p yang maksimal (0.4154) diperoleh pada nilai tegangan penguat medan $V_f = 65$ volt. Dan mendapatkan nilai torsi yang maksimal ($T_t = 66,85$) pada $V_f = 120$ volt.

Selanjutnya dilakukan simulasi untuk mengetahui nilai tegangan penguat medan V_f pada turbin angin yang dapat menghasilkan daya maksimal pada kecepatan angin v_{cut} in. Untuk memudahkan mendapatkan nilai V_f yang menghasilkan nilai daya yang paling maksimal dapat dilihat dari persamaan (2-5), bahwa nilai daya tergantung dari nilai koefisien daya. Sehingga dapat dipilih langsung untuk mendapatkan nilai daya generator yang maksimal ditentukan nilai V_f sebesar 65 volt dapat dilihat pada Gambar 2.

Daya yang dihasilkan turbin angin pada kecepatan angin 7 m/s seperti pada Gambar 2. Selanjutnya sistem turbin angin diuji pada kecepatan 5 m/s dan 14 m/s sebagai perbandingan koefisien daya pada tiap-tiap kecepatan tersebut. Dari hasil simulasi tersebut, dapat dilihat bahwa nilai koefisien daya sistem turbin angin cenderung menurun seiring dengan naiknya kecepatan angin. Data koefisien daya dari sistem turbin angin tanpa pengendali selanjutnya dapat digunakan sebagai data pembandingan untuk mengetahui peningkatan daya yang dihasilkan oleh sistem pengendali turbin angin.

Setelah diketahui nilai tegangan penguat medan dan efek-efeknya, selanjutnya dicari dengan melakukan simulasi untuk mendapatkan nilai derajat *pitch* (β) yang paling maksimal. Pada sistem turbin angin dengan tegangan penguat medan sebesar 65 volt dan kecepatan angin sebesar 7 m/s, disimulasikan turbin angin dengan $\beta = 2,9$ diperoleh nilai $C_p = 0.4085$, untuk $\beta = 3$ diperoleh nilai $C_p = 0.4154$, dan untuk $\beta = 3.1$ diperoleh nilai $C_p = 0.412$.

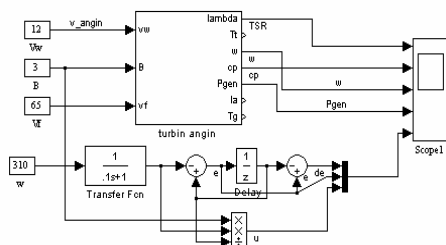
Pada kecepatan angin tinggi dan tegangan penguat medan bernilai 65 volt, kecepatan rotor melebihi dari kecepatan putar nominal generator dc. Diuji coba setelah nilai kecepatan angin melebihi 11.7 m/s maka rotor akan melebihi 3000 rpm (kecepatan rotor nominal dari generator dc).

1) Desain Sistem Pengendali Derajat Pitch

Pengontrolan derajat *pitch* mempunyai tujuan agar memperoleh daya yang maksimal namun dengan syarat kecepatan rotor dari generator dc (ω) tidak melebihi dari kecepatan nominal generator dc (3000 rpm). Model ditentukan sesuai yang diinginkan dengan melalui pengujian. Persamaan model:

$$\frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{1}{0.1s + 1}$$

dan respon dari persamaan model diatas dapat dilihat dalam Gambar 6 dengan masukan berupa konstanta sebesar 310, dimana $314 = ((3000/60) * 2 * \pi)$ dipilih karena nilainya mendekati dan di bawah 314 serta mewakili nilai dari kecepatan nominal generator dc (3000 rpm).



Gambar 6 Rangkaian Simulasi untuk mendapatkan e, de, dan u

Untuk merancang sistem kontroler derajat *pitch* terlebih dahulu mengetahui nilai e, de dan u seperti pada Gambar 6. Setelah diperoleh nilai-nilai tersebut maka dapat digunakan sebagai database. Kemudian database diolah menjadi suatu persamaan yang

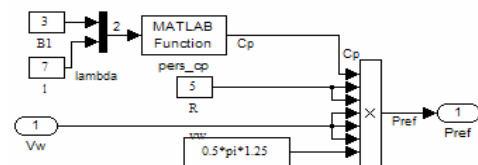
tergantung dengan masukan dari nilai derajat *pitch*, error dan delta error, serta kecepatan angin.

Dari respon Gambar 6, diperoleh nilai u. Nilai u diperoleh dari keluaran yang diinginkan dan keluaran sistem turbin angin serta nilai derajat *pitch*. Kemudian dilakukan simulasi lagi dengan nilai kecepatan angin yang berbeda. Dari hasil tersebut kemudian dilakukan regresi untuk mendapatkan suatu persamaan fungsional. Semakin banyak data yang diambil akan semakin mendekati dengan keluaran yang diinginkan. Dari hasil simulasi dengan nilai kecepatan angin yang berbeda dilakukan regresi. Karena de tidak mempunyai pengaruh yang berarti pada kontroler dan agar persamaan fungsional lebih sederhana, maka variabel de tidak dilibatkan dalam persamaan. Setelah hasil diatas dimasukkan ke dalam rangkaian simulasi.

2) Desain Sistem Pengendali Tegangan Penguat Medan

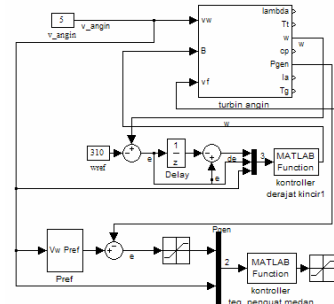
Setelah diperoleh pengontrol untuk sudut *pitch* baling-baling sistem turbin angin maka dapat dicari pengendali yang digunakan untuk mengatur tegangan penguat medan. Tentukan dahulu respon loop terbuka dari turbin angin yang telah ada kontroler derajat *pitch*.

Respon model yang akan dijadikan referensi berupa persamaan daya yang nilainya tergantung pada nilai kecepatan angin dan kecepatan putar generator seperti pada Gambar 7. Rangkaian ini berasal dari persamaan 2-5 yang dibangkitkan oleh baling-baling dan nilai C_p berasal dari regresi serta pendekatan dari Gambar 2.



Gambar 7 Rangkaian Simulasi Model Daya Referensi

Dari rangkaian seperti dalam Gambar 6 (dengan dimasukkannya model daya referensi), dapat diperoleh nilai u, yang nilainya tergantung dengan keluaran yang diinginkan dan keluaran sistem turbin angin serta nilai daya yang maksimal. Dari hasil tersebut kemudian dilakukan regresi untuk mendapatkan suatu persamaan fungsional.

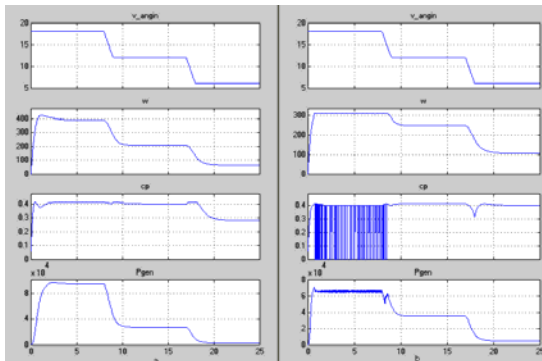


Gambar 8. Desain Sistem Turbin Angin dengan Pengendali Derajat Kincir dan Tegangan Penguat Medan

Dari simulasi yang digunakan untuk mendapatkan e, de, dan u yang digunakan sebagai masukan

pengendalian tegangan penguat medan, dengan nilai kecepatan angin yang berbeda.

Setelah hasil regresi dimasukkan ke dalam rangkaian simulasi seperti pada Gambar 8. Pada simulasi dengan kecepatan angin yang berubah-ubah, diperoleh hasil seperti Gambar 9. Pada Gambar 9.a. saat kecepatan angin 18 m/s, kecepatan rotor melebihi dari 3000 rpm, yang diperbaiki menjadi 310 (agar dalam waktu lama, turbin angin tidak mudah rusak) seperti pada Gambar 9.b. Nilai C_p berubah-ubah sesuai dengan perubahan kontroler.



Gambar 9 Hasil Simulasi Turbin Angin a. sebelum dikendalikan
b. sesudah dikendalikan

Dari Gambar 9, dapat dianalisa sebelum dikendalikan dengan adanya angin yang berubah-ubah, mengakibatkan nilai C_p cenderung tidak stabil dan kecepatan rotor tidak optimal sehingga nilai daya yang diperoleh tidak optimal pula. Walau nilai C_p maksimal belum tentu daya bernilai optimal karena ada pengaruh kecepatan rotor.

Pada hasil simulasi tersebut, grafik daya generator terjadi isolasi kecil mengikuti nilai C_p . Saat kecepatan angin turun menjadi 12 m/s dan 6 m/s, kecepatan rotor menjadi turun. Jika dibandingkan antara sebelum dikontrol dan sesudah dikontrol, baik nilai kecepatan rotor, nilai C_p dan daya generatornya lebih tinggi saat sesudah dikontrol dan tidak ada osilasi. Dengan adanya pengendalian pada sistem turbin, walau ada perubahan kecepatan angin, nilai C_p dapat optimal karena adanya pengendalian derajat *pitch* baling-baling.

V. KESIMPULAN

Dari hasil simulasi, dapat disimpulkan:

1. Dengan mengendalikan variabel derajat *pitch*, yang diperoleh dari error kecepatan rotor dan kecepatan referensi, maka kecepatan putar rotor akan sama atau kurang dari kemampuan kecepatan putar generator
2. Kontroler yang dirancang dapat mengatur daya menjadi lebih optimal dari yang hanya menggunakan kontroler derajat *pitch* saja (0% - 50%) yang tergantung dari kecepatan angin. Semakin tinggi kecepatan angin, peningkatan daya yang dikonversi semakin besar. Hal ini dikarenakan pada sistem turbin angin tanpa kontroler, semakin tinggi kecepatan angin maka koefisien daya turbin angin akan semakin kecil.
3. Penggunaan pengendali *Knowledge Base* diperlukan pengambilan data yang banyak sehingga keluaran akan semakin mendekati dengan keluaran yang dikehendaki.

VI. DAFTAR PUSTAKA

- [1] El-Wakil M., *Power Plant Technology*, Mc Graw-Hill, New York, 1984
- [2] Hand M.M., Balas M.J., *Systematic Controller Design Methodology for Variable-speed Wind Turbines*, National Renewable Energy Laboratory, 2002
- [3] Mullane A., Lightbody G., Yacamini R., *Adaptive Control of Variable Speed Wind Turbine*, University College Cork, Ireland, 2001
- [4] Ogata Katsuhiko, *Teknik Kontrol Automatik*, Erlangga, Jakarta, 1997
- [5] www.maritimindo.com, Data kecepatan Angin Pelabuhan di Indonesia (diunduh Maret 2004)
- [6] www.windpower.com, Data koefisien daya (diunduh Maret 2004)