

SISTEM PENGENDALIAN PH NIRA PADA PROSES PEMURNIAN GULA MENGGUNAKAN ADAPTIVE NEURO FUZZY INFERENCE SYSTEMS (ANFIS)

Fitriana Suhartati, Indrazno Siradjuddin

Abstrak: Bahan baku pembuatan gula (sakarosa, sukrosa) yang utama di Indonesia adalah tebu (*Saccharum officinarum*) yang termasuk keluarga Gramineae. Proses pembuatan gula ini meliputi beberapa tahapan yaitu tahap penggilingan, pemurnian, penguapan dan kristalisasi. Kualitas gula yang dihasilkan sangat ditentukan oleh pengawasan yang dilakukan selama proses tersebut. Proses pemurnian merupakan suatu proses yang dilakukan untuk memurnikan nira mentah yang dihasilkan oleh proses penggilingan tebu. Dalam proses pemurnian ini, sebanyak mungkin zat bukan gula dikeluarkan dari nira mentah. Salah satu proses pemurnian tersebut adalah dengan cara sulfitasi. Dalam proses ini, penetralan air kapur yang berlebihan pada pemurnian nira dilakukan dengan jalan memberikan gas SO₂. Besarnya pH yang diinginkan dalam proses ini adalah 7,2. Bejana sulfitasi merupakan salah satu unit pada proses pemurnian gula yang digunakan sebagai tempat untuk mencampur nira dengan gas SO₂. Pengendalian pH pada Bejana Sulfitasi sangat penting, karena pH akan berpengaruh terhadap kualitas gula putih yang dihasilkan. *Adaptive Neuro Fuzzy Inference Systems* (ANFIS) merupakan sistem kontrol yang tepat untuk mengendalikan pH pada Bejana sulfitasi. Dari hasil pengujian didapatkan ess sebesar -0,0278 % dengan ts (*settling time*) 2,988 menit. Pada tekanan yang berbeda, kontroler ANFIS mampu untuk mengurangi ess yang terjadi kurang dari 2 %. Pada perubahan laju aliran nira sebesar ± 10 % dari laju aliran normal sebesar 152,375 ton/jam, pemakaian kontroler ANFIS mampu mengurangi *error*.

Kata Kunci : pH nira, bejana sulfitasi, *Adaptive Neuro Fuzzy Inference Systems* (ANFIS)

Bahan baku pembuatan gula (sakarosa, sukrosa) yang utama di Indonesia adalah tebu (*Saccharum officinarum*) yang termasuk keluarga Gramineae. Proses pembuatan gula ini meliputi beberapa tahapan yaitu tahap penggilingan, pemurnian, penguapan dan kristalisasi. Kualitas gula yang dihasilkan sangat ditentukan oleh pengawasan yang dilakukan selama proses tersebut.

Proses pemurnian merupakan suatu proses yang dilakukan untuk memurnikan nira mentah yang dihasilkan oleh proses penggilingan tebu. Dalam proses pemurnian ini, sebanyak mungkin zat bukan gula dikeluarkan dari nira mentah.

Salah satu proses pemurnian tersebut adalah dengan cara sulfitasi. Dalam proses ini, penetralan air kapur yang berlebihan pada pemurnian nira dilakukan dengan jalan memberikan gas SO₂. Besarnya pH yang diinginkan dalam proses ini adalah 7,2.

Bejana Sulfitasi merupakan salah satu bagian pada proses pemurnian gula.

Bejana ini digunakan sebagai tempat untuk mencampur nira dengan gas SO₂. Pengendalian pH pada Bejana Sulfitasi sangat penting, karena pH ini akan berpengaruh terhadap kualitas gula putih yang dihasilkan. Kontrol logika *Fuzzy*, dalam hal ini ANFIS, merupakan alternatif yang digunakan untuk mengendalikan pH pada Bejana Sulfitasi ini.

Perubahan pemberian gas SO₂ sangat berpengaruh terhadap pH nira yang keluar dari Bejana Sulfitasi. Laju normal nira yang mengalir ke bejana ini sebesar 152,375 ton/jam sedangkan laju normal gas SO₂ adalah 178 kg/jam. Perbandingan ini menghasilkan pH nira kurang lebih 7. Pengendalian ketinggian pada bejana ini tidak dilakukan dikarenakan gas SO₂ tidak mempengaruhi level cairan dalam bejana.

Perubahan aliran nira sebesar ± 10 % dari laju normal mengakibatkan terjadinya perubahan pada parameter plant. Mekanisme adaptasi dari kontroler ANFIS ini diharapkan mampu untuk mengatasi

perubahan parameter plant sehingga pH nira yang diinginkan sesuai dengan setting point yaitu 7,2 serta kemampuan kontroler ini untuk menangani sistem yang nonlinier seperti pada Bejana Sulfitasi tersebut. Di samping itu pengaturan pH dengan mengatur jumlah aliran gas SO₂ perlu dilakukan, karena perubahan sedikit saja pada aliran gas SO₂ akan berdampak besar terhadap pH nira yang keluar dari Bejana Sulfitasi.

Batasan Masalah

1. Kontroler yang digunakan adalah ANFIS (*Adaptive Neuro Fuzzy Inference System*).
2. Masukan kontroler adalah *error* dan selisih *error*.
3. Bejana Sulfitasi yang digunakan adalah Bejana Sulfitasi yang terdapat di PT. PG. Krebet Baru II Malang.
4. Tekanan gas SO₂ adalah konstan dengan tekanan 3,1 psi, 4,4 psi dan 5,7 psi. Laju normal sebesar 178 kg/jam, laju minimal sebesar 90 kg/jam dan laju maksimal sebesar 267 kg/jam.
5. Laju normal nira adalah 152, 375 ton/jam dan fluktuasi aliran nira ± 10 % dari laju normal.
6. Proses pembelajaran dilakukan secara off-line.
7. Simulasi hasil perancangan menggunakan program matlab 6.5.
8. Temperatur dalam bejana diasumsikan konstan dan homogen.

Proses Pengolahan Gula

Dalam mengolah bahan mentah tebu untuk diproduksi menjadi gula kristal putih, PT. PG. Krebet Baru II Malang menggunakan serangkaian mesin produksi melalui beberapa tahap pengolahan. Urutan proses produksi gula kristal putih pada PT. PG. Krebet Baru II Malang meliputi stasiun gilingan, stasiun pemurnian, stasiun penguapan, stasiun kristalisasi, stasiun pemutaran dan stasiun penyelesaian.

Tebu yang diangkut dengan truk masuk timbangan bruto untuk dilakukan

proses penimbangan kemudian masuk ke stasiun gilingan. Stasiun gilingan berfungsi sebagai penghasil nira yaitu memisahkan nira dari ampas tebu. Nira mentah dari stasiun gilingan masih banyak mengandung kotoran sehingga perlu dilakukan proses lanjutan yaitu proses pemurnian dengan jalan pemanasan, penambahan susu kapur dan gas SO₂. Stasiun penguapan bertugas untuk menjernihkan nira dengan jalan menguapkan air yang terdapat dalam nira sampai mencapai tingkat kekentalan tertentu. Nira kental dari stasiun penguapan kemudian dimasak menjadi bentuk kristal di stasiun masakan.

Nira mentah mengandung gula dan zat bukan gula. Dalam proses pemurnian nira mentah ini, sebanyak mungkin zat bukan gula dikeluarkan. Kondisi lingkungan nira mentah harus diatur agar sukrosa dan zat gula yang mereduksi tidak rusak dan dapat dipertahankan, sehingga sebanyak mungkin zat yang bukan gula dikeluarkan. Pertimbangan ekonomi akan menentukan sistem pemurnian mana yang akan diterapkan.

Dalam industri gula di Indonesia banyak digunakan kapur tohor (CaO) sebagai zat pemurni dan penjernih dalam nira mentah, yang dapat mengendapkan sebagian besar zat bukan gula. Pada proses industri gula di Indonesia membuktikan bahwa pengeluaran zat bukan gula secara optimal terjadi bila pH nira mentah antara 7,3-7,8 dan pH nira encer dipertahankan antara 7,0-7,4 (A. Moerdokusumo, 1993).

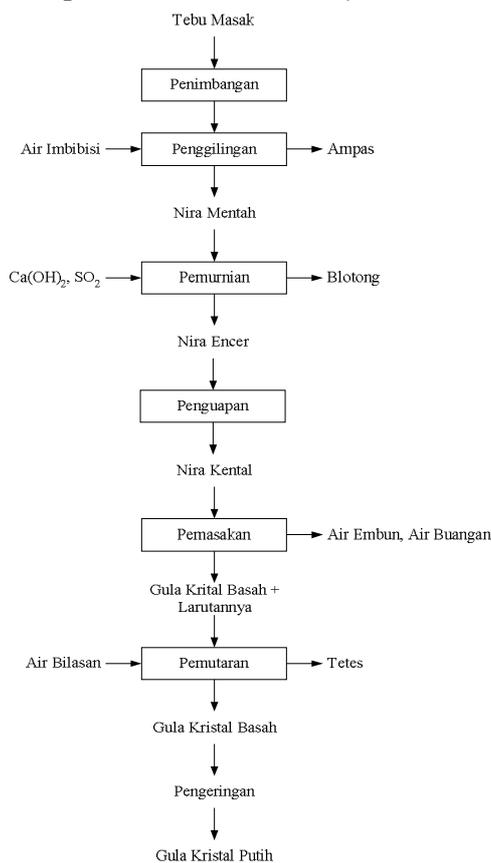
Bahan kapur merupakan kunci dari pemurnian, sehingga kadarnya harus tepat. Tujuan utama pemurnian adalah :

1. Mencegah terjadinya peristiwa inversi dengan jalan menetralkan ion hidrogen
2. Menghilangkan kekeruhan dengan proses pengendapan
3. Menghilangkan kotoran dan zat-zat koloid (ampas halus, lilin, pasir, dispersi tanah)

Proses sulfitasi merupakan proses pemurnian gula menggunakan gas SO₂ dalam menetralkan air kapur. Proses ini dilakukan dalam pembuatan gula putih. Air kapur yang digunakan dalam proses ini jauh lebih besar daripada proses pemurnian dengan cara defekasi (proses pemurnian yang digunakan dalam pembuatan gula merah). Keuntungan dilakukan proses sulfitasi adalah :

1. Lebih banyak bukan gula tersaring
2. Mutu gula lebih baik dibandingkan defekasi

Dalam Bejana Sulfitasi ini, nira mentah akan dicampur dengan gas SO₂ agar didapatkan nira dengan pH 7,2 dan memperoleh endapan sulfat CaSO₃ yang akan menarik dan mengendapkan kotoran-kotoran pada nira membentuk *folk*.



Gambar 1 Diagram alir proses pengolahan gula
Sumber: PT. PG. Krebbe Baru II Malang

Adaptive Neuro Fuzzy Inference Systems

ANFIS merupakan penggabungan dari *Fuzzy* dengan jaringan syaraf tiruan.

Model *Fuzzy* yang digunakan adalah model Takagi-Sugeno-Kang (TSK Model). Model tersebut adalah (Negnevitsky, 2002):

IF x_1 is A_1 AND x_2 is A_2

.....

AND x_m is A_m

THEN $y = f(x_1, x_2, \dots, x_m)$

x_1, x_2, \dots, x_m adalah variabel masukan, sedangkan A_1, A_2, \dots, A_m adalah *Fuzzy* set. Jika y tetap, maka didapatkan zero-order untuk model *Fuzzy* Sugeno. Jika y adalah first order polinomial,

$$y = k_0 + k_1x_1 + k_2x_2 + \dots + k_mx_m$$

maka didapatkan first-order model *Fuzzy* Sugeno (Negnevitsky, 2002). Struktur jaringan ANFIS dapat dilihat dalam Gambar 3.

Layer 1 :

Layer ini adalah *fuzzification layer*. Untuk model Jang's, *Neuron-Neuron* fuzzifikasi memiliki fungsi aktivasi bell (Negnevitsky, 2002). Di dalam layer ini pula dilakukan pengkalkulasian nilai membership untuk parameter premis. Fungsi simpul tersebut adalah :

Output $O_{1,i}$ untuk simpul $i = 1, 2$

$$O_{1,i} = m_{A_i}(x)$$

Output $O_{1,i}$ untuk simpul $i = 3, 4$

$$O_{1,i} = m_{B_{i-2}}(y)$$

A dan B adalah label linguistik, x dan y adalah masukan pada simpul i . Keluaran simpul untuk layer 1 adalah membership value dari input.

$$m_A(x_1) = \exp\left(-\left(\frac{x - c_i}{a_i}\right)^{2b_i}\right) \quad (1)$$

Efek dari perubahan parameter $\{a, b, c\}$ adalah sebagai berikut :

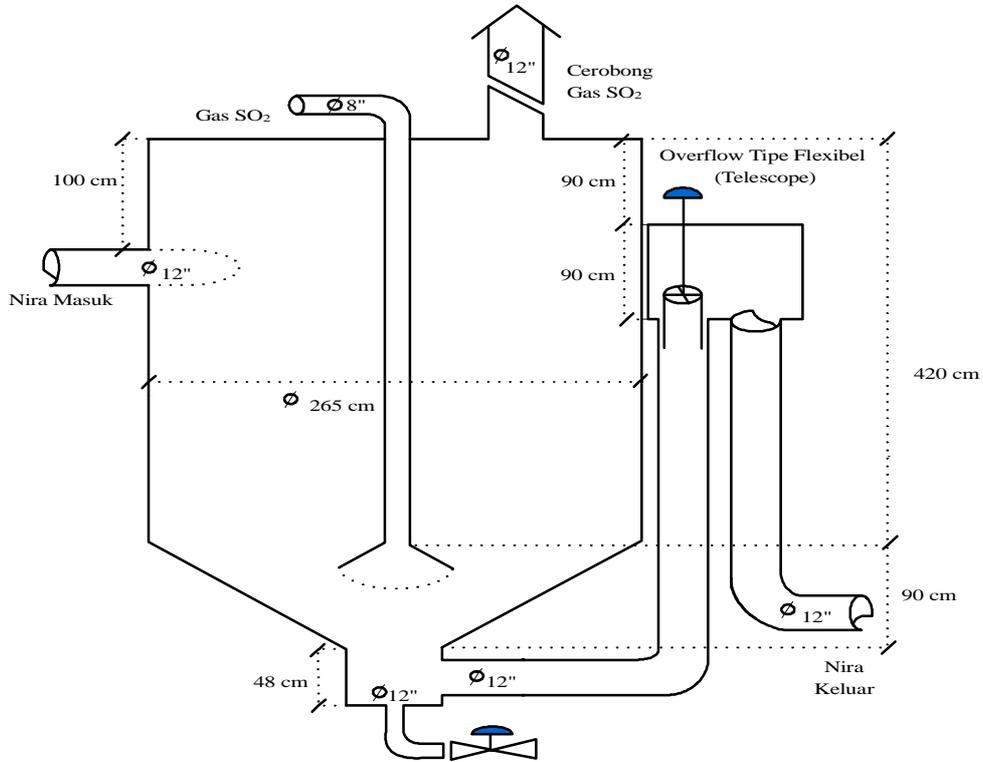
Layer 2 :

Layer ini adalah *rule Layer*. Tiap *Neuron* dalam layer ini berkesesuaian

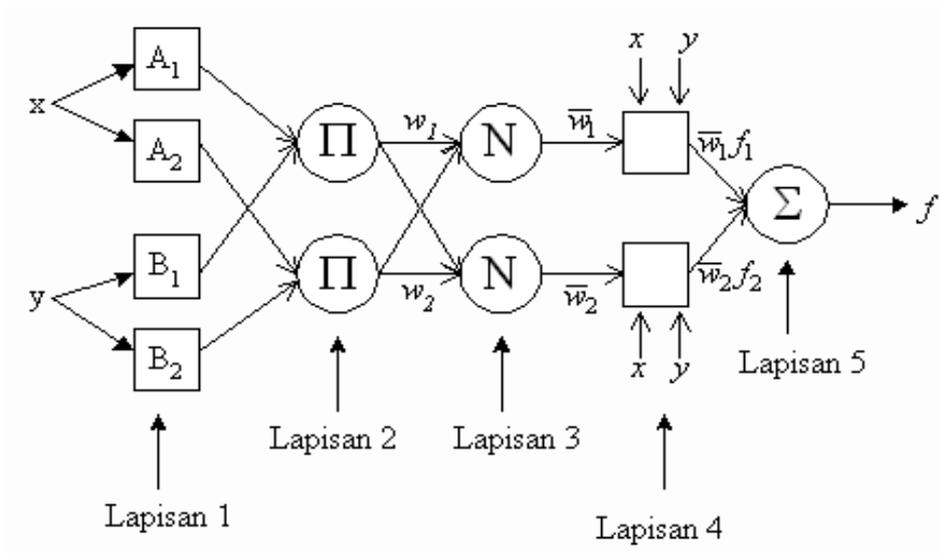
dengan single Sugeno-type *Fuzzy rule*. *Rule Neuron* menerima masukan-masukan dari *Neuron* fuzzifikasi dan mengkalkulasi firing strength dari tiap-tiap *rule*. Dalam

ANFIS, konjungsi dari *rule* antecedent dievaluasi dengan operator product. Fungsi simpul adalah :

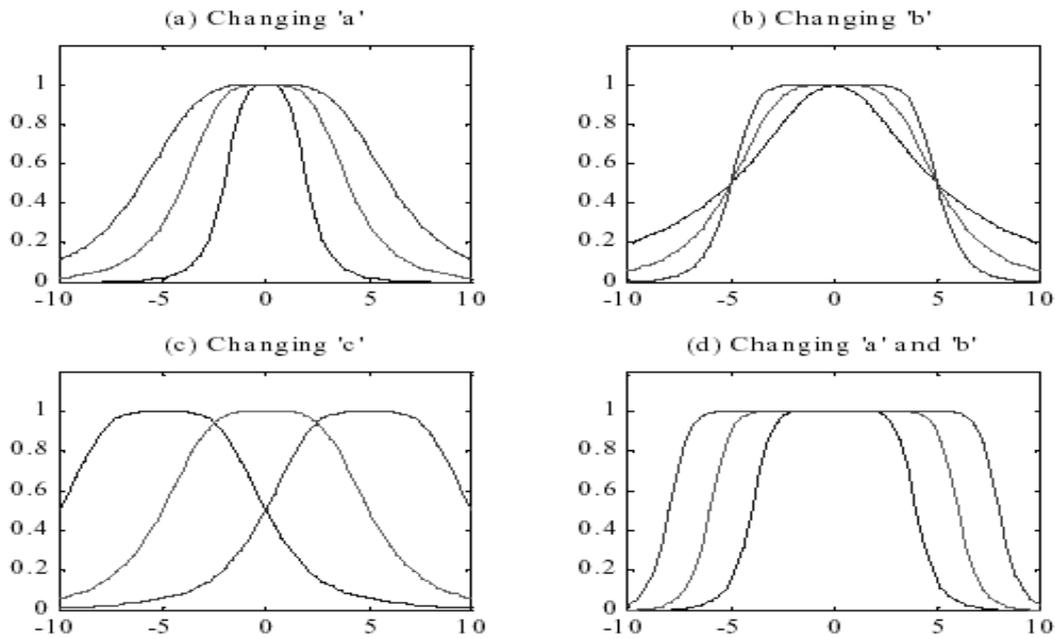
$$O_{2,i} = w_i = m_{A_i}(x)m_{B_i}(y) \text{ untuk } i=1,2$$



Gambar 2 Bejana Sulfitasi



Gambar 3 ANFIS Network



Gambar 4 Efek perubahan parameter a, b, c
 Sumber : www.rpi.edu

Fungsi ini dapat diperluas apabila bagian premis memiliki lebih dari dua himpunan *Fuzzy*. Banyaknya simpul pada lapisan ini menunjukkan banyaknya *rule* yang dibentuk. Operator yang digunakan adalah T-norm. Keluaran dari simpul ini adalah firing strength dari *rule* (Piero, 2002).

Layer 3 :

Layer ini merupakan normalisation *layer*. Tiap *Neuron* dalam *layer* ini menerima input dari semua *Neuron* dalam *rule layer*, dan mengkalkulasi normalisasi firing strength dari *rule-rule* yang ada.

Normalisasi *firing strength* adalah rasio dari firing strength untuk tiap *rule* yang telah diberikan dengan jumlah keseluruhan firing strength dari semua *rule*.

Fungsi simpul tersebut adalah :

$$O_{3,i} = \bar{w}_i = \frac{w_i}{w_1 + w_2} \text{ untuk } i=1,2.. \quad (2)$$

Keluaran titik simpul adalah firing strength yang ternormalisasi (Piero, 2002).

Layer 4 :

Merupakan *layer* defuzzifikasi. Tiap *Neuron* dalam *layer* ini dihubungkan de-

ngan *Neuron* normalisasi dan juga menerima masukan awal, x dan y (Negnevitsky, 2002). *Neuron* defuzzifikasi mengkal-kulasi bobot nilai konsekuen dari *rule* yang diberikan, dengan fungsi simpul (Piero, 2000) :

$$O_{4,i} = \bar{w}_i f_i = \bar{w}_i (p_i x + q_i y + r_i) \quad (3)$$

p_i , q_i , dan r_i adalah parameter-parameter konsekuen dari *rule* i.

Layer 5 :

Pada lapisan ini hanya terdapat satu simpul yang digunakan untuk menjumlahkan semua output dari *Neuron* defuzzifikasi dan menghasilkan keseluruhan keluaran ANFIS (Negnevitsky, 2002).

Fungsi simpul ini adalah :

$$O_{5,i} = \sum_i \bar{w}_i f_i = \frac{\sum_i w_i f_i}{\sum_i w_i} \quad (4)$$

Pembelajaran dalam ANFIS

ANFIS menggunakan algoritma pembelajaran *hybrid* yang mengkombinasikan estimator *least squares* dan metode *gradient descent*. Algoritma pembelajaran A-

NFIS ada dua, tiap epoch disusun dari proses pembelajaran maju dan mundur. Dalam proses pembelajaran maju (*forward pass*), pembelajaran dari model-model input dimasukkan ke dalam ANFIS, *Neuron* output dihitung *layer* per *layer* dan parameter-parameter konsekuen *rule* di-identifikasi menggunakan least square estimator (Negnevitsky, 2002).

Dalam pembelajaran mundur (*backward*), pembelajaran menggunakan algoritma *backpropagation*. Sinyal *error* di kembalikan, dan parameter *antecedent* di-update berdasarkan metode *chain rule* (Negnevitsky, 2002).

Dalam pembelajaran ANFIS ini, parameter-parameter *antecedent* dan konsekuen dioptimasi. Pembelajaran maju, parameter-parameter konsekuen diatur sedangkan parameter-parameter premis tetap. Pada arah pembelajaran mundur, parameter-parameter premis dituning, sedangkan parameter konsekuen dibuat tetap. Satu tahap arah pembelajaran majumundur dinamakan satu epoch.

Tabel 1. Proses pembelajaran hybrid ANFIS

	Arah maju	Arah mundur
Parameter premis	Tetap	<i>Gradient descent</i>
Parameter konsekuen	RLSE	Tetap
Sinyal	Keluaran simpul	Laju kesalahan

Sumber: Jyh-Shing Roger Jang, IEEE Trans, 1993

Penghitungan *error* untuk pembelajaran ke-k, jaringan *error-back propagation* didefinisikan sebagai berikut (Valishev-sky) :

$$E_k = \frac{1}{2}(y_k - O_k)^2 \quad (5)$$

dengan y_k adalah keluaran sistem yang diinginkan dan O_k adalah keluaran sistem yang sebenarnya.

Tiap parameter harus dihitung berdasarkan

$$\frac{\partial E_k}{\partial b_i} = \frac{\partial E_k}{\partial O_k} \frac{\partial O_k}{\partial b_i} = -(y_k - O_k) \frac{\partial O_k}{\partial b_i} \quad (6)$$

Error rata-rata dari parameter konsekuen dapat dihitung sebagai berikut:

$$\frac{\partial E}{\partial b_c} = \frac{\partial E}{\partial O_5} \frac{\partial O_5}{\partial O_4} \frac{\partial O_4}{\partial b_c} \quad (7)$$

di mana adalah parameter konsekuen dan O_i adalah output dari lapisan ke-i.

Error rata-rata untuk parameter premis dihitung sebagai berikut:

$$\frac{\partial E}{\partial b_p} = \frac{\partial E}{\partial O_5} \frac{\partial O_5}{\partial O_4} \frac{\partial O_4}{\partial O_3} \frac{\partial O_3}{\partial O_2} \frac{\partial O_2}{\partial O_1} \frac{\partial O_1}{\partial b_p} \quad (8)$$

di mana adalah parameter premis dan O_i adalah output dari lapisan ke-i.

Turunan dari $\frac{\partial O_j}{\partial O_{j-1}}$, $j = 5, \dots, 2$ adalah

$$\frac{\partial O_5}{\partial O_4} = \frac{\partial(\sum f_i \bar{w}_i)}{\partial(f_i \bar{w}_i)} = 1 \quad (9)$$

di mana adalah normalisasi *firing strength* dari *rule* ke-i

$$\frac{\partial O_4}{\partial O_3} = \frac{\partial(f_i \bar{w}_i)}{\partial(\bar{w}_i)} = f_i \quad (10)$$

di mana i adalah jumlah dari *rule* yang bersesuaian

(jumlah dari unit pada *Layer* ke 3)

$$\frac{\partial O_3}{\partial O_2} = \frac{\partial}{\partial w_i} \left(\frac{w_i}{\sum_{j=1}^n w_j} \right) = \frac{\sum_{j=1}^n w_j - w_i}{\left(\sum_{j=1}^n w_j \right)^2} \quad (11)$$

n adalah jumlah keseluruhan dari *rule* di sistem

$$\frac{\partial O_2}{\partial A_m} = \frac{\partial}{\partial A_m} \left(\prod_{A_j \in \mathfrak{R}(A_m)} A_j \right) = \prod_{A_j \in \mathfrak{R}(A_m), A_j \neq A_m} A_j \quad (12)$$

di mana menunjukkan *Fuzzy set*, yang membuat bagian premis dari *rule* mengan-

dung *Fuzzy* set Am dan dapat diringkas menjadi,

$$\frac{\partial E}{\partial \mathbf{b}_c} = -(y - O) \frac{\partial O_4}{\partial \mathbf{b}_c} \quad (13)$$

di mana $\mathbf{b}_c \in \{p_i, q_i, r_i\}$. Persamaan di atas diturunkan secara parsial terhadap p, q, dan r.

$$\frac{\partial O_4}{\partial p_i} = \frac{\partial}{\partial p_i} (f_i \bar{w}_i) =$$

$$\frac{\partial}{\partial p_i} (\bar{w}_i (p_i x + q_i y + r_i)) = \bar{w}_i x$$

$$\frac{\partial O_4}{\partial q_i} = \frac{\partial}{\partial q_i} (f_i \bar{w}_i) =$$

$$\frac{\partial}{\partial q_i} (\bar{w}_i (p_i x + q_i y + r_i)) = \bar{w}_i y$$

$$\frac{\partial O_4}{\partial r_i} = \frac{\partial}{\partial r_i} (f_i \bar{w}_i) =$$

$$\frac{\partial}{\partial r_i} (\bar{w}_i (p_i x + q_i y + r_i)) = \bar{w}_i$$

Dan untuk parameter premis \mathbf{b}_p dari *membership function* untuk label linguistik Am adalah

$$\frac{\partial E}{\partial \mathbf{b}_p} = -(y - O) f_i \frac{\sum_{j=1}^n w_j - w_i}{\left(\sum_{j=1}^n w_j \right)^2} \prod_{A_j \in \mathfrak{R}(A_m), A_j \neq A_m} A_j \frac{\partial O_1}{\partial \mathbf{b}_p}$$

$$\frac{\partial E}{\partial \mathbf{b}_p} \approx -(y - O) f_i \frac{\partial O_1}{\partial \mathbf{b}_p} \quad (14)$$

di mana $\mathbf{b}_p \in \{a_i, b_i, c_i\}$. Persamaan di atas diturunkan secara parsial terhadap a, b, dan c

$$\frac{\partial O_1}{\partial a_{ij}} \approx \frac{b_{ij}}{a_{ij}} \quad (15)$$

$$\frac{\partial O_1}{\partial b_{ij}} \approx - \ln \left(\frac{x - c_{ij}}{a_{ij}} \right) \quad (16)$$

$$\frac{\partial O_1}{\partial c_{ij}} \approx \frac{b_{ij}}{x - c_{ij}} \quad (17)$$

di mana i adalah jumlah dari *rule* yang bersesuaian dan j adalah jumlah dari variable linguistik yang bersesuaian dalam *rule*.

METODE

Pemodelan Bejana Sulfitasi

Di dalam Bejana Sulfitasi pH keluaran merupakan hasil dari pencampuran antara gas SO₂ dengan nira dan diukur oleh sensor pH. Sinyal keluaran tersebut akan dibandingkan dengan set point oleh kontroler. Laju aliran gas SO₂ merupakan fungsi dari bukaan katub kendali. Fungsi alih dari tiap-tiap proses diperoleh dari perhitungan kesetimbangan massa dan komponen.

Hukum kesetimbangan massa menyebutkan bahwa:

$$\left[\begin{array}{c} \text{laju perubahan} \\ \text{massa dalam sistem} \end{array} \right] = \left[\begin{array}{c} \text{laju massa} \\ \text{masuk sistem} \end{array} \right] - \left[\begin{array}{c} \text{laju massa} \\ \text{keluar sistem} \end{array} \right]$$

Pada bejana sulfitasi dapat dirumuskan sebagai :

$$\frac{d(rV)}{dt} = r_N v_N + r_S v_S - r_O v_{NS} \quad (18)$$

$$V = Ah \quad (19)$$

Untuk aliran laminar, dapat dinyatakan dalam

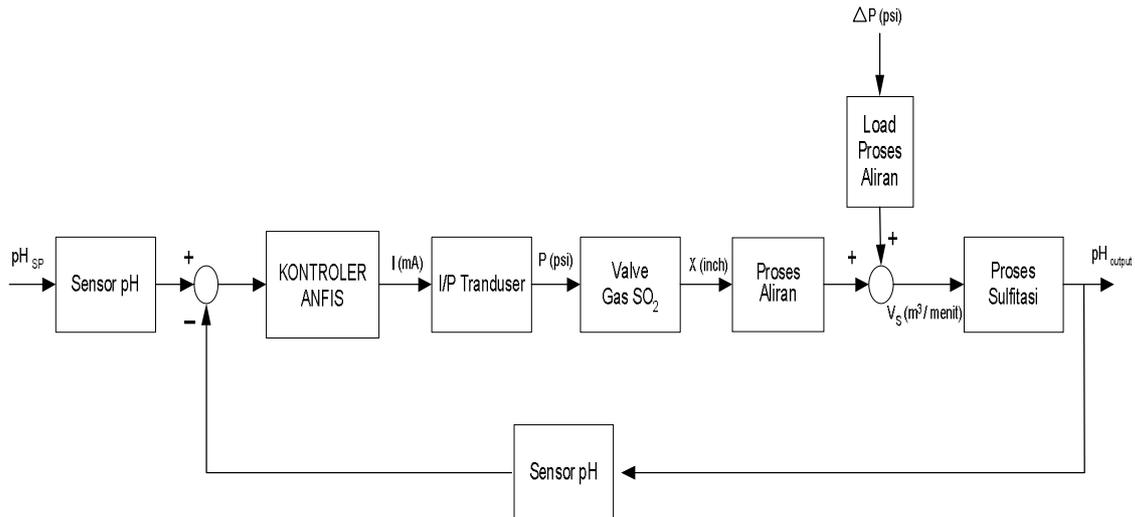
$$v_{NS} = \frac{h}{R} \quad (20)$$

Substitusi persamaan (19) dan (20) ke (18), maka :

$$\frac{dh}{dt} = \frac{r_N}{A} v_N(t) + \frac{r_S}{A} v_S(t) - \frac{r_O}{RA} h(t) \quad (21)$$

dengan memasukkan nilai teknis dari PT. PG. Kretet Baru II Malang, didapatkan :

$$C_{NO}(s) = \frac{1}{s} \left(\frac{(2,591 \times 10^{-9} - C_{NO}(s)) v_N(s)}{h(s)} + (7,424 \times 10^{-4} - C_{NO}(s)) \frac{v_S(s)}{h(s)} - \frac{0,78 \times C_{NO}(s)}{(1 + 0,78 \times C_{NO}(s))^2} \right)$$



Gambar 5 Diagram Blok Sistem Pengendalian pH

Tipe aktuator katub kendali gas SO₂ adalah diafragma. Aktuator ini digerakkan dengan menggunakan sinyal pneumatik. I/P transduser digunakan untuk mengubah arus menjadi sinyal pneumatik 3-15 psi.

$$\frac{P(s)}{I(s)} = \frac{0,75}{0,005s + 1} \quad (22)$$

Control valve berfungsi untuk mengubah variabel yang dikendalikan menjadi sinyal keluaran aktuator yaitu gerakan mekanik dari valve yang akan mengatur laju aliran fluida dan merupakan elemen yang berfungsi untuk memanipulasi variabel proses.

Berdasarkan spesifikasi dari bejana, katub yang digunakan untuk mengendalikan adalah tipe butterfly dengan karakteristik equal percentage (PT. PG. Kreet Baru II Malang). Fungsi alih katub:

$$\frac{X(s)}{P(s)} = \frac{0,5}{0,008s + 1} \quad (23)$$

$$V_s = 3,3833 \times 10^{-4} X(s) + 2,076 \times 10^{-4} \Delta P(s) \quad (24)$$

Fungsi aliran proses ini berdasarkan pemodelan dari skripsi sebelumnya. Aliran gas SO₂ (VS) merupakan fungsi dari katub gas SO₂ (X), tekanan input katub kendali (P1) dan tekanan output katub kendali (P2) (Gunterus, 1994).

Alat yang digunakan sebagai sensor pH adalah elektroda gelas (sel konduktivitas) yang menghasilkan sinyal keluaran

berupa arus 4-20 mA. Gain dari sensor dan transmitter dapat dinyatakan :

$$= \frac{(20 - 4) \text{mA}}{(14 - 0) \text{pH}} = 1,143 \text{ mA/pH} \quad (25)$$

Dengan konstanta waktu 0,48 detik diperoleh fungsi alih transmitter dan sensor pH, yaitu :

$$\frac{I(s)}{\text{pH}(s)} = \frac{1,143}{0,008s + 1} \quad (26)$$

HASIL

Metode penalaran Fuzzy yang digunakan oleh kontroler ANFIS adalah MAX-DOT karena mendukung fungsi yang digunakan dalam pelatihan ANFIS:

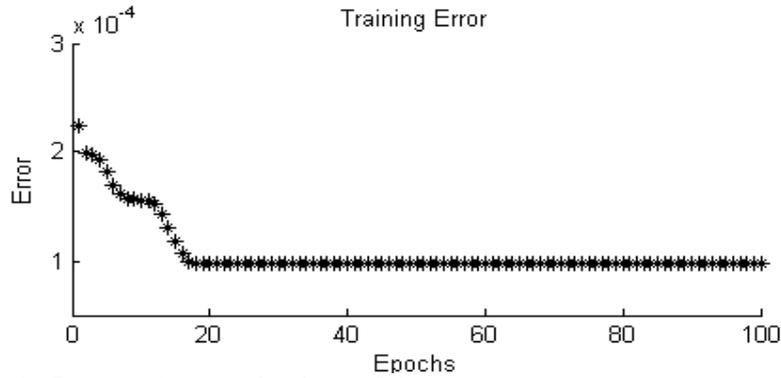
Setelah dilakukan pembentukan FIS, langkah selanjutnya adalah melakukan proses pembelajaran FIS dengan metode LSE.

PEMBAHASAN

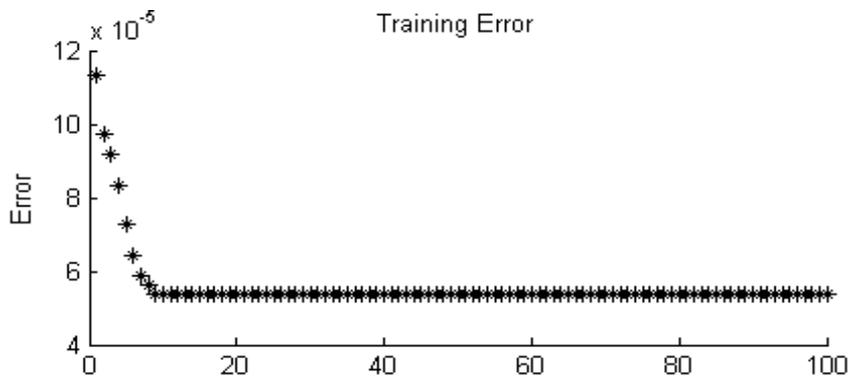
Perancangan Kontroler ANFIS

Perencanaan kontroler ini menggunakan ANFIS (Adaptive Neuro Fuzzy Inference System). ANFIS ini merupakan penggabungan mekanisme Fuzzy Inference System yang digambarkan dalam jaringan syaraf. Sistem Inference Fuzzy yang digunakan adalah ANFIS yang dirancang memiliki dua variabel masukan

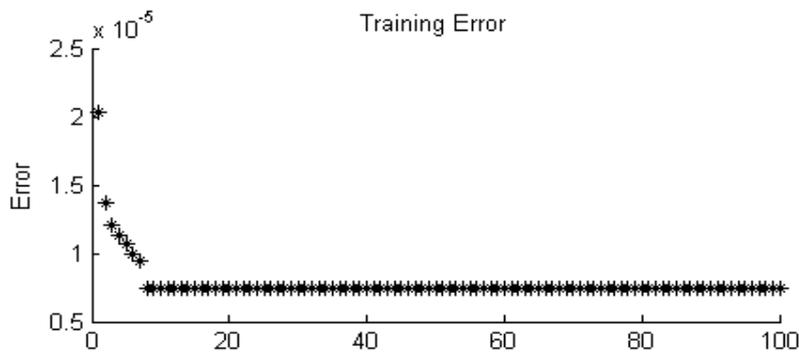
yaitu *error* dan *delta error*, serta satu masuk ke I/P transduser. variabel keluaran yaitu besarnya arus yang



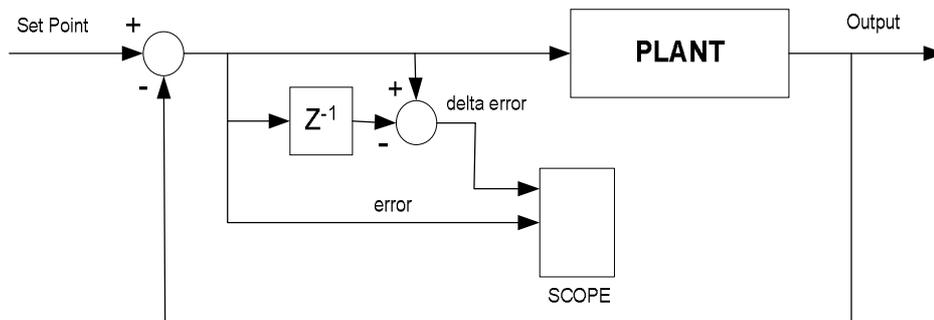
Gambar 6 Proses training pada tekanan 3,1 psi



Gambar 7 Proses Training pada 4,4 psi



Gambar 8 Proses training pada 5,7 psi

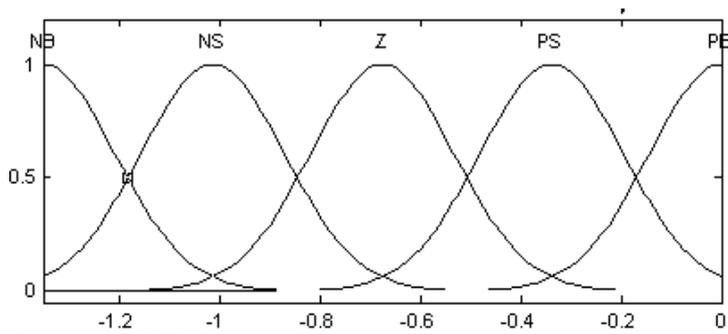


Gambar 9 Pengambilan data training

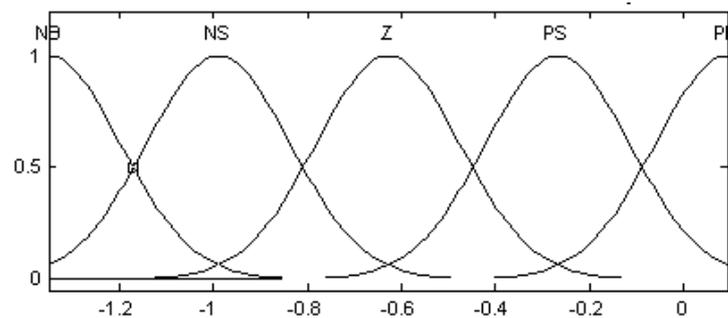
Tahap-tahap yang dilakukan dalam perancangan ANFIS meliputi pengambilan data training, pembentukan FIS, pembelajaran FIS, defuzzifikasi FIS dan pengtesan FIS.

Data yang didapatkan berjumlah 1200 pasangan data yaitu *error* dan *delta error* melalui proses sampling. 1200 pas-

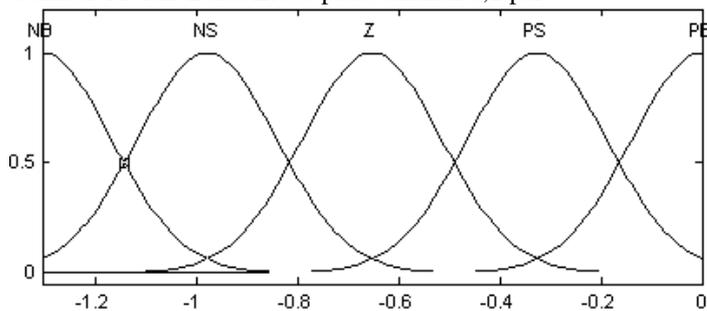
angan data digunakan untuk proses pembelajaran ANFIS, 1200 data lainnya merupakan target untuk tes hasil pembelajaran ANFIS. Pasangan data yang diperoleh terdiri dari 400 pasangan data untuk beban 3,1 psi, 400 untuk 5,7 psi dan 400 untuk beban 4,4 psi.



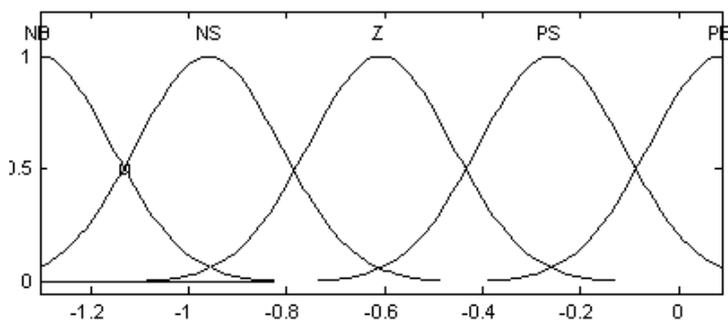
Gambar 10 MF *Error* pada tekanan 3,1 psi



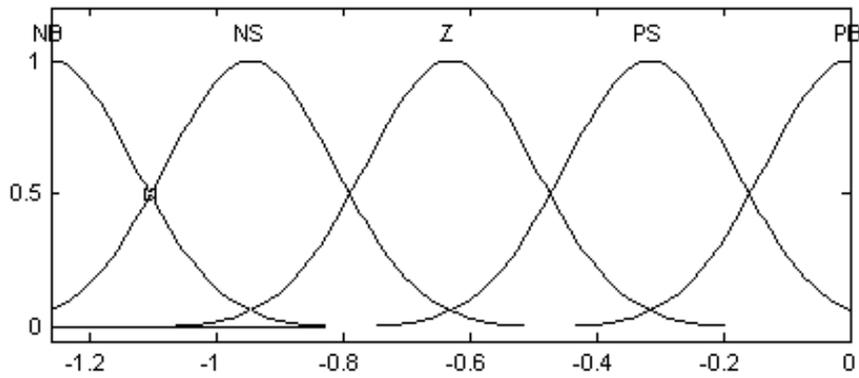
Gambar 11 MF *Delta Error* pada tekanan 3,1 psi



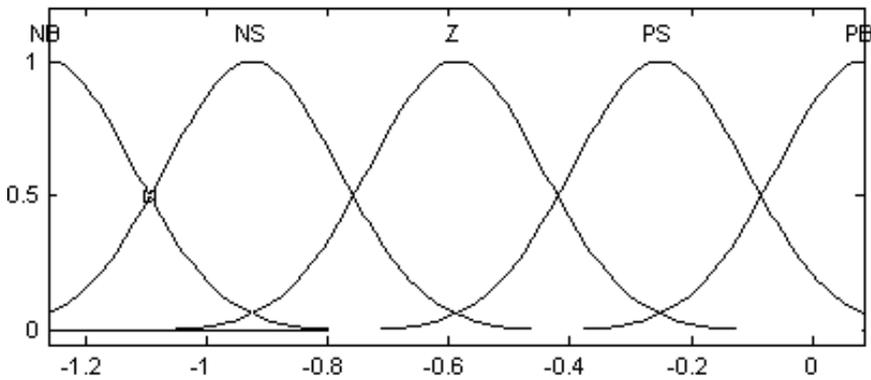
Gambar 12 MF *Error* pada tekanan 4,4 psi



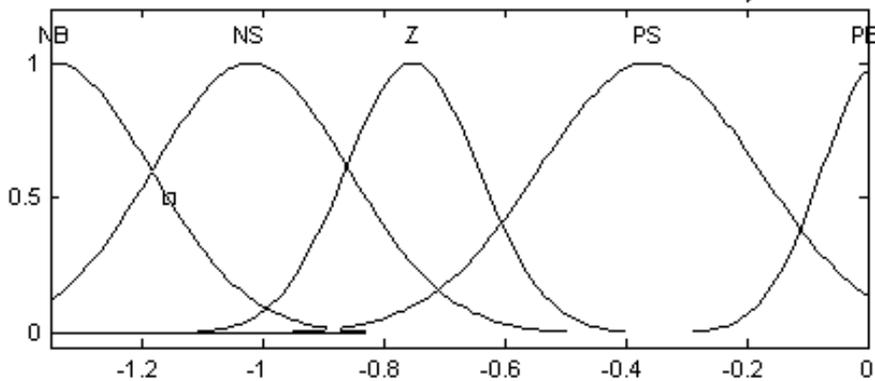
Gambar 13 MF *Delta Error* pada tekanan 4,4 psi



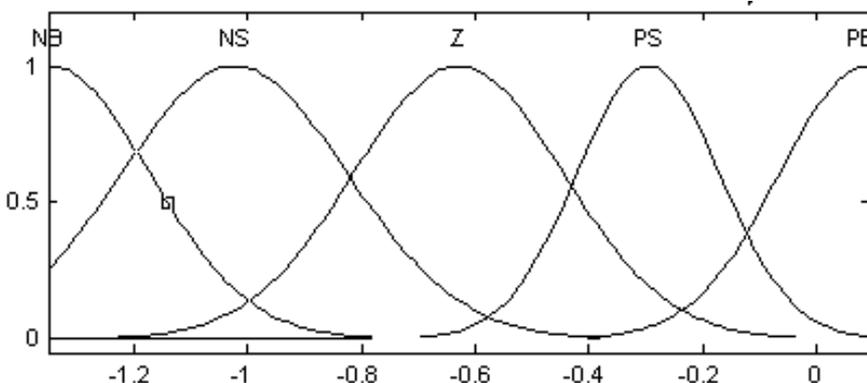
Gambar 14 MF Error pada tekanan 5,7 psi



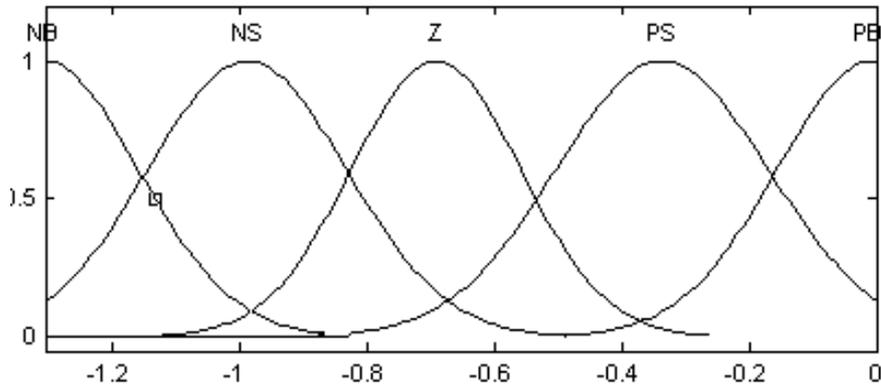
Gambar 15 MF Delta Error pada tekanan 5,7 psi



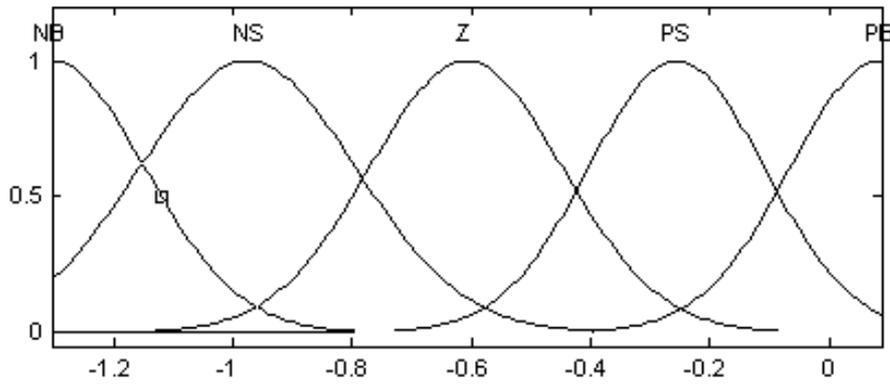
Gambar 16 MF error setelah training pada 3,1 psi



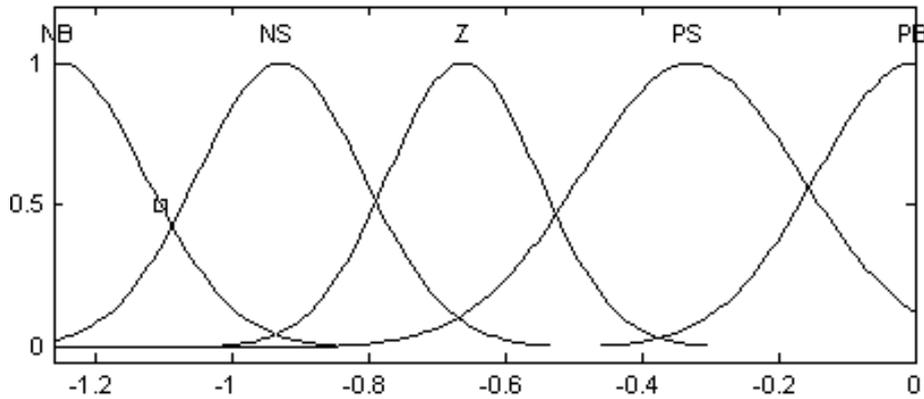
Gambar 17 MF delta error setelah training pada 3,1 psi



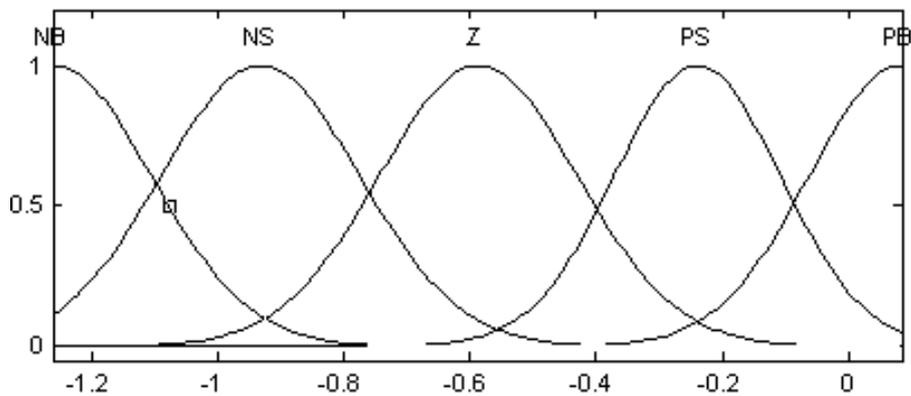
Gambar 18 MF *error* setelah training pada 4,4 psi



Gambar 19 MF *delta error* setelah training pada 4,4 psi



Gambar 20 MF *error* setelah training pada 5,7 psi



Gambar 21 MF *delta error* setelah training pada 5,7 psi

Pengujian dilakukan untuk mengetahui performansi dari kontroler ANFIS dalam meminimalkan *error* akibat perubahan tekanan gas SO₂ yang berbeda.

Kontroler ANFIS mampu mengurangi *error* yang terjadi selama proses penambahan dan pengurangan gas SO₂ kurang dari 2 %.

Tabel 2 Respon sistem terhadap variasi tekanan

Parameter	Perubahan Tekanan Gas SO ₂ (psi)	
	4,4 ke 3,1	4,4 ke 5,7
Waktu pemulihan	1,217 mnt	1,358 mnt

Tabel 3 Respon sistem terhadap variasi tekanan

Parameter	Perubahan Tekanan Gas SO ₂ (psi)					
	4,4 ke 5,7	5,7 ke 3,1	3,1 ke 4,4	4,4 ke 3,1	3,1 ke 5,7	5,7 ke 4,4
Waktu pemulihan	1,358 mnt	2,131 mnt	1,344 mnt	1,217 mnt	1,667 mnt	1,238 mnt

Tabel 4 Respon sistem terhadap variasi aliran nira

Parameter	Perubahan Aliran Nira	
	+10%	-10%
Error rata-rata	0,622 %	0,477 %

Tabel 5 Respon sistem terhadap perubahan tekanan

Parameter	Perubahan Tekanan Gas SO ₂ (psi)	
	4,4 ke 3,1	4,4 ke 5,7
Waktu pemulihan	1,217 mnt	1,358 menit
Error steady state, ess	-0,611 %	0,722 %

KESIMPULAN

Pada tekanan gas normal (4,4 psi), sistem di pabrik akan mencapai keadaan mantap dengan waktu 5,5 menit dan memiliki ess sebesar 3 %. Setelah diberikan kontroler ANFIS, sistem memiliki ess sebesar -0,0278 % dengan waktu menetap 2,988 menit.

Pada tekanan yang berbeda, kontroler ANFIS mampu untuk mengurangi *error steady state* yang terjadi kurang dari 2 %.

RUJUKAN

- Coughanowr, D. R., 1991, *Process Sistem Analysis and Control*, Prentice Hall, USA.
- Fahmie, M. Y., 2002, *Pengaruh Energi Pemurnian Nira pada Stasiun Pemurnian di PT. PG. Kebon Agung Malang*,
- Gunterus, F. 1994. *Falsafah Dasar : Sistem Pengendalian Proses*. Jakarta: PT. Elex Media Komputindo.
- Jamshidi, Mohammad., Nader, Vadiiee., Timothy, J. Ross. 1993. *Fuzzy Logic and Control, Software and Hardware Applications Volume 2*. Prentice Hall International, Inc: New Jersey.
- Jan Jantzen. 1998. *Design of Fuzzy Controllers*, Tech. report no 98-E 864, Department of Automation, Technical University of Denmark, Lyngby, Denmark, 15 May.
- Lee, CC. 1990. *Fuzzy Logic in Control Systems: Fuzzy Logic Controller-Part II*. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Vol. 20, No. 2, March-Apr.
- Seborg, D.E.–Edgar, T.F.–Mellichamp, D. A. 1989. *Process Dynamics and Control*. Singapore: John Wiley & Sons.
- Shinsky, F.G.. 1992. *pH & Ion Measurement System*. New York: McGraw-Hill, Inc. www.chemeng.ui.ac.id
- Yan, Jun. 1994. *Using Fuzzy Logic*. McGraw-Hill: Singapore.