

Aplikasi Metode Neuro-Fuzzy Pada Sistem Pengendalian Antisurge Kompresor

Imam Abadi, Aulia Siti Aisjah, Riftyanto N.S.

Jurusan Teknik Fisika, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Kampus ITS, Keputih Sukolilo-Surabaya 60111

Abstrak

Salah satu bentuk kondisi operasi yang tidak stabil pada kompresor adalah kondisi yang disebut surge, dimana terjadi ketidakstabilan antara aliran dan tekanan yang dapat menyebabkan kerusakan yang serius pada kompresor. Oleh karena itu akan dirancang suatu pengendalian anti surge pada kompresor. Perancangan dilakukan dengan pengendali neuro-fuzzy, yang menggabungkan kemampuan belajar Neural Network dengan kemampuan pengambilan keputusan pada fuzzy. Dengan harapan akan diperoleh performansi yang lebih baik daripada pengendali PI yang nantinya dijadikan sebagai pembanding. Pada simulasi uji respon sistem, dengan setpoint beda tekanan (ΔP) sebesar $37,91 \text{ kg/cm}^2$, pengendali Neuro-Fuzzy menghasilkan performansi yang lebih baik dari pengendali PI dengan settling time 7,3 detik, maksimum overshoot 11,6223 %, persen error 0,0563013 % dan error steady state $0,0213438 \text{ kg/cm}^2$. Sedangkan pengendali PI menghasilkan settling time 22,3 detik, maksimum overshoot 17,8996 %, persen error 0,185294 % dan error steady state $0,0702449 \text{ kg/cm}^2$.

Kata kunci: antisurge, simulasi, *neuro-fuzzy*, settling time, maksimum overshoot, persen error, error steady state.

Abstract

Operating condition that unstable to compressor is called surge, which defined as self oscillations between pressure and flow, that can cause serious damage to compressor. Because of this problem, it is necessary to design of antisurge compressor control. Using conventional control like PI (Proportional and Integral) controller, effective only for certain condition but ineffective for condition with non linier systems. To handle this problems, it is proposed using Neuro-Fuzzy controller. Application of these system will improve performance indicator of PI controller applied in combination Neural Network and Fuzzy Logic Control to get robust performance system. For respon transient experiment, with differential pressure (ΔP) $37,91 \text{ kg/cm}^2$, Neuro-Fuzzy controller result better performance concerning to PI controller with settling time 7.3 seconds, maximum overshoot 11.6223 %, error percent 0.0563013 % and error steady state $0.0213438 \text{ kg/cm}^2$. Whereas, PI controller result settling time 22.3 seconds, maximum overshoot 17.8996 %, error percent 0.185294 % and error steady state $0.0702449 \text{ kg/cm}^2$. For respon transient system simulation with noise and respon transient simulation with noise and load, Neuro-Fuzzy controller also shows better performance with settling time, maximum overshoot and error steady state smaller than PI controller.

Keywords: antisurge, simulation, *neuro-fuzzy*, settling time, maximum overshoot, error percent, steady state error.

Pendahuluan

Dalam suatu proses di industri, hampir selalu dijumpai kebutuhan terhadap udara bertekanan, yang mana tekanan dan kapasitas udara tersebut berbeda-beda. Untuk menghasilkan udara bertekanan ini digunakan kompresor. Salah satu kendala pada pengoperasian kompresor ini adalah adanya kondisi operasi yang tidak stabil yang bisa mengakibatkan kompresor mengalami trouble serius, yang lebih dikenal dengan sebutan *surge*. Surge adalah gejala gangguan pada operasi kompresor dimana terjadi getaran dalam frekuensi yang bervariasi. Gejala umumnya dapat diakibatkan oleh beban yang mendadak turun, tersumbatnya aliran keluaran udara, ataupun aliran masuk yang kurang.

Beberapa hal penting yang menjadi titik berat penelitian ini, diantaranya bagaimana menghitung titik surge kompresor pada operasi normal, serta mendapatkan analisa matematik dan filosofi sebagai dasar perancangan sistem pengendalian antisurge kompresor.

Sistem pengendali antisurge terpasang yang paling sering digunakan di industri adalah, Sistem Pengendalian Terdistribusi (*Distributed Control System, DCS*). Pada surge yang terjadi pada frekuensi dan kecepatan yang rendah, DCS masih dapat mengatasinya. Tetapi bila surge terjadi dengan sangat cepat dan dalam frekuensi yang tinggi, walaupun dengan amplitudo yang rendah akan sukar diatasi, dan masih mungkin mengakibatkan gangguan yang tidak diinginkan.

Oleh sebab itu pada penelitian ini diimplementasikan suatu metode pengendalian antisurge kompresor dengan menggunakan sistem kendali cerdas yaitu

Catatan: Diskusi untuk makalah ini diterima sebelum tanggal 1 Desember 2006. Diskusi yang layak muat akan diterbitkan pada Jurnal Teknik Elektro volume 7, nomor 1, Maret 2007.

Kontrol Logika Fuzzy (KLF) berbasis *neural network*. Salah satu syarat mutlak diterapkannya KLF adalah diperlukannya pengalaman dari perancangannya, dan jika hal ini tidak tersedia, maka tujuan pengontrolan ini sangat sulit tercapai. Untuk mengatasi hal tersebut, maka dikembangkan pengendali Neuro-Fuzzy (NF), yang menggunakan teknik pembelajaran untuk menentukan parameter-parameter terbaik dari logika fuzzy.

Tinjauan Pustaka

Kompresor adalah mesin yang berfungsi mamampatkan udara/gas yang masuk melalui suction bertekanan rendah keluar melalui discharge bertekanan lebih tinggi. Secara umum kompresor terdiri dari 2 tipe yaitu tipe kinetik atau *dynamic* dan tipe *positive displacement*.

Kompresor tipe dinamik adalah kompresor dimana udara atau gas ditekan oleh aksi dinamik dari putaran sudu-sudu atau impeller sehingga memberikan kenaikan kecepatan dan kenaikan tekanan pada aliran gas. Putaran sudu-sudu ini diperoleh dari pesawat penggerak berupa turbin atau motor. Kompresor tipe positive displacement adalah kompresor dimana udara atau gas dikurung dalam suatu ruang tertutup (chamber). Tekanan akan naik dengan menurunnya volume gas yang terkurung dalam chamber.

Kondisi Surge Pada Kompresor

Secara umum ada 2 jenis surge yang terjadi pada kompresor yaitu "mild surge" dan "violent surge"^[12].

a. Mild Surge

Merupakan surge yang terjadi karena adanya osilasi aliran dengan frekuensi tinggi dalam batas aliran sempit yang terjadi pada tekanan yang relatif konstan.

b. Violent Surge

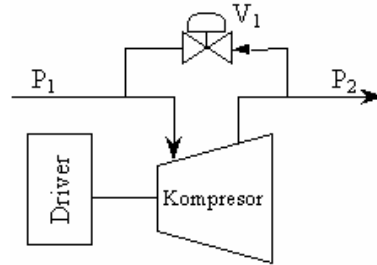
Surge ini terjadi di seluruh unit, ditandai dengan jatuhnya laju aliran secara tiba-tiba sehingga menimbulkan vibrasi yang tinggi, bunyi bising dan temperatur yang tinggi yang kemudian memungkinkan terjadinya kondisi trip pada kompresor.

Sistem Pengendalian Antisurge

Pengendalian antisurge hampir selalu didasarkan pada pemanipulasian *recycle valve*. Bukaannya valve menggeser operasi kompresor dari kondisi surge ke kondisi yang aman.

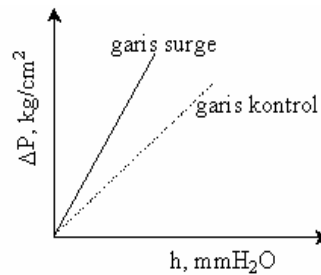
Pada gambar 1 terlihat bahwa dalam kondisi normal secara ideal control valve V_1 harus selalu dalam keadaan tertutup penuh untuk mendapatkan efisiensi

yang maksimal. Valve V_1 akan membuka apabila gejala surging mulai terjadi. Dengan terbukanya valve V_1 , maka aliran suction yang kurang dapat dibackup oleh adanya sirkulasi discharge. Untuk mengendalikan bukaan valve ini diperlukan suatu sistem kontrol otomatis.



Gambar 1. Sistem pengendalian antisurge

Perancangan anti surge control berpedoman pada kurva operasi karakteristik kompresor dengan mendapatkan garis batas surge (*surge limit line*) terlebih dahulu. Dari batas surge limit line tersebut maka dapat dibuat aturan kontrol untuk menentukan garis kontrol surge (*surge control line*) pada pengendalian anti surge.



Gambar 2. Garis batas kontrol dan batas surge

Surge limit line dibuat berdasarkan performansi kompresor. Garis ini menunjukkan batas kondisi minimum yang akan menyebabkan kompresor mengalami *surging*. Pada Gambar 2 menunjukkan suatu keadaan *surge limit line*. Kondisi operasi yang diperkenankan adalah pada daerah di sebelah kanan garis batas surge. Kondisi surging akan terjadi jika operasi berada pada kondisi di sebelah kiri garis batas surge.

Berdasarkan pada Gambar 2 dapat diperoleh hubungan antara h dan ΔP , yaitu, jika h adalah diferensial pressure melalui orifice, dapat dihitung bahwa laju aliran massa, W (dalam kg/dt), dengan rumus:

$$W_s = C_1 \cdot \sqrt{\frac{h_s \cdot P_s}{T_s}} \tag{1}$$

Dengan anggapan pada aliran steady state, laju aliran massa, W , pada suction dan discharge adalah sama, atau $W_s = W_d$, maka:

$$W_d = C_2 \cdot \sqrt{\frac{h_d \cdot P_d}{T_d}} \quad (2)$$

Untuk mendesain pengendalian anti surge dengan elemen pengukur flow pada saluran discharge digunakan persamaan berikut:

$$h_d = C \cdot \Delta P \quad (3)$$

di mana:

h_s = diff. press. orifice suction

P_s = tekanan suction

T_s = suhu suction

h_d = diff. press. orifice discharge

P_d = tekanan discharge

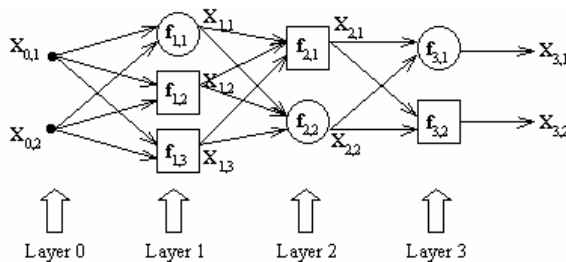
T_s = suhu discharge

ΔP = perbedaan tekanan

$C_n = (C_1, C_2)$ konstanta pengali

Jaringan Adaptif

Salah satu arsitektur dari jaringan syaraf tiruan adalah jaringan adaptif. Jaringan adaptif adalah suatu struktur jaringan yang terdiri dari beberapa simpul yang dihubungkan melalui sambungan langsung.



Gambar 3. Jaringan adaptif

Bagian utama dari pembelajaran jaringan adaptif adalah bagaimana mendapatkan nilai dari vektor gradien secara rekursif. Vektor gradien sendiri didefinisikan sebagai turunan dari error pengukuran terhadap parameter tertentu. Prosedur untuk mendapatkan gradien vektor di dalam struktur jaringan disebut propagasi balik (*backpropagation*), karena vektor gradien dihitung berlawanan dengan arah aliran keluaran dari masing-masing simpul.

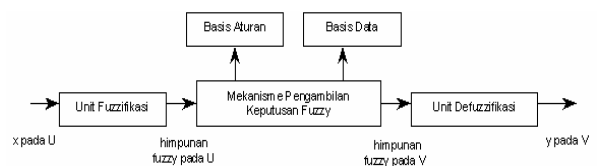
Terdapat beberapa faktor yang mempengaruhi dalam proses training dengan metode *backpropagation*, antara lain nilai awal bobot, konstanta learning, momentum, dan arsitektur (jumlah layer dan node). Faktor tersebut berpengaruh terhadap kecepatan.

Sistem Logika Fuzzy

Sistem fuzzy adalah sistem yang memiliki hubungan langsung dengan konsep fuzzy (himpunan fuzzy, variable linguistik dan sebagainya). Karena sistem fuzzy diberikan sekumpulan aturan *if-then* fuzzy

yang diambil dari pengetahuan manusia, maka sistem fuzzy juga disebut sistem berbasis pengetahuan (*knowledge-based*) atau sistem berbasis aturan (*rule-based*).

Prinsip kerja sistem fuzzy adalah sebagai berikut. *Fuzzifikasi* memetakan nilai crisp pada U kepada himpunan fuzzy pada U. Mesin inferensi fuzzy memetakan himpunan fuzzy pada U kepada himpunan fuzzy pada V dengan menggunakan sekumpulan basis aturan fuzzy. Selanjutnya defuzzifikasi memetakan himpunan fuzzy pada V kepada titik crisp pada V.



Gambar 4. Struktur pengendali logika fuzzy[14]

Untuk mengubah data crisp ke himpunan fuzzy dibutuhkan suatu fungsi keanggotaan untuk menentukan derajat keanggotaan dari data crisp tersebut pada masing-masing istilah bahasa yang telah ditetapkan dalam semesta pembicaraan.

1. Himpunan Fuzzy

Suatu himpunan fuzzy (*fuzzy set*) A dalam semesta pembicaraan (*universe of discourse*) X dinyatakan dengan fungsi keanggotaan μ_A , yang mempunyai harga dalam interval [0,1]. Himpunan secara matematika dinyatakan dengan

$$A = \{x, \mu_A(x) \mid x \in X\} \quad (4)$$

Proses untuk mendapatkan besarnya derajat keanggotaan masukan yang berupa variabel numerik dalam suatu himpunan fuzzy disebut dengan *fuzzifikasi*.

2. Logika Fuzzy dan Penalaran Pendekatan

Pada logika fuzzy, terdapat dua cara atau hukum pembuat keputusan atau disebut *fuzzy inference rule* (FIR). Kedua hukum tersebut adalah: *Generalized modus ponens* (GMP) dan *Generalized modus tollens* (GMT). Perbedaan antara keduanya dapat dijelaskan dalam contoh berikut :

- *Generalized Modus Ponens*
 Premis Mayor : if x is A then y is B
 Premis Minor : x is A'
 Kesimpulan : y is B'
- *Generalized Modus Tollens (GMT)*
 Premis Mayor : if x is A then y is B
 Premis Minor : y is B'
 Kesimpulan : x is A'

Model dari logika fuzzy dapat dibagi menjadi 2 kategori. Model pertama adalah model linguistik yang didasarkan atas kumpulan dari aturan *if-then* yang *antecedent* dan *consequentnya* memiliki nilai fuzzy. Kategori ini menggunakan aturan fuzzy *if-then* dalam bentuk kualitatif, yang menggambarkan kelakuan sistem dengan bahasa natural. Contoh dari model ini adalah model Mamdani, contohnya: *if* tekanan tinggi *then* volume kecil

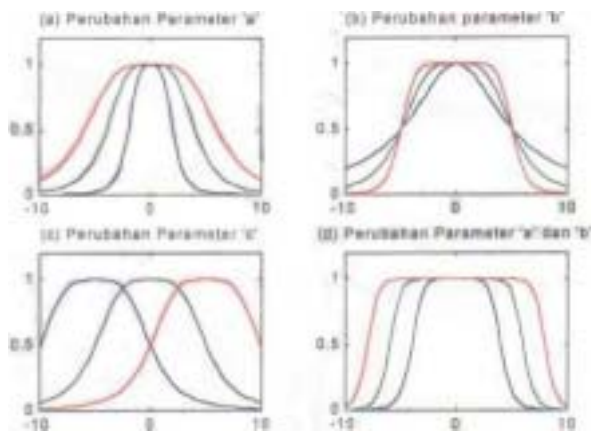
Kategori kedua dari model fuzzy didasarkan oleh metode TSK (Takagi Sugeno Kang) atau biasanya hanya disebut model Sugeno. Model ini didasarkan struktur aturan dengan *antecedent* fuzzy dan *consequent* berupa fungsi non fuzzy, contohnya: *if* kecepatan tinggi *then* gaya = k * kecepatan²

3. Fungsi Keanggotaan

Semua informasi yang terdapat dalam himpunan fuzzy digambarkan dengan fungsi keanggotaan. Misalkan suatu fungsi keanggotaan “bell” dapat dibagi menjadi tiga parameter {a, b, c}, sehingga dapat dirumuskan:

$$Bell(x; a, b, c) = \frac{1}{1 + \left| \frac{x - c}{a} \right|^{2b}} \quad (5)$$

Dimana b biasanya positif karena jika b negatif bentuk fungsi keanggotaan “bell” terbalik. Perubahan dari parameter a dan c akan membuat variasi dari letak titik tengah dan lebar dari fungsi “bell”. Sedangkan perubahan parameter dari b akan merubah slope dan titik *cross over*.



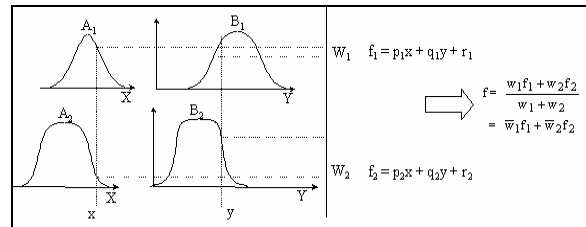
Gambar 5. Perubahan parameter pada Fungsi Keanggotaan Generalized Bell

ANFIS (Adaptive Network Fuzzy Inference System / Adaptive Neuro Fuzzy Inference System)

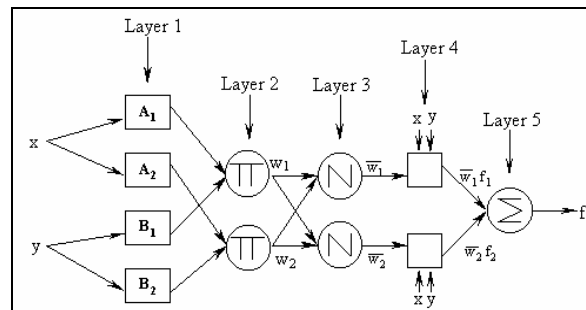
Setelah Sugeno memperkenalkan model *fuzzy* dengan *antecedent* himpunan fuzzy dan *consequentnya* merupakan himpunan crisp maka terdapat istilah baru

yang disebut *fuzzy adaptive*. Salah satu model fuzzy adaptive adalah ANFIS (*Adaptive Neuro Fuzzy Inference System*) yang dikemukakan oleh Roger Jang.

Berikut ini akan diberikan arsitektur ANFIS dengan dua input dan dua kondisi linguistik sesuai dengan gambar 6.



Gambar 6a. Fuzzy Reasoning untuk tipe Sugeno [6]



Gambar 6b. Ekuivalen ANFIS fuzzy tipe Sugeno [6]

Lapis ke-1: setiap simpul pada lapisan ini adalah simpul adaptif dengan fungsi simpul

$$O_{1,i} = \mu_{A_i}(x) \text{ untuk } i = 1,2 \quad (6)$$

$$O_{1,i} = \mu_{B_i}(y) \text{ untuk } i = 3,4 \quad (7)$$

Simpul $O_{1,i}$ berfungsi untuk menyatakan derajat keanggotaan tiap masukan terhadap himpunan fuzzy A dan B.

Lapis ke-2: setiap simpul pada lapisan ini adalah simpul tetap yang merupakan perkalian dari sinyal yang datang. Operator perkalian dari aturan fuzzy pada simpul ini adalah AND

$$O_{2,i} = w_i = \mu_{A_i}(x) \cdot \mu_{B_i}(y) \text{ untuk } i = 1,2 \quad (8)$$

Lapis ke-3: setiap simpul pada lapisan ini adalah simpul tetap. Pada simpul ke-i menghitung ratio dari aturan derajat keanggotaan ke-i dengan jumlah dari aturan derajat keanggotaan, sehingga dapat dirumuskan sebagai berikut :

$$O_{3,i} = \bar{w}_i = \frac{w_i}{w_1 + w_2} \text{ untuk } i = 1,2 \quad (9)$$

Lapis ke-4: setiap simpul pada lapis ini adalah simpul adaptif dengan fungsi simpul adalah:

$$O_{4,i} = \bar{w}_i f_i = \bar{w}_i (p_i x + q_i y + r_i) \quad (10)$$

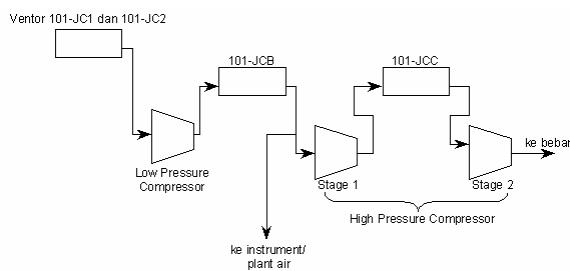
{ p_i, q_i, r_i } adalah himpunan parameter yang disebut *consequent parameter*.

Lapis ke-5: merupakan simpul tunggal yang menghitung keluaran dengan cara menjumlahkan semua sinyal masukan

$$O_{5,i} = \sum \bar{w}_i f_i = \frac{\sum_i w_i f_i}{\sum_i w_i} \quad (11)$$

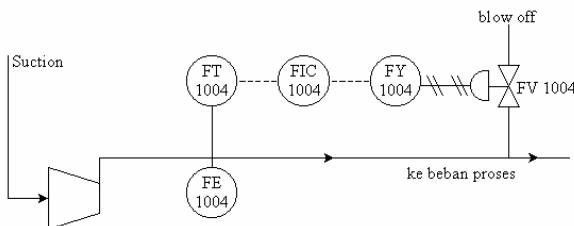
Dinamika Sistem dan Penurunan Model Matematik

Kompresor udara yang ditinjau dalam penelitian ini adalah kompresor udara tipe sentrifugal, dengan fungsi utama menyediakan udara tekan untuk proses pembuatan amoniak. Selain untuk udara proses, sekitar 3% kapasitas udara tekan digunakan untuk instrumen air dan plant air, yang berfungsi sebagai sumber daya untuk instrumen-instrumen dan peralatan pneumatis. Kompresor udara terdiri dari tiga stage utama, satu stage Low Pressure Compressor dan dua stage High Pressure Compressor.



Gambar 7. Sistem perpipaan kompresor udara

Sistem instrumentasi pengendalian anti surge terpasang dapat dilihat pada gambar 3.2 berikut.



Gambar 8. Sistem instrumentasi pengendalian anti surge terpasang.

Pada dasarnya sistem pengendalian anti surge terpasang adalah sistem pengendalian laju aliran pada saluran discharge. Sebagai elemen sensor adalah orifice FE 1004, yang menghasilkan differensial pressure h_d . Differensial orifice ini ditransmisikan oleh FT 1004 yang berupa Differensial Pressure Transmitter (DPT), dan keluaran DPT ini adalah

sinyal umpan balik untuk pengendali FIC 1004 berdasarkan error antara sinyal umpan balik dan set point yang dimasukkan dihasilkan sinyal kembali yang menggerakkan control valve FV 1004 sebagai katup Blow-Off. Laju aliran pada saluran discharge dapat dikendalikan dengan mekanisme membuka atau menutup katup blow-off walaupun dengan aliran pada beban tetap.

Perhitungan Surge Limit Line dan Surge Control Line Kompresor 101-J

Untuk mendapatkan surge limit line, dicari dari kurva performansi kompresor 101-J. Kurva performansi kompresor tersebut dibuat untuk kondisi-kondisi operasi sebagai berikut:

$$P_s \text{ (tekanan suction)} = 0,99 \text{ kg/cm}^2$$

$$T_s \text{ (temperatur suction)} = 33 \text{ }^\circ\text{C} = 306 \text{ }^\circ\text{K}$$

Pada kondisi putaran konstan (100%) didapatkan surge limit berada pada:

$$P_d \text{ (tekanan discharge)} = 50 \text{ kg/cm}^2$$

$$\Delta P \text{ (beda tekanan } \approx P_d - P_s) = 49,01 \text{ kg/cm}^2$$

$$W_d = W_s \text{ (laju aliran massa)} = 61000 \text{ kg/jam}$$

$$= 16,94 \text{ kg/detik}$$

Dari data kondisi operasi orifice FE-1004, untuk input aliran 0-80000 kg/jam atau 0-22,22 kg/detik akan didapat output sebesar 0-2500 mmH₂O atau setara dengan 0-0,245 kg/cm². Maka dengan data-data untuk kondisi discharge sebagai berikut: $W_d = 22,22 \text{ kg/detik}$; $T_d = 183,5 \text{ }^\circ\text{C} = 456,5 \text{ }^\circ\text{K}$; $P_d = 38,9 \text{ kg/cm}^2$; $h_d = 0,245 \text{ kg/cm}^2$, akan dicari nilai dari C menurut persamaan:

$$W_d = C \cdot \sqrt{\frac{h_d \cdot P_d}{T_d}}, \text{ sehingga } C = 154,31$$

Kemudian untuk mencari nilai h_d pada surge limit, didapat dengan memasukkan harga-harga $W_d = 16,94 \text{ kg/detik}$; $P_d = 38,9 \text{ kg/cm}^2$; $T_d = 456,5 \text{ }^\circ\text{K}$; $C = 154,31$ ke persamaan di atas didapatkan $h_d = 0,141 \text{ kg/cm}^2$.

Untuk mencari gradient surge limit line, harga-harga ΔP dan h_d diubah ke persen sinyal arus standart, sehingga didapatkan:

$$\Delta P = 49,01 \text{ kg/cm}^2 \rightarrow W = 16,94 \text{ kg/detik} \rightarrow \frac{16,94}{22,22} \times$$

100% \approx 76% sinyal standart

$$h_d = \frac{0,141}{0,245} \times 100\% \approx 58\% \text{ sinyal standar}$$

Sehingga dari persamaan $h_d = C \cdot \Delta P$ akan diperoleh gradien surge limit line, yaitu:

$$C = \frac{h_d}{\Delta P} = \frac{58\%}{76\%} = 0,763$$

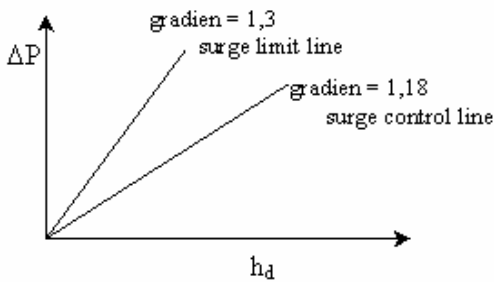
Selanjutnya ditetapkan surge control line berada pada 10% dari laju aliran surge, yaitu: $(10\% \times 16,94 \text{ kg/detik}) + 16,94 \text{ kg/detik} = 18,63 \text{ kg/detik}$
 Jadi surge control line berada pada

$$0,156 \text{ kg/cm}^2 \text{ atau } \frac{0,156}{0,245} \times 100\% \approx 64\% \text{ sinyal}$$

standart. Maka akan diperoleh gradien surge control line:

$$C = \frac{h_d}{\Delta P} = \frac{64\%}{76\%} = 0,84$$

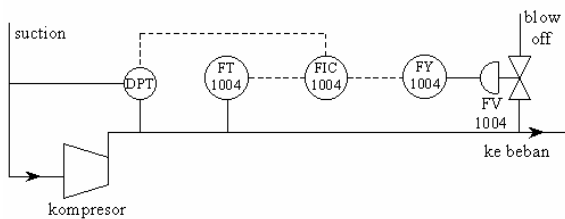
Jika digambarkan, kedudukan kurvanya adalah sebagai berikut:



Gambar 9. Kedudukan kurva “surge control line” terhadap “surge limit line”

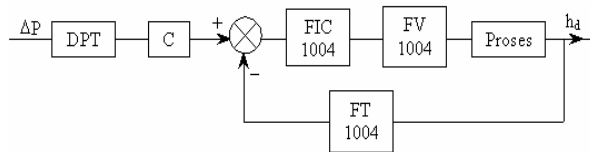
Konfigurasi Sistem Pengendalian Anti Surge

Pada Plant ini, variabel yang dikendalikan adalah differensial orifice (h_d) dengan set point $C\Delta P$. adapun konfigurasi sistem pengendalian ditunjukkan pada gambar 10 .



Gambar 10. Diagram sistem pengendalian yang dirancang

Input tekanan *discharge* didapat dengan memasang sensor dan transmitter tekanan. Harga sinyal tekanan ini dikurangkan dengan harga tekanan suction, sehingga keluarannya adalah beda tekanan (ΔP). Setelah dikalikan dengan gradien kurva C, sinyal ini menjadi set point untuk sistem pengendalian. Variabel yang dikendalikan adalah h_d , yang harganya dikendalikan sehingga sama dengan set point $C\Delta P$. Dengan demikian diagram blok pengendalian dapat digambarkan pada gambar 11.



Gambar 11. Diagram blok sistem pengendalian dirancang

Model Matematis dan Diagram Blok Sistem Pengendalian Anti Surge

Dari diagram blok sistem pengendalian yang dirancang, dapat diturunkan model matematis dan fungsi transfer masing-masing elemen.

Fungsi Alih Transmitter Beda Tekanan

Fungsi alih DPT ini dapat dinyatakan dengan persamaan orde satu sebagai berikut :

$$\frac{I(s)}{\Delta P_c(s)} = \frac{K}{1 + T_s}$$

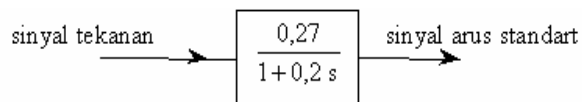
Gain transmitter K adalah

$$K = \frac{\text{span tekanan pneumatis}}{\text{span beda tekanan}} \times \frac{\text{span arus}}{\text{span tekanan pneumatis}}$$

$$K = \frac{1 - 0,2 \text{ kg/cm}^2}{60 - 0 \text{ kg/cm}^2} \times \frac{20 - 4 \text{ mA}}{1 - 0,2 \text{ kg/cm}^2} \text{ sehingga}$$

$$K = 0,27 \frac{\text{mA}}{\text{kg/cm}^2}$$

Selanjutnya time konstan transmitter dengan keluaran sinyal elektrik yang ada pada *Process Control*, Peter Harriot[4] adalah 0,2 detik, sehingga blok diagramnya adalah sebagai berikut



Gambar 12 . Fungsi alih transmitter beda tekanan

Fungsi Alih Transmitter Aliran

Fungsi alih transmitter dapat dilihat dalam persamaan orde satu sebagai berikut:

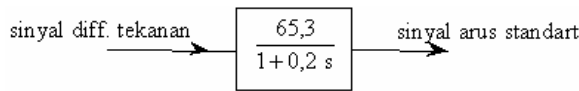
$$\frac{I(s)}{H(s)} = \frac{K_F}{1 + T_F S}$$

Gain transmitter dapat didefinisikan sebagai span keluaran arus dibagi daya span masukan differensial orifice sehingga:

$$K_F = \frac{20 - 4 \text{ mA}}{0,245 - 0 \text{ kg/cm}^2} = 65,3 \frac{\text{mA}}{\text{kg/cm}^2}$$

Dari *Process Control*, Peter Harriot^[4], time konstan elektrik transmitter dengan keluaran sinyal elektrik

dapat dipilih sebesar 0,2 detik, sehingga diagram bloknya:



Gambar 13. Fungsi alih transmiter aliran

Fungsi Alih Elemen Pengendali Akhir

Fungsi alih control valve dapat dinyatakan dengan persamaan orde satu dengan gain dan time konstan sebagai berikut:

$$\frac{W(s)}{P(s)} = \frac{K_v}{1 + T_v (s)}$$

Gain kontrol valve adalah gabungan antara gain perubahan sinyal pada elemen I/P (K_1) dan gain perubahan dari sinyal pneumatis standart ke keluaran tipe aliran pada kontrol valve (K_2). Gain perubahan sinyal pada elemen I/P adalah:

$$K_1 = \frac{\text{span tekanan pneumatis}}{\text{span arus}} = \frac{1 - 0,2 \text{ kg/cm}^2}{20 - 4 \text{ mA}}$$

$$= 0,05 \frac{\text{kg/cm}^2}{\text{mA}}$$

Dari karakteristik suatu valve, maka gain control valve dapat didefinisikan:

$$K_2 = \frac{df(x)}{dx} \cdot \frac{F_{\max}}{100\%}$$

di mana:

$f(x)$ = fraksi aliran

x = posisi stem

F_{\max} = laju aliran max melalui valve

Control valve yang digunakan adalah tipe linear trim, dan actuarnya jenis diaphragma.

Sehingga $f(x) = x$ dan $\frac{df(x)}{dx} = 1$.

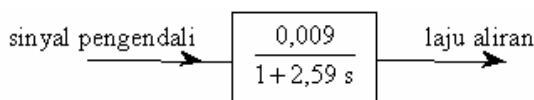
Laju aliran maximum (F_{\max}) yaitu pada saat control valve membuka penuh adalah 64632 kg/jam atau 17,95 kg/detik, sehingga:

$$K_2 = 1 \cdot \frac{17,95}{100\%} = 0,18 \frac{\text{kg/dt}}{\text{kg/cm}^2}$$

Sehingga gain control valve totalnya adalah:

$$K_v = K_1 \cdot K_2 = 0,009 \frac{\text{kg/dt}}{\text{mA}}$$

Untuk perencanaan tubing sejauh 30 feet didapatkan time konstan kontrol valve $T_v = 2,59$ detik. Sehingga diagram bloknya adalah:



Gambar 14. Fungsi alih elemen pengendali akhir

Fungsi Alih Proses dan Beban

Fungsi alih proses dapat didekati dengan persamaan orde satu sebagai berikut:

$$\frac{H(s)}{W_v(s)} = \frac{K_p}{1 + T_p s}$$

Gain proses adalah gain aliran pada *discharge* terhadap aliran pada kontrol valve (K_1) dan gain perubahan differential orifice terhadap perubahan aliran *discharge* (K_2). Dengan asumsi bahwa aliran ke beban tetap, maka perubahan aliran pada *discharge* dan pada kontrol valve sama, sehingga $K_1 = 1$.

Perubahan differential *orifice* terhadap perubahan aliran *discharge* tidak linear. Menurut *Process Control, Peter Harriot*^[4], gain pada orifice didefinisikan:

$$K_2 = \frac{dh/h}{dW/W} = \frac{\% \text{ perubahan differensial orifice}}{\% \text{ perubahan aliran}}$$

di mana:

$$h = kW^2$$

$$dh = 2kW dW$$

Sehingga diperoleh: $\frac{dh}{h} = 2 \frac{dW}{W}$ atau $K_2 = 2$.

Dengan demikian gain total proses adalah:

$$K_p = K_1 \cdot K_2 = 2$$

time konstan proses aliran pada pipa didapat menurut persamaan:

$$T_p = \frac{D}{4 f \cdot v \cdot (1 + R)}$$

di mana:

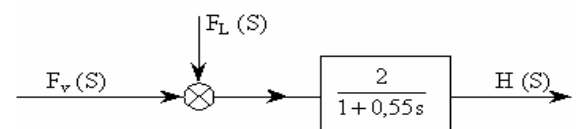
D = diameter dalam pipa (m)

f = faktor gesekan pipa

v = kecepatan aliran pada pipa (m/det)

R = resistensi pipa (bila dianggap semua pressure drop karena gesekan, $R = 0$)

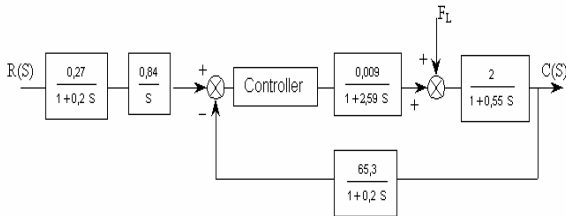
Dari data lapangan, di dapat bahwa diameter dalam pipa, $D = 0,406$ m. Kecepatan fluida, $v = 8,05$ m/dt. Faktor gesekan $f = 0,023$. Sehingga dengan memasukkan harga-harga diatas didapat time konstan proses $T_p = 0,55$ dt.



Gambar 15. Fungsi alih proses dan beban

Diagram Blok Sistem Pengendalian Anti Surge

Model matematik diagram blok sistem pengendalian anti surge secara keseluruhan seperti ditunjukkan pada gambar 16. Konstanta pengali keluaran elemen DPT adalah gradien kurva surge.



Gambar 16. Diagram blok sistem pengendalian

Perancangan Algoritma Pengendali

Setelah diketahui model matematis dari *plant* maka akan dilakukan langkah-langkah untuk merancang sistem pengendali, dengan algoritma sbb:

- a. Perancangan pengendali PI yang nantinya digunakan sebagai guru pada pembelajaran *Neuro-Fuzzy*.
 - Aproksimasi fungsi transfer sistem kontinu orde tinggi (orde 3) menjadi orde rendah (orde 2) agar dapat dilakukan *tuning* dengan metode *Root Locus*.
 - Mengubah fungsi alih teraproksimasi orde2 ke fungsi transfer sistem diskrit dengan metode sampling ZOH (*Zero Order Hold*).
 - *Tuning gain* K_p dan K_i dengan metode *Root Locus*.
- b. Pengambilan data input ke pengendali PI dan keluaran pengendali PI.
- c. Perancangan pengendali *Neuro-Fuzzy*.
 - proses inialisasi pengendali *Neuro-Fuzzy*
 - proses pembelajaran dengan pengendali PI sebagai guru
 - struktur pengambilan keputusan *fuzzy inference system* (FIS) dalam pembelajaran adalah *ANFIS*
 - proses *running*

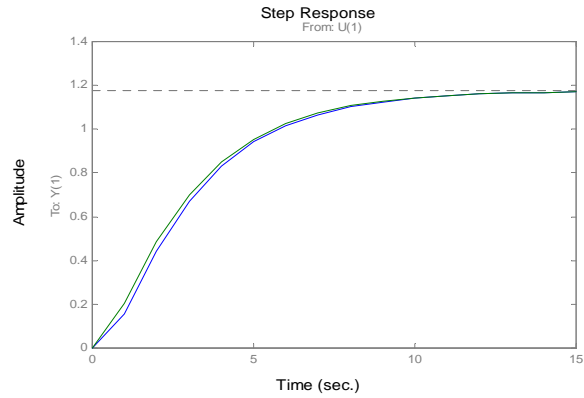
Aproksimasi Persamaan ke Orde-2

Dari model matematis didapat suatu persamaan orde-3 yang akan diaproksimasi ke persamaan orde-2:

$$M_H = \frac{1,175400}{0,2849s^3 + 2,053s^2 + 3.34s + 2,175}$$

Persamaan orde-3 yang diaprokmasikan ke orde-2 adalah:

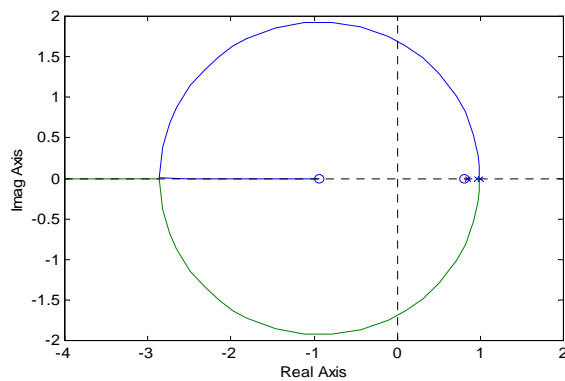
$$M_L = \frac{1,175400}{1 + 3,18s + 1,52s^2}$$



Gambar 17. Perbandingan Respon Step dari Plant dengan Pendekatan ke Orde-2

Perancangan Pengendali PI dengan Metode Root Locus

Dengan menentukan rasio redaman $\xi=0,5$ dan osilasi redaman 0,005 akan didapatkan gain proporsional dan gain integral $K_p = 4,81046$ dan $K_i = 1,92793$.



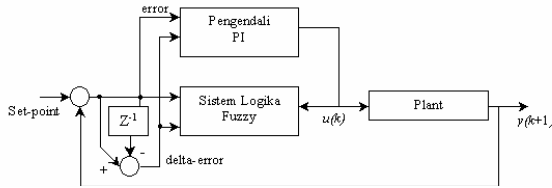
Gambar 18. Tempat kedudukan akar sistem loop tertutup plant menggunakan pengendali PI

Perancangan Pengendali Neuro-Fuzzy

Algoritma perancangan pengendali *Neuro-Fuzzy* terdiri dari tiga tahapan yaitu proses inialisasi, proses pembelajaran dan proses running.

Proses Inialisasi

Gambar 19 menunjukkan struktur sistem saat proses inialisasi harga awal parameter logika *fuzzy*. Sistem logika fuzzy diparalel dengan pengendali PI yang akan menjadi guru bagi sistem tersebut. Sinyal dari pengendali PI dikirimkam ke plant yang akan dikendalikan.



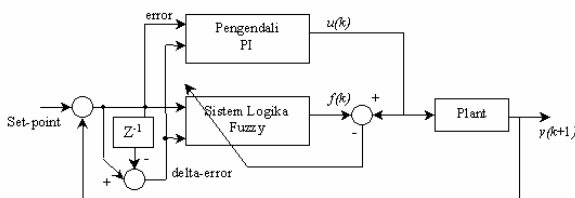
Gambar 19. Struktur sistem ketika dalam pemilihan nilai awal parameter sistem logika fuzzy^[13].

Pada perancangan *neuro-fuzzy* untuk proses inisialisasi, ditentukan nilai-nilai awal sebagai berikut:

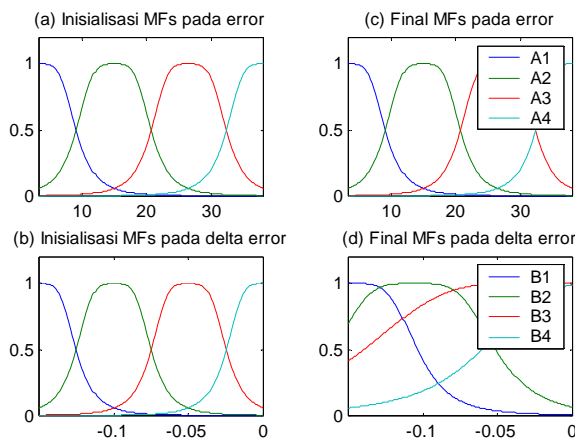
- Arsitektur *fuzzy* yang dipakai adalah *fuzzy Sugeno*.
- Fungsi keanggotaan yang dipakai adalah *Generalized Bell*.
- Jumlah fungsi keanggotaan yang dipakai adalah 4 buah.
- Jumlah aturan (*rule*) yang dipakai adalah 16.

Proses Pembelajaran

Setelah proses pemberian nilai awal parameter, maka nilai awal tersebut dilakukan pembelajaran. Pada proses pembelajaran ini logika fuzzy diletakkan paralel dengan pengendali PI (mirip dengan proses inisialisasi). Selisih antara $u(k)$ dan $f(k)$ merupakan *error learning* yang kemudian dipakai untuk pembelajaran dengan metode ANFIS.



Gambar 20. Struktur sistem saat proses pembelajaran^[13].



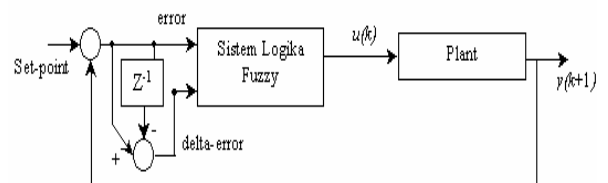
Gambar 21. Inisialisasi dan final fungsi keanggotaan

Setelah dilakukan pembelajaran dengan setting jumlah rule 16, jumlah epoch (iterasi) 50 didapatkan aturan sebagai berikut:

- If E adalah A_1 dan ΔE adalah B_1 then $u(k) = 3,371.E - 0,01761.\Delta E + 0,2712$
- If E adalah A_1 dan ΔE adalah B_2 then $u(k) = 3,81.E - 0,02037.\Delta E + 0,8792$
- If E adalah A_1 dan ΔE adalah B_3 then $u(k) = -3,102.E + 0,0105.\Delta E + 30,35$
- If E adalah A_1 dan ΔE adalah B_4 then $u(k) = 1,6.E - 0,004859.\Delta E + 34,47$
- If E adalah A_2 dan ΔE adalah B_1 then $u(k) = -3,87.E - 0,03039.\Delta E - 0,06882$
- If E adalah A_2 dan ΔE adalah B_2 then $u(k) = 0,3708.E - 0,04987.\Delta E + 7,107$
- If E adalah A_2 dan ΔE adalah B_3 then $u(k) = -0,3265.E - 0,003703.\Delta E + 31,25$
- If E adalah A_2 dan ΔE adalah B_4 then $u(k) = -0,7034.E + 0,005694.\Delta E + 31,08$
- If E adalah A_3 dan ΔE adalah B_1 then $u(k) = 0,3395.E - 1,123.\Delta E - 2,098$
- If E adalah A_3 dan ΔE adalah B_2 then $u(k) = 0,553.E - 0,983.\Delta E - 6,739$
- If E adalah A_3 dan ΔE adalah B_3 then $u(k) = -0,6789.E - 0,0837.\Delta E + 1,2$
- If E adalah A_3 dan ΔE adalah B_4 then $u(k) = 5,352.E + 0,02098.\Delta E + 4,373$
- If E adalah A_4 dan ΔE adalah B_1 then $u(k) = -0,642.E - 2,522.\Delta E + 28,64$
- If E adalah A_4 dan ΔE adalah B_2 then $u(k) = -0,6211.E - 4,319.\Delta E + 26,52$
- If E adalah A_4 dan ΔE adalah B_3 then $u(k) = -0,177.E + 2,583.\Delta E + 13,22$
- If E adalah A_4 dan ΔE adalah B_4 then $u(k) = -0,2907.E + 1,1.\Delta E + 2,191$

Proses Running

Setelah proses pembelajaran kemudian dilanjutkan dengan proses *running* dengan hanya memanfaatkan sistem logika *fuzzy* yang aturan-aturannya didapatkan dari proses pembelajaran, seperti pada gambar di bawah.



Gambar 22. Proses 'running' tanpa pembelajaran^[13].

Simulasi Dan Analisa

Setelah dilakukan perancangan pengendali *neuro-fuzzy* untuk mendapatkan parameter-parameter dari aturan dasar logika fuzzy maka akan dilakukan analisa untuk menguji performansi dari pengendali *neuro-fuzzy* dengan pembandingan adalah pengendali PI. Dalam simulasi digunakan software Matlab 5.3.1.

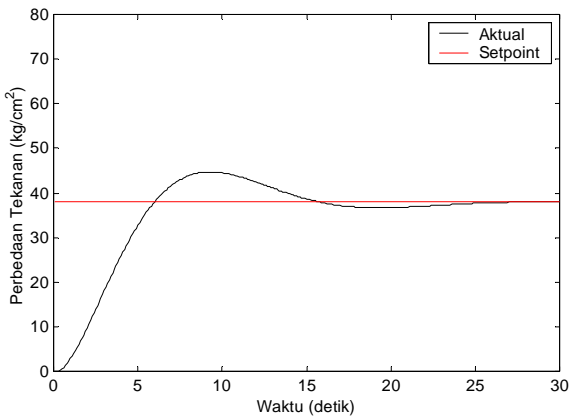
Dari hasil simulasi yang dilakukan dengan menggunakan Neuro-Fuzzy maka akan diketahui performansi sistem yang meliputi settling time (detik), max overshoot (%), persen error (%) dan error steady state (kg/cm^2).

Pengujian Respon Transien Sistem

Dari hasil perancangan pengendali PI, apabila *plant* mendapat input sinyal step dan setpoint beda tekanannya $37,91 \text{ kg/cm}^2$ didapatkan hasil sbb :

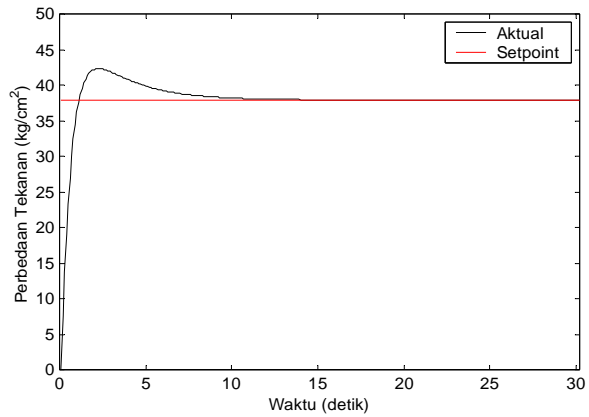
Tabel 1. Respon dinamik sistem pengendali PI dan Neuro-Fuzzy

Ukuran Performansi	Pengendali PI	Pengendali Neuro-Fuzzy
Settling Time (detik)	22,3	7,3
Max Overshoot (%)	17,8996	11,6223
Persen Error (%)	0,185294	0,0563013
Error Steady State (kg/cm^2)	0,0702449	0,0213438



Gambar 24. Respon keluaran sistem menggunakan pengendali PI

Performansi dari sistem yang dipasang pengendali *neuro-fuzzy* terbukti lebih baik dari sistem yang dipasang pengendali PI, karena sistem dengan pengendali *neuro-fuzzy* terpasang memiliki kestabilan yang tinggi, selain itu *settling time* dan *error steady state* jauh lebih kecil daripada sistem dengan pengendali PI terpasang. Hal ini berarti bahwa sistem dengan pengendali *neuro-fuzzy* terpasang cepat mencapai keadaan stabil dibandingkan dengan sistem dengan pengendali PI.



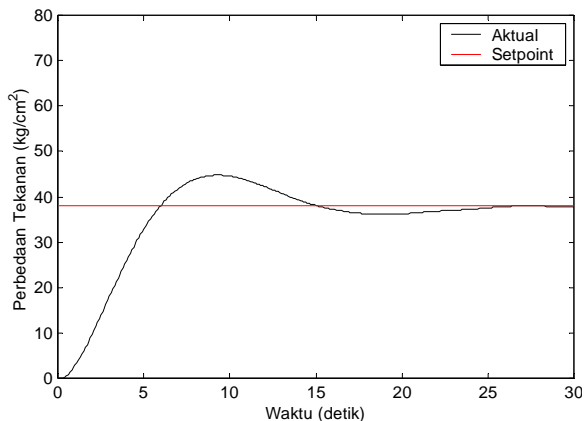
Gambar 25. Respon keluaran sistem menggunakan pengendali neuro-fuzzy

Pengujian Respon Transien Sistem dengan adanya Noise / Gangguan

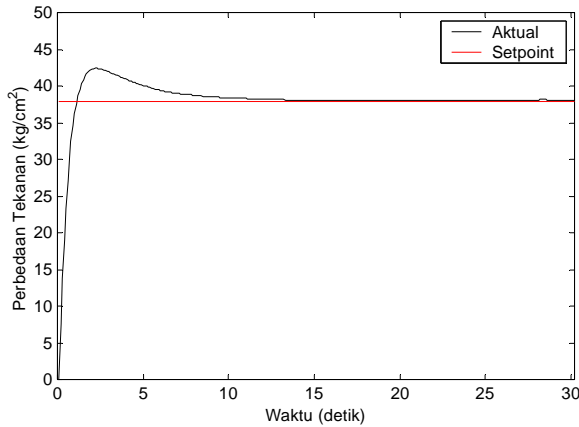
Tabel 2. Respon dinamik sistem pengendali PI dan Neuro-Fuzzy dengan noise

Ukuran Performansi	Pengendali PI	Pengendali Neuro-Fuzzy
Settling Time (detik)	23,5	8,1
Max Overshoot (%)	18,0617	11,8105
Persen Error (%)	0,670068	0,44103
Error Steady State (kg/cm^2)	0,254023	0,167195

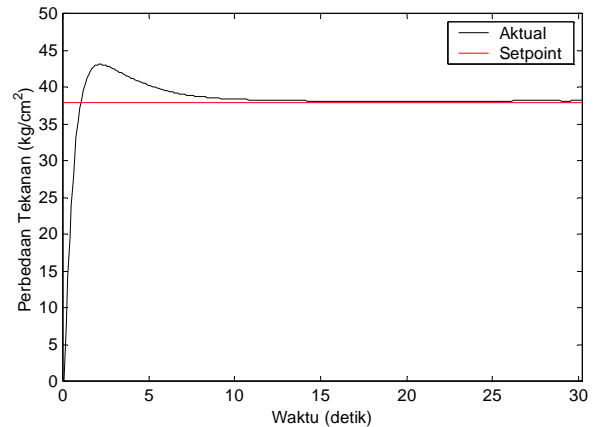
Untuk sistem dengan pengendali PI apabila mendapat gangguan berupa noise pengukuran yaitu sinyal random maka respon transiennya cenderung lama untuk mencapai keadaan stabil, seperti terlihat pada gambar 26. Hal ini sangat berbeda dengan sistem dengan pengendali *neuro-fuzzy* yang dengan adanya noise pengukuran hampir tidak berpengaruh pada respon transien sistemnya.



Gambar 26. Respon keluaran sistem menggunakan pengendali PI dengan noise



Gambar 27. Respon keluaran sistem menggunakan pengendali neuro-fuzzy dengan noise

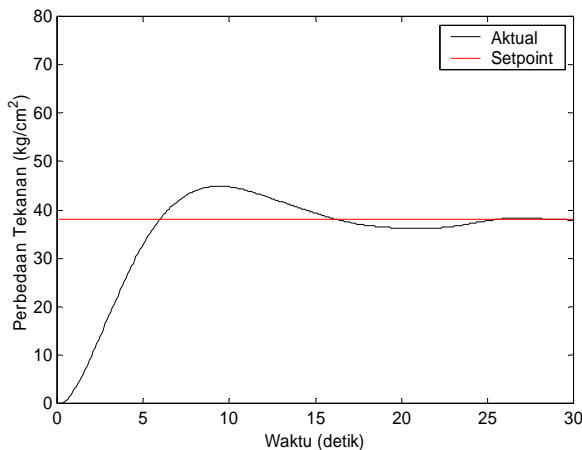


Gambar 29. Respon keluaran sistem menggunakan pengendali neuro-fuzzy dengan noise dan perubahan beban

Pengujian Respon Transien Sistem dengan adanya Noise / Gangguan dan perubahan Beban

Tabel 3. Respon dinamik sistem pengendali PI dan *Neuro-Fuzzy* dengan *noise* dan perubahan beban.

Ukuran Performansi	Pengendali PI	Pengendali Neuro-Fuzzy
Settling Time (detik)	23,9	7,9
Max Overshoot (%)	18,3621	13,5497
Persen Error (%)	0,666436	0,580036
Error Steady State (kg/cm ²)	0,252646	0,219892



Gambar 28. Respon keluaran sistem menggunakan pengendali PI dengan noise dan perubahan beban

Apabila dalam proses ini, terdapat noise pengukuran dan terjadi perubahan beban, maka performansi pengendali *neuro-fuzzy* lebih baik dari pada pengendali PI. Hal ini dapat dibuktikan dari hasil simulasi, bahwa walaupun terjadi perubahan beban dan noise pengukuran, namun plant yang dipasang pengendali neuro-fuzzy relatif lebih stabil dari pada plant yang dipasang pengendali PI.

Kesimpulan

Berdasarkan ketiga uji simulasi, yaitu uji respon transien sistem, uji respon transien sistem dengan noise/gangguan, dan uji respon transien sistem dengan noise dan perubahan beban, pengendali neuro-fuzzy menunjukkan performansi yang lebih baik daripada pengendali PI, hal ini dinyatakan melalui indeks performansi kedua pengendali yakni *settling time*, *max overshoot* dan *error steady state*. Yang mana secara kuantitatif nilai masing masing indek untuk pengendali neuro fuzzy jauh lebih kecil bila dibandingkan dengan pengendali konvensional PI.

Dari segi *safety*, pengendali *Neuro Fuzzy* bisa dikatakan lebih aman, karena tingkat toleransi error yang lebih kecil bila dibandingkan dengan pengendali PI

Daftar Pustaka

- [1] Frans Gunterus, "Falsafah Dasar: Sistem Pengendalian Proses", PT Elex Media Komputindo, Jakarta, 1994
- [2] Fuzzy Logic Toolbox, The Mathwork.Inc, USA, 1998
- [3] Giampolo, T.J., Control of Compressor to Produce Saving, Compressor Control Corporation, USA
- [4] Harriot, P., Process Control, McGraw Hill, New Delhi, 1964
- [5] Incropera, F.D., Fundamental of Heat and Mass Transfer, John Wiley and Son, New York, 1981
- [6] Jang Jyh Shing, Roger, Sun, Chuen-Tsai, Mizutani, Eiji, Neuro Fuzzy and Soft Computing: Computational Approach to learning and Machine Intelligence, Prentice Hall International, 1987

- [7] Josep Edyanto, *Matlab Bahasa Komputasi Teknis (Terjemahan)*, Andi, Yogyakarta, 2000.
- [8] Lin C.T and Lee, "A neuro-fuzzy Synergism to Intelligent System", Prentice Hall International, Inc., 1996.
- [9] Liptak, Bela G., *Instrument Engineer Handbook, Process Control*, 3rd edition, Chilton Book Company I Radnor, Pennsylvania, 1995.
- [10] McMillan, G.K., *Tuning and Control Loop Performance*, ISA, USA, 1983.
- [11] Ogata Katsuhiko, *Modern Control Engineering*, Prentice Hall Inc., 1970.
- [12] Virginia, "Surge As a Problem", Virginia Indonesia Company, 1989.
- [13] Rusimanto, Puput Winarti: "Analisis dan Perancangan Sistem Pengendalian Antisurge Kompresor 024 K 102 Pertamina UP IV Cilacap", Tugas Akhir.
- [14] Son Kuswadi, *Kendali Cerdas*, EEPIS Press, Surabaya, 2000.
- [15] Surton, Moh., "Perancangan Sistem Pengendalian Kecepatan pada Turbin dengan Metode Neuro-Fuzzy di Unit Power Plant PT. Kertas Leces (Persero)", Tugas Akhir, 2000.
- [16] Wang L.X., "A Course in Fuzzy System and Control", Prentice Hall International, 1997.
- [17] Yasir Said M., "Perancangan Sistem Pengendalian Antisurge Kompresor Sintesa Gas dengan Metode Logika Fuzzy di PT. Pupuk Kalimantan Timur Bontang", Tugas Akhir, 2000.