
PENERAPAN KENDALI CERDAS PADA SISTEM TANGKI AIR MENGGUNAKAN LOGIKA FUZZY

Edwar Yazid

Pusat Penelitian Tenaga Listrik dan Mekatronik
Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia
Jl. Cisitua No.21/154D, Bandung 40135, Indonesia
email: edwar_yazid@plasa.com.

ABSTRAK

Implementasi kendali cerdas pada sistem tangki air menggunakan logic fuzzy disajikan pada makalah ini. Sistem tangki air yang merupakan sistem yang dikontrol adalah suatu model dari proses kontrol dengan sensor tunggal dan aktuator tunggal. Kendali logik Fuzzy sebagai kendali cerdas pada penelitian ini didisain dan diimplementasikan untuk membuat ketinggian air mengikuti perubahan ketinggian air acuan secepat mungkin dan mempertahankan ketinggian air sedekat mungkin dengan ketinggian air acuan, dibawah variasi lingkungan. Proses disain dari kontrol logik fuzzy dilakukan menggunakan nilai error (e) dan beda error (de) ketinggian air diukur oleh sensor sedangkan keluaran kendali adalah input tegangan untuk mensupply motor pompa (u). Secara matematik, operasi fuzzy set dan aturan fuzzy diberlakukan pada input dan ouput ini untuk meminimalisasi harga error dan perubahan error. Dari hasil eksperimen, kendali logik fuzzy mempunyai 7 set fuzzy untuk input error, 3 fuzzy set untuk perubahan error dan 21 aturan fuzzy untuk aksi kendali. Error “steady state” yang dihasilkan lebih kecil 37.5% dari pengendali konvensional PI/Proporsional dan Integral (sebagai pengendali pembanding). Untuk respon dari variasi ketinggian air, kendali logik fuzzy cukup cepat tetapi lebih lambat 55.5% dari pengendali PI.

Keywords : Logik Fuzzy, error, perbedaan error, ketinggian air.

ABSTRACT

The implementation of intelligent controller on water tank system using fuzzy logic was discussed in this paper. Water tank system, which was controlled system in this research, was a model of process control with single sensor and single actuator (Single Input Single Output). Fuzzy logic controller as intelligent controller in this research were designed and implemented for making water level follow the reference water level change as fast as possible and keeping water level close to the reference water level under variation of environment. The design of fuzzy logic controller was conducted by using input value of error (e) and difference of error (de) water level were measured by sensor and the output of controller was input voltage to supply pump motor (u). Mathematically, fuzzy set operation and fuzzy rules were conducted to this input and ouput to minimize value of error and difference of error. From experiment results, fuzzy logic controller has 7 fuzzy set for error input, 3 fuzzy set for change of error and 21 fuzzy rules for control action. Steady state error was 37.5% smaller than PI/Proporsional and Integral controller (as reference controller). For respon of water level variation, fuzzy logic controller was fast enough, but 55.5% slower than PI controller.

Keywords : *Fuzzy logic, error, difference of error, water level*

I. PENDAHULUAN

Sektor industri memegang peranan yang sangat penting dalam roda kehidupan. Industri-industri ini meliputi manufaktur, proses, fabrikasi dan sebagainya. Di dalam Industri proses, secara umum ada empat macam pengendalian variabel proses dasar yaitu: kecepatan aliran, ketinggian cairan, tekanan dan temperatur. Seluruh variabel proses ini dapat ditemukan di hampir semua industri proses. Untuk itu sangat dibutuhkan metode kendali yang baik untuk dapat menunjang proses berjalannya industri tersebut dan untuk meningkatkan efektifitas dan efisiensi dalam proses produksi. Karena itu dalam makalah ini dipaparkan suatu eksperimen teknik kendali yang diharapkan dapat memberikan kontribusi dalam dunia industri.

Dalam makalah ini akan dipaparkan tentang eksperimen pengendalian ketinggian air dengan metode kendali logika fuzzy. Logika fuzzy merupakan salah satu bentuk soft computing yaitu sistem komputasi yang lebih mendasarkan pada kemampuan melakukan pemetaan vektor (tidak linear), optimasi, identifikasi dan kemampuan lainnya. Berbagai penerapan telah menunjukkan bahwa pengendali berbasis logika fuzzy dapat mengatasi sifat ketidakpastian yang selalu muncul pada sistem kendali. Ketidakpastian utama yang ditemukan dalam sistem ini adalah ketidaklinearan elemen-elemen sistem kendali. Ketidaklinearan ini berupa gesekan pada komponen-komponen sistem, dead zone dan saturasi yang terdapat pada aktuator yang digunakan, mekanisme gerak sistem, proses pemasangan alat dan lain-lain.

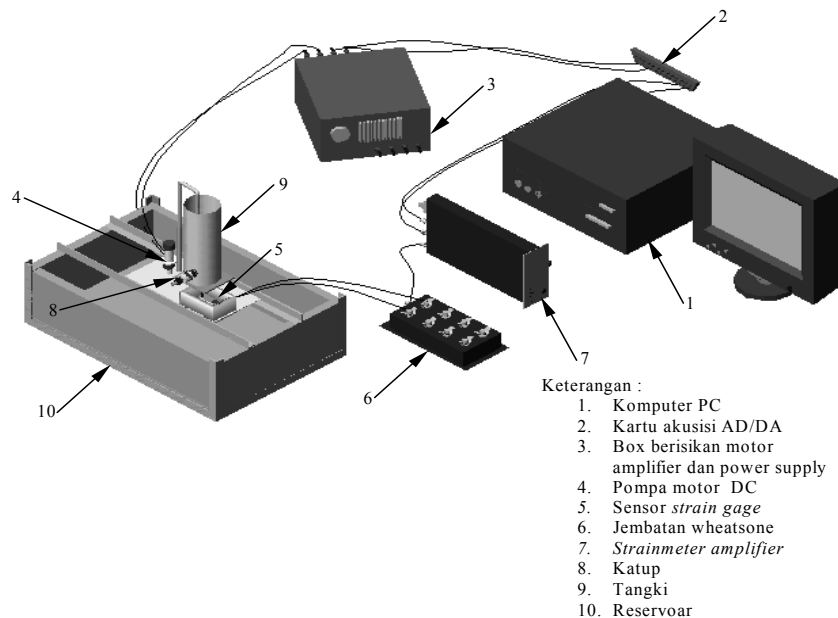
Dalam penerapannya pengendali logika fuzzy memanfaatkan pengalaman seorang pakar yang oleh perancang pengendali diekstrak ke dalam bentuk aturan-aturan jika-maka (if-then). Oleh karena itu, proses pengendalian akan mengikuti pendekatan secara linguistik. Pendekatan secara linguistik berupa interpretasi manusia (operator atau ahli) tentang tingkat keadaan suatu sistem, yang merupakan informasi penting dalam menggambarkan perilaku sistem dan jauh lebih mudah untuk diperoleh. Pengendali logika fuzzy tidak memiliki ketergantungan pada variabel-variabel proses kendali sehingga pengendali ini banyak digunakan pada sistem yang memiliki sifat tidak linear dan perilaku dinamik yang berubah terhadap waktu. Namun dasar-dasar pengetahuan tentang sistem yang akan dikendalikan akan sangat membantu dalam memperoleh prestasi pengendalian yang memadai.

Sistem tangki air yang digunakan dalam penelitian ini dibuat untuk menguji kemampuan pengendali logika fuzzy sebagai kendali cerdas dalam penelitian ini untuk membuat ketinggian air mengikuti tinggi air referensi secepat mungkin dan menstabilkannya pada ketinggian tertentu di bawah variasi lingkungan. Sebagai pembanding unjuk kerjanya, digunakan pengendali konvensional Proporsional dan Integral (PI).

II. PERANGKAT PENGUJIAN SISTEM

Model pengendalian tinggi air tangki terdiri dari sistem tangki air, sensor strain gage, penguat sensor, rangkaian penggerak motor pompa dan komputer PC yang berisi program akuisisi data dan program kendali. Skema perangkat pengujian ini bisa dilihat pada Gambar 1. Sistem tangki air terdiri dari satu reservoir dan satu tangki air. Sistem atur dalam penelitian ini adalah tangki air. Model tangki air berupa gelas ukur yang dilengkapi dengan sebuah katup dan slang. Katup yang digunakan adalah katup bola (ball valve) yang berfungsi sebagai pengatur keluarnya air dari tangki.

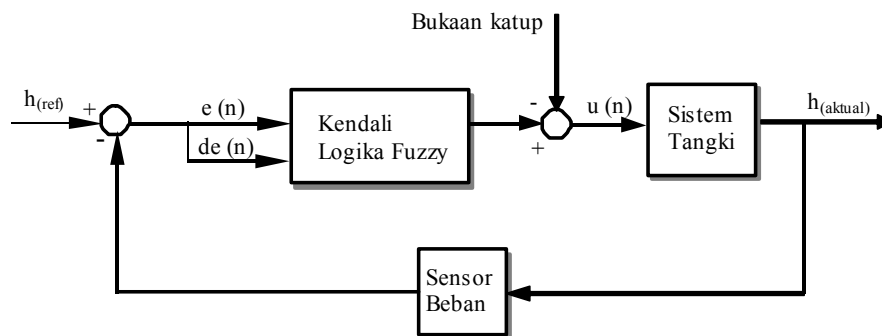
Sebagai pendeteksi ketinggian air pada pengujian ini digunakan sensor strain gage jenis foil dengan sensitivitas $2.14 \pm 1\%$ dan tahanan $120 \pm 0.5\%$. Sensor ini dipasang pada sebuah balok kantilever dengan material pelat aluminium dan diletakkan pada bagian bawah tangki agar memudahkan sensor mendeteksi perubahan tinggi air. Sinyal analog dari strain gage dikondisikan dengan menggunakan sebuah rangkaian jembatan wheatstone dan dikuatkan dengan menggunakan strainmeter amplifier jenis TML Strainmeter model DC-92D. Pengolahan data dalam format analog dan digital dilakukan oleh sebuah kartu akuisisi. Kartu akuisisi ini memiliki 16 channel masukan ADC (Analog to Digital Converter) dan 1 channel keluaran DAC (Digital to Analog Converter), masing-masing memiliki resolusi 12 bit. Kartu akuisisi data ini dipasang pada slot ISA komputer PC pentium I 100 Mhz.



Gambar 1. Perangkat pengujian.

Untuk menaikkan air dari reservoir ke tangki, digunakan sebuah aktuator berupa pompa. Pompa ini digerakkan oleh sebuah motor DC yang dikendalikan oleh algoritma pengendali. Pompa motor DC ini memiliki masukan tegangan listrik maksimum 12 volt. Tegangan listrik di atas 12 volt tidak boleh diberikan ke motor karena dapat menyebabkan kerusakan (terbakar). Namun tegangan yang diterima motor berada dalam batasan 8.5 volt yang disesuaikan dengan tegangan maksimum yang mampu diterima kartu akuisisi. Debit yang berubah-ubah akan dikeluarkan oleh pompa sesuai dengan variasi tegangan masukan ke motor pompa sebagai akibat dari aksi kendali melalui komputer. Pompa dan motor (tidak dapat dipisahkan) dilengkapi dengan sebuah rangkaian penggerak motor (driver motor). Rangkaian ini berfungsi memperkuat arus keluaran DAC sebelum masuk ke motor pompa.

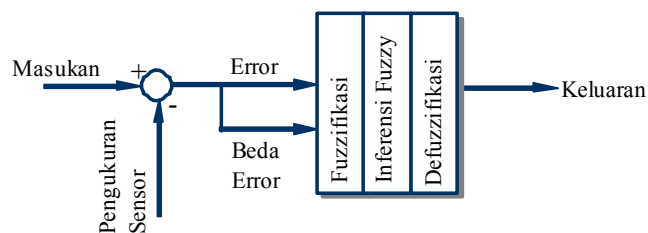
Komputer PC berisi program akuisisi data dan algoritma pengendali. Bahasa pemrograman yang digunakan adalah Turbo Basic V.1. Tegangan analog dari sensor akan dibaca oleh program kendali, kemudian dikonversikan ke dalam format digital, selanjutnya dilakukan analisis fuzzy berdasarkan tegangan yang terbaca dari sensor. Hasil analisis adalah berupa perintah pada sistem aktuator untuk menurunkan dan menaikkan tegangan listrik agar mencapai kenaikan air yang diinginkan dalam tangki. Pengendalian sistem tangki air merupakan sistem pengendalian lup tertutup [1]. Blok diagram pengendalian sistem tangki air dapat dilihat pada Gambar 2.



Gambar 2. Blok diagram sistem kendali tangki air.

III. PERANCANGAN PENGENDALI LOGIKA FUZZY

Secara umum, proses perancangan pengendali logika fuzzy dinyatakan dalam bentuk skema seperti yang diperlihatkan pada Gambar 3.



Gambar 3. Tahapan perancangan pengendali logika fuzzy.

Fuzzifikasi

Fuzzifikasi dapat didefinisikan sebagai pemetaan dari wawasan (domain) masukan terukur (masukan pengendali) menjadi himpunan fuzzy pada wawasan tertentu. Proses ini terdiri atas pengambilan harga masukan dan perhitungan tingkat fuzzynya, sesuai dengan fungsi keanggotaan (membership function) yang digunakan [2]. Pada proses ini dilakukan perubahan informasi dari himpunan tegas menjadi himpunan fuzzy.

Besaran masukan harus berada dalam jangkauan semesta dari kurva derajat keanggotaan yang akan menghasilkan nilai antara 0 dan 1. Dari diagram blok pengendalian sistem yang terdapat pada Gambar 2, terlihat variabel masukan bagi pengendali fuzzy adalah error (e) dan beda error (de) yang terbaca oleh sensor beban, sedangkan variabel keluaran adalah tegangan ke pompa tangki.

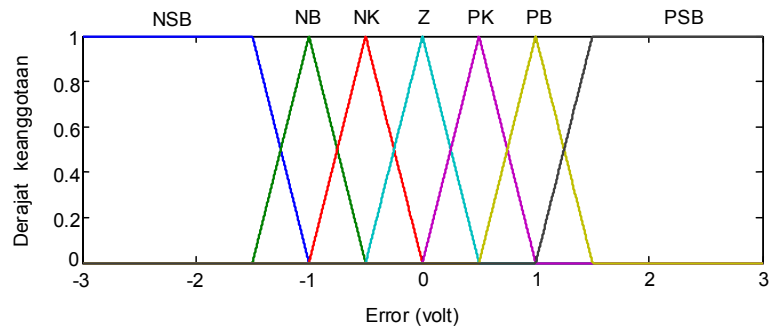
Masukan error (e)

Masukan error (e) didefinisikan sebagai selisih antara tinggi air yang diinginkan dalam bentuk sinyal referensi dengan tinggi air aktual yang terbaca oleh sensor dituliskan dalam persamaan 1 [3] :

$$e(n) = y(n) - x(n-1) \quad (1)$$

dimana : $x(n)$ adalah tinggi air referensi dan $y(n-1)$ adalah tinggi air aktual.

Harga error positif menunjukkan tinggi air aktual di bawah tinggi muka air referensi dan harga error negatif menunjukkan tinggi air aktual di atas tinggi air referensi. Variabel numerik error ini dipetakan dengan menggunakan gabungan fungsi keanggotaan trapesium dan segitiga [4], menjadi tujuh himpunan fuzzy yaitu Negatif Sangat Besar (NSB), Negatif Besar (NB), Negatif Kecil (NK), Zero (Z), Positif Kecil (PK), Positif Besar (PB), Positif Sangat Besar (PSB). Himpunan masukan error diperlihatkan pada Gambar 4.



Gambar 4. Himpunan fuzzy untuk error (e).

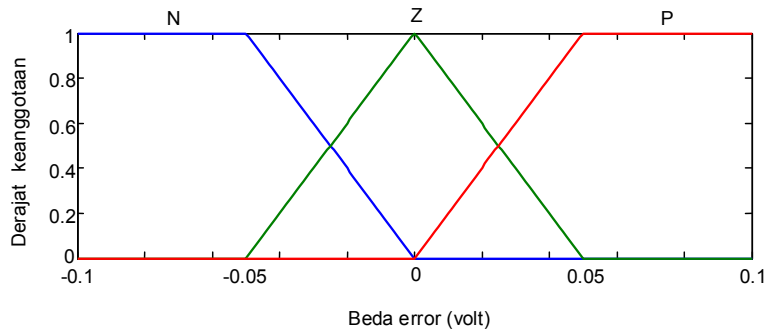
Masukan beda error (de)

Masukan beda error merupakan perubahan error terhadap waktu [3]:

$$\Delta e(n) = e(n) - e(n - 1) \tag{2}$$

dimana : $e(n)$ adalah error saat ke n dan $e(n-1)$ error saat ke $n-1$.

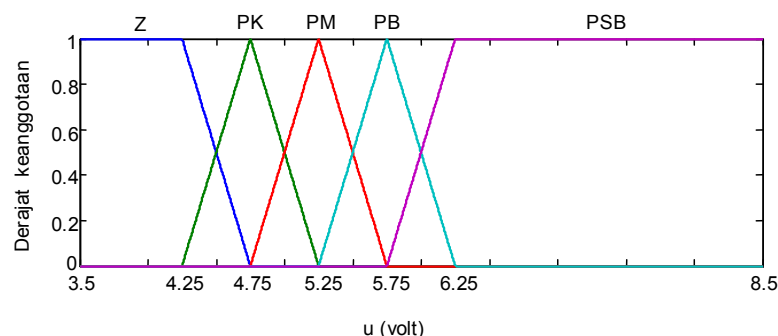
Laju perubahan error menggambarkan kecenderungan gerakan muka air. Jika beda error positif berarti error cenderung turun dan jika beda error negatif maka error menaik. Himpunan-himpunan fuzzy untuk beda error terdiri atas tiga tingkat, yaitu Negatif (N), Zero (Z), Positif (P) seperti pada Gambar 5.



Gambar 5. Himpunan fuzzy untuk beda error (de).

Keluaran pengendali (u)

Himpunan fuzzy untuk keluaran pengendali u mempunyai lima buah himpunan yaitu Zero (Z), Positif Kecil (PK), Positif Menengah (PM), Positif Besar (PB), Positif Besar (PSB). Seluruh himpunan fuzzy keluaran pengendali bernilai positif disebabkan motor pompa DC yang digunakan hanya mempunyai satu arah putaran, yaitu CW (searah jarum jam). Himpunan-himpunan fuzzy untuk keluaran ini diperlihatkan pada Gambar 6.



Gambar 6. Himpunan fuzzy untuk keluaran pengendali (u).

Rentang harga keluaran adalah sebesar 3.5 s/d 8.5 volt. Tegangan 3.5 volt merupakan kondisi motor pompa mulai mengeluarkan debit air dan 8.5 volt adalah tegangan maksimum yang dikirim ke motor pompa.

Mesin Inferensi Fuzzy

Pada tahap ini, pengambilan keputusan dilakukan berdasarkan harga-harga masukan error dan beda error yang telah difuzzifikasi untuk diolah berdasarkan logika-logika yang telah dibangun sehingga menghasilkan suatu keputusan berupa perintah atau tindakan pada aktuator agar melaksanakan pengendalian yang diinginkan. Penentuan aturan-aturan ini dibangun melalui suatu penalaran sederhana yang diekstrak dari pengetahuan perancang dalam usaha mencapai ketinggian air yang diinginkan.

Untuk memudahkan penyusunan aturan-aturan, maka digunakan matriks keputusan seperti yang terlihat pada Tabel 1. Dengan menggunakan tabel ini, keluaran pengendali dihasilkan berdasarkan aturan “jika-maka”. Tabel konsekuensi adalah matriks dengan tujuh kolom (jumlah tingkat keanggotaan error) dan tiga baris (jumlah tingkat keanggotaan beda error). Matriks keputusan diperlihatkan pada Tabel 1.

Aturan jika-maka diterapkan berdasarkan cara berikut, misalkan error adalah NB dan beda error adalah P, maka untuk kasus ini aturannya menjadi : JIKA error adalah NEGATIF BESAR dan beda error adalah POSITIF, MAKA u adalah ZERO. Berdasarkan harga error dan beda error pada tabel 1 di atas terlihat bahwa pada setiap saat diperoleh satu atau lebih aturan jika-maka. Perhitungan tegangan pengendali u dilakukan berdasarkan perpotongan (intersection) dan gabungan (union) dari himpunan-himpunan fuzzy.

Tabel 1. Matriks keputusan perancangan pengendali logika fuzzy

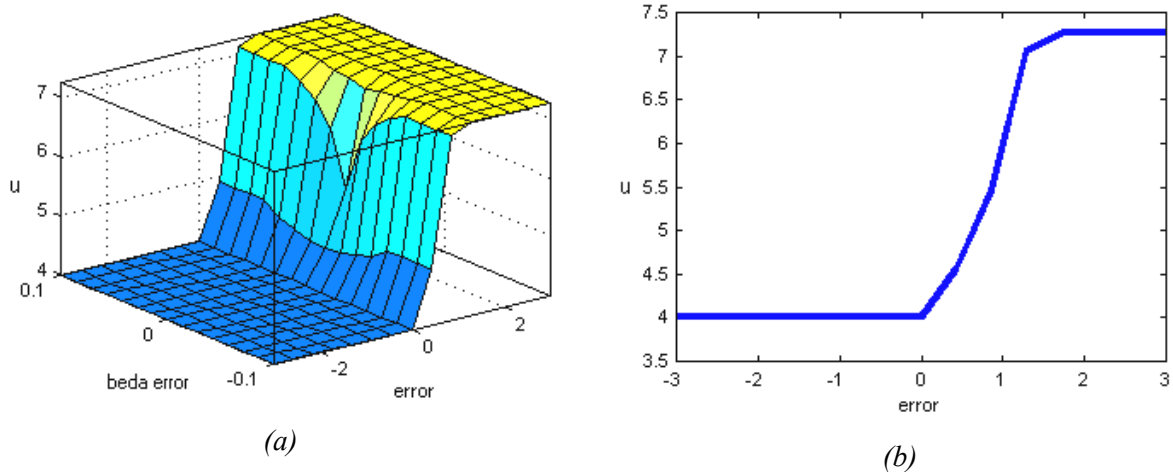
U		E						
		NSB	NB	NK	Z	PK	PB	PSB
DE	N	Z	Z	Z	Z	PM	PSB	PSB
	Z	Z	Z	Z	Z	PK	PB	PSB
	P	Z	Z	Z	Z	PM	PB	PSB

Antar Muka Defuzzifikasi

Pada penelitian ini defuzzifikasi dilakukan dengan menggunakan metode titik pusat massa dari himpunan fuzzy. Metode ini merupakan metode yang padat komputasi (computationally intensive), yang dapat menghasilkan suatu nilai keluaran tertentu berdasarkan pada keanggotaan relatif dari semua aturan yang berlaku.

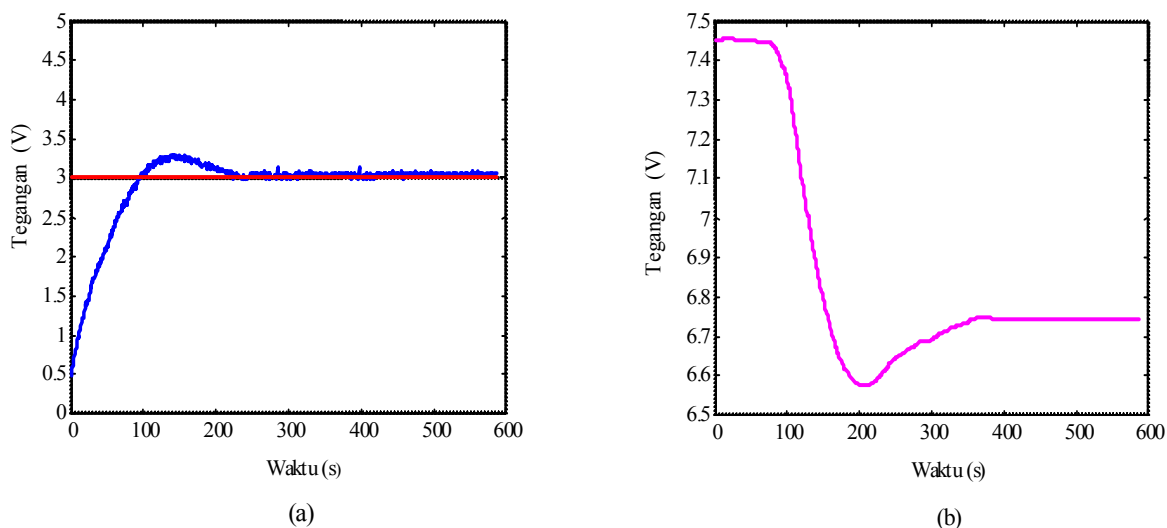
Keluaran aksi kendali logika fuzzy dapat disimulasikan dengan menggunakan Toolbox Logika Fuzzy [5] yang terdapat pada perangkat lunak Matlab. Hasil simulasi ini diperlihatkan pada Gambar 7. Pada Gambar 7(a) dapat dilihat bahwa keluaran pengendali merupakan fungsi dari harga error (e) dan beda error (de) dan pemetaannya merupakan fungsi tidak linear.

Sebagai bahan perbandingan, pada Gambar 7(b) diperlihatkan variasi keluaran pengendali terhadap perubahan harga error. Pada gambar ini, harga beda error dipertahankan konstan sebesar 0.1 volt.



Gambar 7. Simulasi Matlab. (a) Kurva tiga dimensi aksi kendali pengendali logika fuzzy (b) Bidang keluaran pengendali untuk beda error konstan.

Pada Gambar 8 terlihat bahwa untuk harga error yang sangat kecil akan diperoleh tegangan keluaran minimum dan sebaliknya untuk harga error yang sangat besar akan diperoleh tegangan keluaran maksimum.



Gambar 8. Respon pengendali fuzzy. (a) Respon kendali dengan referensi 3 volt ; (b) Aksi kendali.

IV. PENGUJIAN PRESTASI PENGENDALI

Pengujian dilakukan terhadap kedua pengendali dengan kondisi satu harga referensi dan variasi harga referensi dalam kondisi katup bukaan setengah. Sebagai sinyal referensi ketinggian air digunakan fungsi step dengan rentang tegangan dari 1 volt sampai 3.5 volt.

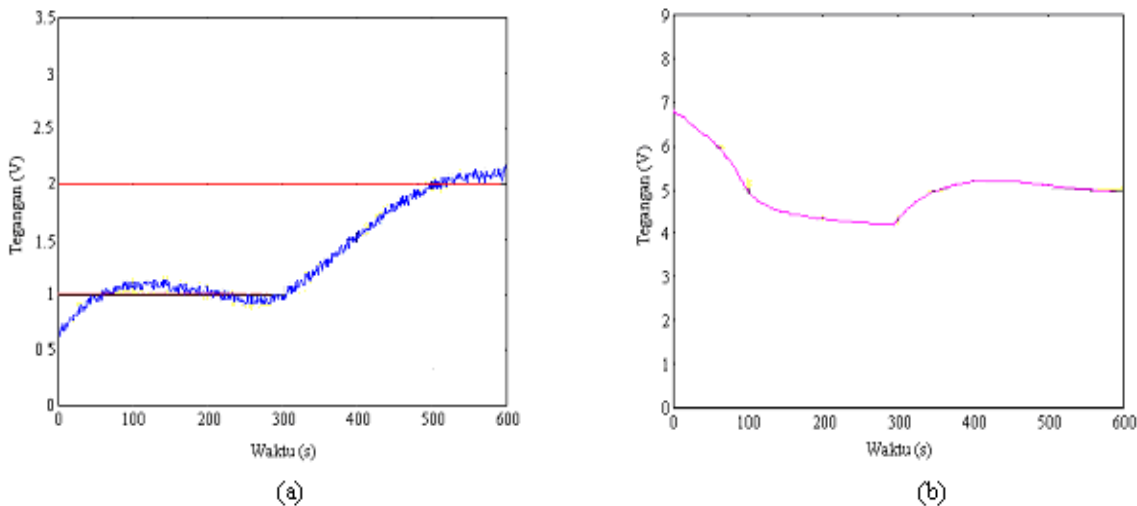
Pengendali Logika Fuzzy

Respon dan aksi kendali sistem dengan kondisi tinggi air pada tegangan referensi 3 volt, setara dengan 800 ml diperlihatkan pada Gambar 8. Pada Gambar 8(a) terlihat bahwa pada saat kondisi awal, harga error bernilai positif sangat besar. Hal ini terjadi karena pada kondisi awal, tinggi air aktual jauh dibawah tinggi referensi. Beberapa saat kemudian sistem kendali dapat berjalan dengan baik, yang ditandai oleh respon kendali yang bergerak menuju tinggi referensi.

Waktu yang dibutuhkan untuk mencapai tinggi referensi oleh pengendali logika fuzzy tercapai pada detik ke 225, dengan mengalami overshoot terlebih dahulu sebesar 0.25 volt. Setelah mencapai tinggi referensi, tinggi air dalam tangki tidak banyak berubah karena debit yang dikeluarkan pompa konstan, seperti yang ditunjukkan oleh grafik aksi kendali pada Gambar 8(a). Grafik respon yang

cenderung lurus mendekati tegangan referensi selama proses pengendalian menunjukkan bahwa pengendali logika fuzzy dapat mempertahankan tinggi air pada tinggi referensi. Hal ini berarti bahwa matriks keputusan pada Tabel 1 telah mampu menghasilkan prestasi kendali yang memadai.

Untuk melihat lebih jauh prestasi pengendali logika fuzzy, maka dilakukan variasi harga tinggi air referensi secara dinamis dari 1 volt menjadi 2 volt. Gambar 9 menunjukkan respon dan aksi kendali sistem terhadap variasi tinggi referensi. Pada Gambar 9(a) ditunjukkan tinggi referensi berubah dari 1 volt kemudian dinaikkan menjadi 2 volt. Dari grafik tersebut dapat dilihat bahwa dibutuhkan waktu ± 200 detik untuk mencapai perubahan tinggi referensi dengan kesalahan tunak sekitar 0.05 volt. Aksi kendali yang ditunjukkan oleh Gambar 9(b) terlihat lebih halus ditandai dengan tidak adanya variasi tegangan yang dikirimkan ke pompa.

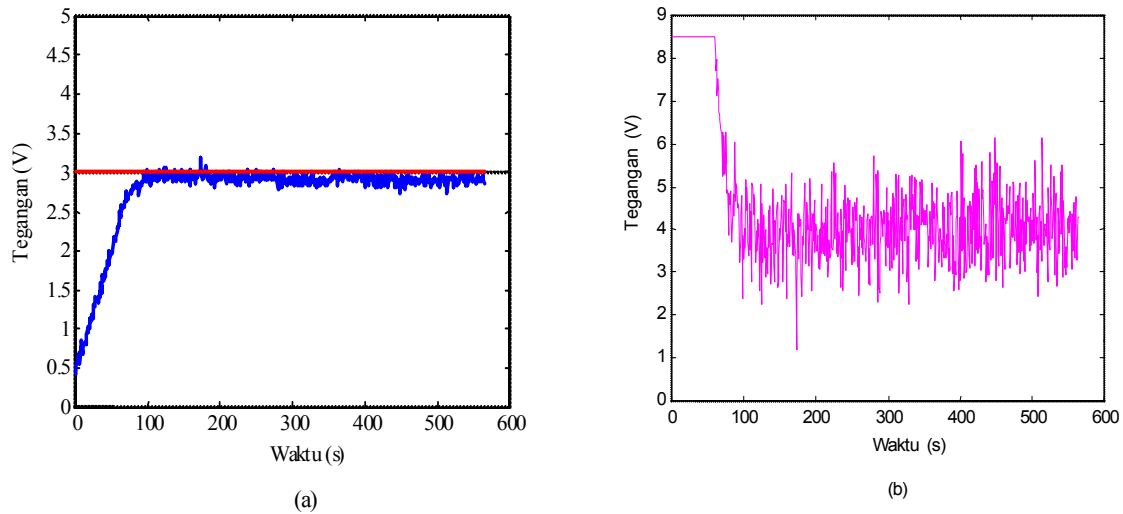


Gambar 9. Respon sistem pengendali fuzzy: (a) Respon kendali dengan variasi referensi dan (b) Aksi kendali.

Pengendali Proporsional dan Integral (PI)

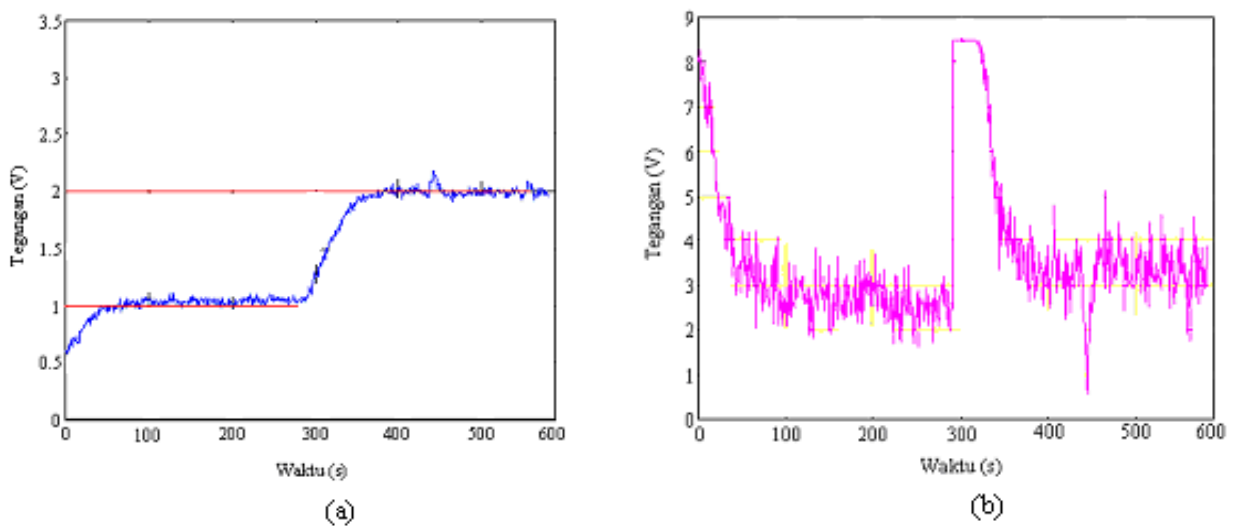
Pada pengujian ini konstanta K_p dan K_i pada pengendali PI diperoleh melalui metode coba-coba. Harga konstanta proporsional (K_p) optimal yang diperoleh sama dengan 41 dan konstanta integral (K_i) sebesar $0.5 \cdot 10^{-3}$.

Pada tinggi referensi sebesar 3 volt yang ditunjukkan pada Gambar 10(a), pengendali PI mempunyai waktu respon yang cepat lebih kurang 100 detik kemudian beresilasi disekitar tinggi referensi. Kondisi kesalahan tunak yang terjadi yaitu sebesar 0.08 volt.



Gambar 10. Respon sistem pengendali PI. (a) Respon kendali dengan referensi 3 volt ; (b) Aksi kendali.

Variasi tinggi referensi seperti yang ditunjukkan pada Gambar 11(a) dengan cukup cepat direspon oleh pengendali PI dengan waktu yang dibutuhkan ± 100 detik. Kesalahan tunak yang terjadi sebesar 0.01 volt. Osilasi yang terlihat pada respon kendali menyebabkan aksi kendali berfluktuatif selama proses pengendalian seperti yang ditunjukkan oleh 11(b).



Gambar 11. Respon sistem pengendali PI. (a) Respon kendali dengan variasi referensi; (b) Aksi kendali.

Dari pengujian prestasi kedua pengendali pada sistem tangki air menunjukkan bahwa waktu respon pengendali PI relatif lebih cepat dibandingkan pengendali logika fuzzy. Hal ini disebabkan oleh pada suatu kondisi dimana harga error dan beda error yang sama, pengendali PI akan menghasilkan

tegangan keluaran yang lebih besar dibandingkan pengendali logika fuzzy. Tegangan keluaran yang lebih besar ini memperbesar debit air yang masuk ke dalam tangki dan mempercepat tercapainya tinggi air referensi. Konsekuensinya adalah aksi kendali keluaran pengendali PI terlihat sangat tidak stabil. Pada kondisi setelah mencapai tinggi referensi pengendali PI mengirim tegangan yang bervariasi ke pompa untuk mempertahankan kondisi kestabilan. Namun akibat variasi tegangan keluaran ini menyebabkan timbulnya osilasi pada sistem.

Kemampuan pengendali logika fuzzy dalam meredam osilasi yang terjadi lebih bagus dibandingkan pengendali PI. Hal ini ditandai dengan lebar pita (bandwidth) respon kendali dan kesalahan tunak yang terjadi kecil. Aksi kendali keluaran pengendali logika fuzzy lebih halus (smooth) dibanding pengendali PI. Sinyal aksi kendali pengendali logika fuzzy yang lebih halus tentunya akan lebih ‘menyehatkan’ pompa dibandingkan aksi kendali pengendali PI. Kondisi menyehatkan disini bisa diartikan sebagai kondisi dimana pompa beroperasi pada kondisi yang baik. Respon kendali yang ditunjukkan oleh kedua pengendali dipengaruhi oleh derau yang dibawa oleh sinyal hasil pengukuran sensor.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil-hasil yang telah diperoleh, maka dapat ditarik kesimpulan yaitu pengendali logika fuzzy merupakan pengendali yang relatif mudah dalam perancangannya, karena tidak dibutuhkan model matematik eksak dari sistem. Dengan pendekatan berbasis aturan-aturan dan logika sederhana, pengendali dirancang dan dibangun. Penalaan logika fuzzy dilakukan secara trial and error untuk mendapatkan respon yang diinginkan.

Pengendali logika fuzzy mampu mengendalikan tinggi air dalam tangki dan merespon perubahan variasi tinggi air yang berubah secara dinamik. Pengendali ini mampu mengurangi derau yang terbawa oleh sinyal hasil pengukuran sensor, mengakibatkan aksi kendali yang dihasilkan tidak bervariasi seperti pengendali PI. Hasilnya, aktuator bekerja pada kondisi yang baik.

UCAPAN TERIMA KASIH

Secara khusus penulis mengucapkan terima kasih pada Lovely Son atas bimbingan dan dukungan yang telah diberikan, hingga terselesaikannya penelitian ini. Bapak Masno Ginting atas masukannya dalam perbaikan dan penyempurnaan penulisan makalah ini.

DAFTAR PUSTAKA

1. Raven, F., "*Automatic Control Engineering*". Singapore, McGraw-Hill International Inc., 1995
2. Jang, J.-S. R, Sun, C.-T., Mizutani, E., "*Neuro-Fuzzy and Soft Computing*". New Jersey, Prentice-Hall International Inc., 1997
3. Son, Lovely, "Pengendalian Mekanisme Gerakan Lurus Presisi dengan Menggunakan Teknik Kendali Kompensasi Gesekan dan Logika Fuzzy". Tesis Magister, Jurusan Teknik Mesin, ITB, 2001.
4. Lin, Lih-Chang & Chen,Chiang-Chuan., "*Rigid Model-based Fuzzy Control of Flexible-Joint Manipulators*". Journal of Intelligent and Robotic Systems, 1995.
5. Jang, J.-S. R & Gulley, Ned., "*MATLAB Fuzzy Logic Toolbox User's Guide*"., The Mathwork Inc., 1997.