

Rancang Bangun Pengendali Suhu Tipe PD dan PI Berbasis Logika Fuzzy Memakai Mikrokontroler Atmega 8535 Beserta Perbandingan Kinerja Hasil Eksperimen

Estiko Rijanto dan Teguh Tri Lusijarto
Pusat Penelitian TELIMEK – LIPI
Kompleks LIPI Gedung 20, Jl. Cisit No.21/154D, Bandung 40135,
Tel: 022-250-3055; Fax: 022-250-4773,
Email: estiko@hotmail.com

ABSTRACT

In this research a temperature controller should be designed and built to calculate proper analog signal delivered to an electrical element in order to increase the temperature as well as to determine binary signals to open or close both heating electronic valve and cooling electronic valve. In this research a dedicated temperature controller has been built to be suitable to the object plant using an 8 bit microcontroller Atmega 8535 as the platform. This paper presents design and experimental results of 2 type temperature controllers. One type is called direct PD (proportional differential) fuzzy controller which incorporates error signal and its differential value. The other type is called direct PI (proportional integral) fuzzy controller which incorporates error signal and its integral value. Fuzzy logic has been used to determine control output signals sent to the electrical element and electronic valves. All micro-computer code has been edited using assembler languages. The best rule base which is considered as representing well the human knowledge and experience has been obtained through 3 times experiments. Experiment results show that the direct PI fuzzy controller demonstrates better performance than the direct PD fuzzy controller.

Keywords: PD fuzzy, PI fuzzy, fuzzy logic, microcontroller, Atmega 8535.

ABSTRAK

Pengendali suhu reaktor pada penelitian ini harus dapat mengatur sinyal keluaran analog yang dikirim ke elemen pemanas untuk menaikkan suhu dan dapat mengatur sinyal keluaran biner yang dikirim untuk mengatur buka tutup katup aliran cairan pemanas dan katup aliran cairan pendingin. Pada penelitian ini telah dirancang bangun pengendali suhu yang bersifat dedicated pada plant yang dikendalikan. Mikrokontroler 8 bit Atmega 8535 dipilih sebagai peranti keras. Pada makalah ini disajikan proses rancang bangun 2 tipe pengendali suhu dan perbandingan kinerja hasil eksperimen. Pengendali tipe fuzzy PD (Proportional Differential) menggunakan sinyal error antara nilai suhu referensi dengan nilai suhu pengukuran keluaran plant dan nilai diferensial sinyal error tersebut. Pengendali tipe fuzzy PI (Proportional Integral) menggunakan sinyal error dan nilai integral sinyal error tersebut. Logika fuzzy digunakan untuk menentukan sinyal keluaran pengendali yang dikirim ke katup-katup dan ke elemen pemanas. Semua program untuk algoritma telah ditulis menggunakan bahasa assembler. Melalui eksperimen 3 kali diperoleh rule base yang dianggap terbaik untuk pengendali tipe fuzzy PD dan pengendali tipe fuzzy PI. Hasil eksperimen menggunakan rule base hasil pengalaman manusia tersebut menunjukkan bahwa pengendali tipe fuzzy PI memberikan kinerja tunak yang lebih baik dari pada pengendali tipe fuzzy PD.

Kata kunci: Tipe PD, tipe PI, logika fuzzy, mikrokontroler, Atmega 8535.

PENDAHULUAN

Pengendali suhu reaktor bersifat *dedicated* karena struktur sistem kendali perlu dioptimalkan sesuai dengan sistem yang dikendalikan. Pada penelitian ini suhu dikendalikan dengan cara mengatur suhu cairan pemanas dan mengatur buka tutup katup cairan pemanas dan katup cairan pendingin. Oleh karena itu pada penelitian ini diperlukan sebuah alat pengendali yang dapat bekerja mengeluarkan sinyal analog ke elemen pemanas dan sinyal biner ke katup pemanas dan pendingin untuk mengatur suhu. Mikrokontroler Atmega 8535 dengan kemampuan 8 bit telah dipilih sebagai peranti kerasnya (Atmel, 2007), (Atmel, 1997), (Wardhana, 2006). Pada penelitian ini pertama telah dirancang bangun sebuah pengendali suhu

berbasis logika fuzzy menggunakan sinyal masukan berupa sinyal error (Error) antara nilai suhu referensi yang diinginkan dengan nilai suhu nyata hasil pengukuran dan nilai diferensial sinyal error tersebut (D_error) (Reznik, 1997). Pengendali tipe ini pada makalah ini disebut pengendali tipe fuzzy PD. Rule base yang dianggap terbaik telah diperoleh setelah melalui 3 kali eksperimen dimana pengalaman manusia digunakan untuk menentukan rule base terbaik yang mungkin.

Untuk memperoleh kinerja kendali yang lebih baik, pada penelitian ini kemudian telah dirancang bangun sebuah pengendali suhu berbasis logika fuzzy menggunakan sinyal masukan berupa sinyal error

(Error) dan nilai integral sinyal error tersebut (I_Error), yang pada makalah ini disebut pengendali tipe fuzzy PI (Rijanto et.al, 2006).

Makalah ini menyajikan materi dengan sistematika sebagai berikut. Untuk memberikan pemahaman tentang sifat plant, pada bagian pertama disajikan tentang deskripsi plant yang dikendalikan. Kemudian disajikan tentang perancangan peranti keras. Pada bagian perancangan peranti lunak disajikan materi tentang: aplikasi logika fuzzy pada mikrokontroler, proses fuzifikasi, proses evaluasi aturan (*rule evaluation*), dan proses defuzifikasi. Pada bagian hasil eksperimen disajikan materi tentang: hasil eksperimen menggunakan pengendali suhu tipe fuzzy PD dan tipe fuzzy PI yang telah dirancang bangun untuk mengendalikan suhu dengan nilai suhu referensi 30 °C dan 40 °C. Terakhir disajikan kesimpulan hasil eksperimen.

DESKRIPSI PLANT

Gambar 1 menunjukkan ilustrasi plant objek kendali pada penelitian ini.

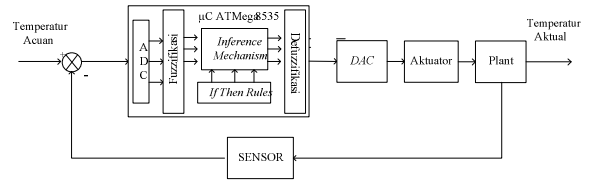


Gambar 1. Ilustrasi plant objek kendali.

Objek kendali tersusun oleh 3 tangki air, 1 cangkir gelas, 2 katup elektronik, 1 elemen pemanas, 1 pompa air, jaringan selang, 1 sensor suhu dan instrumen pengendali suhu. Cangkir gelas yang berisi air ditaruh didalam tangki 1 dan suhu air di dalam cangkir diukur oleh sensor suhu. Ke dalam tangki 1 bisa dialirkan air pendingin dengan membuka katup pendingin dan bisa juga dialirkan air pemanas dengan membuka katup pemanas. Air pendingin dicatu dari keran air tanah, sedangkan air pemanas dicatu dari tangki 2 (tangki pemanas) dengan memanfaatkan energi potensial ketinggian tangki 2. Di dalam tangki 2 dipasang elemen pemanas untuk memanaskan air yang dialirkan oleh pompa dari tangki 3. Tujuan alat eksperimen ini adalah untuk mengatur suhu air di dalam cangkir sesuai dengan suhu referensi. Instrumen pengendali suhu membaca sinyal sensor suhu dan mengatur daya listrik yang dialirkan ke elemen pemanas dan mengatur buka tutup katup pemanas dan katup pendingin.

PERANTI KERAS

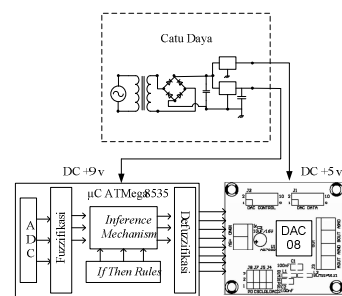
Gambar 2 menunjukkan diagram kotak pengendali suhu berbasis logika fuzzy yang dibuat.



Gambar 2. Diagram kotak kendali fuzzy

Sensor suhu yang digunakan adalah sensor thermo-couple tipe K yang dilengkapi rangkaian pengkondisi sinyal sehingga menghasilkan tegangan keluaran 0-5 [Volt] dengan konstanta konversi suhu ke tegangan 20 °C per Volt. Output ADC berupa data 8 bit dimasukkan ke mikrokontroler ATmega8535. Saat nilai suhu referensi diinputkan ke dalam pengendali, maka pengendali akan menghitung nilai Error dan D_error atau Error dan I_Error. Kedua macam input ini akan menjadi masukan bagi pengendali fuzzy yang berupa perangkat lunak.

Gambar 3 menunjukkan struktur peranti keras yang digunakan. Sinyal masukan dari rangkaian pengkondisi sinyal thermo-couple disambung ke Port A pin 1 PA_1(thermo couple +) dan Port A pin Gnd PA_Gnd (thermo-couple ground). DAC control pada modul DAC08 disambung ke Port B dan DAC data disambung ke Port C. Sinyal analog keluaran dari pengendali suhu dikeluarkan ke rangkaian elektronika daya penggerak elemen pemanas lewat pin AOUT (elemen pemanas +) dan pin AGND (elemen pemanas -) pada modul DAC08. Sinyal biner keluaran pengendali suhu dikeluarkan ke rangkaian elektronika daya penggerak katup pemanas lewat Port C pin 0 PC_0 dan ke rangkaian elektronika daya penggerak katup pendingin lewat Port C pin 1 PC_1, sedangkan ground untuk ke dua katup tersebut diambil dari PC_Gnd.



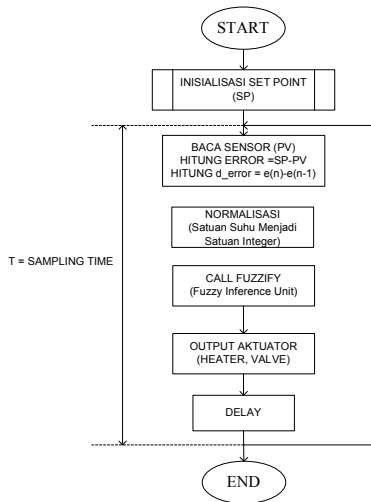
Gambar 3. Diagram kotak peranti keras

Konversi analog ke digital yang digunakan adalah fitur ADC yang tersedia dalam mikrokontroler. Karena yang digunakan adalah mikrokontroler ATmega8535 - 8 bit maka yang tersedia merupakan ADC 8 bit. Rentang data hasil konversi yang dapat dihasilkan ADC adalah dari 0 sampai 255 (bit = 2⁸ = 256). Tegangan referensi yang digunakan adalah 5 Volt maka resolusi pengukuran suhu adalah 0,0196

Volt. Sedangkan untuk konversi data bit digital dari mikrokontroler menjadi analog untuk tegangan ke elemen pemanas digunakan DAC-08 dari pabrikan *Inovative Electronic*. DAC-08 adalah *Digital to Analog Converter* berbasis AD7302 yang dapat mengeluarkan sinyal 0 sampai 5 Volt dengan kemampuan 8 bit.

PERANTI LUNAK

Secara singkat diagram alir program yang diimplementasikan ke dalam mikrokontroler ditunjukkan pada gambar di bawah ini.



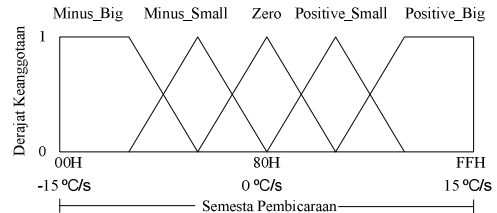
Gambar 4. Diagram alir program utama

Dalam diagram alir ini terdapat proses normalisasi dan *Fuzzy Inference Unit* (FIU) yang terdiri dari: fuzifikasi, evaluasi aturan (*if then rule*), dan defuzifikasi. Proses perancangan pengendali menggunakan logika fuzzy telah dilakukan dengan prosedur sebagai berikut.

1. *Crisp input*. Pada penelitian ini digunakan dua kelompok *crisp input* yaitu: (1) Error dan turunan errornya (*D_error*), serta (2) Error dan penjumlahan errornya (*I_error*).
2. Daerah kerja. Daerah kerja untuk percobaan pada mikrokontroler adalah suhu 15°C s/d 50°C. Sedangkan suhu referensi adalah 30°C dan 40°C. Sinyal error memiliki daerah kerja -15°C s/d 15°C. Dibuat daerah kerja error dengan rentang tidak terlalu lebar untuk meningkatkan

akurasi. Daerah kerja *D_error* adalah dari -10°C s/d 10°C per *sampling time*. Sedangkan daerah kerja untuk *I_Error* adalah dari 0°C s/d 100°C.

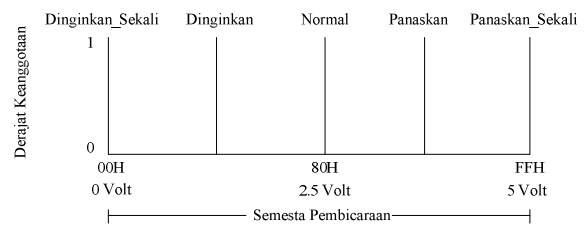
3. Input *Membership Function (MF)*. Input MF untuk sinyal Error memiliki jumlah label lima buah yaitu label Minus Big (NB), Minus Small (NS), Zero (Z), Positive Small (PS), dan Positive Big (PB). Bentuk membership function yang digunakan yaitu trapesium dan segitiga seperti pada gambar 5.



Gambar 5. Input MF Error

Untuk *crisp input D_Error* dan *I_Error*, membership function yang digunakan sama dengan MF *crisp input Error* dengan semesta pembicaraan sesuai dengan daerah kerja masing-masing.

4. Output Tegangan. *Crisp output* berjumlah 1 buah dengan nama "Tegangan". Output *membership function* memiliki jangkauan 0 s/d 5 Volt yang dibagi menjadi 5 bagian yang sama besar. Untuk *crisp output*, MF yang digunakan berbentuk *singleton* untuk memudahkan dalam perhitungan COG (*Center Of Gravity*) seperti pada gambar 6.



Gambar 6. MF output tegangan

5. Aturan *Fuzzy (Rule Base)*. Proses pembuatan *rules* dilakukan dengan menerapkan kemampuan/pengalaman manusia dalam mengendalikan suatu sistem.

Tabel 1. Tabel rule base untuk *plant* objek kendali

" Keluaran pengendali suhu " u [Volt]		Error e(t) [°C]				
		MB	MS	Z	PS	PB
D_Error [°C] dan I_Error [°C]	MB	MB	MB	MS	MS	Z
	MS	MB	MB	Z	Z	PS
	Z	MB	MB	Z	PS	PB
	PS	MS	MS	Z	PB	PB
	PB	Z	MS	PS	PB	PB

Dari hasil pengalaman melalui eksperimen 3 kali diperoleh rule base yang terbaik untuk plant objek kendali pada penelitian ini seperti ditunjukkan pada tabel 1. Contoh aturan yang digunakan dalam bentuk logika sebagai berikut.
IF error $e(n)$ is *Positive Big* (PB) *AND* *D_error* $De(n)$ is *Zero* (Z) *THEN* Output $u(n)$ is *Positive_Big* (PB).

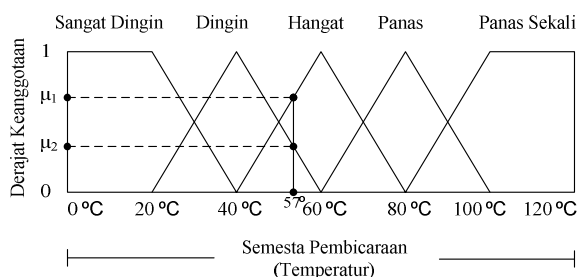
6. *Fuzzy Inference Unit* (FIU)

Unit ini adalah inti dari proses pengendalian berbasis logika fuzzy. Dalam penelitian ini FIU terdiri dari proses: fuzifikasi, evaluasi aturan, dan defuzifikasi. Namun demikian, sebelum melakukan program FIU, perlu dilakukan proses normalisasi yang mengubah besaran fisik di luar mikrokontroler menjadi satuan bilangan bulat 8 bit di dalam mikrokontroler.

Di bawah ini dijelaskan proses fuzifikasi, evaluasi aturan dan defuzifikasi.

Proses fuzifikasi adalah proses merubah crisp input menjadi fuzzy input dalam bentuk derajat keanggotaan μ untuk label fungsi keanggotaan tertentu. Setiap label pada fungsi keanggotaan berbentuk trapesium diwujudkan dalam 4 byte. Strukturnya adalah: byte ke-1 mewakili point 1 di sepanjang semesta pembicaraan (*universe of discourse*) yang memberikan derajat keanggotaan (*degree of membership*) minimum ($\mu = 0=00h$), byte ke-2 mewakili *slope* (kemiringan) 1 garis lurus dari point 1 ke derajat keanggotaan maksimum ($\mu = 1=FFh$), byte ke-3 mewakili point 2 di sepanjang semesta pembicaraan yang memberikan derajat keanggotaan maksimum ($\mu = 1=FFh$), sedangkan byte ke-4 mewakili *slope* 2 garis lurus dari point 2 ke derajat keanggotaan minimum ($\mu = 0=00h$).

Misalkan crisp input memiliki suhu sebesar 57°C (pada mikrokontroler dinyatakan sebagai point x_i) seperti yang ditunjukkan gambar 7.



Gambar 7. Proses perubahan crisp input menjadi fuzzy input

Maka akan didapatkan 2 fuzzy input yang masing-masing adalah: dingin (μ_2) dan hangat (μ_1). Nilai derajat keanggotaannya dapat dicari dengan rumus persamaan garis seperti di bawah ini.

$$\mu_1 = (\text{crisp input} - \text{point1}) * \text{Slope 1} \quad (1)$$

$$\mu_2 = FFh - ((\text{crisp input} - \text{point2}) * \text{Slope 2}) \quad (2)$$

Evaluasi aturan (*rule evaluation*) adalah proses merubah kondisi (*antecedent*) (dalam bentuk fuzzy input) menjadi konsekuensi (*consequence*) (dalam bentuk fuzzy output). Setiap kondisi menunjukkan masing-masing fuzzy input yang didapat dari proses fuzifikasi. Berdasarkan disain software, operator Zadeh yang digunakan pada penelitian ini adalah operator AND dan OR. Operator AND digunakan untuk menentukan fuzzy input terkecil antara kondisi 1 dan kondisi 2 (atau diistilahkan logika minimum). Jika ada konsekuensi yang sama maka digunakan operator OR (logika maksimum). Hasil dari evaluasi aturan adalah fuzzy output.

Pada penelitian ini fuzzy input menunjukkan kondisi dengan look up table di mulai pada alamat Fuz_Ins yang akan mengganti nilai kondisinya. Nilai minimum pada fuzzy input untuk tiap rule ditentukan dengan logika operator AND (operator Zadeh). Tiap kondisi dibaca sampai pada X pointer yang menunjukkan ke konsekuensi, ditandai dengan MSB bernilai 1. Tiap nilai minimum akan disimpan untuk setiap rule pada alamat yang dimulai Fuz_Out yang akan mengganti nilai konsekuensi. Jika ada dua nilai yang akan dituliskan pada lokasi (alamat) konsekuensi yang sama, maka dibandingkan dan nilai terbesar yang akan disimpan. Nilai konsekuensi ini merupakan fuzzy output.

Pada aplikasi pada mikrokontroler, aturan ini berada di memori dimulai pada alamat Rule_Start dan terdiri dari kondisi (bagian IF) dan konsekuensi (bagian Then). Bagian IF (kondisi) didefinisikan sebagai 000X XAAA. Dimana MSB (*Most Significant Bit*) = 0, XX disimbolkan 1 input dari 4 crisp input (Error, D_error, dll.), AAA diartikan 1 label dari 8 label trapesium. Semua kondisi diikuti secara berurut kemudian diikuti konsekuensi. Struktur untuk konsekuensi adalah 1000 XAAA, dimana MSB = 1, X ditandai 1 output dari 2 crisp output, AAA ditandai 1 label dari 8 label singleton.

Proses defuzifikasi adalah proses merubah fuzzy output menjadi nilai crisp output. Prosesnya adalah sebagai berikut: suatu nilai fuzzy output yang berasal dari evaluasi aturan diambil kemudian dimasukkan ke dalam suatu membership function output. Bentuk bangun yang digunakan dalam membership function output adalah bentuk singleton yaitu garis lurus vertikal ke atas, seperti yang ditunjukkan pada gambar 6. Nilai-nilai tersebut dimasukkan ke dalam suatu rumus yang dinamakan COG (*Center Of Gravity*) untuk mendapatkan hasil akhir yang disebut crisp output. Crisp output adalah suatu nilai analog yang dikirim ke rangkaian penggerak elemen pemanas.

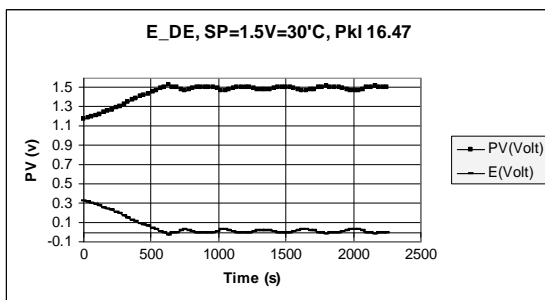
Hasil COG (*crisp output*) ini harus dalam 8 bit. Pada penelitian ini seperti ditunjukkan pada persamaan (3) jumlah perkalian pada numerator adalah 19 bit maksimum dan jumlah denumerator adalah 11 bit maksimum, sehingga harus dipisah-pisah untuk mendapatkan nilai 8 bit.

$$COG = \frac{\sum (Fuzzy\ output) X (Sgltn_pos)}{\sum (Fuzzy\ output)} \quad (3)$$

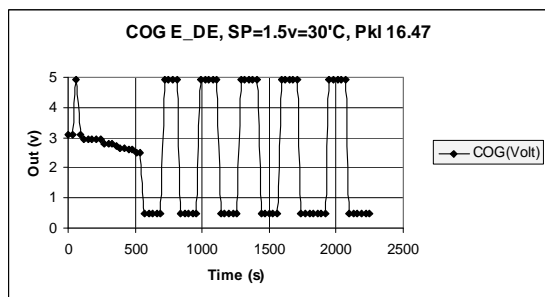
$$= \frac{\max\ 19\ bit}{\max\ 11\ bit}$$

HASIL EKSPERIMEN

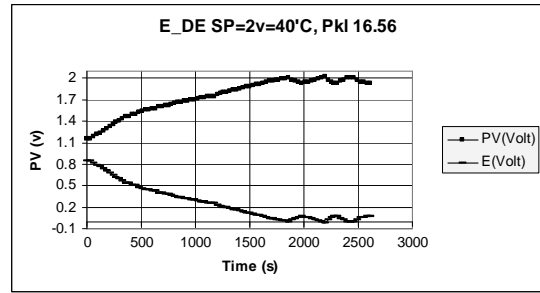
Hasil eksperimen menggunakan pengendali suhu fuzzy PD yang telah dirancang bangun ditunjukkan pada gambar 8 dan 9. Gambar 8 adalah hasil eksperimen untuk nilai referensi suhu 30°C (1.5 Volt), sedangkan gambar 9 adalah hasil eksperimen untuk nilai referensi suhu 40°C (2 Volt).



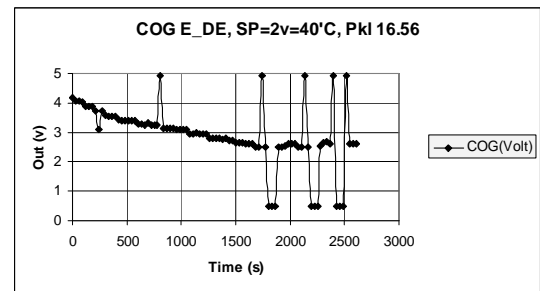
Gambar 8 (a). Hasil eksperimen menggunakan pengendali tipe PD dengan untuk SP=30°C [garis tebal = PV; garis tipis = Error]



Gambar 8(b). Sinyal keluaran pengendali COG menggunakan pengendali tipe PD untuk SP=30°C



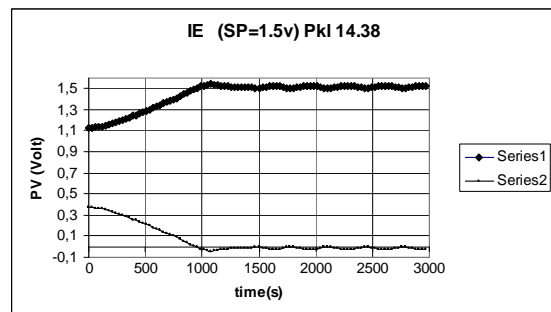
Gambar 9(a) Hasil eksperimen menggunakan pengendali tipe PD untuk SP=40°C [garis tebal = PV; garis tipis = Error]



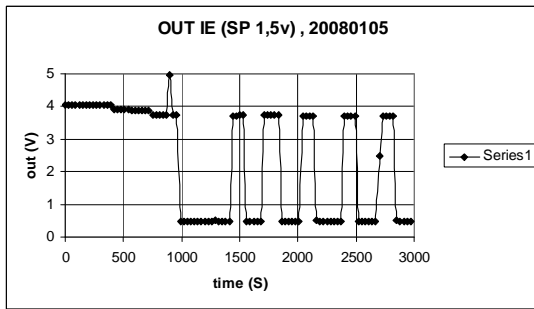
Gambar 9.(b). Sinyal keluaran pengendali COG menggunakan pengendali tipe PD untuk SP=40°C.

Sumbu horisontal menunjukkan waktu dalam satuan detik. Pada gambar 8(a), sumbu vertikal menunjukkan suhu aktual hasil pengukuran keluaran objek kendali PV dalam °C dan pada gambar 8(b) sumbu vertikal menunjukkan kombinasi nilai sinyal analog keluaran COG dan biner keluaran dari pengendali suhu.

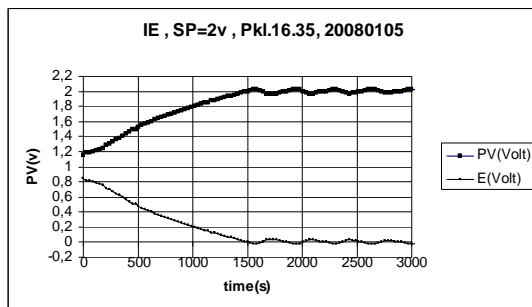
Hasil eksperimen menggunakan pengendali suhu tipe fuzzy PI ditunjukkan pada gambar 10 dan 11. Gambar 10 menunjukkan hasil eksperimen untuk nilai referensi suhu 30°C (1.5 Volt) sedangkan gambar 11 menunjukkan hasil eksperimen untuk nilai referensi suhu 40°C (2 Volt).



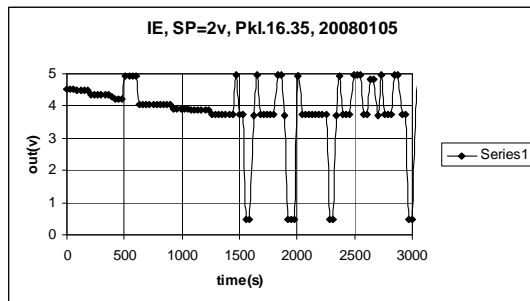
Gambar 10. (a). Hasil eksperimen menggunakan pengendali tipe PI dengan referensi suhu (SP) 30°C [garis tebal = PV; garis tipis = Error]



Gambar 10.(b). Sinyal keluaran pengendali COG hasil eksperimen menggunakan pengendali tipe PI dengan SP 30°C



Gambar 11.(a). Respon kendali (PV) hasil eksperimen menggunakan pengendali tipe PI dengan referensi suhu (SP) 40°C [garis tebal = PV; garis tipis = Error]



Gambar 11.(b). Sinyal keluaran pengendali COG hasil eksperimen menggunakan pengendali tipe PI dengan SP 40°C

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil eksperimen dan analisa yang telah dilakukan dalam penelitian ini maka dapat diambil beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Terbukti instrumen pengendali suhu yang dirancang bangun berbasis logika fuzzy telah berhasil mengendalikan suhu alat eksperimen.
2. Pengendali suhu tipe fuzzy PD memberikan kinerja sbb: (a) untuk suhu referensi 30°C: *Delay Time* (t_d)=5 [menit], *Rise Time* (t_r)=10[menit], *Peak Time* (t_p)=10.5 [menit], *Maximum Overshoot* (M_p)=0.03, *Settling Time*=14 [menit]; (b) untuk suhu referensi 40°C:*Delay Time* (t_d)=15 [menit], *Rise Time* (t_r)=31[menit], *Peak Time* (t_p)=31 [menit],

Maximum Overshoot (M_p)=0.01, *Settling Time*=36 [menit].

3. Pengendali suhu tipe fuzzy PI memberikan kinerja: (a) untuk suhu referensi 30°C: *Delay Time* (t_d)=7.5 [menit], *Rise Time* (t_r)=16[menit], *Peak Time* (t_p)=18 [menit], *Maximum Overshoot* (M_p)=0.05, *Settling Time*=25.5 [menit]; (b) untuk suhu referensi 40°C: *Delay Time* (t_d)=11.5 [menit], *Rise Time* (t_r)=25[menit], *Peak Time* (t_p)=26.5 [menit], *Maximum Overshoot* (M_p)=0.03, *Settling Time*=31 [menit].
4. Pengendali suhu tipe fuzzy PI memberikan kinerja keadaan tunak lebih baik dari pada tipe fuzzy PD.

UCAPAN TERIMAKASIH

Makalah ilmiah ini merupakan salah satu hasil kegiatan penelitian yang didanai oleh LIPI dalam program riset kompetitif LIPI sub-program produk, komoditi dan teknologi tahun anggaran 2007.

DAFTAR PUSTAKA

- Atmel Corporation, 2007, "ATMega8535 Datasheet", www.atmel.com
- Atmel Corporation, 1997, "AVR Tutorial," <http://www.avr-asm-tutorial.net/>
- Reznik, Leonid, 1997, "FuzzyControllers", 1st Ed., Newnes.
- Rijanto, E., Laksmono, J.A., 2006, "Intelligent Control of Temperature in Production of GMS from CPO using Fuzzy Logic", Prosiding International Oleo Palm Conference 2006, ISBN.978-979-8529-76-4, Bali, 19-23 Juni.
- Wardhana, L., 2006, "Mikrokontroler AVR Seri ATMega 8535", 1st Ed., Penerbit ANDI.