

TEKNIK KENDALI HIBRID PI FUZZY UNTUK PENGENDALIAN SUHU ZAT CAIR

Waskito Budi¹, Wahyudi², Iwan Setiawan²

Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro,
Jl. Prof. Sudharto, Tembalang, Semarang, Indonesia

Teknik kendali hibrid telah menjadi salah satu alternatif teknik kendali untuk mendapatkan respon sistem yang diinginkan, yaitu dengan cara menggabungkan dua atau lebih teknik kendali yang berbeda dimaksudkan agar hasil penggabungan (hibrid) ini menghasilkan sistem kendali yang memadukan kelebihan komponen penyusunnya dan mampu menghilangkan kekurangan komponen teknik kendali penyusunnya. Satu dari berbagai macam teknik kendali hibrid yang ada adalah kendali hibrid PI Fuzzy, beberapa penelitian dan penerapan teknik kendali mampu membuktikan kehandalan teknik kendali hibrid ini.

Tujuan dari tugas akhir ini adalah membuat sebuah kendali hibrid PI Fuzzy dan mengamati respon sistem yang dihasilkan oleh plant yang dikendalikan. Pengendalian yang dilakukan pada plant adalah pengendalian suhu air dalam sebuah tabung yang telah dilengkapi dengan elemen pemanas.

Dari pengujian yang dilakukan dapat diketahui bahwa teknik kendali hibrid PI Fuzzy ini mampu menghasilkan respon sistem seperti yang diharapkan, yaitu mampu mengurangi offset dan juga mengurangi sinyal kesalahan sampai dengan nol.

I. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Pengendali PI (Proporsional-Integral) sampai dengan saat ini keberadaannya masih sering ditemui dalam pengendalian berbagai proses dalam industri. Keberadaannya yang tak mudah tergantikan oleh pengendali yang lain dikarenakan kehandalan sistem, struktur dan desainnya yang sederhana. Meskipun demikian pengendali ini memiliki kelemahan untuk mencapai performansi pengendalian yang diinginkan khususnya pada sistem yang dinamis dan tidak linear. Permasalahan ini dapat diatasi dengan menggantikan pengendali PI dengan pengendali Fuzzy, namun Fuzzy tidak sepenuhnya mampu menghasilkan performansi yang diinginkan yaitu dikarenakan kendali Fuzzy tidak mampu menghilangkan *offset* pada keadaan tunak.

Sejalan dengan keinginan untuk meningkatkan performansi pengendalian, muncul berbagai macam teknik pengendalian, salah satunya adalah teknik kendali hibrid PI Fuzzy yaitu gabungan pengendali Fuzzy dengan pengendali PI. Pada pengendalian dengan menggunakan kendali Fuzzy, untuk memperkecil *error* dapat dilakukan dengan cara mempersempit jangkauan himpunan Fuzzy masukan untuk *error* sama dengan nol, hal ini sama artinya dengan menambahkan penguatan permukaan kendali bagian tengah, namun hal ini dapat menyebabkan permukaan kendali menjadi tidak kontinu, permukaan kendali yang tidak kontinu akan menyebabkan respon sistem berosilasi, dan tentunya hal ini bukanlah sesuatu yang diharapkan. Pada pengendali PI untuk menghilangkan *error* pada keadaan tunak digunakan aksi kendali integral, aksi kendali integral berfungsi menghasilkan respon sistem yang memiliki kesalahan pada keadaan mantap sama dengan nol.

Teknik kendali hibrid PI Fuzzy dapat digunakan untuk pengendalian berbagai macam proses di dalam industri. Salah satu proses industri yang dapat dikendalikan dengan kendali ini misalnya adalah proses pengendalian suhu zat cair. Kendali hibrid PI Fuzzy dapat diuji dengan skala proses pengendalian yang lebih kecil, misalnya dengan sebuah *plant* pengaturan suhu air. Sebuah PC (*Personal Computer*) dengan program kendali hibrid PI Fuzzy digunakan untuk pengendalian sekaligus untuk menampilkan respon dari sistem yang dikendalikan sehingga karakteristik sistem, termasuk di dalamnya adalah waktu tunda, waktu naik, waktu lonjakan, waktu penetapan, besarnya lonjakan maksimum, dan waktu pemulihan (*recovery time*) setelah pemberian gangguan dapat diamati.

1.2 Tujuan

Membuat sebuah aplikasi sistem kendali hibrid PI Fuzzy pada pengendalian suhu yang meliputi pembuatan perangkat keras dan perangkat lunak menggunakan bahasa pemrograman Delphi 6 dan *assembler*.

1.3 Pembatasan Masalah

Pembahasan dibatasi beberapa hal sebagai berikut :

1. Teknik kendali yang digunakan adalah Hibrid PI Fuzzy.
2. Objek pengaturan adalah temperatur air dalam tabung dengan kisaran suhu yang diamati adalah 20 °C sampai dengan 50 °C, dan lebar jangkauan pengaturan suhu adalah 30 °C sampai dengan 47 °C
3. Fungsi keanggotaan masukan himpunan Fuzzy yang digunakan adalah segitiga dan trapesium, sedangkan fungsi keanggotaan keluaran

1) Mahasiswa Jurusan Teknik Elektro UNDIP

2) Staf Pengajar Jurusan Teknik Elektro UNDIP

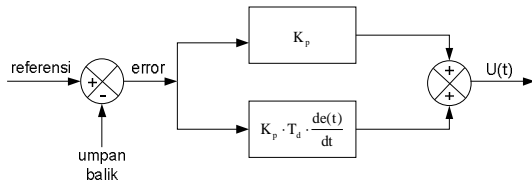
himpunan Fuzzy yang digunakan adalah singleton, metode untuk pengambilan keputusan adalah MAX-MIN, dan defuzzifikasi menggunakan rata-rata terbobot (*weighted average*).

4. Respon sistem yang diamati adalah respon sistem pada pengujian dengan nilai referensi tetap, respon sistem dengan nilai referensi naik, respon sistem dengan referensi turun, dan respon sistem dengan pemberian gangguan berupa pemberian balok es.

II. DASAR TEORI

2.1 Teknik Kendali PI (Proporsional-Integral)

Pengendali PI adalah pengendali yang memiliki dua aksi pengendalian, yaitu aksi kendali proporsional dan aksi kendali integral. Diagram blok pengendali PI diperlihatkan pada Gambar 2.1.



Gambar 2.1 Diagram blok pengendali PI.

Aksi kendali proporsional menyebabkan keluaran yang sebanding atau proporsional dengan besarnya sinyal kesalahan (selisih antara besaran yang diinginkan dengan harga aktualnya). Ciri-ciri aksi kendali proporsional yang perlu diperhatikan adalah :

1. Jika nilai K_p kecil, pengendali proporsional hanya mampu melakukan koreksi kesalahan yang kecil, sehingga respon sistem menjadi lambat.
2. Jika nilai K_p dinaikkan, respon sistem menunjukkan semakin cepat mencapai keadaan mantapnya.
3. Jika nilai K_p terlalu besar, maka sistem menjadi tidak stabil, atau menyebabkan respon sistem akan berosilasi.

Aksi kendali integral berfungsi menghasilkan respon sistem yang memiliki kesalahan pada keadaan mantap sama dengan nol. Kalau sebuah *plant* tidak memiliki unsur integrator ($1/s$), controller proporsional tidak akan mampu menjamin keluaran sistem dengan kesalahan keadaan mantapnya sama dengan nol. Dengan controller integral, respon sistem dapat diperbaiki, yaitu mempunyai kesalahan keadaan mantapnya nol. Aksi kendali integral memiliki karakteristik sebagai berikut :

1. Cenderung memperlambat respon.
2. Ketika sinyal kesalahan berharga nol, keluaran pengendali akan bertahan pada nilai sebelumnya.

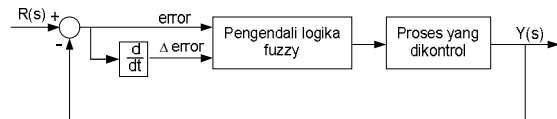
3. Jika sinyal kesalahan tidak sama dengan nol, keluaran akan menunjukkan kenaikan atau penurunan yang dipengaruhi oleh besarnya sinyal kesalahan dan nilai K_i
4. Konstanta integral K_i yang besar akan mereduksi *offset* lebih cepat. Tetapi apabila nilai konstanta K_i semakin besar maka akan menyebabkan peningkatan osilasi dari sinyal keluaran pengendali.

Secara matematis ditunjukkan oleh persamaan :

$$u(t) = K_p e(t) + \frac{K_p}{T_i} \int_0^t e(t) dt \dots\dots\dots (2.1)$$

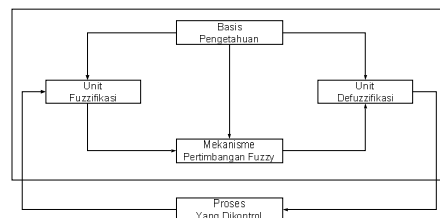
2.2 Teknik Kendali Fuzzy

Ide mengenai himpunan logika Fuzzy (kabur) dikenalkan oleh L.A. Zadeh pada tahun 1965. Dalam logika Fuzzy nilai suatu besaran dinyatakan dalam derajat keanggotaan (*membership value*) yang memiliki nilai kontinu antara 0 sampai dengan 1 untuk suatu kategori, dan setiap nilai mempunyai kemungkinan untuk masuk dalam beberapa kategori. Diagram loop tertutup pengendali Fuzzy diperlihatkan pada Gambar 2.2.



Gambar 2.2 Loop tertutup dengan pengendali Fuzzy.

Gambar 2.2 menunjukkan dua masukan (*Crisp Input*), yaitu masukan kesalahan (*error*) dan perubahan *error* ($\Delta error$) yang diperoleh dari nilai referensi, keluaran *plant*, dan *error* sebelumnya. Dua masukan tersebut akan diolah oleh pengendali logika Fuzzy, sehingga dihasilkan nilai keluaran berupa *Crisp Output*. Struktur dasar pengendali Fuzzy diperlihatkan pada Gambar 2.3.

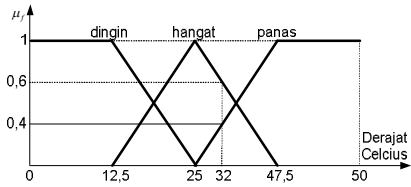


Gambar 2.3 Struktur dasar pengendali Fuzzy.

2.2.1 Fuzzifikasi

Pada suatu kendali proses, data yang dihasilkan berbentuk tegas/nyata (*crisp*). Fuzzifikasi diperlukan untuk mengubah masukan tegas/nyata

(*crisp inputs*) yang bersifat bukan Fuzzy ke dalam himpunan Fuzzy menjadi nilai Fuzzy dari beberapa *variabel linguistik* masukan yang telah didefinisikan. Hasil perubahan data inilah yang dinamakan masukan Fuzzy (*Fuzzy Inputs*). Berikut ini adalah contoh fuzzifikasi. Jika suhu air merupakan suatu variabel linguistik, dengan nilai linguistik T(suhu) = {dingin, hangat, panas}, dimana semesta pembicaraannya terletak antara suhu 0 °C sampai dengan suhu 50°C. Distribusi fungsi keanggotaan segitiga pada Fuzzy diperlihatkan pada Gambar 2.4.



Gambar 2.4 Proses Fuzzifikasi

Jika masukan adalah suhu sebesar 32 °C, maka proses Fuzzifikasi menghasilkan nilai linguistik dingin dengan derajat keanggotaan 0, hangat dengan derajat keanggotaan 0,6 dan panas derajat keanggotaannya 0,4.

2.2.2 Basis pengetahuan

Basis pengetahuan terdiri dari basis data dan basis aturan. Basis data mendefinisikan himpunan Fuzzy atas ruang-ruang masukan dan keluaran. Basis aturan berisi aturan-aturan kendali Fuzzy yang digunakan untuk pengendalian proses.

Pembentukan basis data mencakup perancangan fungsi keanggotaan untuk masing-masing variabel masukan dan keluaran, pendefinisian semesta pembicaraan dan penentuan variabel linguistik setiap variabel masukan dan keluaran.

Basis aturan kendali Fuzzy adalah kumpulan aturan-aturan kendali Fuzzy yang dibuat berdasarkan pengetahuan manusia dalam pengendalian suatu sistem. Aturan yang ditetapkan digunakan untuk menghubungkan antara variabel masukan dan variabel keluaran.

2.2.3 Mekanisme Pertimbangan Fuzzy

Berdasarkan basis aturan yang telah dibuat, variabel masukan Fuzzy diolah lebih lanjut untuk mendapatkan suatu penyelesaian. Dengan demikian dapat diambil suatu keputusan berupa keluaran Fuzzy, yaitu himpunan-himpunan keluaran Fuzzy dengan fungsi keanggotaan yang telah ditetapkan. Mekanisme pertimbangan Fuzzy yang sering digunakan adalah dengan metode MAX-MIN.

2.2.4 Defuzzifikasi

Defuzzifikasi adalah proses perubahan besaran Fuzzy yang disajikan dalam himpunan Fuzzy ke sinyal yang bersifat bukan Fuzzy. Strategi

defuzzifikasi ditujukan untuk menghasilkan suatu aksi kontrol bukan Fuzzy (*crisp output*) yang paling tepat dalam merepresentasikan kemungkinan distribusi aksi kontrol Fuzzy yang telah dihitung. Salah satu metode defuzzifikasi adalah dengan metode rata-rata terbobot (*weighted average*).

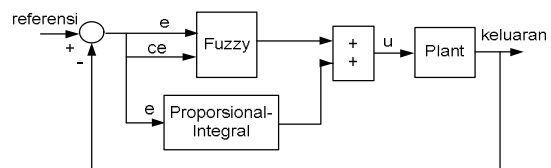
Nilai keluaran tegas metode *weighted average* adalah jumlah dari hasil kali keluaran Fuzzy untuk setiap himpunan Fuzzy keluaran dengan posisi singleton pada sumbu x setiap himpunan Fuzzy keluaran dibagi dengan jumlah keluaran Fuzzy untuk setiap himpunan Fuzzy keluaran atau dapat dirumuskan :

$$Keluaran\ Crisp = \frac{\sum_i \left(Keluaran\ Fuzzy \right) \times \left(Posisi\ singleton\ pada\ sumbu\ x_i \right)}{\sum_i \left(Keluaran\ Fuzzy \right)} \dots\dots\dots (2.2)$$

Keluaran Fuzzy merupakan hasil dari proses evaluasi aturan sedangkan posisi singleton merupakan nilai pada sumbu x dari variabel linguistik fungsi keanggotaan keluaran. Banyaknya keluaran Fuzzy (i) adalah sama dengan banyaknya posisi singleton (i) yaitu sebanyak himpunan Fuzzy yang didesain pada fungsi keanggotaan keluaran.

2.3 Teknik Kendali Hibrid PI Fuzzy

Teknik kendali hibrid PID Fuzzy adalah teknik kendali yang menggabungkan kendali PID dan Fuzzy dimana menggunakan kendali Fuzzy untuk pengendalian pada keadaan peralihan dan menggunakan kendali PID untuk mereduksi kesalahan pada keadaan tunak. Aksi kendali pada hibrid PID Fuzzy dapat dibagi menjadi dua yaitu aksi kendali untuk pengendalian pada keadaan peralihan dan pengendalian pada keadaan tunak. Pengendalian pada keadaan peralihan digunakan kendali Fuzzy, kendali Fuzzy dirancang untuk dapat menghasilkan performansi pada keadaan peralihan sebaik mungkin, karena kemiripannya secara fungsional dengan kendali konvensional PD, kendali Fuzzy ini juga disebut sebagai kendali Fuzzy PD-like. Pada keadaan tunak kesalahan direduksi dengan kendali integral dan untuk meningkatkan kestabilan digunakan kendali proporsional. Diagram hibrid PI Fuzzy diperlihatkan pada Gambar 2.5.



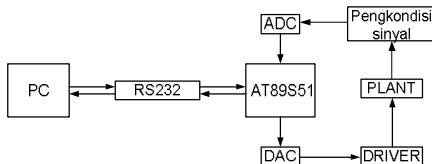
Gambar 2.5 Diagram blok pengendali hibrid PI Fuzzy.

III. PERANCANGAN

Perancangan yang dimaksudkan adalah perancangan perangkat lunak (*software*) dan perangkat keras (*hardware*). Perangkat keras yang dibuat meliputi *plant* pengujian dan perangkat antarmuka (*interface*). Kemudian perancangan perangkat lunak dilakukan dengan menggunakan Delphi sebagai pusat pengendali dan pengamat, dan pada perangkat antarmuka menggunakan bahasa *assembler*.

3.1 Perancangan Perangkat Keras

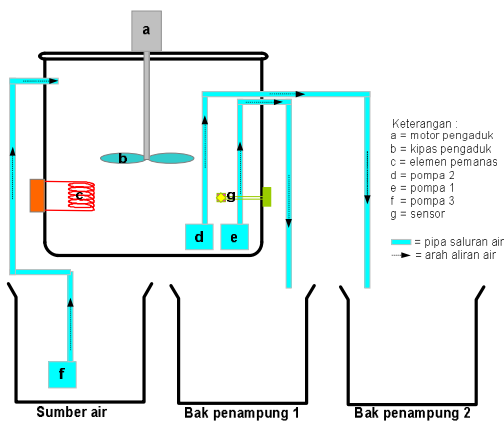
Ide perancangan dibuat berdasarkan hubungan antara satu perangkat dengan yang lain diperlihatkan pada Gambar 2.6.



Gambar 3.1 Blok diagram hubungan antar perangkat keras

3.1.1 Plant Pengujian

Plant pengujian yang dirancang digambarkan sebagai sebuah tabung yang berisi air yang memiliki satu saluran masukan dan dua saluran keluaran, di dalam tabung terdapat pengaduk, pemanas, dan sensor suhu. Volume air di dalam tabung yang akan diatur suhunya adalah sebanyak 9,37 liter. Debit air yang masuk adalah sama dengan debit air yang keluar yaitu sebesar 18,52 mililiter tiap satu detik. Pemanas yang digunakan adalah pemanas listrik 350 watt sebanyak tiga buah dan sensor yang digunakan adalah LM35. Gambar rancangan *plant* yang digunakan diperlihatkan pada Gambar 3.2.



Gambar 3.2 Rancangan *plant* suhu zat cair.

Ketika suhu air dalam tabung pengaturan belum sesuai dengan suhu yang diinginkan, maka pompa 1 akan menyala dan akan mengalirkan air

menuju bak penampung 1. Dan apabila suhu air dalam tabung sudah sesuai dengan suhu referensi maka pompa 1 akan mati dan pompa 2 akan menyala dan mengalirkan air menuju bak penampung 2. Pompa 3 adalah pompa yang mengalirkan air dari bak penampung 1 sebagai sumber air.

3.1.2 Pengkondisi Sinyal

Rangkaian pengkondisi sinyal ini dirancang untuk mengubah level tegangan yang dihasilkan oleh sensor suhu LM35 sebelum dikirimkan ke ADC. Level tegangan dari sensor yang memiliki jangkauan 0 volt sampai dengan 1,5 volt perlu disetarakan terlebih dahulu dengan tegangan masukan ADC yaitu 0 volt sampai dengan 5 volt.

3.1.3 Konverter Analog ke Digital (ADC)

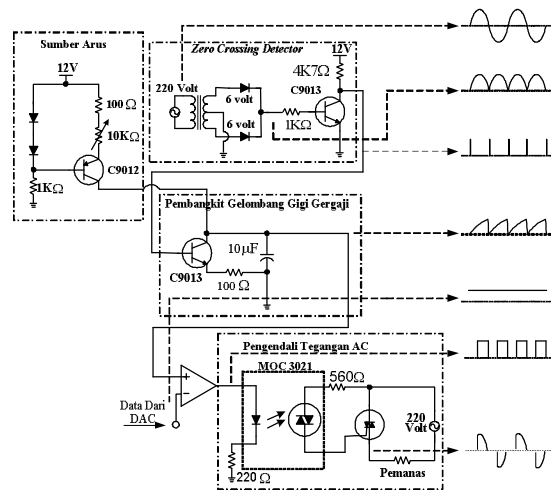
Rangkaian ADC digunakan untuk mengubah data analog menjadi data digital, dalam hal ini mengubah masukan dari sensor suhu yang telah dikuatkan menjadi data digital 8 bit.

3.1.4 Konverter Digital ke Analog (DAC)

Rangkaian DAC adalah rangkaian yang mengubah data digital menjadi data analog. Data masukan DAC yang berupa data digital adalah sinyal kendali yang memiliki nilai 0 sampai 255, masukan ini akan dikonversikan menjadi tegangan kendali yang bernilai 0 sampai 5 Volt.

3.1.5 Rangkaian Penggerak Pemanas

Untuk menggerakkan elemen pemanas digunakan rangkaian antarmuka yang berfungsi sebagai penggerak elemen pemanas menggunakan rangkaian pemacu. Blok kerja rangkaian penggerak diperlihatkan pada Gambar 3.3.



Gambar 3.3 Diagram blok pengendali pemanas dengan pemacu.

3.1.6 Rangkaian Penggerak Pompa

Rangkaian penggerak pompa ini berfungsi untuk mengatur penyalan pompa yang mengalirkan air keluar dari tempat pengaturan suhu, yaitu apabila suhu air sudah sesuai dengan referensi maka pompa 2 akan menyala dan mengalirkan air ke bak penampung untuk air yang sudah sesuai dengan referensi, adapun ketika suhu air belum sesuai dengan referensi maka pompa 1 akan menyala dan mengalirkan air ke bak penampung untuk air yang suhunya belum sesuai dengan referensi.

3.1.7 Perangkat Antarmuka

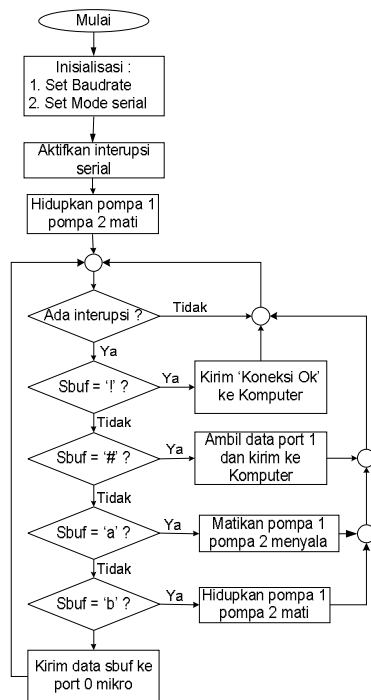
Dua komponen penting dalam rangkaian antarmuka ini adalah mikrokontroler AT89S51 dan IC RS232. rangkaian antarmuka ini berfungsi sebagai penghubung komunikasi antara PC (*Personal Computer*) sebagai pengendali dengan perangkat *plant* yang akan dikendalikan. Komunikasi yang digunakan adalah komunikasi serial.

3.2 Perancangan Perangkat Lunak

Program pertama yang dibuat adalah program untuk perangkat antarmuka dan yang kedua adalah program yang digunakan untuk pengendalian dan pengamatan.

3.2.1 Pemrograman Perangkat Antarmuka

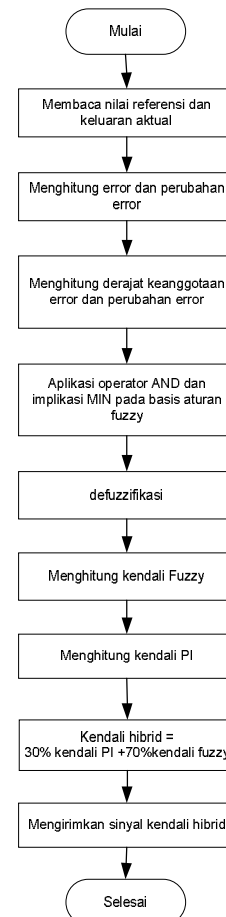
Diagram alir rutin program *assembler* untuk antarmuka komunikasi serial antara mikrokontroler dengan komputer adalah seperti diperlihatkan pada Gambar 3.4.



Gambar 3.4 Diagram alir komunikasi serial.

3.2.2 Pemrograman Teknik Kendali Hibrid PI Fuzzy

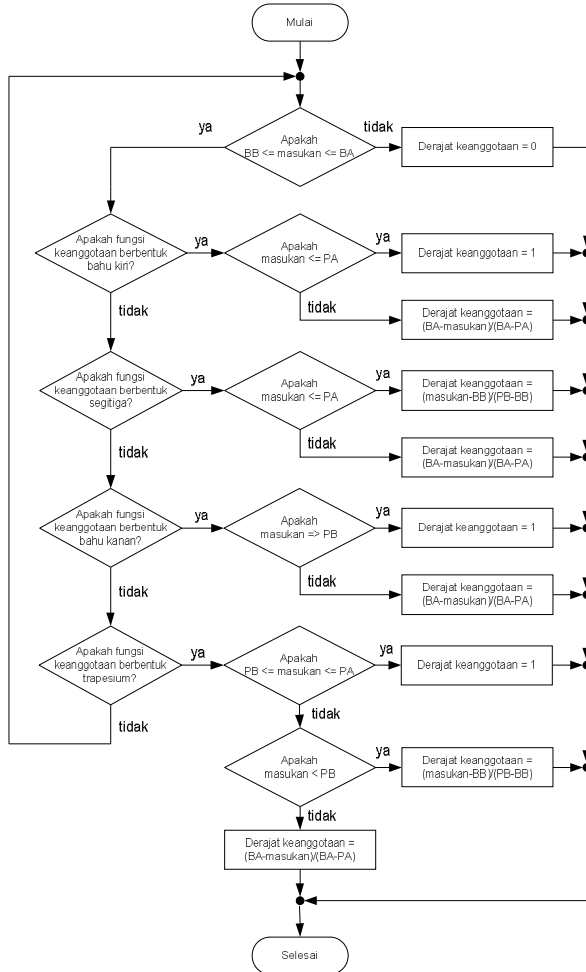
Teknik hibrid antara pengendali PI dengan pengendali Fuzzy adalah dengan menjumlahkan besarnya sinyal kendali PI dengan sinyal kendali Fuzzy. Kendali hibrid dirancang dengan tujuan untuk memadukan kelebihan antara kendali PI dengan kendali Fuzzy. Dalam kendali hibrid ini peran utama kendali Fuzzy adalah mempercepat respon sistem dan mengatasi jika terjadi gangguan, sedangkan kendali PI berperan mengurangi kesalahan sampai dengan nol. Pengaruh kendali PI atau kendali Fuzzy dalam hibrid ditentukan dalam persentase. Persentase kendali PI dalam hibrid yang dirancang akan lebih kecil daripada persentase kendali Fuzzy, hal ini menyesuaikan dengan keinginan bahwa kendali PI bertujuan untuk memperbaiki respon sistem dalam keadaan tunak. Blok diagram pemrograman diperlihatkan pada Gambar 3.5.



Gambar 3.5 Diagram blok sistem kendali hibrid PI Fuzzy.

Tahapan pertama dalam sistem kendali Fuzzy adalah menghitung derajat keanggotaan masukan, atau disebut juga fuzzifikasi. Bentuk fungsi keanggotaan masukan adalah trapesium dan

segitiga. Blok diagram alir fuzzifikasi diperlihatkan pada Gambar 3.6.



Gambar 3.6 Diagram alir program fuzzifikasi.

Setelah mendapatkan derajat keanggotaan sinyal masukan, maka langkah selanjutnya adalah evaluasi aturan-aturan (*rules*). Jumlah aturan yang digunakan adalah sebanyak 25 aturan seperti diperlihatkan pada Gambar 3.7.

| | | error | | | | |
|-----------------|----|-------|----|---|----|----|
| | | NB | NK | Z | PK | PB |
| perubahan error | NB | N | N | K | K | B |
| | NK | N | K | S | S | B |
| | Z | N | K | S | B | M |
| | PK | S | S | S | M | M |
| | PB | B | B | B | M | M |

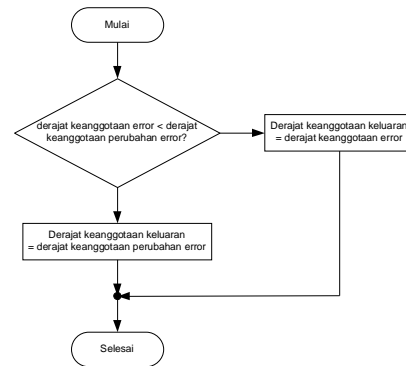
Keterangan :

- NB: Negatif Besar N : Nol
- NK: Negatif Kecil K : Kecil
- Z : Zero S : Sedang
- PK: Positif Kecil B : Besar
- PB: Positif Besar M : Maksimal

Gambar 3.7 Aturan Fuzzy.

Dengan basis aturan yang telah dibuat, selanjutnya sistem Fuzzy melakukan evaluasi aturan, untuk mendapatkan konsekuen dari setiap aturan. Mekanisme pertimbangan fuzzy yang digunakan

adalah metode MIN-MAX. Diagram alir mekanisme pertimbangan fuzzy diperlihatkan pada Gambar 3.8.



Gambar 3.8 Diagram alir evaluasi aturan.

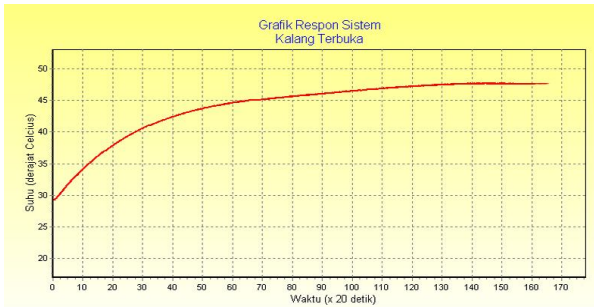
Dengan menggunakan basis aturan yang telah dibuat, selanjutnya sistem Fuzzy melakukan evaluasi terhadap derajat keanggotaan dari masukan *error* dan perubahan *error* untuk menentukan derajat keanggotaan parameter keluaran dari setiap aturan. Operator yang digunakan pada aturan adalah operator AND. Mekanisme pertimbangan Fuzzy menggunakan metode MIN-MAX. Evaluasi aturan akan menghasilkan konsekuen untuk setiap aturan, tahap selanjutnya adalah melakukan komposisi semua hasil evaluasi dari setiap aturan untuk mendapatkan nilai keluaran Fuzzy. Nilai keluaran Fuzzy yang didapatkan selanjutnya akan melalui defuzzifikasi, yaitu tahapan untuk mendapatkan suatu nilai *crisp* dari keluaran Fuzzy. Aturan yang digunakan untuk komposisi keluaran adalah aturan max, dan metode yang digunakan untuk defuzzifikasi adalah rata-rata terbobot (*weighted average*).

Setelah mendapatkan nilai kendali Fuzzy, langkah selanjutnya adalah menghitung nilai kendali proporsional integral PI, kemudian apabila nilai kendali Fuzzy dan nilai kendali PI masing-masing telah didapatkan, maka langkah selanjutnya adalah mendapatkan nilai kendali hibrid yang besarnya kendali PI dan Fuzzy pada kendali hibrid diatur dengan penguatan. Besarnya penguatan pada kendali PI menentukan kecepatan kendali hibrid mencapai sinyal kesalahan sama dengan nol. Besarnya penguatan kendali Fuzzy menentukan kehandalan hibrid dalam mengatasi gangguan. Penguatan kendali PI maupun kendali Fuzzy mempengaruhi karakter kendali hibrid, semakin besar penguatan kendali Fuzzy dibandingkan penguatan kendali PI, maka karakter kendali Fuzzy akan lebih kuat pada kendali hibrid daripada kendali PI, begitu pula sebaliknya.

IV. PENGUJIAN

4.1 Pengujian Sistem Kalang Terbuka

Untuk mengetahui karakteristik *plant* suhu yang akan dikendalikan, maka dilakukan pengujian secara kalang terbuka. Pengujian kalang terbuka ini dilakukan dengan cara mengirimkan tegangan dengan jangkauan antara 0 sampai dengan 5 volt. Besarnya tegangan yang dimaksudkan ini akan dikeluarkan oleh DAC, tegangan 5 volt akan menyebabkan pemanas menghasilkan tingkat pemanasan yang maksimal, sedangkan tegangan 0 volt akan menyebabkan pemanas menghasilkan tingkat pemanasan yang minimal. Respon pengujian kalang terbuka diperlihatkan pada Gambar 4.1.



Gambar 4.1 Grafik respon sistem dengan pengujian kalang terbuka

Pengujian kalang terbuka menunjukkan bahwa dengan tegangan 5 volt dan dengan suhu awal sebesar 29,294 °C maka setelah 46 menit suhu air stabil pada suhu 47,467 °C. Dari hasil secara kalang terbuka, nilai konstanta sistem (T) dapat dihitung yaitu besarnya waktu yang diperlukan untuk mencapai suhu 0,632 dari suhu stabil. Suhu stabil bernilai $(0,632 \times (47,647 - 29,294) \text{ } ^\circ\text{C}) + 29,294 \text{ } ^\circ\text{C} = 40,8931 \text{ } ^\circ\text{C}$. Pengujian kalang terbuka menunjukkan bahwa untuk mencapai suhu 40,89 °C diperlukan waktu selama 632,4 detik.

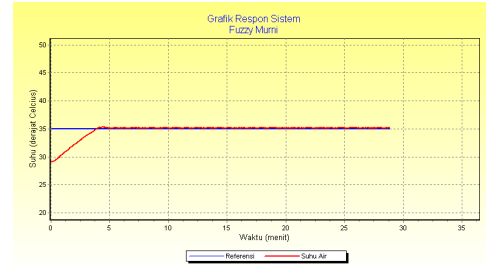
4.2 Pengujian Kendali

Pengamatan respon kendali menggunakan kendali Fuzzy dan kendali hibrid PI Fuzzy menggunakan fungsi keanggotaan masukan maupun keluaran yang sama. Nilai referensi yang diberikan pada kendali hibrid PI Fuzzy dan kendali Fuzzy yang digunakan sebagai bahan perbandingan disamakan.

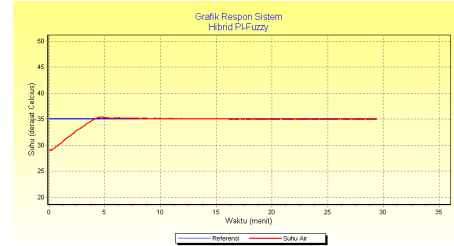
4.2.1 Pengujian Nilai Referensi Tetap Tertentu

Pengujian dilakukan dengan cara memberikan nilai referensi tertentu dan mendapatkan grafik responnya. Pengujian ini bertujuan mengetahui pengaruh penambahan pengendali PI pada pengendali Fuzzy, pada respon *plant* dengan nilai referensi tertentu. Pengujian dilakukan pada suhu 35 °C, 40 °C dan 46 °C. Respon diperlihatkan pada

Gambar 4.2, Gambar 4.3, Gambar 4.4, dan ditabelkan pada Tabel 4.1.

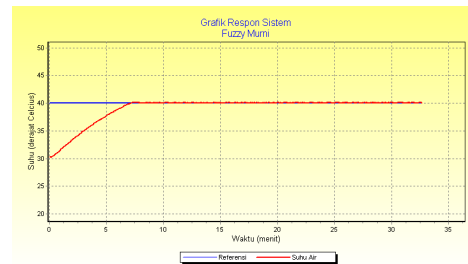


(a) Kendali Fuzzy

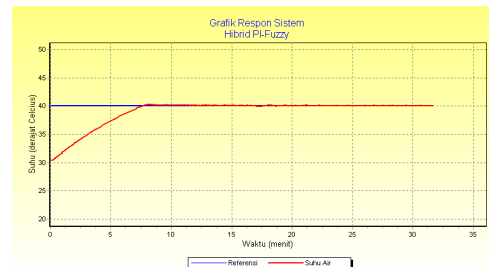


(b) Kendali hibrid PI Fuzzy

Gambar 4.2 Respon *plant* pada referensi 35 °C.



(a) Kendali Fuzzy

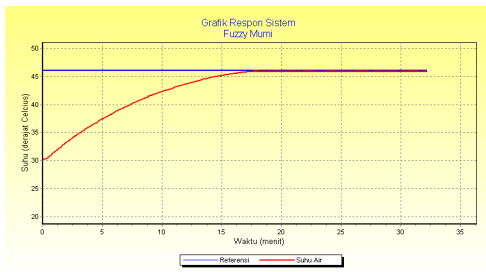


(b) Kendali hibrid PI Fuzzy

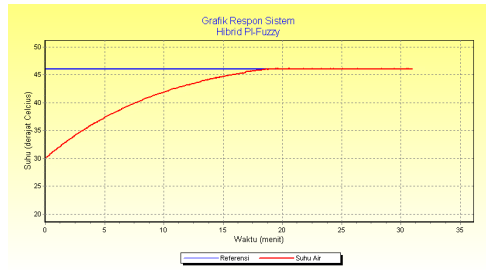
Gambar 4.3 Respon *plant* pada referensi 40 °C.

Tabel 4.1 Karakteristik respon pada beberapa referensi tetap.

| Keterangan | Referensi (°C) | Suhu awal (°C) | Waktu Tunda/ t_d (menit) | Waktu Naik/ t_r (menit) | Waktu Puncak/ t_p (menit) | Lonjakan maksimum (°C) | Waktu Penetapan/ t_s (menit) | Suhu akhir (°C) | Offset (°C) |
|-------------------------|----------------|----------------|----------------------------|---------------------------|-----------------------------|------------------------|--------------------------------|-----------------|-------------|
| Kendali Fuzzy | 35 | 29,176 | - | 3,94 | 4,12 | 0,294 | 4,66 | 35,176 | 0,118 |
| | 40 | 30,235 | - | 7,02 | 7,44 | 0,235 | 7,46 | 40 | - |
| | 46 | 30,235 | - | 17,7 | - | - | 17,72 | 45,882 | -0,118 |
| Kendali Hibrid PI Fuzzy | 35 | 29,176 | - | 3,82 | 4,12 | 0,412 | 7,16 | 34,941 | - |
| | 40 | 30,235 | - | 7,48 | 7,82 | 0,235 | 10,78 | 40 | - |
| | 46 | 30,235 | - | 19,78 | - | - | 19,80 | 46 | - |



(a) Kendali Fuzzy



(b) Kendali hibrid PI Fuzzy

Gambar 4.4 Respon *plant* pada referensi 46 °C.

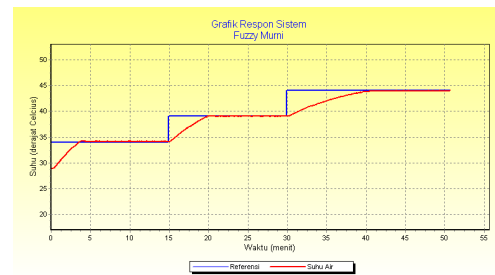
Secara umum, perbandingan waktu tunda, waktu naik, waktu puncak, dan lonjakan maksimum dari pengujian dengan menggunakan tiga referensi yang berbeda menunjukkan kedekatan nilai. Sebagai contoh misalnya dapat digunakan perbedaan waktu naik pada referensi 46 °C antara pengendali hibrid PI Fuzzy dengan Fuzzy, pada referensi ini selisih waktu naik yang terjadi adalah 2,08 menit atau dengan persentase perbandingan terhadap waktu naik pada kendali Fuzzy adalah sebesar 11,7 %. Jika ditinjau waktu penetapannya, kendali Fuzzy memiliki waktu penetapan yang jauh lebih kecil jika dibandingkan dengan kendali hibrid PI Fuzzy, hal ini dapat dikarenakan pada kendali hibrid PI Fuzzy respon sistem menjadi lambat ketika mendekati kestabilan karena terdapatnya faktor integral yang terdapat dalam kendali hibrid PI Fuzzy. Pada pengujian dengan kendali Fuzzy pada referensi 35 °C didapatkan bahwa suhu air dalam keadaan tunak beresilasi dari suhu 35,059 °C sampai dengan suhu 35,176 °C, sedangkan dengan menggunakan kendali hibrid PI Fuzzy suhu air dalam keadaan tunak beresilasi antara suhu 34,941 °C sampai dengan suhu 35,059 °C. Jadi respon sistem keadaan tunak pada pengendalian dengan kendali Fuzzy beresilasi di atas nilai referensi yang ditetapkan, sedangkan dengan menggunakan kendali hibrid PI Fuzzy respon sistem beresilasi pada nilai referensi. Osilasi pada nilai referensi 35 °C ini dapat terjadi karena keterbatasan tingkat ketelitian ADC, seperti yang telah dijelaskan pada bab 3 yaitu kenaikan 1 bit mewakili kenaikan suhu sebesar 0,118 °C. Dengan osilasi yang terjadi antara suhu 35,059 °C sampai dengan 35,175 °C

dapat diartikan bahwa *offset* yang terjadi adalah sebesar 0,118 °C di atas referensi. Lonjakan maksimum yang terjadi pada respon dengan kendali PI Fuzzy lebih besar jika dibandingkan pada kendali Fuzzy.

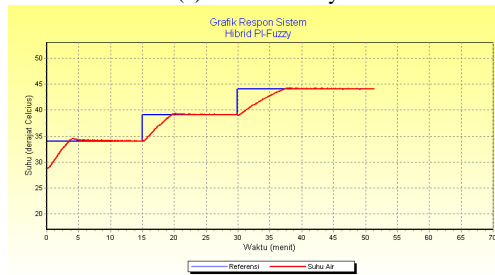
Pengujian dengan referensi 46 °C dengan kendali Fuzzy terjadi kecenderungan bahwa respon sistem stabil pada suhu 45,882 °C, sedangkan dengan menggunakan kendali hibrid PI Fuzzy sistem memiliki respon yang lebih baik yaitu kecenderungannya stabil pada nilai referensi yang telah ditentukan yaitu 46 °C. Ini berarti bahwa respon sistem yang dihasilkan oleh kendali Fuzzy memiliki *offset* sebesar 0,118 °C dibawah nilai referensi 46 °C yang telah ditetapkan. Pada referensi 46 °C ini, grafik respon kendali hibrid PI Fuzzy lebih halus daripada respon kendali Fuzzy.

4.4.2 Pengujian dengan Referensi Naik

Pengujian dengan referensi naik ini bertujuan untuk mengetahui kecepatan respon kendali hibrid terhadap perubahan kenaikan referensi. Gambar 4.5 memperlihatkan grafik respon *plant*, dan Tabel 4.2 memperlihatkan nilai waktu naik, waktu lonjakan, waktu penetapan.



(a) Kendali Fuzzy



(b) Kendali hibrid PI Fuzzy

Gambar 4.5 Respon *plant* pada referensi naik.

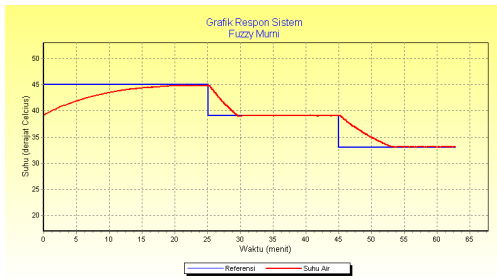
Tabel 4.2 Karakteristik respon sistem pada referensi naik.

| Keterangan | Referensi (°C) | Suhu awal (°C) | Waktu Tunda/ t_d (menit) | Waktu Naik/ t_r (menit) | Waktu Puncak/ t_p (menit) | Lonjakan maksimum (°C) | Waktu Penetapan/ t_s (menit) | Suhu akhir (°C) | Offset (°C) |
|-------------------------|----------------|----------------|----------------------------|---------------------------|-----------------------------|------------------------|--------------------------------|-----------------|-------------|
| Kendali Fuzzy | 35 | 28,824 | - | 3,48 | 4,02 | 0,353 | 4,04 | 34,118 | 0,118 |
| | 40 | 34,118 | - | 4,78 | 4,78 | 0,059 | 4,78 | 39,059 | - |
| | 46 | 39,059 | - | 11,18 | - | - | 11,20 | 44 | - |
| Kendali Hibrid PI Fuzzy | 35 | 28,824 | - | 3,22 | 3,62 | 0,471 | 9,02 | 34 | - |
| | 40 | 34 | - | 4,18 | 4,6 | 0,294 | 5,24 | 39,059 | - |
| | 46 | 39,059 | - | 6,84 | - | - | 7,88 | 44 | - |

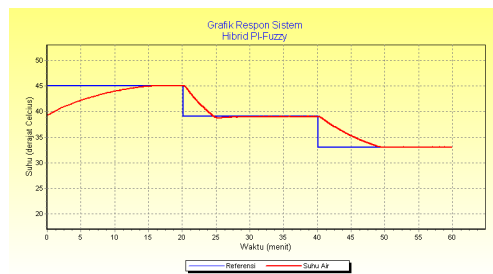
Dari hasil pengujian referensi naik dengan menggunakan kendali Fuzzy didapatkan bahwa waktu naik menuju referensi 34 °C adalah sebesar 3,48 menit atau 0,26 detik lebih lama dibandingkan waktu naik yang diperlukan oleh kendali hibrid PI Fuzzy untuk mencapai suhu 34 °C. Hal yang sama juga terjadi pada dua kenaikan referensi berikutnya, bahkan menunjukkan peningkatan selisih waktu naik. Kendali hibrid PI Fuzzy menghasilkan respon dengan waktu puncak yang lebih cepat dibandingkan dengan kendali Fuzzy. Waktu penetapan, pada referensi 34 °C dan 39 °C kendali Fuzzy memiliki waktu penetapan lebih cepat. Pada pengendali Fuzzy, lonjakan maksimum yang terjadi pada referensi 35 °C adalah 0,353 °C, pada referensi 39 °C adalah 0,059 °C, dan pada referensi 44 °C tidak terjadi lonjakan. Pada pengendali hibrid PI Fuzzy, lonjakan maksimum yang terjadi pada referensi 35 °C adalah 0,471 °C, pada referensi 39 °C adalah 0,294 °C, dan pada referensi 44 °C tidak terjadi lonjakan. Dari pengujian ini dapat disimpulkan bahwa kedua kendali menunjukkan kemiripan respon sistem untuk referensi menuju 34 °C dan referensi 39 °C, namun pada referensi 44 °C kendali hibrid mampu mencapai referensi 44 °C lebih cepat.

4.2.2 Pengujian dengan Referensi Turun

Pengujian dengan referensi naik ini bertujuan untuk mengetahui kecepatan respon kendali hibrid terhadap perubahan penurunan referensi. Respon hasil pengujian diperlihatkan Gambar 4.6 dan ditabelkan pada Tabel 4.3.



(a) Kendali Fuzzy



(b) Kendali hibrid PI Fuzzy

Gambar 4.6 Respon *plant* pada referensi turun.

Tabel 4.3 Karakteristik respon sistem pada referensi turun.

| Keterangan | Referensi (°C) | Suhu awal (°C) | Waktu Tunda/ t_d (menit) | Waktu Naik/ t_r (menit) | Waktu Puncak/ t_p (menit) | Lonjakan maksimum (°C) | Waktu Penetapan/ t_s (menit) | Suhu akhir (°C) | Offset (°C) |
|-------------------------|----------------|----------------|----------------------------|---------------------------|-----------------------------|------------------------|--------------------------------|-----------------|-------------|
| Kendali Fuzzy | 45 | 39,176 | - | 18,3 | - | - | 18,3 | 44,706 | -0,294 |
| | 39 | 44,706 | - | - | - | - | 4,14 | 39,059 | - |
| | 33 | 39,059 | - | - | - | - | 7,62 | 33,176 | 0,176 |
| Kendali Hibrid PI Fuzzy | 45 | 39,176 | - | 18,3 | - | - | 15,36 | 45,059 | - |
| | 39 | 45,059 | - | - | - | - | 6,64 | 38,941 | - |
| | 33 | 40 | - | - | - | - | 9 | 33,059 | - |

Pada pengujian dengan referensi turun dengan menggunakan kendali Fuzzy didapatkan data bahwa pada referensi 45 °C nilai referensi ini tidak dapat tercapai dan keluaran respon relatif stabil pada suhu 44,706 °C, ini berarti terjadi *offset* sebesar 0,294 °C di bawah referensi yang ditentukan. Sedangkan dengan kendali hibrid PI Fuzzy, nilai akhir respon adalah 45,059 °C nilai ini telah melewati nilai referensi 45 °C. Kestabilan pada suhu 45 °C ini tidak dapat diperlihatkan dengan baik karena keterbatasan ADC dalam penunjukan suhu air sebenarnya, kestabilan ini dapat dilihat pada waktu pengambilan data yaitu ketika ADC menunjukkan peralihan suhu antara 44,941 °C dengan 45,059 °C. Data yang didapatkan memperlihatkan bahwa kendali Fuzzy membutuhkan waktu yang lebih singkat untuk menyesuaikan dengan referensi yang lebih rendah jika dibandingkan dengan kendali hibrid PI Fuzzy. Pengendalian dengan menggunakan kendali hibrid PI Fuzzy membutuhkan waktu yang lebih lama untuk menyesuaikan dengan referensi yang lebih rendah, hal ini dapat disebabkan karena adanya faktor integral yang dibawa oleh kendali PI di dalam kendali hibrid PI Fuzzy, faktor integral inilah yang menyebabkan respon sistem menjadi lebih pelan.

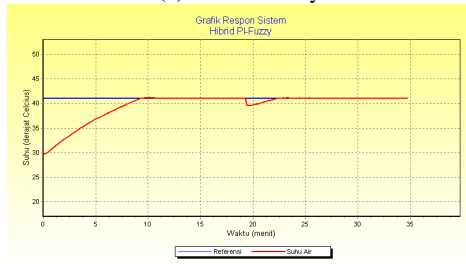
4.2.3 Pengujian dengan Pemberian Gangguan

Untuk mengetahui daya tahan sistem terhadap gangguan, maka dilakukan pengujian dengan memberikan gangguan berupa penambahan air dingin pada sistem yang telah mencapai kestabilan untuk suatu setting value. Pada pengujian ini gangguan yang diberikan dengan cara memasukkan serpihan es batu ke dalam *plant* suhu yang telah mencapai suhu tertentu. Pengujian dengan gangguan panas tidak diberikan karena tugas akhir ini tidak dibuat untuk melakukan pendinginan. Tujuan pengujian dengan gangguan ini adalah mengetahui kecepatan respon sistem untuk kembali ke referensi semula setelah diberikan gangguan, waktu yang diperlukan untuk kembali ke referensi semula disebut sebagai waktu pemulihan. Volume es yang diberikan sebagai gangguan adalah 35 cm³. Es dimasukkan ke dalam *plant*, sebelum

dimasukkan es dihancurkan menjadi berbentuk serpihan agar lebih mudah tercampur dengan air dalam *plant*. Grafik respon pengujian dengan pemberian gangguan diperlihatkan pada Gambar 4.7.



(a) Kendali Fuzzy



(b) Kendali hibrid PI Fuzzy

Gambar 4.7 Respon *plant* dengan gangguan.

Pada pengujian ini pada kendali Fuzzy maupun pada kendali hibrid PI Fuzzy mula-mula ditetapkan suhu referensi adalah 41 °C. Pada suhu awal yang sama 39,176 °C, suhu 41 °C dengan pengendali Fuzzy 10,96 menit sedangkan pada pengendali hibrid PI Fuzzy dicapai dalam waktu 10,72 menit.

Pada pengujian menggunakan kendali Fuzzy murni setelah 19,76 menit dari waktu awal dan ketika suhu air telah stabil, serpihan es dimasukkan ke dalam *plant*, selanjutnya diketahui bahwa suhu air di dalam *plant* turun sampai dengan 39,412 °C pada menit ke 20, kemudian berangsur-angsur kembali ke referensi sebelumnya dalam waktu 2,92 menit.

Pada pengujian menggunakan kendali hibrid PI Fuzzy setelah 19 menit dari waktu awal dan ketika suhu air telah stabil, serpihan es dimasukkan ke dalam *plant*, selanjutnya diketahui bahwa suhu air di dalam *plant* turun sampai dengan 39,529 °C pada menit ke 19,46. Dan kemudian berangsur-angsur kembali ke referensi sebelumnya dalam waktu 2,98 menit.

Dari kedua pengujian yang telah dilakukan, waktu pemulihan kendali Fuzzy ternyata lebih cepat 0,08 menit daripada kendali hibrid PI Fuzzy, pengaruh penambahan kendali PI pada pengendali Fuzzy menyebabkan penurunan ketahanan terhadap gangguan, persentase selisih ini jika dibandingkan dengan waktu pemulihan adalah 2,7 %. Dari pengujian dengan gangguan ini dapat disimpulkan bahwa dengan penambahan faktor kendali PI ke

dalam kendali Fuzzy maka sistem tetap dapat mengembalikan respon menuju nilai referensi sebelumnya.

V. PENUTUP

5.1. Kesimpulan

Berdasarkan perancangan, pengujian dan analisa yang telah dilakukan dalam tugas akhir ini, maka dapat disimpulkan hal-hal sebagai berikut :

1. Berdasarkan pengujian secara kalang terbuka didapatkan konstanta sistem sebesar 632,4 detik.
2. Pada pengujian dengan nilai referensi tetap tertentu, teknik kendali hibrid yang dirancang dapat menunjukkan performansi yang baik, yaitu secara umum didapatkan respon sistem yang relatif stabil pada nilai referensi yang diinginkan.
3. Dari pengujian yang dilakukan, semakin tinggi nilai referensi maka waktu naik yang diperlukan juga semakin lama.
4. Dibandingkan dengan kendali Fuzzy kendali hibrid PI Fuzzy memiliki respon lebih halus, tetapi respon kendali hibrid PI Fuzzy lebih lambat dibandingkan dengan respon yang dihasilkan kendali Fuzzy.
5. Pada pengujian referensi naik, kendali hibrid PI Fuzzy memiliki laju penyesuaian dengan referensi baru yang relatif sama dengan kendali Fuzzy, tetapi pada nilai referensi 44 °C kendali hibrid PI Fuzzy memiliki waktu penetapan yang lebih kecil.
6. Pada pengujian dengan gangguan, kendali Fuzzy menghasilkan waktu pemulihan yang lebih singkat dibandingkan dengan kendali hibrid PI Fuzzy.
7. Pengendali Hibrid PI Fuzzy mampu menghasilkan respon yang lebih baik dibandingkan kendali Fuzzy murni kecuali pada pengujian referensi turun, hal ini terjadi karena persentase kendali PI pada Hibrid yang masih cukup besar.
8. Kendali Hibrid PI Fuzzy mampu menghasilkan tanggapan respon sistem yang lebih halus dibandingkan dengan menggunakan kendali Fuzzy murni.

5.2. Saran

Beberapa saran yang disarankan dari pelaksanaan tugas akhir ini adalah :

1. Untuk memperoleh respon sistem yang lebih baik, maka dapat dicoba dengan mengubah dan mengatur basis aturan serta fungsi keanggotaan pada pengendali logika Fuzzy dan selain itu juga melakukan pengaturan

terhadap debit air atau level air secara otomatis, agar ketinggian air dapat lebih stabil.

2. Untuk dapat mempercepat respon kenaikan suhu maka perlu ditambahkan jumlah pemanas atau dengan memperbesar daya pemanas. Sedangkan untuk mempercepat respon terhadap penurunan referensi dapat ditambahkan pendingin.

VI. DAFTAR PUSTAKA

- [1] Coughlin, Robert dan Driscoll, Federick, *Penguat Operasional dan Rangkaian Terpadu Linier*, Jakarta : Erlangga, 1994.
- [2] Jacquot, Raymond G., *Modern Digital Control System*, New York : Marcel Dekker Inc., 1981.
- [3] Kusumadewi, Sri; *Analisa Dan Desain Sistem Fuzzy Menggunakan Toolbox Matlab*, Yogyakarta : Penerbit Graha Ilmu, 2002.
- [4] Laksono, Suryo Krido, *Pengaturan Sudut Fasa Berbasis Logika Fuzzy Untuk Pengaturan Sistem Temperatur*, Tugas Akhir, Jurusan Teknik Elektro Universitas Diponegoro, Semarang, 2003.
- [5] Malvino, Albert Paul., *Prinsip-prinsip Elektronik*, Jakarta : Erlangga, 1985.
- [6] M. Agus J., *Belajar Sendiri Borland Delphi 6.0*, Bandung : Elex Media Komputindo, 2001.
- [7] Nalwan, Paulus Andi, *Panduan Praktis Teknik Antarmuka dan Pemrograman Mikrokontroler AT89C51*, Jakarta : Gramedia, 2003.
- [8] Ogata, Katsuhiko, *Teknik Kontrol Otomatik Jilid 1*, Jakarta : Erlangga, 1991.
- [9] Passino, Kevin M. dan Yurkovich, Stephen, *Fuzzy Control*, California : Addison Wesley Longman Inc., 1997.
- [10] Philips, Charles L. dan Harbor, Royce D., *Sistem Kontrol*, Jakarta :PT Prenhallindo, 1996.
- [11] Putra, Agfianto E., *Belajar Mikrokontroler AT89C51/52/55*, Yogyakarta : Penerbit Gava Media, 2002.
- [12] Rashid Muhammad H., *Rangkaian, Devais, dan Aplikasinya Jilid 1*, Jakarta : PT Prenhallindo, 1999.
- [13], *Tip dan Trik Pemrograman Delphi 7*, Yogyakarta : Penerbit ANDI dan Wahana Komputer, 2003.
- [14], http://liama.ia.ac.cn/hubg/Paper/P_TFS01.pdf
- [15], http://www.cs.wright.edu/people/faculty/krattan/courses/419/hybrid_pid.pdf



Waskito Budi (L2F000648) dilahirkan di Purworejo, 14 Februari 1982. Menempuh pendidikan di SD Semawung Daleman II lulus pada tahun 1994, kemudian melanjutkan ke SLTP Negeri 1 Kutoarjo lulus pada tahun 1997, kemudian melanjutkan ke SMU Negeri 1 Purworejo lulus tahun

2000, dan sampai saat ini sedang menyelesaikan studi S1 di Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Diponegoro Semarang Konsentrasi Instrumentasi dan Kontrol.

E-mail : waskitobudi@gmail.com

Homepage : waskitobudi.multiply.com

Mengetahui,

Dosen Pembimbing I

Dosen Pembimbing II

Wahyudi, S.T., M.T

NIP. 132 086 662

Tanggal

Iwan Setiawan, S.T., M.T.

NIP. 132 283 183

Tanggal