

Tuning Parameter Proporsional – Integral dengan Fuzzy Logic untuk Pengaturan Suhu Air pada Plant Heat Exchanger

Prestian Rindho S.¹, Budi Setiyono², Iwan Setiawan²

1. Mahasiswa Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Diponegoro Semarang
2. Dosen Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Diponegoro Semarang

Abstract

Metode kontrol Proporsional-Integral (PI) merupakan sebuah metode kontrol yang banyak diterapkan di bidang industri sampai saat ini. Kontroler ini memiliki parameter-parameter pengontrol, yaitu konstanta proporsional (K_p) dan konstanta integral (K_i). Pada metode PI konvensional, kedua parameter tersebut diturunkan dari perhitungan matematis. Kesulitan penalaan parameter-parameter tersebut akan ditemui bila plant yang dikendalikan adalah sistem dengan orde tinggi. Maka dari itu, diperlukan suatu metode penala PI yang lebih baik dan dapat diterapkan dalam sistem orde tinggi.

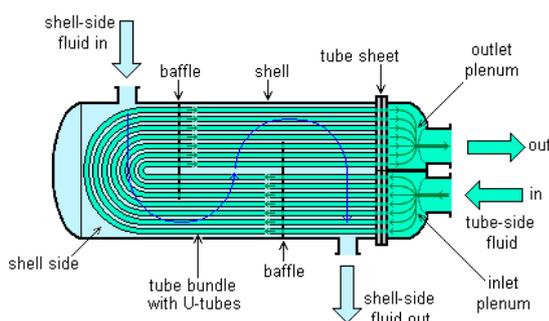
Metode penalaan PI dengan logika fuzzy dapat dilakukan secara otomatis tanpa melakukan pemodelan sistem. Pada metode ini nilai K_p dan K_i ditentukan berdasarkan sejumlah aturan-aturan yang ditetapkan oleh Logika fuzzy. Input fuzzy berupa error dan delta error. Plant pengendalian suhu cairan pada Heat Exchanger menggunakan mikrokontroler ATmega8535 sebagai kontroler dan heater sebagai aktuator. Pada pengujian didapatkan hasil penalaan parameter PI dengan logika fuzzy mampu menghasilkan tanggapan keluaran dengan rise time yang cepat, selisih tunak yang kecil, overshoot yang kecil, dan ketika sistem diberi gangguan, tanggapan keluaran akan tetap terjaga dalam kestabilan.

Keyword : PI (Proporsional-Integral), metode Penalaan PI dengan logika fuzzy, Mikrokontroler ATmega 8535, Heat Exchanger

I. PENDAHULUAN

Kebutuhan teknologi yang semakin maju, menuntut berkembangnya sistem kendali yang handal. Sistem kendali yang baik sangat diperlukan dalam meningkatkan efisiensi dalam proses produksi. Sebagai contoh, otomatisasi dalam bidang industri yaitu proses pemanasan cairan yang mengalir pada tangki Heat Exchanger. Salah satu jenis Heat Exchanger dapat dilihat pada Gambar 1.1.

U-tube heat exchanger



Gambar 1 Gambar proses pada Heat Exchanger.

Heat Exchanger adalah peralatan yang digunakan untuk melakukan proses pertukaran kalor antara dua fluida, baik cair (panas atau dingin) maupun gas, dimana fluida ini mempunyai temperatur yang berbeda antara sisi masukan dan sisi keluaran. Heat Exchanger banyak digunakan di berbagai industri tenaga atau industri yang lainnya dikarenakan mempunyai beberapa keuntungan, antara lain:

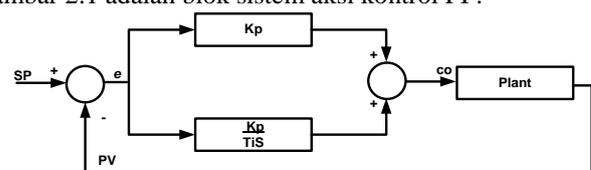
1. Konstruksi sederhana, kokoh dan aman.
2. Biaya yang digunakan relatif murah.

3. Kemampuannya untuk bekerja pada tekanan dan temperature yang tinggi dan tidak membutuhkan tempat yang luas.
4. Logika Fuzzy dapat digunakan untuk menala parameter-parameter kendali konvensional seperti kendali PI, logika Fuzzy menerapkan suatu sistem kemampuan manusia untuk mengendalikan sesuatu, yaitu dalam bentuk aturan-aturan Jika – Maka (If – Then Rules), sehingga proses pengendalian akan mengikuti pendekatan secara linguistik. Pada penelitian ini dirancang suatu sistem pengendalian suhu cairan pada Heat Exchanger dengan memanfaatkan mikrokontroler ATmega 8535 sebagai kontroler, dan logika Fuzzy sebagai metode penala konstanta kendali PI dengan tujuan mendapatkan respon sistem yang baik yaitu rise time yang cepat dan overshoot yang minimal.

II. DASAR TEORI

2.1 Kendali PI (Proporsional-Integral)

Untuk dapat mengimplementasikan sistem kendali PI pada komputer, PI harus diubah ke dalam persamaan diskrit. Gambar 2.1 adalah blok sistem aksi kontrol PI.



Gambar 2 Blok Sistem Aksi Kontrol Proporsional-Integral.

Pengolahan parameter-parameter PI menjadi konstanta-konstanta pengendalian secara diskrit sesuai dengan penjelasan perhitungan berikut. Berdasarkan Persamaan 1

dan dengan menggunakan Transformasi Laplace, didapatkan persamaan PI dalam kawasan s sebagai berikut.

$$co(s) = K_p E(s) + \frac{K_p}{T_i s} E(s)$$

$$co(s) = \frac{K_p s E(s) + \frac{K_p}{T_i} E(s)}{s}$$

$$sco(s) = K_p s E(s) + \frac{K_p}{T_i} E(s) \dots\dots\dots (1)$$

Persamaan 1 diubah kembali ke kawasan waktu, sehingga menjadi :

$$\frac{dco(t)}{dt} = K_p \frac{de(t)}{dt} + \frac{K_p}{T_i} e(t) \dots\dots\dots (2)$$

Persamaan 2 diubah ke dalam bentuk diskrit, digunakan Persamaan backward difference, di mana :

$$\frac{dco(t)}{dt} = \frac{co(k) - co(k-1)}{T} \quad \text{dan}$$

$$\frac{d^2co(t)}{dt^2} = \frac{co(k) - 2co(k-1) + co(k-2)}{T^2}$$

Sehingga Persamaan (2) menjadi:

$$\frac{co(k) - co(k-1)}{T} = K_p \left[\frac{e(k) - e(k-1)}{T} \right] + \frac{K_p}{T_i} e(k)$$

$$co(k) - co(k-1) = K_p [e(k) - e(k-1)] + \frac{K_p T}{T_i} e(k)$$

$$co(k) = co(k-1) + \left[K_p + \frac{K_p T}{T_i} \right] e(k) - [K_p] e(k-1) \dots\dots\dots (3)$$

Persamaan 3 menunjukkan persamaan pengendali PI dalam bentuk diskrit. Dari Persamaan 3 dapat diketahui bahwa pengendali PI menggunakan konstanta-konstanta pengendalian sebagai berikut :

$$co(k) = co(k-1) + K_2 e(k) - K_3 e(k-1) \dots\dots\dots (4)$$

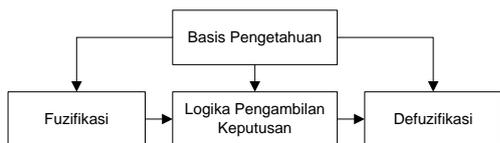
dengan

$$K_2 = (K_p + K_i) \Rightarrow K_1 = \frac{K_p T}{T_i} \dots\dots\dots (5)$$

$$K_3 = K_p \dots\dots\dots (6)$$

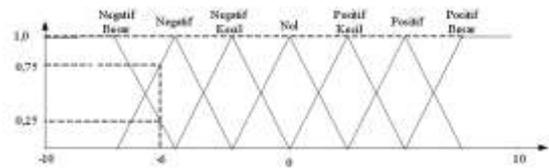
2.2 Logika Fuzzy

Fuzzy berarti samar, kabur atau tidak jelas. Fuzzy adalah istilah yang dipakai oleh Lotfi A Zadeh pada bulan Juli 1964 untuk menyatakan kelompok / himpunan yang dapat dibedakan dengan himpunan lain berdasarkan derajat keanggotaan dengan batasan yang tidak begitu jelas (samar), tidak seperti himpunan klasik yang membedakan keanggotaan himpunan menjadi dua, himpunan anggota atau bukan anggota. Gambar 3 menunjukkan struktur dasar pengendalian Fuzzy.



Gambar 3 Struktur dasar pengendali Fuzzy.

Kendali logika Fuzzy dilakukan dalam tiga tahap, yaitu fuzzifikasi, evaluasi aturan dan defuzzifikasi. Komponen Fuzifikasi berfungsi untuk memetakan masukan data tegas ke dalam himpunan Fuzzy menjadi nilai Fuzzy dari beberapa variabel linguistik masukan. Gambar 4 menunjukkan proses Fuzzifikasi



Gambar 4 Proses Fuzzifikasi.

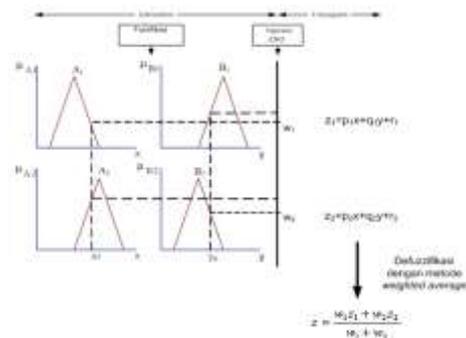
Basis pengetahuan berisi pengetahuan sistem kendali sebagai pedoman evaluasi keadaan sistem untuk mendapatkan keluaran kendali sesuai yang diinginkan perancang. Basis pengetahuan terdiri dari basis data dan basis aturan Fuzzy.

1. Basis Data
Basis data merupakan komponen untuk mendefinisikan himpunan Fuzzy dari masukan dan keluaran.
2. Basis Aturan Fuzzy
Basis Aturan Fuzzy merupakan kumpulan pernyataan aturan 'IF-THEN' yang didasarkan kepada pengetahuan pakar.

Metode yang digunakan dalam penentuan basis aturan Fuzzy adalah menggunakan metode *trial and error*. Logika pengambilan keputusan disusun dengan cara menuliskan aturan yang menghubungkan antara masukan dan keluaran sistem Fuzzy. Aturan ini diekspresikan dalam kalimat: 'jika <masukan> maka <keluaran>'. Metode ini mempunyai bentuk aturan seperti persamaan 7

$$\text{IF } x \text{ is } A \text{ and } y \text{ is } B \text{ then } z = C \quad (7)$$

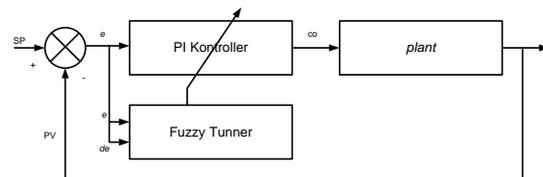
Defuzzifikasi dapat didefinisikan sebagai proses perubahan besaran Fuzzy yang disajikan dalam bentuk himpunan-himpunan Fuzzy keluaran dengan fungsi keanggotaan untuk mendapatkan kembali bentuk tegasnya (*crisp*). Gambar 5 menunjukkan proses pengambilan keputusan metode sugeno.



Gambar 5 Proses pengambilan keputusan metode Sugeno.

2.3 Metode Fuzzy Multiterm Controllers

Pada metode *Fuzzy Multiterm Controllers*, logika Fuzzy akan dipergunakan untuk menala atau mengadaptasi sebuah kontroler *multiterm* seperti kontroler PD, PI atau PID seperti yang terlihat pada Gambar 6.



Gambar 6 Kontroler PI yang diadaptasi oleh fuzzy sebagai tuning.

Kontroler PI dapat direpresentasikan oleh salah satu dari dua bentuk berikut yaitu

1. Bentuk Kontinyu :

$$co(t) = Kp.e(t) + Ki \int e(t)dt$$

2. Bentuk Diskrit :

$$co(k) = Kp.e(k) + KiTs \sum_{i=1}^n e(i)$$

Dimana Kp dan Ki masing-masing adalah konstanta Proporsional, dan konstanta Integral, Nilai $Ti = Kp/Ki$, sering dikenal sebagai konstanta waktu integral, $\Delta e(k) = e(k)-e(k-1)$, Ts adalah periode sampling dan n adalah jumlah sampel data. Pendekatan dasar dalam mengadaptasi kontroler *multiterm* (kontroler PI) dengan menggunakan logika Fuzzy adalah dengan merencanakan *supervisory rules* dari Fuzzy tersebut dengan aturan (rule) berikut ini :

- IF $e(k)$ is A_i and $\Delta e(k)$ is B_i , THEN Kp is C_i and Ki is D_i (8)

Dimana, A_i , B_i , C_i , dan D_i adalah variabel linguistik dari rule ke-I ($i = 1, 2, \dots, m$) yang dapat direpresentasikan dengan fungsi keanggotaan tertentu.

2.4 Model Kontrol Proses Temperatur pada Sistem Heat Exchanger

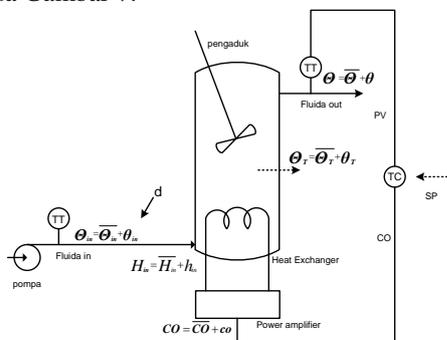
Dalam mendapatkan model kontrol dari suatu proses temperatur fluida dapat dilakukan dengan menerapkan hukum kesetimbangan energi di sekitar daerah kerjanya, maka model matematis antara output proses (deviasi temperature output) terhadap perubahan input yang terjadi dalam proses tersebut dapat dicari sebagai berikut.

$$\frac{d}{dt}(V\rho c\theta_T(t)) = cw\theta_T + h_{in} \dots (9)$$

Dimana:

- V : volume tangki (konstan) dalam m^3
- w : laju aliran fluida dalam keadaan *steady* dalam kg/menit
- ρ : densitas fluida (konstan) dalam kg/m^3
- c : Kalar jenis fluida (konstan) dalam $J/(Kg.^{\circ}C)$
- θ_{in} : perubahan temperatur fluida input di sekitar nilai *steady* awalnya ($^{\circ}C$)
- θ_T : perubahan temperatur fluida tangki di sekitar nilai *steady* awalnya ($^{\circ}C$)
- h_{in} : perubahan laju kalor masukan di sekitar nilai *steady* awalnya (J/menit)

Model kontrol proses temperatur pada Heat Exchanger dapat dilihat pada Gambar 7.



Gambar 7 Sistem Kontrol Heat Exchanger

Jika penguat daya yang digunakan bersifat *linear*, perubahan laju kalor masukan akan sebanding dengan besar perubahan sinyal control co (%):

$$h_{in} = K_{ps} \cdot co \dots (10)$$

Dengan mensubstitusikan persamaan (9) pada persamaan (10) serta dengan sedikit penyederhanaan akan diperoleh persamaan *diferensial*.

$$\frac{V\rho c}{w} \frac{d}{dt}(\theta_T(t)) = \theta_{in} - \theta_T + \frac{K_{ps}cc}{cw} \dots (11)$$

Atau dapat ditulis

$$T \frac{d}{dt}(\theta_T(T)) = \theta_{in} - \theta_T + Kco \dots (12)$$

Dalam hal ini, konstanta waktu proses.

$$T = \frac{V\rho c}{w} \dots (13)$$

Dan gain statis proses.

$$K = \frac{K_{ps}}{cw} \dots (14)$$

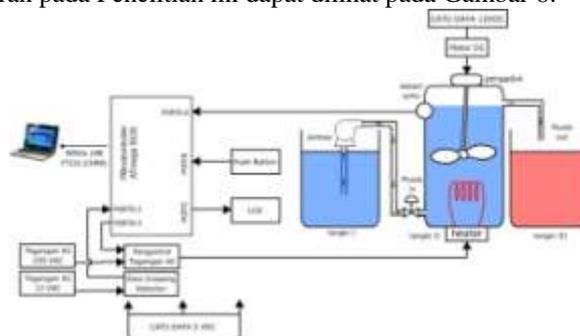
Dengan mencari transformasi Laplace untuk kedua ruas persamaan (12) diatas, akan diperoleh persamaan berikut.

$$\theta_T(s) = \frac{K}{Ts+1} co(s) + \frac{1}{Ts+1} \theta_{in}(s) \dots (15)$$

III. PERANCANGAN PERANGKAT KERAS

3.1 Perancangan Perangkat Keras

Blok rancangan perangkat keras sistem pengaturan suhu cairan pada Penelitian ini dapat dilihat pada Gambar 8.



Gambar 8 Rancangan plant kendali suhu cairan.

Penjelasan dari masing-masing blok sistem pengendali suhu cairan sebagai berikut :

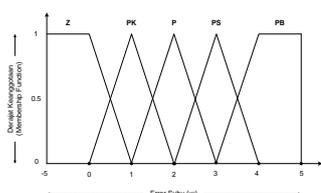
1. Sensor LM35 merupakan sensor yang akan mendeteksi kenaikan suhu pada tangki *heat exchanger*.
2. Sebuah *water heater* dengan daya 1000 watt dengan sumber tegangan AC sebagai *aktuator*.
3. *Push Button* sebagai masukan untuk mengatur *set point* suhu cairan dan menjalankan proses pengendalian.
4. LCD (*Liquid Crystal Display*) dan *driver LCD* berfungsi sebagai media tampilan.
5. *Zero crossing detector* adalah rangkaian yang digunakan untuk mendeteksi gelombang sinus tegangan jala-jala AC 220 V ketika melalui persimpangan titik nol.
6. Rangkaian pengendali tegangan AC berfungsi untuk kendali tegangan beban dengan memberi waktu tunda pemucuan *triac*. Komponen utama pengatur tegangan AC berupa *triac* dan optoisolator *MOC3021*.
7. Pompa berfungsi menyalurkan cairan yang akan dipanaskan pada plant *heat exchanger*.
8. Catu daya berfungsi sebagai suplai sistem keseluruhan.
9. Mikrokontroler AVR ATmega 8535 yang berfungsi sebagai pusat pengendalian pada sistem pengatur suhu cairan ini dapat diprogram dengan menggunakan bahasa *C embedded*.

3.2 Program Fuzzy Sebagai Tuning Kendali PI.

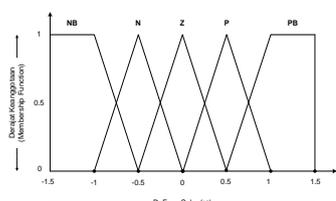
A. Fuzzifikasi

Tahapan awal proses Fuzzifikasi adalah menentukan parameter-parameter fungsi keanggotaan pada setiap himpunan Fuzzy masukan. Pada pemrograman Fuzzifikasi ini

digunakan parameter fungsi keanggotaan masukan berupa *error* dan *d_error*. Fungsi keanggotaan dapat dilihat pada Gambar 9 dan Gambar 10.



Gambar 9 Fungsi keanggotaan *error* suhu.



Gambar 10 Fungsi keanggotaan *d_error* suhu.

B. Evaluasi aturan

Evaluasi aturan adalah proses mengevaluasi derajat keanggotaan tiap-tiap fungsi keanggotaan himpunan Fuzzy masukan ke dalam basis aturan yang telah ditetapkan. Basis aturan yang dibuat berdasarkan tingkah laku plant yang diinginkan. Keluaran Fuzzy akan menentukan nilai konstanta PI. Dua puluh lima aturan yang digunakan terlihat pada Tabel 1 dan Tabel 2.

Tabel 1 Basis Aturan tuning PI dengan Logika Fuzzy untuk Konstanta Kp.

D_Error / Error	NB	N	Z	P	PB
Z	KS	KS	KS	KS	KS
PK	K	S	S	S	K
P	S	B	B	B	S
PS	B	BS	BS	BS	B
PB	BS	BS	BS	BS	BS

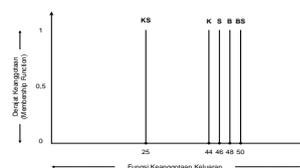
Tabel 2 Basis Aturan tuning PI dengan Logika Fuzzy untuk Konstanta Ki.

D_Error / Error	NB	N	Z	P	PB
Z	KS	KS	KS	KS	KS
PK	K	S	S	S	K
P	S	B	B	B	S
PS	B	BS	BS	BS	B
PB	BS	BS	BS	BS	BS

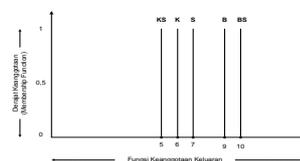
Metode pengambilan keputusan (inferensi) yang digunakan dalam pemrograman ini adalah metode Max-Min. Setelah semua aturan fuzzy dieksekusi, dilakukan proses agregasi dengan mengambil nilai maksimal dari masing-masing fungsi keanggotaan variabel keluaran.

C. Defuzzifikasi

Defuzzifikasi, yaitu mengubah himpunan Fuzzy keluaran menjadi keluaran tegas (*crisp*). Pengubahan ini diperlukan karena konstanta kendali PI hanya mengenal nilai tegas sebagai variabel parameter. Perancangan ini, menggunakan sebuah himpunan Fuzzy keluaran dengan fungsi keanggotaannya berupa *singleton*, seperti tampak pada Gambar 11 dan Gambar 12.



Gambar 11 Fungsi keanggotaan keluaran konstanta Kp.

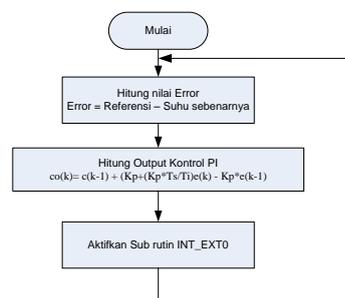


Gambar 12 Fungsi keanggotaan keluaran konstanta Ki.

Nilai tegas (*crisp*) keluaran diperoleh dari himpunan-himpunan Fuzzy keluaran dengan menggunakan metode rata-rata terbobot.

3.3 Program Kendali PI.

Pada penelitian ini digunakan kendali PI untuk mendapatkan tinggi muka cairan yang diinginkan. Nilai konstanta Kp dan Ki diperoleh dari Sistem Fuzzy sebagai penala. Perhitungan dengan algoritma PI dimulai dengan menghitung *error* antara *setpoint* level dengan level sebenarnya. *Error* digunakan sebagai masukan pada kendali PI. Diagram alir proses pengontrolan dengan menggunakan algoritma kendali PI digital ditunjukkan dalam Gambar 13.



Gambar 13 Diagram alir algoritma PI.

IV. PENGUJIAN DAN ANALISA

4.1 Pengujian Sensor LM35

Pengujian sensor LM35 dilakukan dengan mengukur suhu pada *plant* terhadap suhu *setpoint*. Pembacaan sensor dibatasi pada suhu 30 °C – 60 °C. Tabel 3 terlihat bahwa sensor LM35 memiliki *error* sebesar 0.1-0.3 °C. Data hasil pengukuran yang dilakukan adalah sebagai berikut.

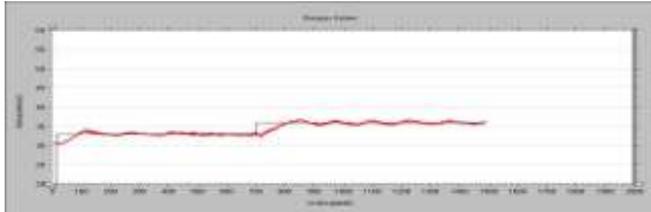
Tabel 3 Hasil perbandingan suhu pembacaan termometer dengan pembacaan sensor LM35.

No	Suhu terukur (°C)	Sensor LM35
1	30	29.9
2	35	35.2
3	37	36.9
4	41	40.7
5	45	45.3
6	47	47.2
7	54	53.9
8	57	56.8

4.2 Pengujian Respon Sistem dengan PC.

A. Pengujian dengan Nilai Referensi Naik

Respon dengan nilai referensi naik dapat dilihat pada Gambar 14.

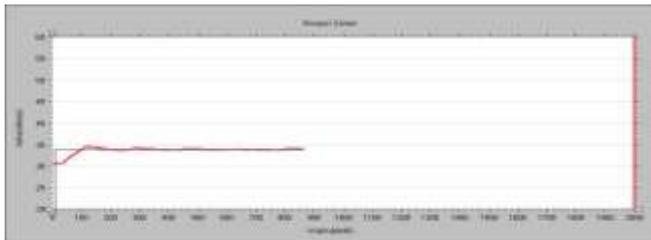


Gambar 14 Respon sistem dengan pemberian referensi naik 34 °C, 36 °C.

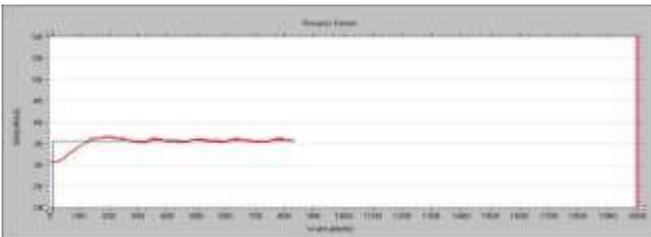
Gambar 14 adalah gambar respon kendali suhu dengan referensi naik 34 °C dan 36 °C. Saat referensi 34 °C. Waktu tunda (t_d) 39 detik, waktu naik (t_r) 62 detik. Selama 46 detik sistem mengalami *offset* sebesar 0.8 °C. Saat referensi 36 °C. Waktu tunda (t_d) 57 detik, waktu naik (t_r) 92 detik. Selama 38 detik sistem mengalami *offset* sebesar 0.5 °C.

B. Respon sistem kendali suhu tanpa gangguan.

Respon sistem suhu tanpa gangguan dengan referensi suhu yang berbeda yaitu 34 °C dan 36 °C. Respon sistem dapat dilihat pada Gambar 15, Gambar 16.



Gambar 15 Tanggapan sistem kendali suhu tanpa gangguan dengan referensi 34 °C.



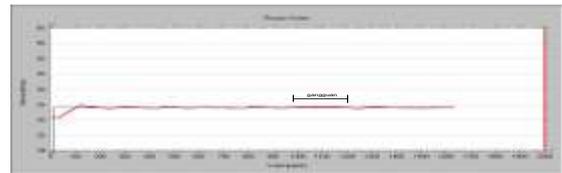
Gambar 16 Tanggapan sistem kendali suhu tanpa gangguan dengan referensi 36 °C.

Gambar 15 adalah grafik respon kendali suhu dengan referensi 34 °C. Waktu tunda (t_d) yang diperlukan adalah 46 detik, waktu naik (t_r) 74 detik. Gambar 16 adalah grafik respon kendali suhu dengan referensi 36 °C. Waktu tunda (t_d) yang diperlukan adalah 64 detik, waktu naik (t_r) 102 detik.

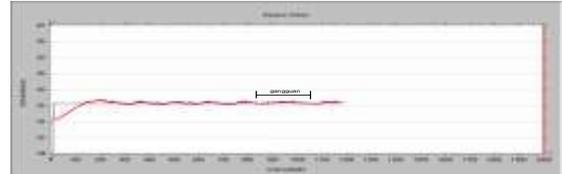
C. Respon sistem Kendali suhu terhadap gangguan.

Gangguan pada sistem kendali suhu dilakukan dengan pengujian pengaruh gangguan sesaat dan gangguan kontinyu.

Respon gangguan sesaat pada sistem kendali suhu dilakukan dengan cara memberikan gangguan aliran dengan menutup penuh *valve* selama 30 detik, kemudian mengembalikan bukaan *valve* ke posisi awalnya. Hasil pengujian respon sitem ditunjukkan pada Gambar 17 dan Gambar 18.



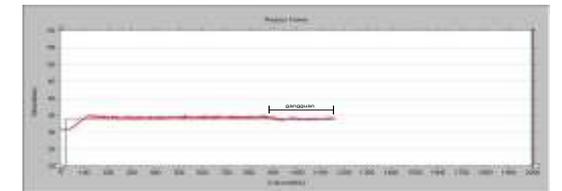
Gambar 17 Tanggapan sistem kendali suhu dengan gangguan sesaat dengan referensi 34 °C.



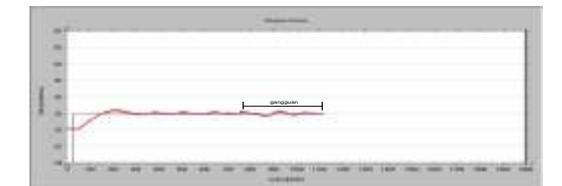
Gambar 18 Tanggapan sistem kendali suhu dengan gangguan sesaat dengan referensi 36°C.

Pada Gambar 17 dengan referensi 34 °C, gangguan diberikan dengan menutup aliran *inlet* pada waktu 950 detik selama 30 detik, kemudian mengembalikan *valve* ke posisi awalnya. Pada waktu 1000 detik suhu sistem naik sampai suhu tertinggi yaitu 34,54 °C. Waktu pemulihan 220 detik setelah terjadi lonjakan. Pada Gambar 18 dengan referensi 36 °C, gangguan diberikan dengan menutup aliran *inlet* pada waktu 800 detik selama 30 detik, kemudian mengembalikan *valve* ke posisi awalnya. Pada waktu 850 detik suhu sistem berangsur-angsur naik sampai suhu tertinggi 36,46 °C. Waktu pemulihan 200 detik setelah terjadi lonjakan.

Pengaruh gangguan kontinyu pada sistem kendali suhu dilakukan dengan cara memberikan tambahan aliran pada bagian *inlet* plant secara kontinyu. Pemberian tambahan aliran *inlet* dilakukan dengan cara membuka penuh bukaan *valve*. Hasil pengujian respon sitem ditunjukkan pada Gambar 19 dan Gambar 20.



Gambar 19 Tanggapan sistem kendali suhu dengan gangguan kontinyu dengan referensi 34 °C.



Gambar 20 Tanggapan sistem kendali suhu dengan gangguan kontinyu dengan referensi 36 °C.

Pada Gambar 19 menunjukkan respon sistem kendali suhu dengan gangguan kontinyu pada referensi 34 °C, gangguan diberikan dengan memberikan aliran *inlet* pada waktu 850 detik, selama 90 detik suhu sistem berangsur-angsur turun sampai suhu terendah yaitu 33,87 °C kemudian naik kembali hingga kembali ke keadaan *steady*. Pada Gambar 20 menunjukkan respon sistem suhu dengan gangguan kontinyu pada referensi 36 °C, gangguan kontinyu diberikan dengan memberikan aliran *inlet* pada waktu 750 detik, selama 210 detik suhu sistem mengalami *offset* tunak sebesar 0.88 °C, kemudian pada detik 1010 sistem kembali ke keadaan *steady*.

V. PENUTUP

5.1 Kesimpulan

1. Pada pengujian dengan nilai referensi naik, untuk suhu referensi 34 °C. Waktu tunda (t_d) 39 detik, waktu naik (t_r) 62 detik. Sedangkan dengan referensi 36 °C. Respon sistem stabil tidak terjadi kesalahan keadaan tunak, setelah detik ke 1500 pengujian dihentikan. Waktu tunda (t_d) 57 detik, waktu naik (t_r) 92 detik.
2. Pada pengujian dengan nilai referensi tetap, sistem mampu menghasilkan respon yang baik yaitu *rise time* yang cepat dan overshoot yang tidak terlalu besar, untuk referensi 34 °C menghasilkan waktu tunda (t_d) 46 detik, waktu naik (t_r) 74 detik, untuk referensi 36 °C menghasilkan waktu tunda (t_d) 64 detik, waktu naik (t_r) 102 detik.
3. Pengujian gangguan sesaat, saat aliran berhenti selama 30 detik, kemudian aliran mengalir sesuai keadaan awalnya, untuk referensi 34 °C terjadi *offset* keadaan tunak sebesar 0.54 °C, diperlukan waktu 220 detik untuk mencapai kestabilan. Sedangkan untuk referensi 36 °C terjadi *offset* keadaan tunak sebesar 0.46 °C, diperlukan waktu 200 detik untuk mencapai kestabilan.
4. Pengujian gangguan kontinyu, saat diberikan perubahan debit pada sisi *inlet*, untuk suhu 34 °C, selama 90 detik suhu sistem turun sampai suhu terendah yaitu 33,87 °C kemudian naik kembali hingga keadaan *steady*. Sedangkan untuk referensi 36 °C, selama 210 detik suhu sistem mengalami *offset* tunak sebesar 0.88 °C, kemudian pada detik 1010 sistem kembali ke keadaan *steady*.

5.2 Saran

1. Dapat dilakukan perancangan kembali penalaan konstanta PI dengan logika Fuzzy, dengan basis aturan maupun fungsi keanggotaan (masukan/keluaran) yang berbeda untuk memperoleh respon sistem yang lebih baik dan memuaskan.
2. Dapat dilakukan pengendalian suhu *heat exchanger* dengan metode *gain scheduling*, adaptif STR (*Self Tuning Regulator*), dan jaringan saraf tiruan.

Daftar Pustaka

- (1) Bhakti, Dheka, K.W., *Skripsi : Pengendalian Suhu Secara Cascade Control Menggunakan Proporsional – Integral Berbasis Mikrokontroler Atmega 8535*, Teknik Elektro, Universitas Diponegoro, Semarang.
- (2) Gunterus, Frans, *Falsafah Dasar: Sistem Pengendalian Proses*, PT Elex Media Komputindo, Jakarta, 1997.
- (3) Heryanto, M. Ary dan Wisnu Adi P, *Pemrograman Bahasa C Untuk Mikrokontroler AT MEGA 8535*, Penerbit Andi, Yogyakarta, 2008.
- (4) Kurniawan, David, *Skripsi : Kontrol Mobile Robot Penjejak Objek Bergerak Berbasis Logika Fuzzy*, Teknik Elektro, Universitas Diponegoro, Semarang.
- (5) Kusumadewi, Sri, “*Artificial Intelligence Teknik dan Aplikasinya*”. Jogjakarta: Graha Ilmu. 2003.
- (6) Setiawan, Iwan., *Kontrol PID untuk Proses Industri*, PT. Elex Media Komputindo, Jakarta, 2008.
- (7) Tigor, Eduward, *Skripsi : Tuning Parameter Proporsional – Integral dengan FL (Fuzzy Logic) untuk Pengaturan Level Air Berbasis Mikrokontroler Atmega 8535*, Teknik Elektro, Universitas Diponegoro, Semarang.