

PENGENDALIAN TEMPERATURE PADA PLANT SEDERHANA ELECTRIC FURNACE BERBASIS SENSOR THERMOCOUPLE DENGAN METODE KONTROL PID

Zabib Bashori, Sumardi, and Iwan Setiawan

Jurusan Teknik Elektro, Universitas Diponegoro Semarang
Jl. Prof. Sudharto, SH, Kampus UNDIP Tembalang, Semarang 50275, Indonesia

**)Email : abibz82@gmail.com*

Abstrak

Furnace adalah suatu peralatan yang digunakan untuk memanaskan bahan industri baik minyak ataupun baja dan sebagainya, dimana biasanya menggunakan bahan bakar minyak, gas atau batu bara. Namun saat ini sudah ada pula Furnace yang menggunakan energi listrik. Dalam Penelitian ini mensimulasikan sebuah *plant electric furnace* sebagai media pemanasan yang lebih ramah lingkungan dan safety. Sensor yang digunakan untuk plant sederhana *Electric furnace* ini adalah sensor *thermocouple* yang banyak digunakan pada industri-industri pengolahan minyak ataubaja, karena sensor ini mampu untuk mengukur temperature yang tinggi. Sensor *thermocouple* mempunyai tegangan keluaran yang sangat kecil dengan noise yang besar sehingga diperlukan suatu pengkondisi sinyal agar keluaran sensor *thermocouple* dapat terbaca stabil oleh mikrokontroler dimana mikrokontroler yang digunakan adalah ATmega8535. Dalam pengontrolannya nanti digunakan suatu metode kontrol yang sudah sering dijumpai di bidang industri yakni metode kontrol Proporsional-Integral-Derifativ(PID). Metode control Proporsional-Integral-Derifativ (PID) merupakan sebuah metode kontrol yang banyak diterapkan di bidang industri sampai saat ini. Kontroler ini memiliki parameter-parameter pengontrol, yaitu konstanta proporsional (Kp) dan konstanta integral(Ki) dan konstanta derifativ (Kd). Pada metode PID konvensional, ketiga parameter tersebut diturunkan dari perhitungan matematis. Salah satu metode penalaan parameter PID yang sering dipakai adalah metode penalaan *Ziegler-Nichols*.

Kata kunci: Electric Furnace, PID (Proporsional-Integral-Derifativ), Thermocouple, Mikrokontroler ATmega 8535, Ziegler-Nichols.

Abstract

Furnace is an equipment used to heat the oil industry either material or steel etc, which usually using fuel oil, gas or coal. But nowd there are also Furnace that uses electrical energy. The final task is to simulate an electric furnace plant as heating media more environmentally friendly and safety. Sensor used for simple plant Electric furnace was thermocouple sensor where widely used in petroleum processing industries or steel, because the sensor is able to measure high temperatures. Thermocouple sensor output voltage has a very small with a big noise thus a signal conditioner is used that thermocouple sensor output can be read by the microcontroller where the microcontroller used is ATmega8535 microcontroller. In controlling, used a method of control that is often found in the industrial field is Proportional-Integral-Derifativ (PID) control method. Proportional-Integral -Derifativ (PID) control method is a method widely applied in industry today. This controller has controller parameters, the proportional constant (Kp), integral constants (Ki) and derifativ constant (Kd). In the conventional PID method, the three parameters are derived from mathematical calculations. One method for tuning the parameters PID whereoften used is *Ziegler-Nichols* tuning method.

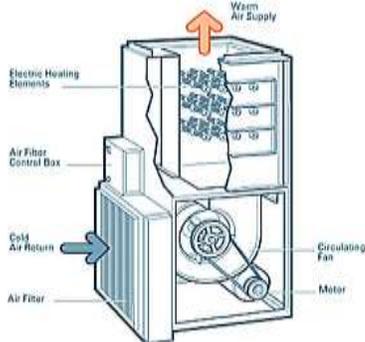
Keyword: Electric Furnace, PID (Proporsional-Integral-Derifativ), Thermocouple, Mikrokontroler ATmega 8535, Ziegler-Nichols.

1. 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 pada *Electric*

Furnace. Salah satu jenis *Electric Furnace* ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Gambar proses pada *Electric Furnace*^[10].

Electric Furnace adalah peralatan yang biasa digunakan dalam peleburan bijih logam pada proses industri sebelum dicetak menjadi logam yang diinginkan. Penelitian ini merancang aplikasi kontrol pada plant sederhana *Electric Furnace* dengan mikrokontroler AVR Atmega8535. Desain aplikasi kontrol ini dapat diterapkan pada pengaturan *temperature* yang dikehendaki untuk pemodelan system *Electric Furnace*. Pengontrolan suhu tersebut dilakukan dengan menggunakan metode kontrol *Proporsional, Integral, dan Derivatif (PID)* dan diharapkan memberikan pemanasan efisien dan sesuai yang diharapkan.

2. Metode

2.1. Sensor Thermocouple

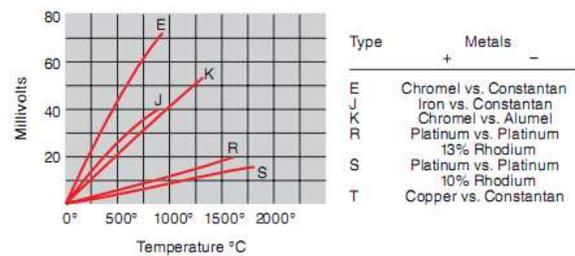
Thermocouple adalah transduser aktif suhu yang tersusun dari dua buah logam berbeda dengan titik pembacaan pada pertemuan kedua logam dan titik yang lain sebagai outputnya. *Thermocouple* merupakan salah satu sensor yang paling umum digunakan untuk mengukur suhu karena relative murah namun akurat yang dapat beroperasi pada suhu panas maupun dingin.

Fenomena termo elektrik pertama kali ditemukan tahun 1821 oleh ilmuwan Jerman, Thomas Johann Seebeck. Ia menghubungkan tembaga dan besi dalam sebuah rangkaian. Di antara kedua logam tersebut lalu diletakkan jarum kompas. Ketika sisi logam tersebut dipanaskan, jarum kompas ternyata bergerak. Belakangan diketahui, hal ini terjadi karena aliran listrik yang terjadi pada logam menimbulkan medan magnet. Medan magnet inilah yang menggerakkan jarum kompas. Fenomena tersebut kemudian dikenal dengan efek Seebeck.

Penemuan Seebeck ini memberikan inspirasi pada Jean Charles Peltier untuk melihat kebalikan dari fenomena tersebut. Dia mengalirkan listrik pada dua buah logam yang

direkatkan dalam sebuah rangkaian. Ketika arus listrik dialirkan, terjadi penyerapan panas pada sambungan kedua logam tersebut dan pelepasan panas pada sambungan yang lainnya.

Pelepasan dan penyerapan panas ini saling berbalik begitu arah arus dibalik. Penemuan yang terjadi pada tahun 1934 ini kemudian dikenal dengan efek Peltier. Sir William Thomson, menemukan arah arus mengalir dari titik panas ke titik dingin dan sebaliknya. Efek Seebeck, Peltier, dan Thomson inilah yang kemudian menjadi dasar pengembangan teknologi termoelektrik.



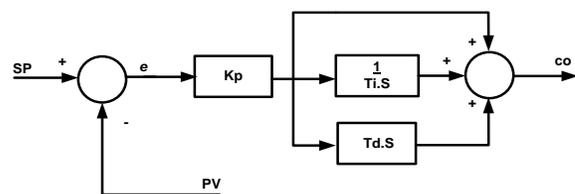
Gambar 2. Grafik *thermocouple*^[11].

2.2. Kontrol Proporsional, Integral, dan Derivatif (PID)

Kontrol PID merupakan gabungan dari tiga macam metode pengontrol, yaitu pengontrol proporsional (*Proportional Controller*), pengontrol integral (*Integral Controller*), dan pengontrol turunan (*Derivative Controller*). Tujuan dari penggabungan ketiga macam pengontrol tersebut adalah untuk memperbaiki kinerja sistem dimana masing-masing pengontrol akan saling melengkapi dan menutupi dengan kelemahan dan kelebihan masing-masing. Struktur kontrol PID ideal merupakan struktur kontrol PID yang umum dijumpai.

Struktur control ini dikenal juga dengan nama struktur kontrol PID tipe A atau struktur kontrol PID parallel atau struktur kontrol PID *non – interacting*^[9].

Gambar 3 menunjukkan struktur kontrol PID ideal.



Gambar 3. Struktur kontrol PID ideal bentuk *dependen*^[9].

Persamaan 1 memperlihatkan bentuk umum dari kontrol PID ideal dalam bentuk kontinyu.

$$CO(t) = K_p \left(e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt + T_d \cdot \frac{de(t)}{dt} \right) \dots\dots\dots (1)^{[9]}$$

dengan:

- CO(t) = output kontroler atau sinyal kontrol,
- e(t) = error (e = SP - PV),
- K_p = gain proporsional,
- T_i = waktu integral,
- T_d = waktu derivatif.

Realisasi kontrol PID digital akan ditemukan dalam sistem berbasis mikroprosesor. Sistem kontrol PID digital bekerja dalam basis-basis waktu diskret, sehingga persamaan matematis diskret diperlukan untuk aplikasi kontrol PID ke dalam sistem mikroprosesor. Dari Persamaan 1, kontrol PID ideal dalam kawasan diskret yang ditanam ke dalam sistem mikroprosesor memiliki bentuk seperti pada Persamaan 2.

$$CO(k) = CO_p(k) + CO_i(k) + CO_d(k) \dots\dots\dots (2)^{[9]}$$

dengan

$$CO_p(k) = K_p \cdot e(k) \dots\dots\dots (3)^{[9]}$$

$$CO_i(k) = CO_i(k-1) + \frac{K_p T_c}{T_i} e(k) \dots\dots\dots (4)^{[9]}$$

$$CO_d(k) = K_p T_d \frac{(e(k) - e(k-1))}{T_c} \dots\dots\dots (5)^{[9]}$$

Aksi kontrol PID pada dasarnya bertujuan untuk menggabungkan kelebihan komponen-komponen dasar kontrol PID. Komponen kontrol proporsional berfungsi untuk mempercepat respon. Komponen kontrol integral ini berfungsi untuk menghilangkan *error steady* yang terjadi pada respon sistemnya. Komponen kontrol derivatif berfungsi untuk memperbaiki sekaligus mempercepat respon transien.

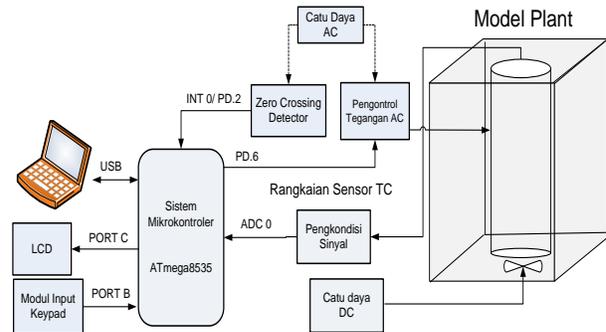
Pengetahuan tentang efek yang diakibatkan oleh masing-masing kontroler tersebut yang nantinya akan digunakan dalam penentuan nilai parameter seperti *gain* proporsional (K_p), waktu integral (T_i), dan waktu derivatif (T_d). Tabel basis pengetahuan hubungan antara penentuan parameter dan efek pada pengontrol PID diperlihatkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Efek dari kontroler P, I, dan D^[9].

	Rise time	Overshoot	Settling time	Kestabilan
Pembesaran K _p	-	+	Sedikit+	-
Pengcilan T _i	Sedikit-	+	+	-
Pembesaran T _d	Sedikit -	-	-	+

2.3. Perancangan Perangkat Keras

Blok rancangan perangkat keras sistem pengaturan suhu cairan pada Penelitian ini dapat dilihat pada Gambar 4.



Gambar 4. Rancangan plant kendali temperatur.

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

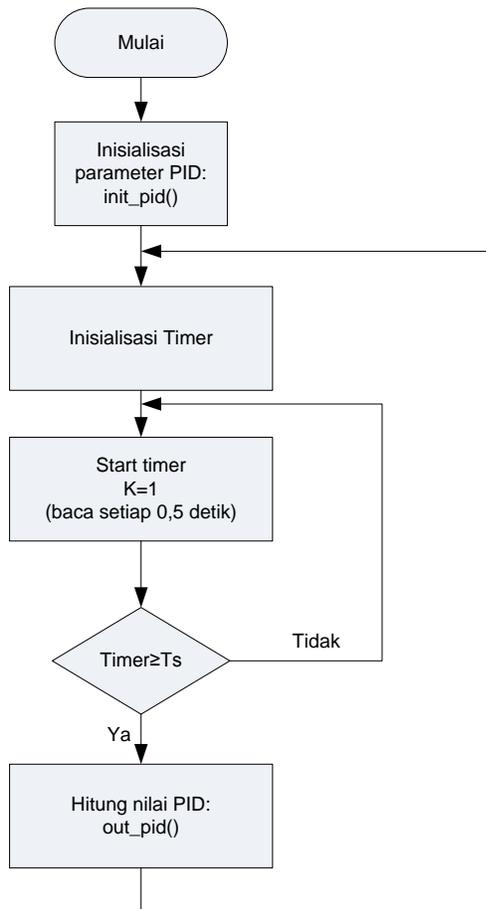
1. Mikrokontroler AVR ATmega8535 yang berfungsi sebagai pusat pengendalian pada sistem pengatur suhu ini dapat diprogram dengan menggunakan bahasa C *embedded*.
2. Keypad berfungsi sebagai unit masukan untuk mengatur *set point* suhu.
3. LCD (*Liquid Crystal Display*) dan *driver* LCD berfungsi sebagai media tampilan selama proses pengendalian berlangsung.
4. *Zero crossing detector* adalah rangkaian yang digunakan untuk mendeteksi gelombang sinus tegangan jala-jala AC 220 V ketika melalui persimpangan titik nol.
5. Rangkaian pengendali tegangan AC adalah rangkaian yang berfungsi untuk mengendalikan tegangan beban dengan memberi waktu tunda pemucuan *triac*. Komponen utama pengatur tegangan AC berupa *triac* dan optoisolator MOC3021.
6. Personal komputer sebagai unit monitoring yang akan menampilkan data suhu berupa grafik respon sistem. Grafik ini selanjutnya dapat digunakan untuk keperluan analisis.
7. Pengkondisi sinyal *thermocouple* berfungsi untuk mengkondisikan sinyal analog berupa tegangan dari *thermocouple* yang relatif sangat kecil, untuk dikuatkan sehingga dapat dibaca oleh Mikrokontroler melalui ADC (*Analog to Digital Converter*).

2.4. Perancangan Perangkat Lunak

2.4.1. Program Kontrol PID

Pada penelitian ini digunakan metode kontrol PID untuk mengendalikan suhu. Nilai parameter K_p, T_i, dan T_d sudah

dideklarasikan pada fungsi `init_pid()`, sedangkan nilai parameter T_s dideklarasikan pada inisialisasi awal program utama. *Error* digunakan sebagai masukan pada kontrol PID. Prosedur kontrol PID dipanggil dalam program utama. Gambar 5 menunjukkan diagram alir proses pengontrolan dengan menggunakan algoritma kontrol PID digital.



Gambar 5. Diagram alir control.

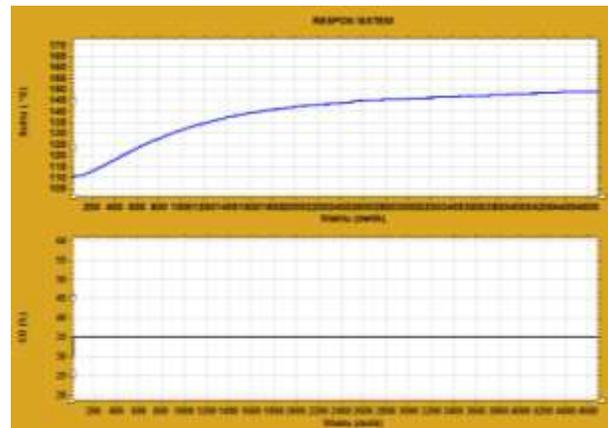
Sub rutin kontrol PID dibuat suatu prosedur untuk memudahkan dalam pemrograman sehingga dapat dipanggil pada program utama. Pada *plant model electric furnace* perancangan sistem kontrol dilakukan dengan waktu naik yang harus cepat. Perhitungan dengan algoritma PID dimulai dengan menghitung *error* antara *setpoint* suhu dengan suhu sebenarnya. Untuk mendapatkan aksi kontrol PID yang baik pada *plant* maka digunakan *anti wind up* pada algoritma kontrol PID yang dirancang. Pada fungsi `out_pid()` nilai T_s telah dideklarasikan pada inisialisasi program utama. T_s merupakan tetapan waktu *sampling* atau waktu cuplik (T_c) yang dimiliki algoritma kontrol PID. T_s pada perancangan

pengontrolan suhu *plant model electric furnace* adalah sebesar 0,5.

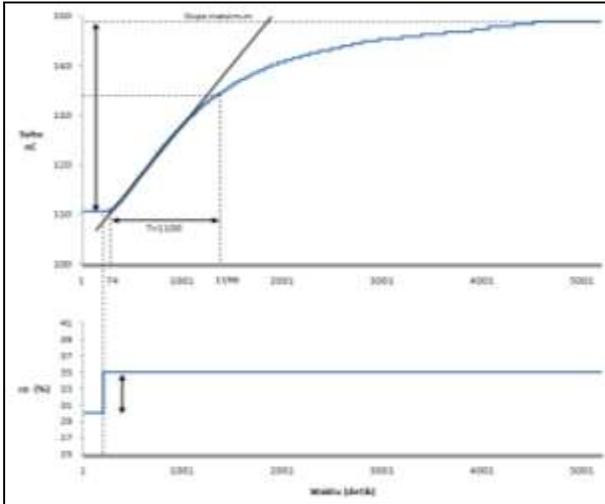
Tugas Akhir ini dirancang mempunyai sinyal kontrol (CO) maksimal 100% dan minimal 0%. CO 100% merupakan CO saat *heater* dipanaskan dengan tegangan penuh atau saat TCNT0 255, sedangkan CO 0% merupakan CO saat TCNT0 bernilai 0, pada Penelitian ini CO 0% bernilai 0 V, hal ini dikarenakan interupsi pada *Int0* dan *Timer0* yang digunakan hanya 8 bit saja, sehingga mempunyai nilai maksimal 255.

2.4.2. Penalaan Parameter PID

Untuk mengetahui karakteristik proses dari *plant* pengatur suhu yang akan dikendalikan dapat dilakukan dengan menganalisis respon sistem *open loop*. Pada awalnya *plant* diberi masukan berupa sinyal kontrol (*co*) pada *heater* sebesar 30%, setelah sistem stabil sinyal kontrol (*co*) dinaikkan menjadi 35%. Tanggapan yang dihasilkan oleh *plant* tersebut ditunjukkan pada Gambar 6.



Gambar 6. Respon sistem open loop.



Gambar 7. Analisis respon sistem.

Berdasarkan grafik pada gambar 7 diatas, parameter proses adalah sebagai berikut:

- a) Keterlambatan Waktu Proses (L):
 $L = 74 \text{ s}$
- b) Gain Statis proses (K):
 $K = \frac{\Delta PV}{\Delta CO} = \frac{(38,16)^\circ\text{C}}{(5)\%} = 7,6(^\circ\text{C}/\%)$
- c) Konstanta Waktu Proses:
 $T_{63\%} = 1100 \text{ s}$

Dari parameter-parameter proses diatas maka dapat dihitung parameter *Propositional-Integral-Derefatve* (K_p , T_i , T_d) dari *plant* pengendali suhu dengan menggunakan metode penalaan *Ziegler-Nichols* sebagai berikut:

$$K_p = \frac{1,2T}{LK} = \frac{1,2 \times 1100}{74 \times 7,6} = 2,35$$

$$T_i = 2L = 2 \times 74 = 148$$

$$T_d = \frac{1}{2}L = \frac{1}{2} \times 74 = 37$$

Jadi parameter PID untuk pengendali suhu pada *plant* pengendali suhu dengan metode penalaan *Ziegler-Nichols* adalah $K_p=2,35$; $T_i=148$; $T_d=37$.

3. Hasil dan Analisa

3.1. Pengujian Sensor *Thermocouple*

Pengujian Pembacaan sensor *thermocouple* dilakukan dengan mengukur suhu pada *plant* yang di bandingkan dengan pembacaan pengukuran termometer. Pembacaan sensor untuk pengujian ini dibatasi pada range suhu 35°C-

200°C dengan rata-rata *error* sebesar 0,5. Data hasil pengukuran yang dilakukan adalah sebagai berikut.

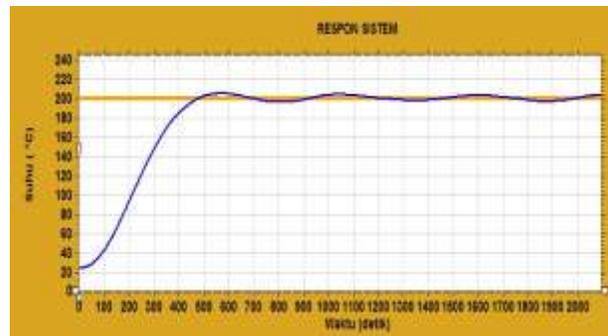
Tabel 2. Hasil perbandingan suhu pembacaan termometer dengan pembacaan sensor *Thermocouple*.

Suhu terukur (°C)	Sensor <i>thermocouple</i> (°C)	<i>error</i>
35	35,7	0,7
40	40,4	0,4
50	50,3	0,3
60	60,3	0,3
70	70,6	0,6
80	80,5	0,5
90	90,4	0,4
100	100,3	0,3
110	110,7	0,7
120	120,6	0,6
130	130,5	0,5
140	140,4	0,4
150	150,3	0,3
160	160,2	0,2
170	170,6	0,6
180	180,5	0,5
190	190,9	0,9
200	200,8	0,8
Error rata-rata		0,5

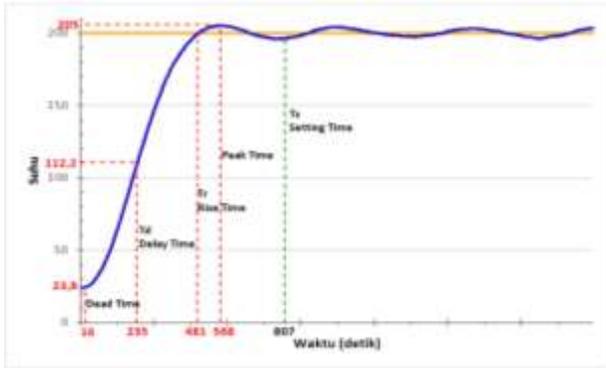
3.2. Pengujian Respon Sistem dengan PC

3.2.1. Pengujian dengan nilai referensi tetap

Respon sistem dengan nilai referensi tetap beserta analisisnya dapat dilihat pada Gambar 12 dan Gambar 13.



Gambar 8. Respon sistem referensi tetap 200°C



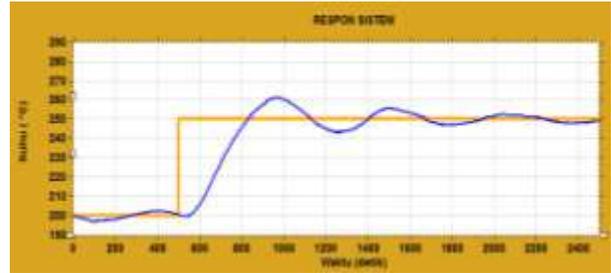
Gambar 9. Analisis respon sistem referensi tetap 200°C.

Gambar 8 adalah grafik respon kendali suhu dengan referensi 200 °C dengan kondisi awal 23,8°C, sedangkan gambar 9 merupakan analisis dari respon sistem tersebut. Dari gambar 9 terlihat bahwa respon sistem mempunyai karakteristik sebagai berikut:

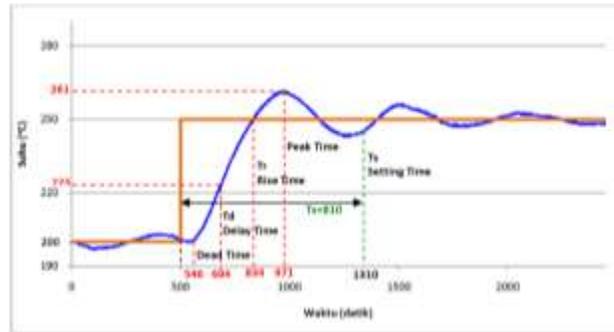
- 1) Waktu Respon (*Dead Time*) atau waktu yang dibutuhkan oleh sistem untuk memulai memberikan respon/ tanggapan adalah 16 detik.
- 2) Waktu naik/*Rise Time* (T_r) atau waktu yang diperlukan tanggapan sistem untuk naik dari 0% sampai 100% dari harga akhirnya (200°C) adalah 465 detik.
- 3) Waktu Tunda/*Delay Time* (T_d) atau waktu yang sistem untuk mencapai setengah dari nilai referensi yang telah ditetapkan (200°C) adalah 235 detik.
- 4) Waktu Puncak /*Peak Time* (T_p) atau waktu yang diperlukan tanggapan sistem untuk mencapai puncak lewatan yang pertama kali adalah 568 detik.
- 5) Lewatan maksimum/*maximum overshoot* (M_p) atau harga puncak maksimum dari kurva tanggapan sistem adalah 205°C (+5°C).
- 6) Waktu penetapan/*settling time* (T_s) atau waktu yang diperlukan tanggapan sistem untuk mencapai dan menetap dalam daerah disekitar harga akhir (5% dari *set point*) adalah 807 detik.

3.2.2. Pengujian dengan Nilai Referensi Naik

Pengujian dengan kenaikan nilai referensi dilakukan dengan memberikan referensi dari 200°C naik menjadi 250°C. Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui kemampuan atau untuk kerja kontrol PID terhadap perubahan kenaikan referensi. Gambar 10 dan gambar 11 memperlihatkan respon sistem terhadap kenaikan nilai referensi dari 200°C sampai 250°C.



Gambar 10. Respon sistem pada referensi naik (200°C-250°C).



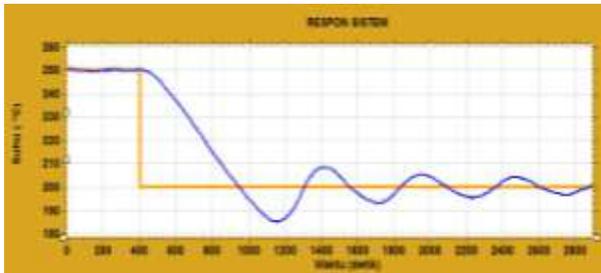
Gambar 11 Analisis respon sistem pada referensi naik (200°C-250°C).

Gambar 10 dan gambar 11 menunjukkan grafik respon sistem dari pengujian dengan kenaikan referensi (*set point*) dan analisisnya. Dari gambar terlihat bahwa respon sistem dengan kenaikan referensi dari 200°C sampai 250°C mempunyai karakteristik sebagai berikut:

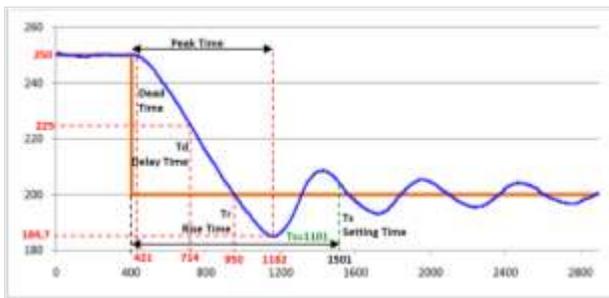
- 1) Waktu Respon (*Dead Time*) atau waktu yang dibutuhkan oleh sistem untuk memulai memberikan respon/ tanggapan adalah 46 detik.
- 2) Waktu naik/*Rise Time* (T_r) atau waktu yang diperlukan respon sistem untuk naik dari 0% sampai 100% dari harga akhirnya (50°C) adalah 288 detik.
- 3) Waktu Tunda/*Delay Time* (T_d) atau waktu yang diperlukan oleh sistem untuk mencapai setengah dari nilai kenaikan referensi yang telah ditetapkan (50°C) adalah 194 detik.
- 4) Waktu Puncak/*Peak Time* (T_p) atau waktu yang diperlukan tanggapan sistem untuk mencapai puncak lewatan yang pertama kali adalah 471 detik.
- 5) Lewatan maksimum/*maximum overshoot* (M_p) atau harga puncak maksimum dari kurva tanggapan sistem adalah 261°C (+11°C).
- 6) Waktu penetapan/*settling time* (T_s) atau waktu yang diperlukan tanggapan sistem untuk mencapai dan menetap dalam daerah disekitar harga akhir (5% dari *set point*) adalah 810 detik.

3.2.3. Pengujian dengan Nilai Referensi Turun

Pengujian dengan penurunan nilai referensi dilakukan dengan memberikan referensi menurun dari 250°C turun menjadi 200°C. Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui kemampuan atau untuk kerja kontrol PID terhadap perubahan penurunan referensi. Gambar 12 dan gambar 13 memperlihatkan respon sistem terhadap penurunan nilai referensi dari 250°C sampai 200°C.



Gambar 12. Respon sistem pada referensi turun (250°C-200°C).



Gambar 13. Analisis respon sistem pada referensi turun (250°C-200°C).

Gambar 12 dan gambar 13 menunjukkan grafik respon sistem dari pengujian dengan penurunan nilai referensi (*set point*) dan analisisnya. Dari gambar terlihat bahwa respon sistem dengan penurunan referensi dari 250°C sampai 200°C mempunyai karakteristik sebagai berikut:

- 1) Waktu Respon (*Dead Time*) atau waktu yang dibutuhkan oleh sistem untuk memulai memberikan respon/ tanggapan adalah 21 detik.
- 2) Waktu naik/*Rise Time* (T_r) atau dalam pengujian ini waktu yang diperlukan respon sistem untuk turun dari 0% sampai 100% dari harga akhirnya (50°C) adalah 529 detik.
- 3) Waktu Tunda/*Delay Time* (T_d) atau waktu yang diperlukan oleh sistem untuk mencapai setengah dari nilai kenaikan referensi yang telah ditetapkan (50°C) adalah 314 detik.

- 4) Waktu Puncak/*Peak Time* (T_p) atau waktu yang diperlukan tanggapan sistem untuk mencapai puncak lewatan yang pertama kali adalah 762 detik.
- 5) Lewatan maksimum/*maximum overshoot* (M_p) atau harga puncak maksimum dari kurva tanggapan sistem adalah 184,7°C (-15,3°C).
- 6) Waktu penetapan/*settling time* (T_s) atau waktu yang diperlukan tanggapan sistem untuk mencapai dan menetap dalam daerah disekitar harga akhir (5% dari *set point*) adalah 1101 detik.

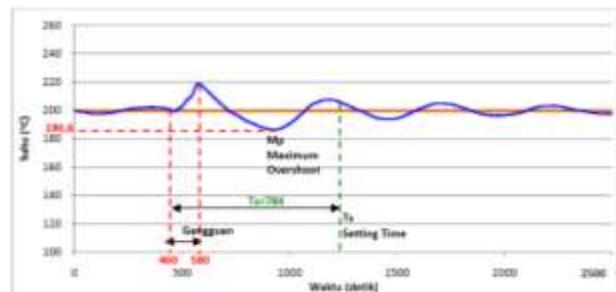
3.2.4. Pengujian Respon Sistem dengan Gangguan.

Pengujian terhadap pengaruh gangguan pada sistem dilakukan dengan memberikan gangguan sesaat pada sistem. Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui kemampuan atau untuk kerja kontrol PID terhadap gangguan luar.

Pengaruh gangguan sesaat pada sistem ini dilakukan dengan mengalirkan udara panas pada plant selama 120 detik saat sistem telah mencapai keadaan stabil pada nilai referensi yang telah ditentukan yaitu 200°C.



Gambar 14. Respon sistem dengan gangguan.



Gambar 15. Analisis respon sistem dengan gangguan.

Gambar 14 dan gambar 15 menunjukkan grafik respon sistem dari pengujian dengan gangguan beserta analisisnya. Dari gambar terlihat bahwa respon sistem dengan gangguan mempunyai karakteristik sebagai berikut:

- 1) Lewatan maksimum/*maximum overshoot* (Mp) atau harga puncak maksimum dari kurva tanggapan sistem adalah pada $186,6^{\circ}\text{C}$ ($+13,4^{\circ}\text{C}$).
- 2) Waktu penetapan/*settling time* (Ts) atau waktu yang diperlukan tanggapan sistem untuk mencapai dan menetap dalam daerah disekitar harga akhir (5% dari *set point*) setelah adanya gangguan adalah 784 detik.

Secara keseluruhan respon sistem *plant* kendali suhu dengan kontrol PID metode penalaan *ZieglerNichols* menunjukkan hasil yang baik. Dari berbagai pengujian yang dilakukan, respon sistem dapat mencapai *steadystate* serta dapat kembali stabil meskipun diberi gangguan dari luar.

4. Kesimpulan

Pada pengujian perbandingan pembacaan suhu antara termometer dan *thermocouple* didapatkan rata-rata error sebesar $0,5^{\circ}\text{C}$. Pada pengujian rangkaian kendali tegangan AC, semakin besar sinyal kontrol yang diberikan ke pemecuan (TCNT0), maka bagian dari tegangan AC yang diberikan ke beban untuk tiap fasenya (fase positif dan fase negatif) akan semakin besar, yang berarti bahwa tegangan listrik yang diberikan ke beban akan semakin besar. Secara keseluruhan pengujian yang telah dilakukan dengan parameter PID metode *Ziegler-Nichols* ($K_p=2,35$; $T_i=148$; $T_d=37$) memiliki kinerja yang baik karena mampu mencapai dan mempertahankan suhu pada referensi yang ditentukan dalam waktu yang relatif cepat. Grafik respon kendali suhu pada referensi tetap 200°C dengan parameter PID metode *Ziegler-Nichols* dimana suhu awal $23,8^{\circ}\text{C}$ mempunyai waktu naik (T_r) 465 detik dan waktu penetapan (T_s) 807 detik. Grafik pengujian respon system dengan menaikkan *set point* pada saat referensi 200°C naik menjadi 250°C mempunyai waktu naik (T_r) sistem 288 detik, dan waktu penetapan (T_s) 810 detik. Grafik uji coba pada saat *set point* diturunkan pada saat referensi 250°C turun menjadi 200°C waktu turun 529 detik dan waktu penetapan system adalah 1101 detik. Respon system Kendal isuhu dengan gangguan sesaat pada referensi 200°C system mengalami *overshoot* sebesar $13,4^{\circ}\text{C}$ dan kembali stabil setelah 784 detik. Untuk pengembangan sistem lebih lanjut, maka dapat dilakukan penggantian desain model sistem electrical furnace yang lebih baik serta dapat dilakukan penggantian heater yang memiliki daya lebih besar agar dapat digunakan untuk pengendalian suhu yang lebih tinggi.

5. Referensi

- [1]. DwiM, Tunjung. 2011. *Pengontrolan Suhu Menggunakan Metode Fuzzy-PID pada Sistem Hipertermia*. Penelitian. Semarang: Universitas Diponegoro.
- [2]. Fitriadi, Eka. 2011. *Aplikasi Kontrol PID untuk Pengontrolan Suhu Model Sistem Hipertermia Berbasis Sensor Thermopile Mlx9024*. Penelitian. Semarang: Universitas Diponegoro.
- [3]. Heryanto, M. Ary dan Wisnu Adi P. 2008. *Pemrograman Bahasa C Untuk Mikrokontroler AT MEGA 8535*. Yogyakarta: Penerbit Andi.
- [4]. Ogata, Katsuhiko. 1994. *Teknik Kontrol Automatik Jilid 1 - 2*, diterjemahkan oleh Edi Leksono. Jakarta: Erlangga.
- [5]. Ogata, Katsuhiko. 2002. *Modern Control Engineering 4th ed*. New Jersey: Prentice Hall.
- [6]. Pate M.W dan Kusnandar. 1995. *Desain dan Ujicoba Bahasa C Untuk Mikrokontroler AT MEGA 8535*. PUSLITBANG P3FT-LIPI.
- [7]. Permadi, Indra. 2012. *Pengendalian Temperature pada Plant Electric Furnace Menggunakan Sensor Thermocouple dengan Metode Fuzzy*. Penelitian Jurusan Teknik Elektro. Semarang: Universitas Diponegoro.
- [8]. Rindho S, Prestian. 2011. *Tuning Parameter Proposional-Integral dengan Fuzzy Logic untuk Pengaturan Suhu Air pada Plant Heat Exanger*. Penelitian Jurusan Teknik Elektro. Semarang: Universitas Diponegoro.
- [9]. Setiawan, Iwan. 2008. *Kontrol PID untuk Proses Industri*. Jakarta: Elex Media Komputindo.
- [10]. -----, Furnace, <http://www.fikrindo.com/news/latest/tip-agar-heater-awet--tahan-lama.html>, 10 juni 2011.
- [11]. -----, Thermocouple, <http://hendragalus.wordpress.com>, 18 Oktober 2011.