

## Pengontrolan Suhu Menggunakan Metode *FUZZY-PID* pada Model Sistem Hipertermia

Tunjung Dwi Madyanto<sup>1</sup>, Imam Santoso<sup>2</sup>, Iwan Setiawan<sup>2</sup>

1. Mahasiswa Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro Semarang

2. Dosen Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro Semarang

### Abstract

Hipertermia merupakan salah satu metode penyembuhan dengan menggunakan proses penaikan suhu beberapa derajat Celcius di atas suhu fisiologi normal, untuk manusia hal ini berarti suhu dari 41 °C sampai 45 °C. Tujuan terapi dengan hipertermia adalah untuk membangkitkan panas yang cukup untuk membunuh sel-sel tumor tanpa merusak sel-sel jaringan tubuh yang sehat. Menjaga kestabilan suhu di pada daerah terapi menjadi sesuatu yang sangat diperlukan. Hal ini dikarenakan, tanpa adanya pengontrolan suhu yang baik akan mengakibatkan sel-sel jaringan tubuh yang normal juga akan mengalami kerusakan. Dengan melihat kenyataan tersebut, maka pada penelitian ini dibuat suatu sistem pengendalian suhu dengan metode fuzzy-PID berbasis mikrokontroler ATmega32 pada pemodelan hipertermia. Sistem ini menggunakan sensor suhu non kontak MLX90247, yang berfungsi mengukur suhu permukaan objek yang diterapi. Potongan kulit sapi digunakan sebagai objek yang akan dikendalikan suhunya. Kulit sapi dipilih karena memiliki sifat yang hampir sama dengan kulit manusia. Berdasarkan pengujian yang dilakukan, dapat diketahui bahwa kendali fuzzy-PID mampu menghasilkan respon sistem yang cukup baik, hal ini ditandai dengan kemampuan sistem mengikuti referensi sampai 20 menit. Untuk nilai referensi 42 °C-45 °C, sistem memerlukan waktu  $\pm 2$  menit untuk mencapai kestabilan.

**Keyword :** hipertermia, Mikrokontroler Atmega32, fuzzy-PID, sensor suhu non kontak MLX90247.

### I. PENDAHULUAN

#### 1.1 Latar Belakang

Metode penyembuhan merupakan suatu cara yang dilakukan untuk mendapatkan fisik maupun jiwa yang sehat dari kondisi yang sakit. Akhir-akhir ini telah banyak dikembangkan metode-metode penyembuhan, dari metode penyembuhan yang bersifat konvensional hingga metode penyembuhan yang bersifat modern. Berbeda dengan metode penyembuhan konvensional, metode penyembuhan modern sudah banyak terdapat sentuhan teknologi dan sistem otomatisasi di dalamnya. Metode penyembuhan modern merupakan bukti kemajuan di bidang kedokteran, salah satunya yaitu sistem hipertermia.

Hipertermia merupakan proses penaikan suhu beberapa derajat Celcius di atas suhu fisiologi normal, untuk manusia hal ini berarti suhu dari 41°C sampai 45°C. Tujuan terapi dengan hipertermia adalah untuk membangkitkan panas yang cukup untuk membunuh sel-sel tumor tanpa merusak sel-sel jaringan tubuh yang sehat. Hal ini dikarenakan sel-sel tumor lebih sensitif terhadap panas dibandingkan dengan sel-sel jaringan tubuh yang normal. Hipertermia dapat digunakan secara tersendiri atau dikombinasikan dengan kemoterapi atau radioterapi.

Dalam system hipertermia diperlukan suatu proses untuk menjaga kestabilan suhu tersebut. *Fuzzy-PID controller* merupakan suatu metode pengontrolan modern gabungan dari algoritma *fuzzy* dan PID, yang menawarkan keunggulan-keunggulan dibandingkan dengan metode pengontrolan konvensional. Parameter-parameter PID yang berfungsi untuk menentukan sifat dari respon sistem, ditentukan oleh keluaran dari algoritma *fuzzy*.

Pada Penelitian ini digunakan mikrokontroler ATmega32 sebagai kontroler, dan *Fuzzy-PID controller*

sebagai metode pengendali. *Fuzzy-PID* digunakan untuk mengendalikan suhu keluaran dari sistem.

#### 1.2 Tujuan

Tujuan yang ingin dicapai dalam Penelitian ini adalah mengimplementasikan metode *fuzzy-PID* berbasis mikrokontroler ATmega32, pada model sistem termoterapi untuk pengontrolan suhu permukaan objek yang diterapi.

#### 1.3 Pembatasan Masalah

Dalam Penelitian ini penulis membatasi permasalahan sebagai berikut :

- 1.) Penalaan dengan sistem pengendali Fuzzy metode Sugeno, fungsi keanggotaan masukan himpunan Fuzzy adalah segitiga dan trapesium, metode pengambilan keputusan menggunakan fungsi implikasi MIN dengan agregator MAX, dan defuzzifikasi menggunakan metode rata-rata terbobot (*weighted average*).
- 2.) Bahasa pemrograman yang digunakan pada mikrokontroler adalah dengan menggunakan *CodeVisionAVR V2.03.9* dan *Visual C#* digunakan dalam proses monitoring. Pada Penelitian ini program monitoring tidak dibahas.

### II. KAJIAN PUSTAKA

#### 2.1 Hipertermia

Satu masalah dalam terapi tumor adalah keberadaan sel tumor sangat sulit diidentifikasi. Sifat sel tumor ini lebih sensitif terhadap panas dari pada sel normal, maksudnya adalah sel tumor ini akan mati apabila dikenai panas di atas suhu fisiologis normal, sedangkan sel normal masih bertahan. Menaikkan suhu beberapa derajat di atas suhu normal pada

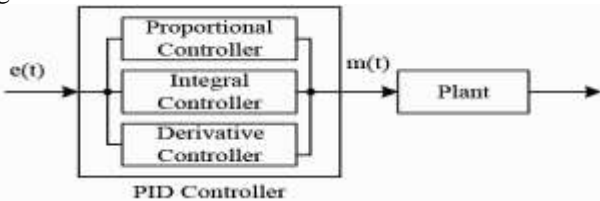
daerah tumor adalah salah satu cara untuk menghancurkan sel tumor (Bradova, 1998).

Hipertemia adalah suatu proses kenaikan temperatur beberapa derajat celsius di atas temperatur fisiologi normal. Hipertermia bisa juga diartikan sebagai suatu teknik untuk membangkitkan panas yang cukup untuk membunuh sel tumor tanpa merusak sel sehat. Hipertermia dapat membunuh sel kanker dan memperkecil ukuran tumor dengan merusak protein maupun struktur sel.

Teknik hipertermia menggunakan prinsip transfer energi untuk membentuk panas pada jaringan tubuh, teknik ini menaikkan temperatur jaringan tubuh di atas normal yaitu sekitar 41°C sampai 45°C.

**2.1 Kendali PID (Proporsional-Integral-Diferensial)**

Pengendali PID merupakan gabungan dari tiga macam pengendali, yaitu pengendali proporsional, pengendali integral, dan pengendali turunan. Tujuan dari penggabungan ketiga macam pengendali tersebut adalah untuk memperbaiki kinerja sistem di mana masing-masing pengendali akan saling melengkapi dan menutupi dengan kelemahan dan kelebihan masing-masing. Gambar 1 menunjukkan diagram blok pengendali PID secara umum.



Gambar 1 Diagram blok pengendali PID secara umum.

Struktur PID parallel merupakan struktur PID yang sering digunakan. Persamaan (1) berikut memperlihatkan bentuk umum dari kontrol PID.

$$CO(t) = k_p \left( e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau + T_d \frac{de(t)}{dt} \right) \quad (1)$$

dengan CO(t) = output kontroler, e(t) = error (e = SP - PV), K<sub>p</sub> = gain proporsional, T<sub>i</sub> = time integral, T<sub>d</sub> = time derivative.

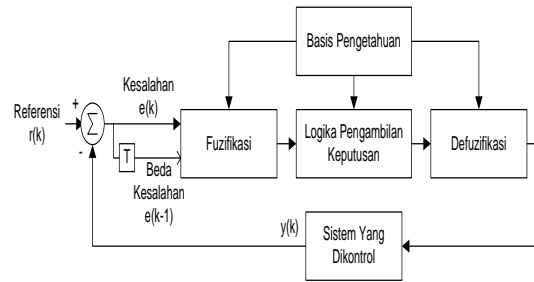
Dalam kawasan Laplace, persamaan (1) tersebut dapat ditulis:

$$CO(s) = K_p \left[ 1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right] e(s) \quad (2)$$

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.

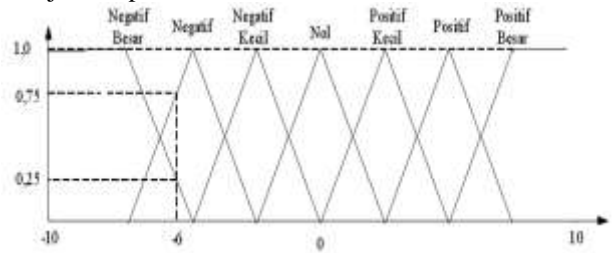
**2.2 Sistem Logika Fuzzy**

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 2 menunjukkan mekanisme kendali logika Fuzy.



Gambar 2 Mekanisme kendali logika Fuzzy kalang tertutup.

Kendali logika Fuzzy dilakukan dalam tiga tahap, yaitu fuzzifikasi, evaluasi aturan dan defuzzifikasi. Gambar 3 menunjukkan proses Fuzzifikasi.

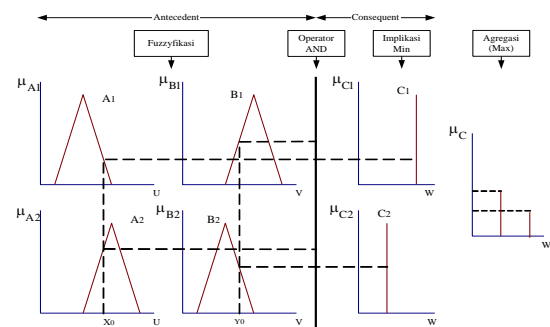


Gambar 3 Proses Fuzzifikasi.

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 3

$$\text{IF } x \text{ is } A \text{ and } y \text{ is } B \text{ then } z = k \quad (3)$$

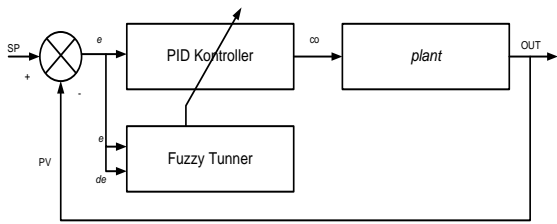
Defuzzifikasi dapat didefinisikan sebagai proses perubahan besaran Fuzzy yang disajikan dalam bentuk himpunan-himpunan Fuzzy keluaran dengan fungsi keanggotaan untuk mendapatkan kembali bentuk tegasnya (crisp). Gambar 4 menunjukkan proses pengambilan keputusan metode sugeno.



Gambar 4 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 5.



Gambar 5 Kontroler PID yang diadaptasi oleh Fuzzy sebagai tuning.

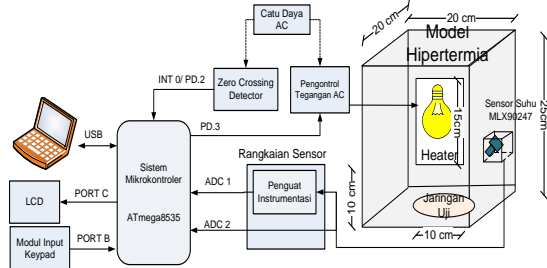
Pendekatan dasar dalam mengadaptasi kontroler *multiterm* (kontroler PID) dengan menggunakan logika Fuzzy adalah dengan merencanakan *supervisory rules* dari Fuzzy tersebut dengan aturan (rule) berikut ini :

- 1) IF  $e(k)$  is  $A_i$  and  $\Delta e(k)$  is  $A_i$ ,  
 THEN  $K_p$  is  $C_i$ ,  $K_i$  is  $D_i$  and  $K_d$  is  $E_i$  (12)  
 Dimana,  $A_i, B_i, C_i, D_i$  dan  $E_i$  adalah variabel linguistik dari *rule ke-1* ( $i = 1, 2, \dots, m$ ) yang dapat direpresentasikan dengan fungsi keanggotaan tertentu.

### III. PERANCANGAN

#### 3.1 Perancangan Perangkat Keras (*Hardware*)

Perancangan perangkat keras sistem hipertermia pada penelitian ini dapat dilihat pada Gambar 6.



Gambar 6 Diagram blok perancangan perangkat keras.

#### 3.2 Perancangan Perangkat Lunak

Perancangan perangkat lunak terdiri dari perancangan program utama, Program Fuzzy sebagai tuning kendali PID. Program kendali kendali PID.

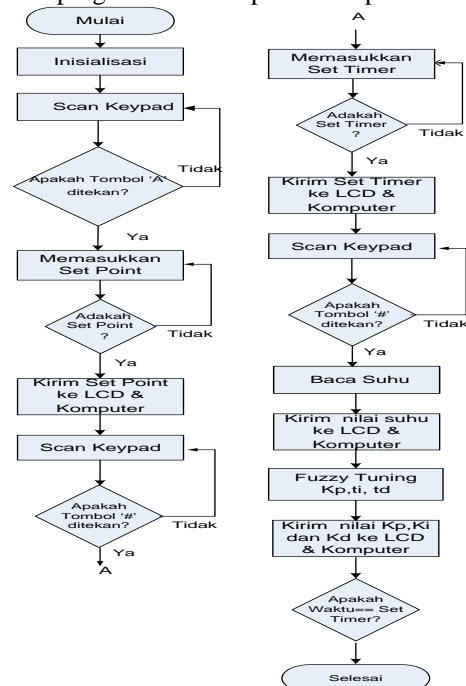
##### 3.2.1 Program Utama

Perancangan perangkat lunak program utama ini secara garis besar bertujuan untuk mengatur kerja sistem seperti inialisasi *register I/O* dan variabel, *scanning keypad*, *setting parameter*, pembacaan hasil sensor, proses pengaturan sinyal kontrol proses penghitungan sinyal *error* dan *delta error*.

Program utama akan diawali dengan inialisasi variabel-variabel yang digunakan dalam keseluruhan proses kendali, tahapan selanjutnya untuk mengatur besarnya suhu yang diinginkan dengan menekan tombol 'A', penekanan tombol 'A' mengakibatkan program memasuki tahapan penentuan *set point* yang diinginkan yaitu 42°C-45°C. Dengan menekan '#', maka diharuskan mengisi waktu lamanya sistem berjalan.

Sistem akan menjalankan program setelah *set timer* dimasukkan dengan menekan tombol '#', program kemudian mengirimkan data *set timer* ke LCD dan komputer, sensor *thermophile* membaca suhu, yang selanjutnya data suhu yang didapat dikirimkan ke LCD dan komputer. Program selanjutnya mengeksekusi program *Fuzzy-PID*, yang hasil dari pengolahan *Fuzzy-PID* ini digunakan untuk mengendalikan suhu dengan actuator lampu pijar. Data parameter suhu yang diperoleh dikirimkan ke LCD dan Komputer, sedangkan data parameter  $K_p, K_i$  dan  $K_d$  akan

dikirimkan ke komputer. Program akan terus berjalan sampai dengan batas waktu yang telah ditentukan. Diagram alir program utama dapat dilihat pada Gambar 7.



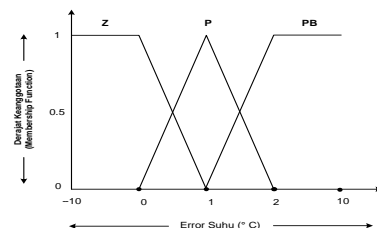
Gambar 7 Diagram alir sistem

##### 3.2.1 Program Fuzzy Sebagai Tuning Kendali PID.

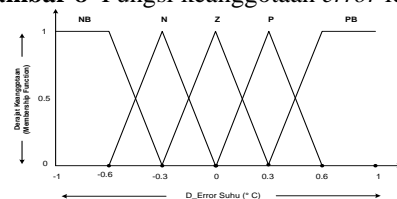
Program kendali Fuzzy terdiri atas Fuzzifikasi, evaluasi aturan, mekanisme pengambilan keputusan, dan defuzzifikasi. Keluaran pada proses defuzzifikasi merupakan hasil dari proses sistem Fuzzy secara keseluruhan.

#### A. Fuzzifikasi

Pada pemrograman Fuzzifikasi ini digunakan parameter fungsi keanggotaan masukan berupa *error* dan *d\_error*. Derajat keanggotaan bernilai antara 0 dan 1, sedangkan dalam pemrograman *tuning* dengan logika Fuzzy ini, nilai derajat keanggotaan dinormalisasi ke dalam nilai 0 hingga 200 dengan tujuan menghemat memori *flash* pada mikrokontroler. Fungsi keanggotaan *error* dan *d\_error* ditunjukkan pada Gambar 8 dan Gambar 9.



Gambar 8 Fungsi keanggotaan *error level*.



Gambar 9 Fungsi keanggotaan *d\_error level*.

#### B. Evaluasi aturan

Evaluasi aturan adalah proses mengevaluasi derajat keanggotaan tiap-tiap fungsi keanggotaan himpunan Fuzzy masukan ke dalam basis aturan yang telah ditetapkan.

Sebelum melakukan evaluasi aturan terlebih dahulu ditetapkan basis aturan. Basis aturan merupakan keseluruhan aturan dari kombinasi dua masukan yang mungkin. Keluaran Fuzzy akan menentukan nilai konstanta PID. Lima belas aturan yang digunakan terlihat pada Tabel 1, Tabel 2 dan Tabel 3.

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

D Error \ Error	NB	N	Z	P	PB
Z	K	K	K	KS	KS
P	B	B	B	S	S
PB	M	M	M	M	M

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

D Error \ Error	NB	N	Z	P	PB
Z	K	K	K	KS	KS
P	B	B	B	S	S
PB	M	M	M	M	M

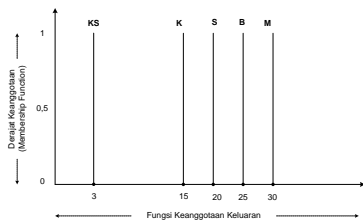
**Tabel 3** Basis Aturan tuning PID dengan Logika Fuzzy untuk Konstanta Kd.

D Error \ Error	NB	N	Z	P	PB
Z	B	M	M	KS	KS
P	S	S	S	KS	KS
PB	K	K	K	K	K

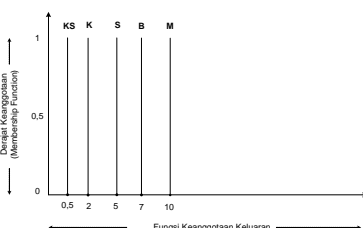
Metode pengambilan keputusan (inferensi) yang digunakan dalam pemrograman ini adalah metode Max-Min. Setelah semua aturan fuzzy dieksekusi, dilakukan proses agregasi dengan mengambil nilai maksimal dari masing-masing fungsi keanggotaan variabel keluaran.

**C. Defuzzifikasi**

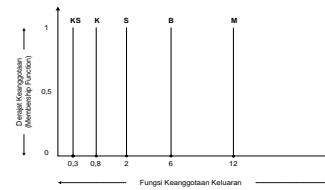
Defuzzifikasi merupakan kebalikan dari proses Fuzzifikasi, yaitu mengubah himpunan Fuzzy keluaran menjadi keluaran tegas (*crisp*). Perubahan ini diperlukan karena konstanta kendali PID hanya mengenal nilai tegas sebagai variabel parameter. Perancangan ini, menggunakan sebuah himpunan Fuzzy keluaran dengan fungsi keanggotaannya berupa *singleton*, seperti tampak pada Gambar 10, Gambar 11 dan Gambar 12.



**Gambar 10** Fungsi keanggotaan keluaran konstanta Kp.



**Gambar 11** Fungsi keanggotaan keluaran konstanta Ki.



**Gambar 12** Fungsi keanggotaan keluaran konstanta Kd.

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

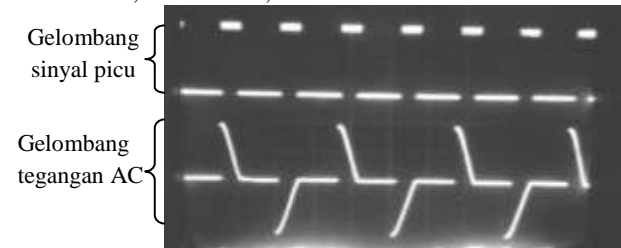
**3.2.2 Program Kendali PID.**

Pada penelitian ini digunakan kendali PID untuk mendapatkan nilai suhu yang diinginkan. Nilai konstanta Kp, Ki dan Kd diperoleh dari Sistem Fuzzy sebagai penala. Perhitungan dengan algoritma PID dimulai dengan menghitung *error* antara *setpoint* level dengan level sebenarnya. *Error* digunakan sebagai masukan pada kendali PID..

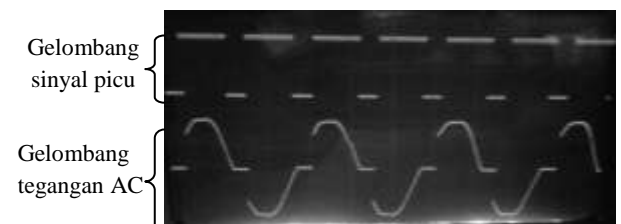
**IV. PENGUJIAN Dan ANALISIS**

**4.1 Pengujian Rangkain Kendali Tegangan AC**

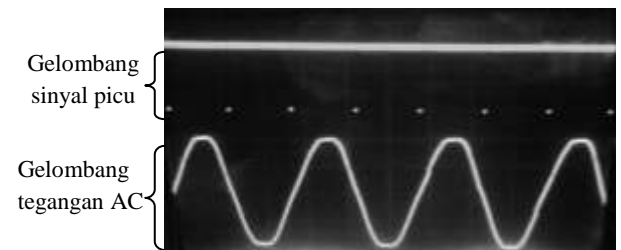
Pengamatan dilakukan dengan osiloskop terhadap gelombang picu dari mikrokontroler dan keluaran pengendali tegangan AC yang diberikan ke beban berdasarkan pengaturan sinyal kontrol. Hasil pengujiannya terlihat pada Gambar 13, Gambar 14, dan Gambar 15.



**Gambar 13** Sinyal picu dan tegangan beban untuk Co = 0%.



**Gambar 14** Sinyal picu, tegangan beban untuk Co = 60%.



**Gambar 15** Sinyal picu, tegangan beban untuk Co = 100%.

Ketiga bentuk gambar gelombang tegangan pada beban yang diuji, dapat diketahui bahwa semakin besar sinyal kontrol yang diberikan ke pemucuan (TCNT0), maka tegangan AC yang diberikan ke beban untuk tiap fasenya (fase positif dan fase negatif) akan semakin besar, yang



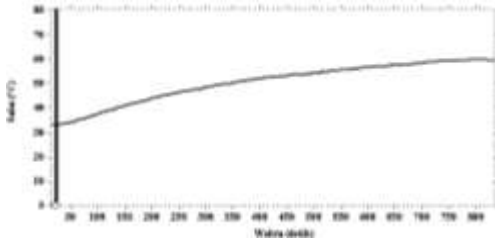
berarti bahwa tegangan listrik yang diberikan ke beban akan semakin besar.

**4.3 Pengujian Respon Sistem dengan PC.**

Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui unjuk kerja pengendali pada sistem terhadap nilai referensi yang diberikan. Beberapa respon sistem yang diambil antara lain respon sistem *open loop*, respon sistem dengan referensi tetap, respon sistem dengan kenaikan referensi, respon sistem dengan penurunan referensi.

**4.3.1 Pengujian Respon Sistem Open Loop**

Pengujian respon sistem *open loop* dilakukan untuk mengetahui karakteristik plant pengatur suhu yang akan dikendalikan. Pada pengujian ini, plant diberi masukan berupa tegangan yang diberikan ke lampu pijar sebesar 220 volt. Tanggapan yang dihasilkan oleh plant tersebut ditunjukkan pada Gambar 16.

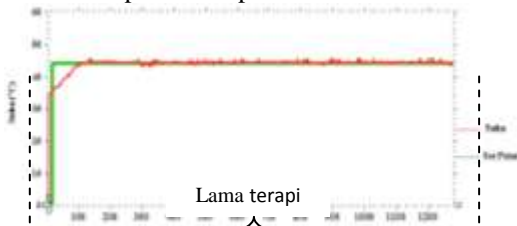


**Gambar 16** Tanggapan plant suhu untuk pengujian respon sistem *open loop*.

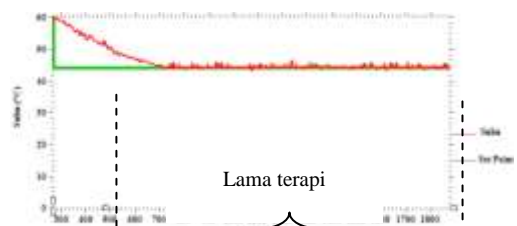
Respon sistem suhu pada Gambar 16 menunjukkan bahwa sistem *open loop* ini stabil pada detik ke 800, dengan suhu pencapaian 59,37°C. Tanggapan *plant* suhu menunjukkan bahwa pada *plant* ini memiliki waktu tunda (*delay time*) 0,1 detik.

**4.3.2 Pengujian Nilai Refrensi Tetap.**

Tanggapan pengendalian sistem suhu tanpa gangguan dengan memberikan nilai referensi suhu yang sama, tetapi dengan kondisi awalan yang berbeda yaitu 34,5°C dan 60°C. Respon sistem dapat dilihat pada Gambar 17 dan Gambar 18.



**Gambar 4.17** Respon sistem kendali suhu dengan referensi 44°C dengan kondisi awal 34,5°C.



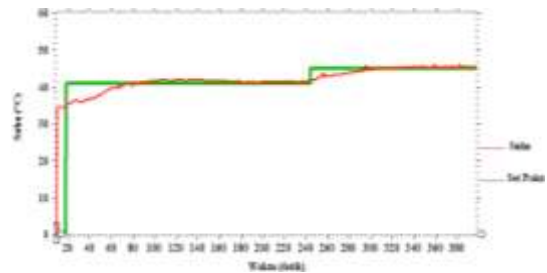
**Gambar 4.18** Respon sistem kendali suhu dengan dengan referensi 44°C dengan kondisi awal 65°C.

Dari Gambar 17 dan Gambar 18 dapat dilihat bahwa pada referensi 44°C dengan kondisi awal 34,5°C mempunyai waktu naik terkecil yaitu 100 detik, dan waktu penetapan 200 detik, sedangkan pada referensi 45°C dengan kondisi

awal 60°C mempunyai waktu naik 420 detik, dan waktu penetapan 520 detik. Hal ini disebabkan sistem tidak memiliki pendingin untuk menurunkan suhu secara cepat. Kendali PID dengan penalaan logika *Fuzzy* pada sistem tanpa gangguan yang diuji sudah bekerja secara optimal, dimana semua respon sistem untuk referensi yang berbeda dapat mencapai keadaan stabil.

**4.3.3 Pengujian Nilai Referensi Naik**

Pengujian nilai referensi naik dilakukan dengan memberikan referensi menaik yaitu dari 41°C naik menjadi 45°C. Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui kemampuan atau untuk kerja kendali PID dengan penalaan logika *Fuzzy* terhadap perubahan kenaikan referensi. Respon pengujian terhadap kenaikan nilai referensi ditunjukkan pada Gambar 19.

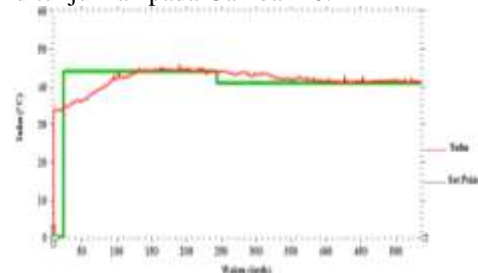


**Gambar 19** Respon sistem pada referensi naik.

Dari Gambar 19 dapat dilihat bahwa pada referensi 41°C mempunyai waktu naik terbesar, yaitu 63 detik dan waktu penetapan 163 detik. Ketika referensi dinaikkan menjadi 45°C, waktu naik sistem adalah 51 detik dan waktu penetapan 64detik. Hal ini disebabkan karena selisih suhu awal 34,41°C menuju 41°C lebih besar daripada 41°C menuju 45°C.

**4.3.4 Pengujian Nilai Referensi Turun**

Pengujian nilai referensi turun dilakukan dengan memberikan referensi menurun yaitu dari 44°C turun menjadi 41°C. Respon pengujian terhadap penurunan nilai referensi ditunjukkan pada Gambar 20.



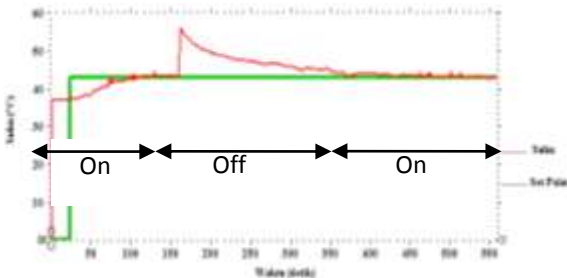
**Gambar 20** Respon sistem pada referensi turun.

Gambar 20 menunjukkan referensi 44°C mempunyai waktu naik terbesar, yaitu 106 detik dan waktu penetapan 116 detik. Ketika referensi diturunkan menjadi 41°C, waktu naik sistem adalah 180 detik dan waktu penetapan 189 detik. Hal ini disebabkan karena sistem tidak memiliki sistem pendingin, jadi suhu turun secara alamiah.

**4.3.5 Pengujian Respon Sistem terhadap Gangguan**

Pengujian terhadap pengaruh gangguan pada sistem dilakukan dengan pengujian pengaruh gangguan sesaat pada sistem. Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui kemampuan atau untuk kerja kendali PID dengan penalaan logika *Fuzzy* terhadap gangguan luar.

Pengaruh gangguan sesaat pada sistem dilakukan dengan meletakkan benda panas dengan suhu  $56,14^{\circ}\text{C}$  pada daerah pemanasan. Pemberian gangguan dilakukan ketika mencapai keadaan stabil, sesuai dengan referensinya. Hasil pengujian respon sistem ditunjukkan pada Gambar 21.



**Gambar 21** Respon sistem terhadap gangguan.

Pada Gambar 21 menunjukkan respon sistem kendali suhu dengan gangguan sesaat pada referensi  $56,14^{\circ}\text{C}$ , gangguan diberikan dengan meletakkan benda panas dengan suhu  $56,14^{\circ}\text{C}$  pada daerah pemanasan. Dengan gangguan yang sangat besar akan membuat sistem langsung mati hingga *error* tidak kurang dari  $-0,5$ . Sistem kendali suhu ini membutuhkan waktu pemulihan menuju kestabilan.

## V. PENUTUP

### 5.1 Kesimpulan

Berdasarkan pengujian dan analisis yang telah dilakukan, maka dapat disimpulkan beberapa hal sebagai berikut:

1. 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.
2. Pada pengujian nilai referensi tetap, pada referensi  $44^{\circ}\text{C}$  dengan kondisi awal  $34,5^{\circ}\text{C}$  mempunyai waktu naik terkecil yaitu 100 detik, dan waktu penetapan 200 detik, sedangkan pada referensi  $44^{\circ}\text{C}$  dengan kondisi awal  $60^{\circ}\text{C}$  mempunyai waktu naik 420 detik, dan waktu penetapan 520 detik. Hal ini disebabkan sistem tidak memiliki pendingin untuk menurunkan suhu secara cepat.
3. Pada pengujian referensi naik, pemberian referensi  $4^{\circ}\text{C}$  mempunyai waktu naik lebih besar, yaitu 63 detik dan waktu penetapan 164 detik, dibandingkan ketika referensi dinaikkan menjadi  $45^{\circ}\text{C}$ , waktu naik sistem adalah 51 detik dan waktu penetapan 64 detik. Hal ini disebabkan karena selisih suhu awal  $34,41^{\circ}\text{C}$  menuju  $41^{\circ}\text{C}$  lebih besar daripada  $41^{\circ}\text{C}$  menuju  $41^{\circ}\text{C}$ .
4. Pada pengujian referensi turun, pemberian referensi  $44^{\circ}\text{C}$  mempunyai waktu naik lebih kecil, yaitu 106 detik dan waktu penetapan 116 detik, dibandingkan ketika referensi diturunkan menjadi  $41^{\circ}\text{C}$ , waktu naik sistem adalah 180 detik dan waktu penetapan 189 detik. Hal ini disebabkan karena sistem tidak memiliki sistem pendingin, jadi suhu turun secara alamiah.
5. Pada pengujian respon sistem terhadap gangguan, gangguan sesaat pada referensi  $44^{\circ}\text{C}$ , gangguan diberikan dengan meletakkan benda panas dengan suhu  $56,14^{\circ}\text{C}$  pada daerah pemanasan. Sistem kendali suhu ini membutuhkan waktu pemulihan menuju kestabilan.

### 5.2 Saran

Untuk pengembangan sistem lebih lanjut, maka ada beberapa saran yang dapat dilakukan yaitu sebagai berikut:

1. Dapat dilakukan penggantian model sistem hipertermia yang lebih baik, yaitu dengan menggunakan magnetron sebagai aktuatornya.
2. Plant pengontrolan suhu masih dapat dikembangkan lagi dengan mengubah kontroler, misalkan algoritma genetic dan jaringan syaraf tiruan..

### Daftar Pustaka

- [1] Adel S. Sedra dan Kenneth C. Smith, *Rangkaian Mikroelektronik*, Penerbit Erlangga, Jakarta, 1990.
- [2] Anggoro, Bambang, *Pengukuran Listrik*, Laboratorium Teknik Tegangan Tinggi & Pengukuran Listrik ITB, Bandung, 1986.
- [3] Atmel, *Datasheet Mikrokontroler ATmega32*, [http://www.atmel.com/dyn/resources/prod\\_documents/doc2503.pdf](http://www.atmel.com/dyn/resources/prod_documents/doc2503.pdf).
- [4] Habash, R.W.Y., *Non-Invasive Microwave Hyperthermia*, Tesis S-2, Indian Institute of Science, Bangalore, 1994.
- [5] Iqbal, Muhammad, *Pengaturan Suhu Cairan yang Mengalir dengan Fuzzy Logic Controller*, Penelitian, Jurusan Teknik Elektro Universitas Diponegoro, Semarang, 2001.
- [6] Jang, J.-S.R., C.-T. Sun, E. Mizutani, *Neuro Fuzzy and Soft Computing*, Prentice-Hall International, Inc, 1997.
- [7] Laksono, Suryo Krido, *Pengaturan Sudut fasa Berbasis Logika Fuzzy untuk Sistem pengaturan Temperatur*, Penelitian Jurusan Teknik Elektro Universitas Diponegoro Semarang, 2003.
- [8] Melexis, *Data Sheet Infrared Sensor MLX90247*, <http://www.melexis.com/Asset/IR-Sensor-MLX90247-DataSheet-DownloadLink-4763.aspx>.
- [9] Pornjit Pratumsuwan, Siripun Thongchai, and Surapun Tansriwong, "A Hybrid of Fuzzy and Proportional-Integral-Derivative Controller for Electro-Hydraulic Position Servo System" *Energy Research Journal* 1, 62-67, 2010.
- [10] Şaban Çetin, and Özgür Demir, "Fuzzy PID Controller with Coupled Rules for a Nonlinear Quarter Car Model", *World Academy of Science*, 62-67, 2008.
- [11] Setiawan, Iwan, *Kontrol PID untuk Proses Industri*, Elexmedia Computindo, Jakarta, 2008.
- [12] Wardhana, Lingga, *Belajar Sendiri Mikrokontroler AVR Seri ATmega8535 Simulasi, Hardware, dan Aplikasi*, Penerbit Andi, Yogyakarta, 2006.
- [13] Wei Li, Xiaoguang Chang, "Application of Hybrid Fuzzy Logic Proportional plus Conventional Integral-Derivative Controller to Combustion Control of Stoker-Fired Boilers", *Elsevier*, 267-284, 1997.
- [14] Willis, M.J., "Proportional-Integral-Derivative Control", Department of Chemical and Process Engineering University of Newcastle, Newcastle, 1999.