

## Makalah Seminar Tugas Akhir

# APLIKASI KONTROL PID UNTUK PENGONTROLAN SUHU MODEL SISTEM HIPERTERMIA BERBASIS SENSOR *THERMOPILE* MLX90247

Eka Fitriyadi<sup>1</sup>, Imam Santoso<sup>2</sup>, Iwan Setiawan<sup>2</sup>

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

### Abstract

*Hyperthermia is a healing method by increasing the temperature of the object above the normal physiology temperature, for the human temperature is 42°C until 45°C. Cancerous patient can be cured by hyperthermia's therapy. Temperature on hyperthermia's range enough to kill tumour cells without destroying the healthy body tissues. A control system such as PID control is required to keep temperature stability on the hyperthermia's range.*

*This final project purpose to make PID control application in a model of hyperthermia system based on a noncontact temperature sensor, thermopile MLX90247. System will heat the cowhide tissues as sample tissues for 20 minutes therapeutic time. Temperature of the sample tissue can be measured by a noncontact temperature sensor, thermopile MLX90247 as a feedback on PID control systems to control the therapeutic temperature. The control output of PID control will give AC voltage control circuit firing that activate a light bulb as a heat actuator. The PID control system embedded on ATmega32 microcontroller that can operated by a keypad module and monitored by LCD or Personal Computer (PC).*

*From the experiment result, we can get a conclusion that the PID control systems can applied properly in a model of hyperthermia's system based on a non contact temperature sensor, thermopile MLX90247 by used Zieger Nichols tuning method. The results on tuning of PID control parameters are  $K_p = 66$ ,  $K_i = 2$ , and  $K_d = 25$ . System reached the references on therapeutic temperature ranges at 42°C until 45°C and stable for 20 minutes therapeutic times.*

**Key words :** *hyperthermia, PID control, ATmega32 microcontroller, noncontact temperature sensor thermopile MLX90247.*

## I. PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Sampai saat ini kontrol PID merupakan satu-satunya strategi yang paling banyak diadopsi pada pengontrolan proses industri. Popularitas PID sebagai komponen kontrol proses dilatarbelakangi terutama oleh kesederhanaan struktur serta kemudahan dalam melakukan tuning parameter kontrolnya<sup>[19]</sup>.

Pemanfaatan suhu banyak digunakan dalam dunia medis untuk melakukan tindakan *thermotherapy*. Suhu yang diatur pada kondisi tertentu dapat menyembuhkan suatu penyakit pada pasien. Pada *thermotherapy* panas dengan suhu tertentu diberikan kepada bagian tubuh dari pasien yang sakit. Panas tersebut diberikan melalui pancaran (radiasi) maupun hantaran (konduksi) sehingga sampai pada bagian tubuh pasien yang sakit<sup>[7]</sup>.

Hipertermia merupakan salah satu contoh tindakan *thermotherapy*. Pengobatan untuk pasien penyakit kanker dapat dilakukan dengan hipertermia. Kanker dapat dihilangkan dari pasien dengan pancaran panas pada suhu 42°C sampai dengan 45°C dalam waktu tertentu secara rutin.

Pemanasan tidak boleh dilakukan pada suhu di atas 45°C karena akan merusak permukaan kulit<sup>[9]</sup>.

Tugas akhir ini merancang aplikasi kontrol pada model hipertermia dengan mikrokontroler AVR ATmega32. Desain aplikasi kontrol ini dapat diterapkan pada pengaturan suhu panas yang dikehendaki pada suhu 42°C sampai dengan 45°C selama waktu tertentu. Pengaturan suhu tersebut dilakukan dengan mengguakan aksi kontrol PID (*Proportional Integral Derivative*) dan diharapkan memberikan pemanasan secara tepat dan aman untuk terapi hipertermia lokal.

### 1.2 Tujuan

Tujuan dari penelitian tugas akhir ini adalah membuat dan menganalisis perangkat keras dan perangkat lunak untuk mengaplikasikan kontrol PID pada pengontrolan suhu model sistem hipertermia menggunakan sensor *thermopile* MLX90247.

### 1.3 Pembatasan Masalah

Dalam pembuatan tugas akhir ini penulis membatasi permasalahan sebagai berikut :

1.) Pengujian dilakukan dengan memodelkan pengontrolan suhu pada hipertermia lokal

1) Mahasiswa Jurusan Teknik Elektro UNDIP

2) Staf Pengajar Jurusan Teknik Elektro UNDIP

menggunakan kontrol PID dengan jaringan uji berupa jaringan kulit sapi.

- 2.) Bahasa pemrograman yang digunakan pada mikrokontroler adalah dengan menggunakan *CodeVisionAVR V2.03.9* dan *Visual C#* digunakan dalam proses monitoring.

## II. KAJIAN PUSTAKA

### 2.1 Hipertermia

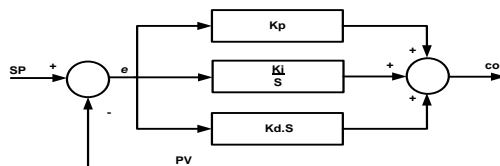
Hipertemia adalah suatu proses kenaikan temperatur beberapa derajat celsius di atas temperatur fisiologi normal<sup>[9]</sup>. Hipertermia bisa juga diartikan sebagai suatu teknik untuk membangkitkan panas yang cukup untuk membunuh sel tumor tanpa merusak sel sehat.

Teknik hipertermia menggunakan prinsip transfer energi untuk membentuk panas pada jaringan tubuh, teknik ini menaikkan temperatur jaringan tubuh di atas normal yaitu sekitar 42°C sampai 45°C<sup>[9]</sup>. Hal ini menghasilkan dampak dari panas yang dihasilkan pada terapi hipertermia dapat mengakibatkan panas yang melebihi suhu normal jaringan (36°C sampai 37°C) pada jaringan sehat, sehingga terjadi kerusakan pada jaringan yang terkena kanker.

Salah satu teknik pemanasan pada sistem hipertermia adalah hipertermia lokal. Hipertermia lokal dilakukan dengan pemanasan pada area yang terbatas, hanya pada jaringan kanker<sup>[10]</sup>. Untuk kanker yang terletak di permukaan tubuh atau dekat dengan kulit, alat penghasil panas diletakkan di dekat tumor, kemudian pancaran gelombang diarahkan ke area yang hendak dipanaskan.

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

Kontrol PID merupakan gabungan dari tiga macam metode kontroler, yaitu pengontrol proporsional (*Proportional Controller*), pengontrol integral (*Integral Controller*), dan pengontrol turunan (*Derivative Controller*)<sup>[5], [11], [12], [20]</sup>.



Gambar 1 Struktur kontrol PID ideal bentuk *independent*<sup>[20]</sup>.

Gambar 1 menunjukkan struktur kontrol PID ideal. Struktur kontrol PID ideal merupakan struktur kontrol PID yang umum dijumpai<sup>[20]</sup>.

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

$$CO(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t).dt + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (1)$$

Secara praktis, struktur kontrol PID pada persamaan (1) dikenal juga dengan istilah PID ideal bentuk *independent*. Dalam kawasan Laplace, persamaan (1) tersebut dapat ditulis:

$$CO(s) = \left[ K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s \right] e(s) \quad (2)$$

Dari persamaan (2) tersebut dapat diperoleh fungsi alih kontroler PID (dalam domain s) sebagai berikut:

$$G_c(s) = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s \quad (3)$$

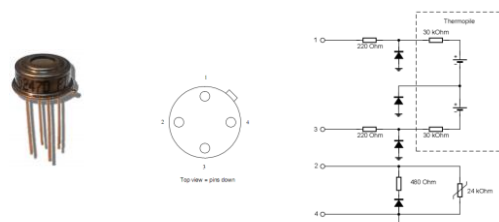
Aksi kontrol PID ideal bentuk *independent* dalam kawasan sistem diskret dapat dituliskan pada bentuk persamaan (4) sebagai berikut:

$$CO(k) = K_p \cdot e(k) + K_i \cdot T_c \cdot \sum_{i=0}^k (e(i)) + K_d \frac{(e(k) - e(k-1))}{T_c} \quad (4)$$

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<sup>[11], [12], [20]</sup>.

### 2.3 Sensor Suhu *Thermopile* MLX90247

Sensor suhu *thermopile* merupakan salah satu jenis detektor suhu *passive infrared*. Sensor suhu *thermopile* mengukur suhu berdasarkan prinsip pengukuran suhu radiasi inframerah. Radiasi inframerah merupakan radiasi gelombang elektromagnetik dengan panjang gelombang 0,7 µm hingga 300 µm yang dapat memancarkan panas pada suhu tertentu<sup>[21]</sup>. Sensor *thermopile* didesain untuk pengukuran suhu nonkontak<sup>[17]</sup>. Gambar 2(a) menunjukkan bentuk sensor *thermopile* MLX90247 dengan kemasan TO39<sup>[16]</sup>.



(a) Bentuk, (b) Tampak atas, (c) Bagian dalam, Gambar 2 Skematik sensor *thermopile* MLX90247<sup>[16]</sup>.

Gambar 2(b) menunjukkan penampang tampak atas dari pin sensor *thermopile* MLX90247 yang memiliki empat kaki. Kaki 1 dan 3 merupakan output *thermopile* (Vir), sedangkan kaki 2 dan 4 terhubung ke termistor dan *ground*. Gambar 2(c) menunjukkan rangkaian penyusun sensor suhu *thermopile* MLX90247. Sensor suhu MLX90247

memiliki bagian *thermopile* dan termistor yang terpisah. Bagian *thermopile* memiliki resistansi sebesar 60 kΩ yang terbagi dalam dua buah resistor. Keduanya terhubung dengan *absorber* yang menghasilkan potensial listrik ( $V_{ir}$ ) sebagai output dari *thermopile* pada kaki 1 dan kaki 2. Potensial listrik tersebut besarnya sesuai dengan persamaan (5).

$$V_{ir} = Alpha \cdot [(T_o)^4 - (T_a)^4] \quad (5)$$

Kaki 2 dan 4 pada Gambar 2 merupakan output untuk resistansi termistor sebagai kompensasi pengukuran suhu dengan *thermopile* yang merupakan suhu *ambient* sensor *thermopile* tersebut ( $T_a$ ). Resistansi termistor dapat dihitung dengan persamaan (6).

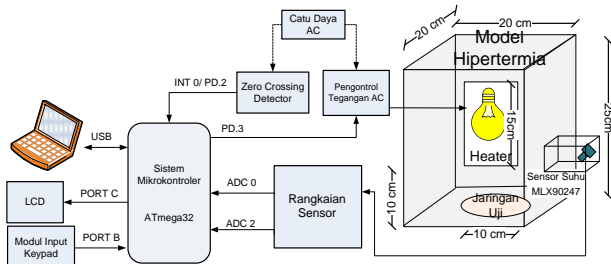
$$R(T) = R(25^\circ C) \cdot [1 + TC_1(T - 25^\circ C) + TC_2(T - 25^\circ C)^2] \quad (6)$$

Jangkauan (*range*) kerja optimal sensor MLX90247 adalah pada saat suhu *ambient* -40 °C sampai dengan 85 °C<sup>[16]</sup>. Tegangan keluaran sensor ini akan bernilai 46 μV pada suhu objek 27°C dan suhu *ambient* sensor 26°C dengan *field of view* (sudut pandangan) 100 % atau sekitar 88°<sup>[17]</sup>.

### III. PERANCANGAN

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

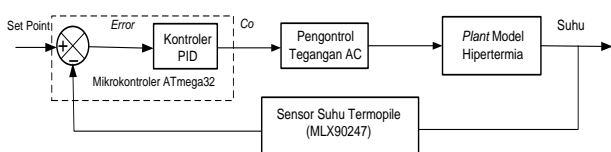
Perancangan perangkat keras sistem hipertermia pada tugas akhir ini dapat dilihat pada Gambar 3.



Gambar 3 Diagram blok perancangan perangkat keras.

#### 3.2 Perancangan Perangkat Lunak

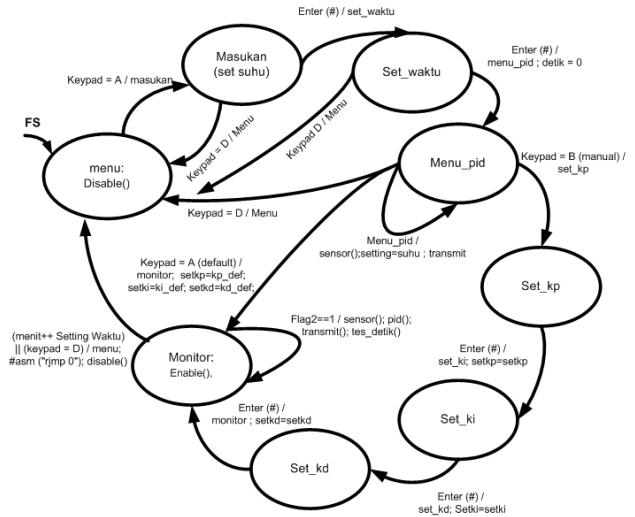
Kontrol PID diaplikasikan untuk mengontrol suhu jaringan uji pada model sistem hipertermia. Blok diagram aplikasi pengendalian secara umum dapat dilihat pada Gambar 4.



Gambar 4 Diagram blok pengendalian model sistem hipertermia.

Masukan dari kontrol PID adalah *error* suhu permukaan jaringan uji. *Error* akan diolah oleh algoritma kontrol PID sehingga menghasilkan sinyal kontrol yang diumpankan ke pemanas melalui pengontrol tegangan AC.

*Statechart* program utama diperlihatkan pada Gambar 5.



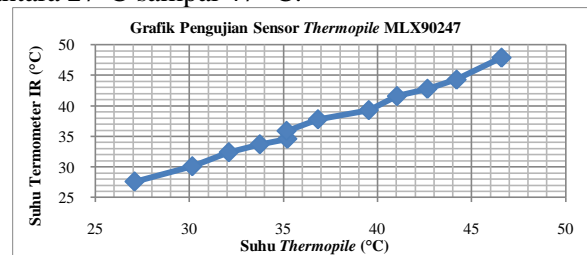
Gambar 5 *Statechart* program utama sistem.

### IV. PENGUJIAN DAN ANALISIS

#### 4.1 Pengujian Perangkat Keras

##### 4.1.1 Pengujian Sensor Suhu *Thermopile* MLX90247

Pengujian sensor *thermopile* dilakukan dengan cara mengukur suhu jaringan uji yang dipapar panas pada *plant* model hipertermia yang sebenarnya menggunakan termometer inframerah. Suhu yang terukur oleh termometer inframerah kemudian dibandingkan dengan suhu yang terdeteksi oleh sensor *thermopile* MLX90247, yang tertampil di LCD. Pengujian dilakukan pada jangkauan suhu antara 27°C sampai 47 °C.



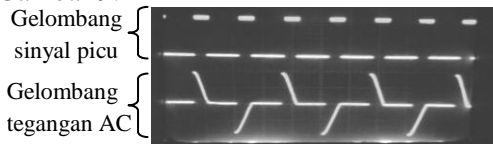
Gambar 6 Grafik pengujian sensor *thermopile* MLX90247.

Gambar 6 menunjukkan bahwa suhu yang terdeteksi sensor MLX90247 dengan termometer IR proporsional. Jadi kalibrasi pada program untuk sensor *thermopile* MLX90247 sudah bisa dikatakan baik.

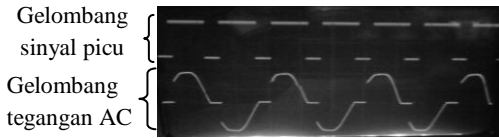
##### 4.1.2 Pengujian Rangkain Kontrol Tegangan AC

Pengamatan dilakukan dengan osiloskop terhadap gelombang picu dari mikrokontroler dan

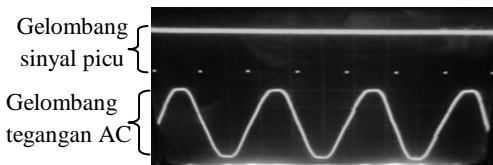
keluaran Pengontrol tegangan AC yang diberikan ke beban berdasarkan pengaturan sinyal kontrol. Hasil pengujiannya terlihat pada Gambar 7, Gambar 8, dan Gambar 9.



Gambar 7 Sinyal picu dan tegangan beban untuk  $C_o = 0\%$ .



Gambar 8 Sinyal picu, tegangan beban untuk  $C_o = 60\%$ .



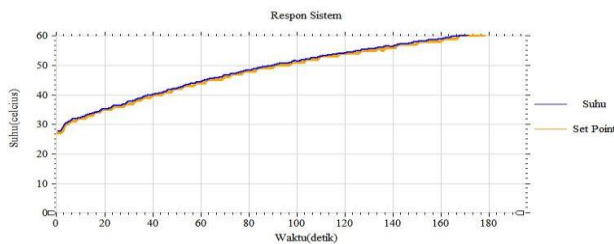
Gambar 9 Sinyal picu, tegangan beban untuk  $C_o = 100\%$ .

Ketiga bentuk gambar gelombang tegangan pada beban yang diuji, dapat diketahui bahwa semakin besar sinyal kontrol yang diberikan ke pemecuan (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.

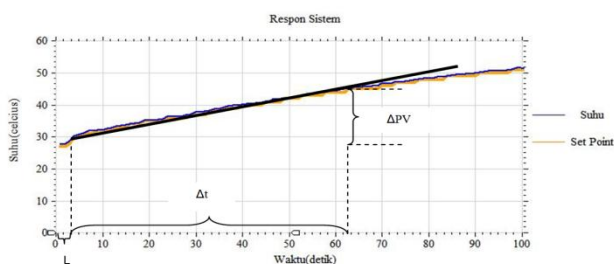
## 4.2 Pengujian Perangkat Lunak

### 4.2.1 Pengujian Kalang Terbuka

Karakteristik *plant* model hipertermia dapat diketahui dengan melakukan pengujian kalang terbuka. Pengujian kalang terbuka dilakukan dengan memberikan tegangan maksimal 220 V atau saat CO sebesar 100 % pada *heater* selama 12 menit.



Gambar 10 Respon sistem untuk pengujian kalang terbuka.



Gambar 11 Analisis pengujian kalang terbuka untuk model IPDT.

Gambar 10 menunjukkan bahwa bahwa *plant* model hipertermia memiliki output proses (PV) berupa suhu yang terus-menerus membesar untuk perubahan tangga sinyal kontrol (CO) maksimal. Respon sistem tersebut memperlihatkan output model IPDT (*Integrating Plus Dead Time*). Nilai keterlambatan transportasi ( $L$ ) pada respon sistem tersebut adalah sebesar 10 detik, output kontrol akan memanaskan *plant* model hipertermia saat memulai pengujian.  $\Delta t$  respon kalang terbuka pada *slope* maksimum dari Gambar 11 adalah sebesar 110 detik. *Gain* integratif proses ( $K^*$ ) yang dimiliki model proses IPDT didapatkan dari perhitungan berikut:

$$K^* = \frac{\Delta PV / \Delta t}{\Delta CO} = \frac{(45 - 30) / 110}{100} = 0,00136$$

Dari nilai  $L$  dan  $K^*$  didapatkan fungsi alih model hipertermia sebagai berikut :

$$H(s) = \frac{K^*}{s} e^{-sL} = \frac{0,00136}{s} e^{-10s}$$

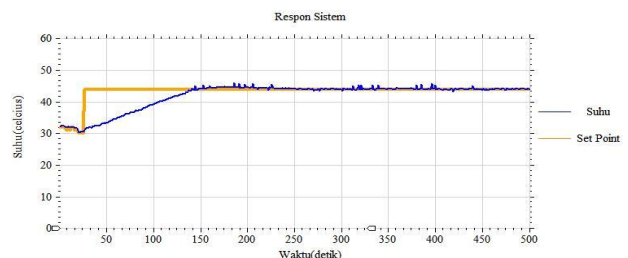
### 4.2.2 Pengujian Penalaan Kontrol PID

Respon sistem pada pengujian kalang terbuka menunjukkan bahwa *plant* model hipertermia termasuk model IPDT, penalaan *Zieger Nichols* hanya dapat dilakukan pada  $K_p$  dan  $K_i$  [20]. Nilai  $K_p$  dan  $K_i$  pada model IPDT dapat dihitung dengan penalaan *Zieger Nichols* sebagai berikut:

$$K_p = \frac{0,9}{K^* \times L} = \frac{0,9}{0,00136 \times 10} = 66$$

$$K_i = \frac{K_p}{T_i} = \frac{K_p}{3,3 \times L} = \frac{66}{3,3 \times 10} = \frac{66}{33} = 2$$

Pengujian penalaan kontrol PID secara empiris dilakukan untuk menentukan nilai parameter  $K_d$  yang dapat ditambahkan untuk memperbaiki unjuk kerja respon sistem kontrol PID dengan penalaan *Zieger Nichols* pada *plant* model hipertermia. Variasi  $K_d$  diberikan pada  $K_d = 0$  sampai 50 dengan nilai  $K_p$  dan  $K_i$  hasil penalaan *Zieger Nichols* yaitu  $K_p = 66$  dan  $K_i = 2$ .



Gambar 12 Respon sistem pengujian penalaan Kontrol PID dengan  $K_d = 25$ .



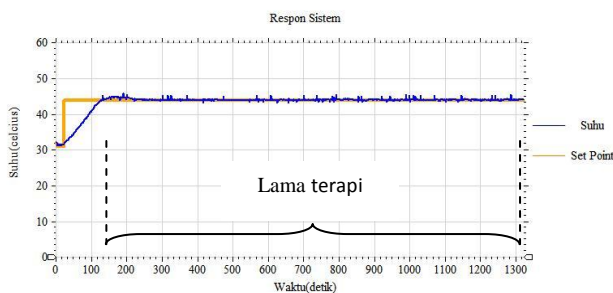
Tabel 1 Pengaruh perubahan  $K_d$  pada respon sistem.

$K_p$	$K_i$	$K_d$	$T_r$ (detik)	$T_s$ (detik)
66	2	0	115	240
66	2	5	115	250
66	2	10	115	220
66	2	15	115	220
66	2	20	115	220
66	2	25	110	200
66	2	30	110	230

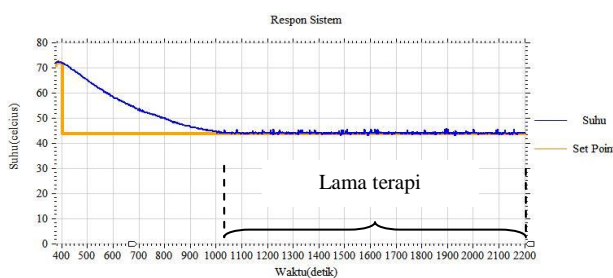
Tabel 1 menunjukkan pengaruh perubahan  $K_d$ , penambahan parameter  $K_d$  yang tepat dapat digunakan untuk memperbaiki unjuk kerja respon sistem parameter PID pada model IPDT dengan penalaan *Zieger Nichols*. Secara empiris, pada variasi  $K_d = 25$  waktu naik ( $T_r$ ) = 110 detik dan waktu *steady* ( $T_s$ ) = 200 detik, respon sistem lebih cepat dibandingkan unjuk kerja pada variasi lain maupun sebelum penambahan variasi  $K_d$ . Pada variasi  $K_d = 25$  sistem juga memiliki *overshoot* yang lebih kecil dibandingkan *overshoot* untuk variasi lain seperti ditunjukkan pada Gambar 12.

#### 4.2.3 Pengujian Karakteristik Kontrol PID

Pengujian karakteristik kontrol PID dilakukan pada tanggapan pengontrolan sistem tanpa gangguan dengan memberikan nilai referensi suhu yang sama, tetapi dengan kondisi awalan yang berbeda yaitu 30°C dan 71°C.



Gambar 13 Respon sistem dengan referensi 44°C dengan kondisi awal 30°C.



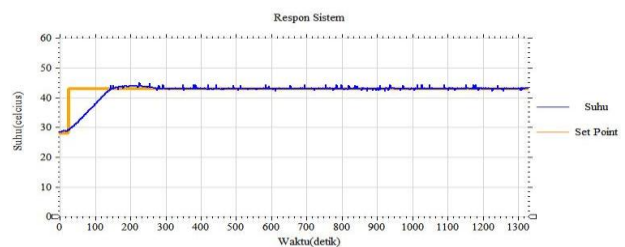
Gambar 14 Respon sistem dengan referensi 44°C dengan kondisi awal 71°C.

Gambar 13 adalah grafik respon kontrol suhu dengan referensi 44°C dengan kondisi awal 30°C. Pada pengujian ini sistem dapat mencapai referensi dan stabil. Setelah lama terapi 20 menit pengujian dihentikan. Waktu naik ( $T_r$ ) yang diperlukan adalah 110 detik dan waktu penetapan ( $T_s$ ) 200 detik. Gambar 14 adalah grafik respon

kontrol suhu dengan referensi 44°C dengan kondisi awal 71°C. Sistem bisa mencapai referensi dengan lama terapi 20 menit. Waktu naik ( $T_r$ ) yang diperlukan adalah 600 detik dan waktu penetapan ( $T_s$ ) 680 detik. Dari data tersebut diketahui bahwa waktu naik dan waktu penetapan dengan kondisi awal 71°C lebih lama dibandingkan dengan kondisi awal 30°C. Hal ini disebabkan keterbatasan sinyal kontrol sistem yang tidak memiliki pendingin untuk menurunkan suhu secara cepat.

#### 4.2.4 Pengujian pada Variasi Referensi Tetap

Pengujian pada variasi referensi dilakukan dengan memberikan referensi bervariasi dari 42°C sampai 45°C untuk parameter PID  $K_p = 66$ ,  $K_i = 2$ , dan  $K_d = 25$  dengan lama terapi 20 menit.



Gambar 15 Respon sistem referensi 43°C.

Gambar 15 menunjukkan respon sistem relatif stabil untuk referensi 43°C dengan lama terapi 20 menit.

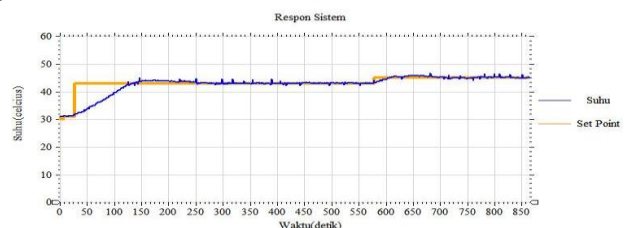
Tabel 2 Respon sistem kontrol PID pada variasi referensi.

Referensi (°C)	$T_r$ (detik)	$T_s$ (detik)
42	100	180
43	110	200
44	110	200
45	120	210

Tabel 2 menunjukkan bahwa respon sistem dengan referensi semakin besar akan mengakibatkan waktu naiknya semakin besar. Respon sistem mampu mencapai kestabilan untuk semua variasi referensi dengan  $T_r$  cepat.

#### 4.2.5 Pengujian Nilai Referensi Naik

Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui kemampuan atau untuk kerja kontrol PID terhadap perubahan kenaikan referensi.

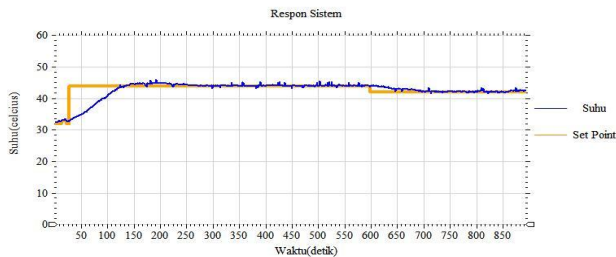


Gambar 16 Respon sistem referensi naik.

Gambar 16 menunjukkan pengujian respon sistem model hipertermia pada perubahan *setting*

*point* naik atau semakin besar. Pada awalnya sistem diberi *setting* referensi suhu permukaan jaringan kulit uji sebesar 43°C. Waktu naik yang diperlukan untuk mencapai referensi tersebut adalah 95 detik. Sistem telah mencapai keadaan *steady* atau stabil dengan waktu 200 detik dan *overshoot* kecil. Ketika sistem melakukan perubahan referensi dari 43°C menjadi 45°C waktu naik yang diperlukan adalah 20 detik dan *overshoot* lebih kecil.

#### 4.2.6 Pengujian Nilai Referensi Turun

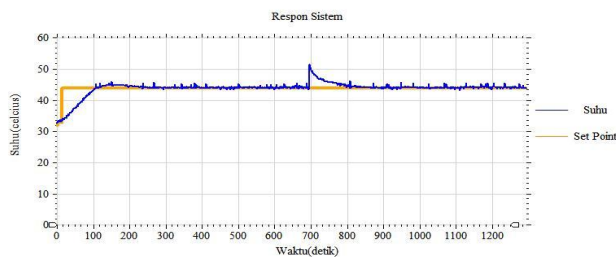


Gambar 17 Respon sistem referensi turun.

Gambar 17 menunjukkan pengujian respon sistem model hipertermia pada perubahan *setting point* turun atau semakin kecil. Pada awalnya sistem diberi *setting* referensi suhu sebesar 44°C. Waktu naik yang diperlukan untuk mencapai referensi tersebut adalah 110 detik dan waktu penetapan 200 detik. Ketika sistem melakukan perubahan referensi menjadi 42 °C waktu yang diperlukan untuk mencapai referensi baru adalah 80 detik dan waktu penetapan 90 detik. Waktu yang diperlukan untuk mencapai referensi baru ketika referensi turun relatif lama karena tidak adanya pendingin.

#### 4.2.7 Pengujian Respon Sistem terhadap Gangguan Luar

Pengaruh gangguan sesaat pada sistem dilakukan dengan meletakkan benda panas dengan suhu 52°C pada daerah pemanasan. Pemberian gangguan dilakukan ketika mencapai keadaan stabil.



Gambar 18 Respon sistem terhadap gangguan luar.

Gambar 18 menunjukkan respon sistem gangguan sesaat pada referensi 44°C dengan lama terpaai 20 menit. Setelah sistem *steady*, gangguan luar diberikan dengan meletakkan benda panas dengan suhu 52°C pada daerah pemanasan. Sesuai algoritma kontrol untuk keamanan penggunaan

sistem, gangguan yang sangat besar membuat sistem langsung mati hingga *error* tidak kurang dari -1 sistem akan kembali aktif. Respon sistem *plant* dengan gangguan menunjukkan bahwa sistem membutuhkan waktu pemulihan relatif lama sebesar 130 detik saat merespon gangguan sebesar 52°C karena keterbatasan sinyal kontrol yang dimiliki.

## V. PENUTUP

### 5.1 Kesimpulan

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

- 1.) Pada pengujian kalang terbuka, *plant* model hipertermia termasuk model IPDT yang bersifat integrator dengan nilai  $L = 10$  detik dan  $K^*=0,0016$ .
- 2.) Penalaan kontrol PID *plant* model hipertermia dapat dilakukan dengan metode *Zieger Nichols* untuk parameter  $K_p$  dan  $K_i$  dengan penambahan  $K_d$  secara empiris untuk memperbaiki respon *Zieger Nichols*. Pada pengujian penalaan didapatkan parameter PID untuk pengontrolan *plant* model sistem hipertermia  $K_p = 66$ ,  $K_i = 2$ , dan  $K_d = 25$ . Dengan parameter tersebut respon sistem kontrol PID mampu mencapai referensi pada jangkauan suhu terapi lebih cepat dan stabil.
- 3.) Pada pengujian dengan referensi tetap, sistem mampu menghasilkan respon yang baik selama 20 menit dengan *rise time* ( $T_r$ ) cepat. Pada suhu awal 30 °C untuk referensi 42 °C  $T_r = 100$  detik, untuk referensi 43 °C  $T_r = 110$  detik, untuk referensi 44 °C  $T_r = 110$  detik, dan untuk referensi 45 °C  $T_r = 120$  detik.
- 4.) Pada pengujian dengan nilai referensi naik, respon sistem mampu mengikuti kenaikan referensi dengan *rise time* relatif cepat. Saat mencapai referensi pertama 43 °C,  $T_r$  sebesar 95 detik. Ketika sistem melakukan perubahan referensi menjadi 45°C,  $T_r$  yang diperlukan adalah 20 detik.
- 5.) Pada pengujian dengan nilai referensi turun, respon sistem mampu mengikuti penurunan referensi dengan *rise time* relatif lambat. Saat mencapai referensi yang pertama 44 °C, memiliki  $T_r$  sebesar 110 detik. Ketika sistem melakukan perubahan referensi menjadi 42°C,  $T_r$  yang diperlukan adalah 80 detik.
- 6.) Pada pengujian respon sistem terhadap gangguan, sistem mampu merespon dengan waktu pemulihan relatif lambat. Sistem membutuhkan waktu pemulihan sebesar 130 detik saat merespon gangguan bersuhu 52°C dari keadaan *steady* 44°C.

## 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, yaitu dengan menggunakan magnetron sebagai aktuatornya.
- 2.) Plant pengontrolan suhu masih dapat dikembangkan lagi dengan mengubah kontroler, misalkan kontrol adaptif, kontrol fuzzy, algoritma genetik dan jaringan syaraf tiruan.

### DAFTAR PUSTAKA

- [1] AAPM Hyperthermia Comitee, "Performance Evaluation of Hyperthermia Equipment", *AAPM Report*, 26, 5-28, 1989.
- [2] Analog Devices Inc., *AD620 Low Cost, Low Power Instrumentation Amplifier*, <http://www.analog.com>, Juni 2010.
- [3] Atmel Corporation, *ATmega32 (L)*, [http : // www-.atmel.com / dyn / resources/ prod documents-/doc2503.pdf](http://www.atmel.com/dyn/resources/prod_documents/doc2503.pdf), Januari 2011.
- [4] Barnett, R., Cox, S., dan O'Cull, L., *Embedded C Programming and the Atmel AVR*, Thomson Delmar Learning, New York, 2007.
- [5] Doren, V.V., "Sorting Out PID Controller Differences", *Control Engineering*, 2, 42-43, 2009.
- [6] Eren, Halit, *Electronic Portable Instruments: Design and Applications*, CRC Press, Florida, 2004.
- [7] Gabriel, J. F., *Fisika Kedokteran*, EGC, Jakarta, 1996.
- [8] Greenfield, David, "When PID is Not the Answer", *Control Engineering*, 3, 54-57, 2010.
- [9] Habash, R.W.Y., *Non-Invasive Microwave Hyperthermia*, Tesis S-2, Indian Institute of Science, Bangalore, 1994.
- [10] Habash, R.W.Y., et. al., Thermal Therapy, Part 2 : Hyperthermia Techniques, *Critical Review in Biomedical Eng.*, 34, 492-542, 2006.
- [11] Ibrahim, Dogan, *Microcontroller Based Temperature Monitoring and Control*, Elsevier Sciences and Technology Books, Oxford, 2002.
- [12] Laksono, Suryo Krido, *Pengaturan Sudut fasa Berbasis Logika Fuzzy untuk Sistem Pengaturan Temperatur*, Skripsi S-1, Universitas Diponegoro, Semarang, 2003.
- [13] Littelfuse Inc., *AN1001: Fundamental Characteristic of Thyristor*, <http://www.littelfuse.com>, Juni 2010.
- [14] Littelfuse Inc., *AN1003: Phase Control Using Thyristors*, <http://www.littelfuse.com>, Juni 2010.
- [15] Melexis N. V., *MLX90247 Discrete Infrared Thermopile Detector*, <http://www.melexis.com/-Asset/IR-Sensor-MLX9024-7-DataSheet-Down-loadLink-4763.aspx>, Mei 2010.
- [16] Millier, Brian, "Noncontact Infrared Thermometry", *Circuit Cellar*, 175, 30-38, 2005.
- [17] Nahvi, Mahmood dan Edminister, J.A., *Schaum's Easy Outlines Rangkaian Listrik*, Erlangga, Jakarta, 2004.
- [18] Ogata, Katsuhiko, *Modern Control Engineering 4<sup>th</sup> ed.*, Prentice Hall, New Jersey, 2002.
- [19] Ogata, Katsuhiko, *Teknik Kontrol Automatik Jilid 1*, diterjemahkan oleh Edi Leksono, Erlangga, Jakarta, 1994.
- [20] Setiawan, Iwan, *Kontrol PID untuk Proses Industri*, Elex Media Komputindo, Jakarta, 2008.
- [21] Setiawan, Iwan, *Perancangan Software Embedded System Berbasis FSM*, <http://www.elektro.undip.ac.id/iwan/Perancangan%20Software%20Embedded%20System%20Berbasis%20FSM.pdf>, Agustus 2010.
- [22] Soloman, Sabrie, *Sensors Handbook, 2<sup>nd</sup> ed.*, Mc Graw-Hill, Inc., New York, 2010.
- [23] Welander, Peter, "Understanding Derivative in PID Control", *Control Engineering*, 2, 24-27, 2010.
- [24] Wilson, J. S., *Sensor Technology Handbook*, Elsevier Sciences and Technology Books, Oxford, 2005.

## BIODATA



Eka Fitriyadi (L2F005531). Lahir di Temanggung, 28 Mei 1987. Mahasiswa Reguler 1 Jurusan Teknik Elektro 2005, Konsentrasi Kontrol dan Automatik, Universitas Diponegoro.

Menyetujui dan Mengesahkan,

Pembimbing I

Pembimbing II

Imam Santoso,ST,MT

NIP.197012031997021001

Tanggal.....

Iwan Setiawan,ST,MT

NIP.197309262000121001

Tanggal.....