# SISTEM PENGENDALIAN SUHU CAIRAN PENDINGIN TRANSFORMATOR TENAGA

**Harjanto Gito Sarjono[1], Akhmad Musafa[2]**

[1,2] Teknik Elektro, Fak.Teknik, Universitas Budi Luhur, Jakarta, 12260
Telp : (021) 5853753 ext 254
e-mail: hagios.cg66@gmail.com, akhmad.musafa@budiluhur.com

**Abstract** - This paper presents the design of the cooling fluid temperature control system of power transformers in the electricity distribution system by using a PID controller in parallel structure. PID parameter tuning is done by trial and error method. The system consists of the LM35 temperature sensor as coolant temperature detector, a microcontroller as the main controller cooling system, keypad to input system parameters, LCD for displaying system parameters, as a regulator of frequency inverters and 3-phase induction motor as the driving force cooling fan. When the temperature read exceeds the value predetermined reference temperature, the microcontroller will respond by adjusting the rotational speed cooling fan in accordance with the increase or decrease in coolant temperature. From the test results, the best system response is obtained for the PID parameter values Kp = 2, Ki and Kd = 3 = 3 with a percentage error steady state value below 1%.

**Key Words–temperature control, cooling system, power transformer, PID controller**

**Abstrak –** Makalah ini menyajikan perancangan sistem pengendalian suhu cairan pendingin transformator tenaga pada sistem distribusi tenaga listrik dengan menggunakan pengendali PID struktur paralel. Tuning parameter PID dilakukan dengan metode trial and error. Sistem terdiri dari sensor suhu LM35 sebagai pendeteksi suhu cairan pendingin, mikrokontroler sebagai pengendali utama sistem pendinginan, keypad untuk menginputkan parameter sistem, LCD untuk menampilkan parameter sistem, inverter sebagai pengatur frekuensi, dan motor induksi 3 fasa sebagai penggerak kipas pendingin. Ketika suhu yang terbaca melebihi nilai suhu acuan yang telah ditentukan, mikrokontroler akan merespon dengan mengatur kecepatan putar kipas pendingin sesuai dengan kenaikan atau penurunan suhu cairan pendingin. Dari hasil pengujian, respon sistem yang terbaik diperoleh untuk nilai parameter PID Kp=2, Ki=3 dan Kd=3 dengan persentase nilai kesalahan steady state dibawah 1%.

**Kata Kunci –pengendalian suhu, sistem pendinginan, transformator tenaga, pengendali PID**

## I. PENDAHULUAN

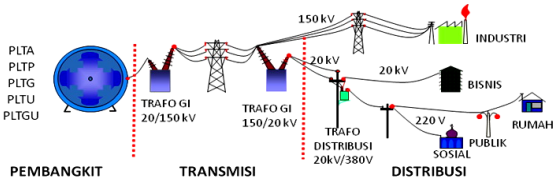
Dalam operasi sistem transmisi dan distribusi tenaga listrik, transformator tenaga merupakan komponen penting sebagai jantung dari operasi tersebut. Oleh karena itu transformator tenaga harus beroperasi secara maksimal. Peningkatan kapasitas operasi akan diikuti oleh peningkatan suhu operasi dari transformator tenaga sesuai dengan kenaikan beban. Pengendalian suhu operasi transformator tenaga diperlukan untuk menjaga *life time* dan kondisi operasi dari transformator tenaga tersebut. Pengendalian suhu transformator tenaga dapat dilakukan dengan memberi tekanan pada radiator pendingin, dimana beberapa buah kipas besar digantung di dekat radiator dan beberapa di bawah radiator. Kipas ini secara otomatis dihidupkan jika suhu cairan pendingin (minyak) transformator tenaga naik di atas nilai yang telah ditentukan dan akan kembali mati jika suhu minyak trafor berada di bawah nilai yang telah ditentukan[1]. Selain itu, pengendalian suhu juga dapat dilakukan dengan mempercepat sirkulasi media pendingin dengan penambahan pompa-pompa sirkulasi minyak, pompa udara, dan pompa air. Cara ini disebut sebagai pendinginan paksa[2]. Dalam penelitian ini, sistem kendali dilakukan dengan mengatur kecepatan putar motor kipas pendingin yang ada di dalam sistem pendingin transformator tenaga. Kecepatan putar motor kipas pendingin diatur sesuai suhu kenaikan operasi cairan pendingin yaitu antar $24^0$C sampai $72^0$C.

## II. DASAR TEORI

### 2.1 Sistem Distribusi Tenaga Listrik

Secara umum sistem tenaga listrik terbagi menjadi tiga bagian yaitu pembangkitan, penyaluran, dan distribusi seperti ditunjukkan pada Gambar 1. Dalam sistem distribusi listrik tegangan 150 KV dari sistem transmis diturunkan lagi menjadi 20 kV dengan transformator penurun tegangan pada gardu induk distribusi. Kemudian dengan sistem tegangan tersebut penyaluran tenaga listrik dilakukan oleh saluran distribusi primer. Dari saluran distribusi primer inilah gardu-gardu distribusi mengambil tegangan untuk diturunkan tegangannya dengan trafo distribusi menjadi sistem tegangan rendah, yaitu 220/380 Volt. Selanjutnya disalurkan oleh saluran distribusi sekunder ke konsumen-konsumen. Didalam sistem distribusi inilah terdapat transformator tenaga yang berperan penting dalam melayani kebutuhan konsumen

akan tenaga listrik. Oleh karenanya kinerja dari transformator tenaga sealu dijaga dan dipelihara agar tetap dalam kondisi terbaiknya.




*Gambar 1. Tahapan sistem tenaga listrik*

## 2.2. Sistem Pendinginan Transformator Tenaga

Transformator tenaga merupakan peralatan tenaga listrik yang berfungsi untuk menyalurkan tenaga atau daya listrik dari tegangan tinggi 150 KV ke tegangan rendah 20 KV. Transformator tenaga dilengkapi dengan peralatan pelengkap untuk menunjang kinerjanya, yaitu peralatan proteksi untuk melindungi dari gangguan serta Peralatan bantu untuk menunjang operasi transformator tenaga tersebut diantaranya adalah peralatan pendingin yang bertugas untuk menjaga suhu operasi dari transformator tenaga tersebut agar tetap pada suhu operasi yang ditentukan.

Untuk mengurangi kenaikan suhu transformator yang berlebihan maka perlu dilengkapi dengan alat atau sistem pendingin untuk menyalurkan panas keluar transformator. Oleh karena itu transformator tenaga dilengkapi dengan sirip-sirip pendingin yang berguna untuk mendinginkan minyak transformator dengan prinsip kerja seperti radiator. Pada sirip-sirip ini akan dialirkan media yang berguna untuk mendinginkan minyak dengan suhu panas yang mengalir didalam sirip-sirip tersebut. ketika minyak yang mengalir pada sirip telah dingin, maka akan dialirkan kembali ke dalam tanki utama baik dengan cara alami mapun dengan cara paksa. Media yang dipakai pada sistem pendingin dapat berupa udara/gas, minyak, dan air.

Macam-macam cara pendinginan dapat diaplikasikan pada transformator tenaga sesuai dengan spesifikasi dan kebutuhan operasi transformator tenaga itu sendiri, seperti ditunjukkan pada pada Tabel 1.

*Tabel 1. Jenis sistem pendinginan transformator tenaga*

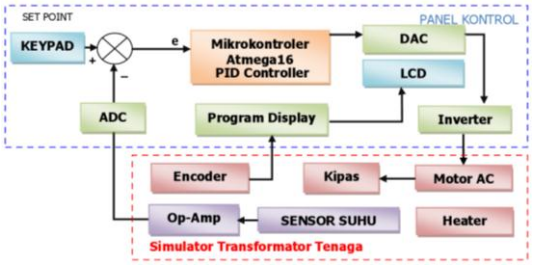
| No. | Macam Sistem Pendingin *) | Media | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | Dalam Transformator | | Diluar Transformator | |
| | | Sirkulasi alamiah | Sirkulasi Paksa | Sirkulasi Alamiah | Sirkulasi Paksa |
| 1. | AN | - | - | Udara | - |
| 2. | AF | - | - | - | Udara |
| 3. | ONAN | Minyak | - | Udara | - |
| 4. | ONAF | Minyak | - | - | Udara |
| 5. | OFAN | - | Minyak | Udara | - |
| 6. | OFAF | - | Minyak | - | Udara |
| 7. | OFWF | - | Minyak | - | Air |
| 8. | ONAN/ONAF | Kombinasi 3 dan 4 | | | |
| 9. | ONAN/OFAN | Kombinasi 3 dan 5 | | | |
| 10. | ONAN/OFAF | Kombinasi 3 dan 6 | | | |
| 11. | ONAN/OFWF | Kombinasi 3 dan 7 | | | |

Dalam penelitian ini, sistem pendinginan yang digunakan adalah sistem pendinginan paksa dengan menggunakan motor induksi 3 fasa sebagai penggerak untuk mengalirkan media pendingin baik udara maupun minyak.

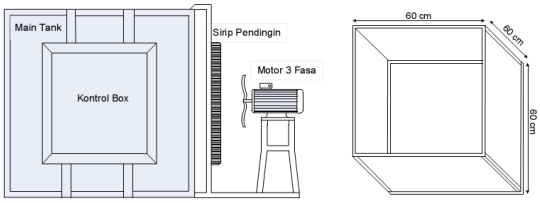
# III. PERANCANGAN SISTEM

## 3.1 Diagram Blok Sistem

Diagram blok sistem pengendalian suhu cairan pendingin transformator tenaga ditunjukkan pada Gambar 2, sedangkan rancangan mekanik sistem ditunjukkan pada Gambar 3.




*Gambar 2. Diagram blok sistem*

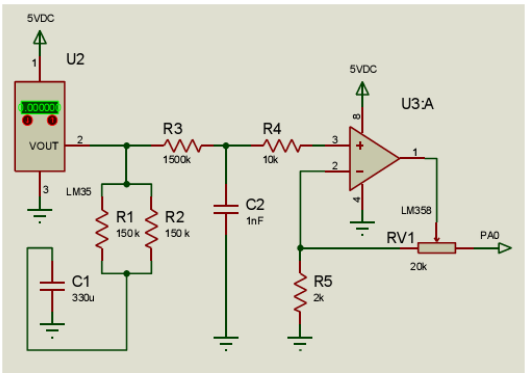



*Gambar 3. Rancangan mekanik sistem*

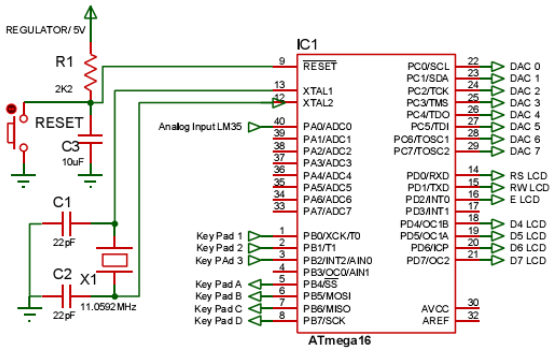
## 3.2. Prinsip Kerja Sistem

Dari Gambar 2, suhu acuan diinputkan melalui keypad. Suhu actual cairan pendingin dideteksi menggunakan sensor suhu LM35 (Gambar 4). Algoritma pengendali PID pada mikrokontroler (Gambar 5) akan menghitung sinyal kendali berdasarkan besarnya error suhu yang terjadi. Sinyal kendali output PID adalah data digital 8 bit (0-255) yang diubah menjadi

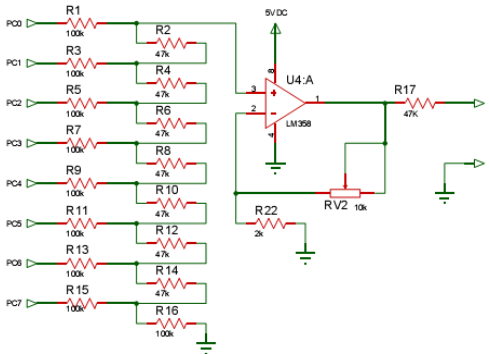
tegangan analog 0-5 volt oleh rangkaian DAC (Gambar 6), yang diinputkan ke inverter yang digunakan untuk mengatur kecepatan motor induksi 3 fasa yang digunakan untuk menggerakan kipas pendingin pada traformator tenaga. Kecepatan putar motor induksi dibaca oleh sensor rotary encoder.




*Gambar 4. Rangkaian sensor suhu LM35*

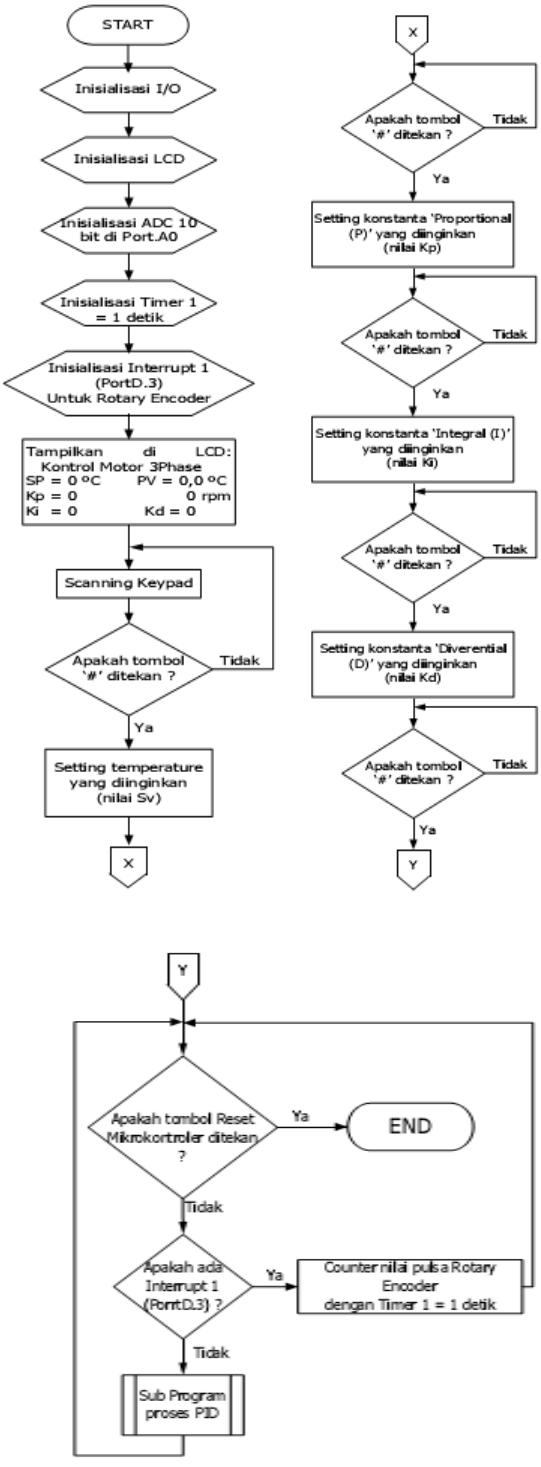



*Gambar 5. Rangkaian kontroler*

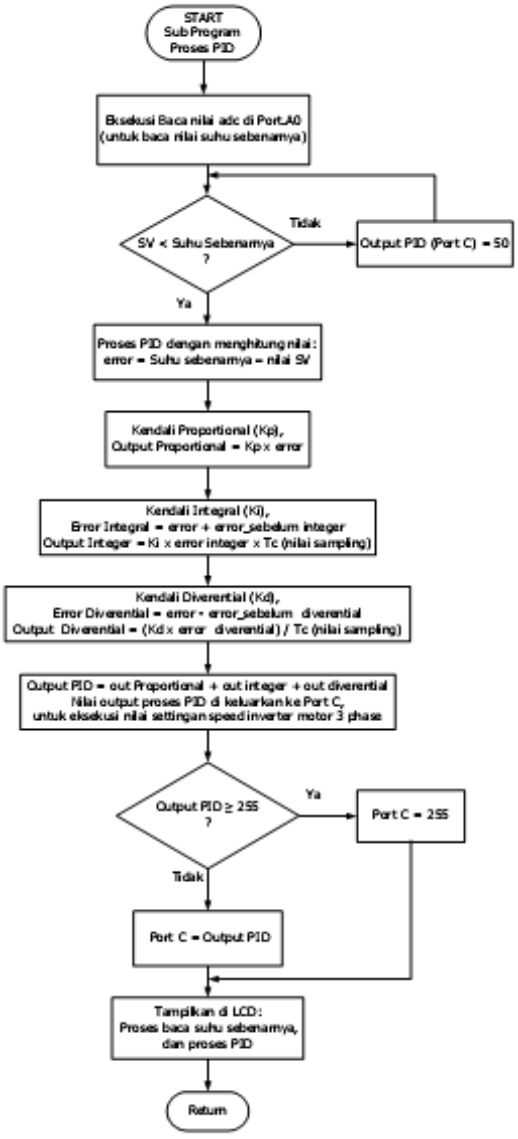



*Gambar 6. Rangkaian DAC*

Prinsip kerja sistem secara keseluruhan diimplementasikan dalam rancangan algoritma program seperti ditunjukkan pada Gambar 7 dan Gambar 8.



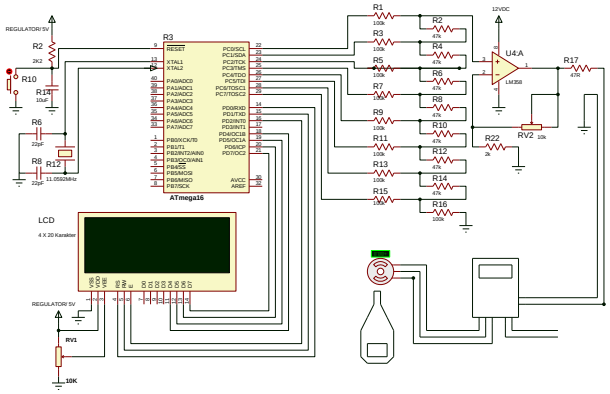

*Gambar 7. Diagram alir program utama*




*Gambar 8. Diagram alir sub program PID*

## IV. PENGUJIAN DAN ANALISA SISTEM

Pengujian sistem dilakukan dengan mensimulasikan sistem pendingan transformator tenaga pada suhu operasional sebenarnya yaitu antara 45°C - 75°C. Sebelum melakukan pengujian, terlebih dahulu perlu dilakukan kalibrasi terhadap pembacaan putaran motor kipas pendingin. Pembacaan putaran motor kipas pendingin dilakukan oleh encoder sebagai sensor kecepatan. Sensor ini mengirimkan sinyal pulsa mikrokontroler yang dibaca sebagai kecepatan putar motor per menit (dalam rpm). Rangkaian kalibrasi encoder ditunjukkan pada Gambar 9. Motor induksi 3 fasa dihubungkan dengan inverter yang telah diberikan input sinyal PID dari kontroler. Tachometer diletakkan pada poros motor 3 fasa untuk membaca putarannya. Kalibrasi pembacaan putaran motor oleh encoder dilakukan dengan membandingkannya dengan hasil pembacaan dari tachometer dengan pembacaan encoder yang terlihat pada LCD. Hasil kalibrasi encoder ditunjukkan pada Tabel 2.




*Gambar 9. Rangkaian kalibrasi encoder*

Hasil kalibrasi encoder ditunjukkan pada Tabel 2.

| Input PID | Pembacaan RPM | | Selisih Pembacaan (RPM) | Keterangan |
|---|---|---|---|---|
| | Tachometer | Encoder | | |
| 25 | 233 | 232 | 1 | Ok |
| 50 | 408 | 407 | 1 | Ok |
| 75 | 605 | 607 | 0 | Ok |
| 100 | 775 | 775 | 2 | Ok |
| 125 | 930 | 931 | 1 | Ok |
| 150 | 1117 | 1115 | 2 | Ok |
| 175 | 1324 | 1326 | 2 | Ok |
| 200 | 1497 | 1496 | 1 | Ok |
| 225 | 1665 | 1668 | 3 | Ok |
| 250 | 1851 | 1850 | 1 | Ok |

Dari Tabel 2 diketahui bahwa selisih antara pembacaan kecepatan motor antara tachometer dengan encoder tidak terlalu besar, maksimal 3 RPM.

Dalam pengujian sistem, heater digunakan sebagai alat untuk memanaskan air sebagai simulasi dari minyak pada transformator tenaga dengan volume 144.000 $cm^3$. Sedangkan untuk sirkulasi cairan pendingin digunakan pompa air berkapasitas 50W untuk mengalirkan air ke radiator pendingin. Heater yang digunakan sebanyak 15 heater dengan konsumsi daya masing-masing sebesar 150W. Heater dengan jumlah 15 digunakan untuk mencapai suhu maksimal cairan pendingin simulator transformator tenaga yaitu sebesar 75°C dalam waktu 40 menit. Lama waktu pemanasan dari kondisi aktual transformator tenaga sampai dengan suhu 75°C tidak digunakan sebagai acuan waktu pada pemanasan air pendingin di simulator, hal ini dikarenakan kenaikan suhu aktual pada transformator tenaga sangat tergantung dari pembebanan yang sedang terjadi, fluktuasi kenaikan suhu operasi menjadi tidak pasti bergantung kepada seberapa besar beban yang sedang disalurkan. untuk penempatan dari heater dan pompa sirkulasi air dapat dilihat pada Gambar 10.

*Gambar 10. Penempatan heater dan Pompa Sirkulasi Air*

Pada pengujian sistem secara keseluruhan, pertama kali yang dilakukan adalah menginputkan nilai suhu acuan cairan pendingin pada suhu 45°C melalui *keypad*, sensor suhu LM35 akan membaca suhu cairan pendingin didalam tanki simulator trafo tenaga dan mengirimkan nilai suhu actual ke kontroler. Algoritma pengendali PID pada kontroler akan menghitung berapa sinyal kontrol yang harus diberikan ke inverter untuk mengatur kecepatan putaran kipas pendingin sehingga suhu cairan pendingin didalam tanki simulator trafo tenaga sesuai dengan suhu yang diinginkan. Untuk Bentuk fisik dari simulator transformator tenaga dapat dilihat pada Gambar 11.

*Gambar 11. Simulator Transformator Tenaga*

Pengujian sistem keseluruhan dilakukan dalam dua kondisi, yaitu pengujian sistem tanpa gangguan dan pengujian sistem dengan gangguan.

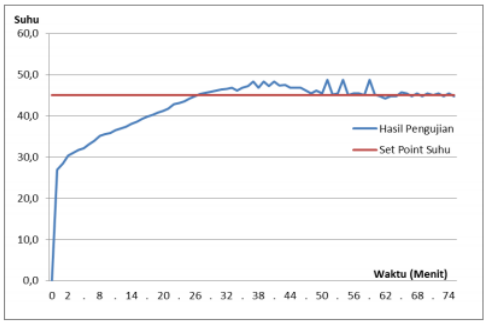
### 4.1 Pengujian SIstem Kondisi Tanpa Gangguan

Pertama dilakukan pada sistem dalam kondisi tanpa adanya gangguan. Hasil pengujian ditunjukkan pada Tabel 3.

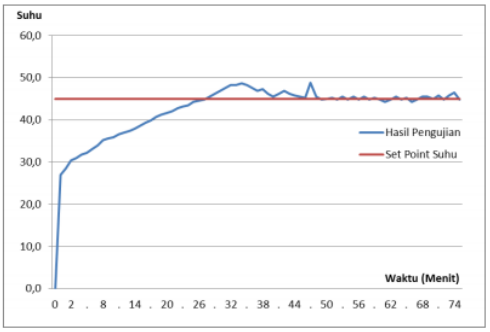
*Tabel 3. Hasil pengujian sistem kondisi tanpa gangguan*

| Waktu | Suhu (°C) | Suhu Aktual (°C) | | |
|---|---|---|---|---|
| (Menit) | Set Point | KP=1, KI=1, KD=1 | KP=1, KI=2, KD=2 | KP=2, KI=3, KD=3 |
| 0 | 45 | 26,9 | 26,9 | 26,9 |
| 1 | 45 | 28,4 | 28,4 | 28,4 |
| 2 | 45 | 30,4 | 30,4 | 30,4 |
| 3 | 45 | 31,0 | 31,0 | 31,0 |
| 4 | 45 | 31,7 | 31,7 | 31,7 |
| 5 | 45 | 32,2 | 32,2 | 32,2 |
| 6 | 45 | 33,1 | 33,1 | 33,1 |
| 7 | 45 | 34,0 | 34,0 | 34,0 |
| 8 | 45 | 35,2 | 35,2 | 35,2 |
| 9 | 45 | 35,6 | 35,6 | 35,6 |
| 10 | 45 | 35,9 | 35,9 | 35,9 |
| 11 | 45 | 36,6 | 36,6 | 36,6 |
| 12 | 45 | 37,0 | 37,0 | 37,0 |
| 13 | 45 | 37,4 | 37,4 | 37,6 |
| 14 | 45 | 38,0 | 38,0 | 38,2 |
| 15 | 45 | 38,6 | 38,6 | 38,6 |
| 16 | 45 | 39,3 | 39,3 | 39,3 |
| 17 | 45 | 39,9 | 39,9 | 40,6 |
| 18 | 45 | 40,2 | 40,7 | 41,6 |
| 19 | 45 | 40,8 | 41,2 | 41,7 |
| 20 | 45 | 41,2 | 41,6 | 42,2 |
| 21 | 45 | 41,7 | 42,1 | 42,6 |
| 22 | 45 | 42,8 | 42,8 | 42,8 |
| 23 | 45 | 43,1 | 43,1 | 43,5 |
| 24 | 45 | 43,5 | 43,5 | 44,5 |
| 25 | 45 | 44,2 | 44,2 | 45,2 |
| 26 | 45 | 44,8 | 44,5 | 45,6 |
| 27 | 45 | 45,4 | 44,8 | 46,2 |
| 28 | 45 | 45,6 | 45,5 | 46,9 |
| 29 | 45 | 45,9 | 46,2 | 45,5 |
| 30 | 45 | 46,2 | 46,9 | 46,2 |
| 31 | 45 | 46,4 | 47,6 | 45,5 |
| 32 | 45 | 46,6 | 48,3 | 46,2 |
| 33 | 45 | 46,9 | 48,3 | 46,9 |
| 34 | 45 | 46,2 | 48,6 | 46,2 |
| 35 | 45 | 46,9 | 48,3 | 45,5 |
| 36 | 45 | 47,2 | 47,6 | 46,2 |
| 37 | 45 | 48,3 | 46,9 | 45,5 |
| 38 | 45 | 46,9 | 47,3 | 44,8 |
| 39 | 45 | 48,3 | 46,2 | 45,5 |
| 40 | 45 | 47,3 | 45,5 | 44,8 |
| 41 | 45 | 48,3 | 46,2 | 45,5 |
| 42 | 45 | 47,4 | 46,9 | 44,8 |
| 43 | 45 | 47,6 | 46,2 | 45,8 |
| 44 | 45 | 46,9 | 45,8 | 45,5 |
| 45 | 45 | 46,9 | 45,5 | 46,2 |
| 46 | 45 | 46,9 | 45,2 | 44,8 |
| 47 | 45 | 46,2 | 48,8 | 46,2 |
| 48 | 45 | 45,5 | 45,5 | 44,8 |
| 49 | 45 | 46,2 | 44,8 | 44,5 |
| 50 | 45 | 45,5 | 45,0 | 44,8 |
| 51 | 45 | 48,8 | 45,2 | 45,5 |
| 52 | 45 | 45,2 | 44,8 | 44,8 |
| 53 | 45 | 45,5 | 45,5 | 45,5 |
| 54 | 45 | 48,8 | 44,8 | 44,8 |
| 55 | 45 | 45,0 | 45,5 | 45,5 |
| 56 | 45 | 45,5 | 44,8 | 44,8 |
| 57 | 45 | 45,5 | 45,5 | 45,5 |
| 58 | 45 | 45,1 | 44,8 | 44,8 |
| 59 | 45 | 48,8 | 45,2 | 45,5 |
| 60 | 45 | 45,2 | 44,8 | 44,8 |
| 61 | 45 | 44,8 | 44,2 | 45,5 |
| 62 | 45 | 44,2 | 44,8 | 44,8 |
| 63 | 45 | 44,8 | 45,5 | 45,5 |
| 64 | 45 | 44,8 | 44,8 | 44,8 |
| 65 | 45 | 45,8 | 45,2 | 45,5 |
| 66 | 45 | 45,5 | 44,2 | 44,8 |
| 67 | 45 | 44,8 | 44,8 | 45,5 |
| 68 | 45 | 45,5 | 45,5 | 44,8 |
| 69 | 45 | 44,8 | 45,5 | 45,5 |
| 70 | 45 | 45,5 | 45,0 | 44,8 |
| 71 | 45 | 45,0 | 45,8 | 45,5 |
| 72 | 45 | 45,5 | 44,8 | 44,8 |
| 73 | 45 | 44,8 | 45,8 | 45,5 |
| 74 | 45 | 45,5 | 46,4 | 44,8 |

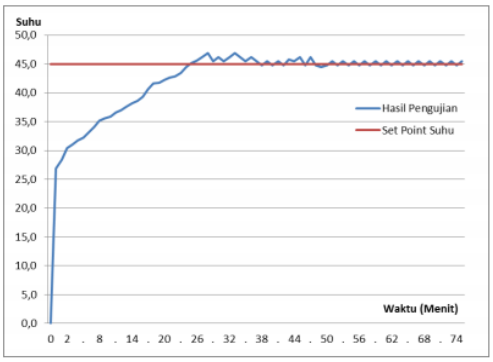
Dari Tabel 3, dapat dilihat respon sistem untuk tiga variasi nilai parameter PID seperti ditunjukkan pada Gambar 12, 13, dan 14.




*Gambar 11. Respon sistem dengan Kp=1, Ki=1, Kd=1*




*Gambar 12. Respon sistem dengan Kp=1, Ki=2, Kd=2*




*Gambar 13. Respon sistem dengan Kp=2, Ki=3, Kd=3*

Dari Tabel 3, dapat dianalisa parameter respon transien dan steady state dari masing-masing parameter PID seperti ditunjukkan pada Tabel 4 dan Tabel 5.

*Tabel 4. Karakteristik respon transien sistem tanpa gannguan*

| Parameter PID | Karakteristik Respon Transien | | | |
|---|---|---|---|---|
| | Tr (Time Respon) | Tp (Peak Time) | Ts (Seatling Time) | OS (Over Shoot) |
| KP = 1 KI = 1 KD = 1 | 21 menit | 37 menit | 60 menit | 8,4 % |
| KP = 1 KI = 2 KD =2 | 20 menit | 34 menit | 50 menit | 8,4 % |
| KP = 2 KI = 3 KD =3 | 18 menit | 28 menit | 50 menit | 4,2 % |

*Tabel 5.Nilai steadt state error sistem tanpa gannguan*

| Nilai SV (°C) | Menit Ke | Parameter PID | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | KP=1, KI=1, KD=1 | | KP=1, KI=2, KD=2 | | KP=2, KI=3, KD=3 | |
| | | Nilai PV(°C) | ESS | Nilai PV(°C) | ESS | Nilai PV(°C) | ESS |
| 45°C | 50 | 45,5 | 0,5 | 45,0 | 0 | 44,8 | 0,2 |
| 45°C | 51 | 48,8 | 3,8 | 45,2 | 0,2 | 45,5 | 0,5 |
| 45°C | 52 | 45,2 | 0,2 | 44,8 | 0,2 | 44,8 | 0,2 |
| 45°C | 53 | 45,5 | 0,5 | 45,5 | 0,5 | 45,5 | 0,5 |
| 45°C | 54 | 48,8 | 3,8 | 44,8 | 0,2 | 44,8 | 0,2 |
| 45°C | 55 | 45,0 | 0 | 45,5 | 0,5 | 45,5 | 0,5 |
| 45°C | 56 | 45,5 | 0,5 | 44,8 | 0,2 | 44,8 | 0,2 |
| 45°C | 57 | 45,5 | 0,5 | 45,5 | 0,5 | 45,5 | 0,5 |
| 45°C | 58 | 45,1 | 0,1 | 44,8 | 0,2 | 44,8 | 0,2 |
| 45°C | 59 | 48,8 | 3,8 | 45,2 | 0,2 | 45,5 | 0,5 |
| 45°C | 60 | 45,2 | 0,2 | 44,8 | 0,2 | 44,8 | 0,2 |
| 45°C | 61 | 44,8 | 0,2 | 44,2 | 0,8 | 45,5 | 0,5 |
| 45°C | 62 | 44,2 | 0,2 | 44,8 | 0,2 | 44,8 | 0,2 |
| 45°C | 63 | 44,8 | 0,2 | 45,5 | 0,5 | 45,5 | 0,5 |
| 45°C | 64 | 44,8 | 0,2 | 44,8 | 0,2 | 44,8 | 0,2 |
| 45°C | 65 | 45,8 | 0,8 | 45,2 | 0,2 | 45,5 | 0,5 |
| 45°C | 66 | 45,5 | 0,5 | 44,2 | 0,8 | 44,8 | 0,2 |
| 45°C | 67 | 44,8 | 0,2 | 44,8 | 0,2 | 45,5 | 0,5 |
| 45°C | 68 | 45,5 | 0,5 | 45,5 | 0,5 | 44,8 | 0,2 |
| 45°C | 69 | 44,8 | 0,2 | 45,5 | 0,5 | 45,5 | 0,5 |
| 45°C | 70 | 45,5 | 0,5 | 45,0 | 0 | 44,8 | 0,2 |
| 45°C | 71 | 45,0 | 0 | 45,8 | 0,8 | 45,5 | 0,5 |
| 45°C | 72 | 45,5 | 0,5 | 44,8 | 0,8 | 44,8 | 0,2 |
| 45°C | 73 | 44,8 | 0,2 | 45,8 | 0,8 | 45,5 | 0,5 |
| 45°C | 74 | 45,5 | 0,5 | 46,4 | 1,4 | 44,8 | 0,2 |
| 45°C | 75 | 44,8 | 0,2 | 44,8 | 0,2 | 45,5 | 0,5 |
| Total ESS | | | 18,8 | | 10,8 | | 8,6 |

Berdasarkan 3 kali percobaan tanpa disturbance didapatkan parameter PID dengan respon terbaik adalah Kp : 2, Ki : 3, Kd : 3 sehingga dapat dianalisa respon transient dari sistem sebagai berikut:

1. *time respon* tercepat dari sistem adalah 18 menit.
2. Dari grafik respon pengujian sistem terjadi overshot suhu sebesar 1,9 $^0$C, dengan persentase sebesar 4,2%.
3. Waktu yang diperlukan sistem untuk mencapai keadaan steady state adalah 50 menit dengan waktu total pengujian selama 72 menit.
4. Sistem mengendalikan suhu transformator tenaga pada *set point* 45$^0$C dengan rata-rata *error* sebesar 0.344$^0$C dengan persentase sebesar 0,76% pada keadaan steady state.

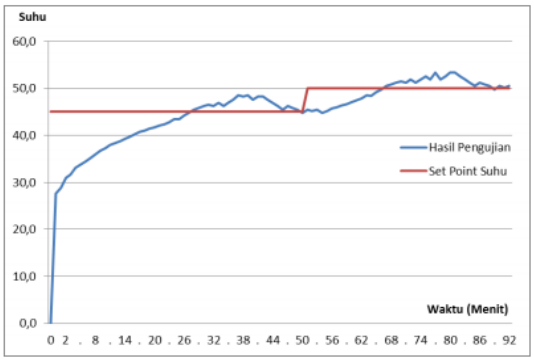
### 4.2 Pengujian Sistem dengan Gangguan

Tujuan pengujian pada sistem dengan adanya gangguan (*disturbance*) adalah untuk mengetahui kinerja saat sistem bekerja dan diberikan gangguan. Gangguan diberikan pada saat sistem bekerja dalam keadaan steady state dengan cara memberikan perubahan nilai set point dan memberikan panas tambahan penambahan 3 buah heater. Data hasil pengujian sistem dengan disturbance ditunjukkan pada Tabel 6, Tabel 7, dan Tabel 8.

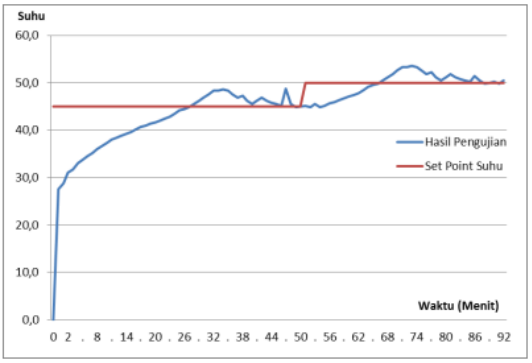
*Tabel 6. Hasil pengujian sistem dengan gannguan*

| Waktu (Menit) | Suhu (°C) Set Point | Suhu Aktual (°C) KP=1, KI=1, KD=1 | KP=1, KI=2, KD=2 | KP=2, KI=3, KD=3 |
|---|---|---|---|---|
| 0 | 45 | 27,6 | 27,6 | 27,6 |
| 1 | 45 | 28,8 | 28,8 | 28,8 |
| 2 | 45 | 31,0 | 31,0 | 31,0 |
| 3 | 45 | 31,7 | 31,7 | 31,7 |
| 4 | 45 | 33,1 | 33,1 | 33,1 |
| 5 | 45 | 33,8 | 33,8 | 33,8 |
| 6 | 45 | 34,5 | 34,5 | 34,5 |
| 7 | 45 | 35,2 | 35,2 | 35,2 |
| 8 | 45 | 36,0 | 36,0 | 36,0 |
| 9 | 45 | 36,7 | 36,7 | 36,7 |
| 10 | 45 | 37,3 | 37,3 | 37,3 |
| 11 | 45 | 38,0 | 38,0 | 38,0 |
| 12 | 45 | 38,4 | 38,4 | 38,4 |
| 13 | 45 | 38,8 | 38,8 | 38,8 |
| 14 | 45 | 39,3 | 39,3 | 39,3 |
| 15 | 45 | 39,7 | 39,7 | 39,7 |
| 16 | 45 | 40,2 | 40,2 | 40,2 |
| 17 | 45 | 40,7 | 40,7 | 40,7 |
| 18 | 45 | 41,0 | 41,0 | 41,6 |
| 19 | 45 | 41,4 | 41,4 | 41,7 |
| 20 | 45 | 41,7 | 41,7 | 42,2 |
| 21 | 45 | 42,1 | 42,1 | 42,6 |
| 22 | 45 | 42,4 | 42,4 | 42,8 |
| 23 | 45 | 42,8 | 42,8 | 43,5 |
| 24 | 45 | 43,5 | 43,5 | 44,5 |
| 25 | 45 | 43,4 | 44,2 | 45,2 |
| 26 | 45 | 44,2 | 44,5 | 45,6 |
| 27 | 45 | 44,8 | 44,8 | 46,2 |
| 28 | 45 | 45,5 | 45,5 | 46,9 |
| 29 | 45 | 45,8 | 46,2 | 45,5 |
| 30 | 45 | 46,2 | 46,9 | 46,2 |
| 31 | 45 | 46,5 | 47,6 | 45,5 |
| 32 | 45 | 46,2 | 48,3 | 46,2 |
| 33 | 45 | 46,9 | 48,3 | 46,9 |
| 34 | 45 | 46,2 | 48,6 | 46,2 |
| 35 | 45 | 46,9 | 48,3 | 45,5 |
| 36 | 45 | 47,6 | 47,6 | 46,2 |
| 37 | 45 | 48,5 | 46,9 | 45,5 |
| 38 | 45 | 48,3 | 47,3 | 44,8 |
| 39 | 45 | 48,5 | 46,2 | 45,5 |
| 40 | 45 | 47,6 | 45,5 | 44,8 |
| 41 | 45 | 48,3 | 46,2 | 45,5 |
| 42 | 45 | 48,3 | 46,9 | 44,8 |
| 43 | 45 | 47,6 | 46,2 | 45,8 |
| 44 | 45 | 46,9 | 45,8 | 45,5 |
| 45 | 45 | 46,2 | 45,5 | 46,2 |
| 46 | 45 | 45,5 | 45,2 | 44,8 |
| 47 | 45 | 46,2 | 48,8 | 46,2 |
| 48 | 45 | 45,8 | 45,5 | 44,8 |
| 49 | 45 | 45,5 | 44,8 | 44,5 |
| 50 | 45 | 44,8 | 45,0 | 44,8 |
| 51 | 45 | 45,5 | 45,2 | 45,5 |
| 52 | 45 | 45,2 | 44,8 | 44,8 |
| 53 | 45 | 45,5 | 45,5 | 45,5 |
| 54 | 45 | 44,8 | 44,8 | 44,8 |
| 55 | 45 | 45,2 | 45,2 | 46,0 |
| 56 | 45 | 45,7 | 45,7 | 45,7 |
| 57 | 45 | 46,0 | 46,0 | 46,6 |
| 58 | 45 | 46,4 | 46,4 | 46,7 |
| 59 | 45 | 46,7 | 46,7 | 47,2 |
| 60 | 45 | 47,1 | 47,1 | 47,6 |
| 61 | 45 | 47,4 | 47,4 | 47,8 |
| 62 | 45 | 47,8 | 47,8 | 48,5 |
| 63 | 45 | 48,5 | 48,5 | 49,5 |
| 64 | 45 | 48,4 | 49,2 | 50,2 |
| 65 | 45 | 49,2 | 49,5 | 50,6 |
| 66 | 45 | 49,8 | 49,8 | 51,2 |
| 67 | 45 | 50,5 | 50,5 | 51,9 |
| 68 | 45 | 50,8 | 51,2 | 50,5 |
| 69 | 45 | 51,2 | 51,9 | 51,2 |
| 70 | 45 | 51,5 | 52,6 | 50,5 |
| 71 | 45 | 51,2 | 53,3 | 51,2 |
| 72 | 45 | 51,9 | 53,3 | 51,9 |
| 73 | 45 | 51,2 | 53,6 | 51,2 |
| 74 | 45 | 51,9 | 53,3 | 50,5 |
| 75 | 45 | 52,6 | 52,6 | 51,2 |
| 76 | 45 | 51,9 | 51,9 | 50,5 |
| 77 | 45 | 53,3 | 52,3 | 49,8 |
| 78 | 45 | 51,9 | 51,2 | 50,5 |
| 79 | 45 | 52,6 | 50,5 | 49,8 |
| 80 | 45 | 53,3 | 51,2 | 50,5 |
| 81 | 45 | 53,3 | 51,9 | 49,8 |
| 82 | 45 | 52,6 | 51,2 | 50,8 |
| 83 | 45 | 51,9 | 50,8 | 50,5 |
| 84 | 45 | 51,2 | 50,5 | 51,2 |
| 85 | 45 | 50,5 | 50,2 | 49,8 |

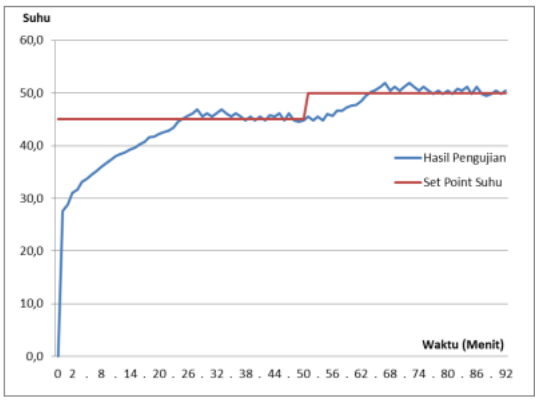
Respon sistem PID seperti ditunjukkan pada Gambar 15, 16, dan 17.




*Gambar 15. Respon pengujian sistem dengan gangguan untuk Kp=1, Ki=1 dan Kd=1*




*Gambar 16. Respon pengujian sistem dengan gangguan untuk Kp=1, Ki=2 dan Kd=2*




*Gambar 17. Respon pengujian sistem dengan gangguan untuk Kp=2, Ki=3 dan Kd=3*

Dari Tabel 6, dapat dianalisa respon transient dan steady state sistem untuk 3 variasi parameter PID seperti ditunjukkan pada Tabel 7 dan 8.

*Tabel 7. Karakteristik respon transien sistem dengan gannguan*

| Parameter PID | Karakteristik Respon Transien terhadap Disturbanse | | | |
|---|---|---|---|---|
| | Tr (Time Respon) | Tp (Peak Time) | Ts (Seatling Time) | OS (Over Shoot) |
| KP = 1 KI = 1 KD = 1 | 57 menit | 77 menit | 86 menit | 2,13 % |
| KP = 1 KI = 2 KD =2 | 57 menit | 71 menit | 86 menit | 2,14 % |
| KP = 2 KI = 3 KD =3 | 55 menit | 67 menit | 75 menit | 2,07 % |

*Tabel 8. Nilai steady state error sistem dengan gannguan*

| Nilai SV (°C) | Menit Ke | Parameter PID | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | KP=1, KI=1, KD=1 | | KP=1, KI=2, KD=2 | | KP=2, KI=3, KD=3 | |
| | | Nilai PV(°C) | ESS(°C) | Nilai PV(°C) | ESS(°C) | Nilai PV(°C) | ESS(°C) |
| 50°C | 85 | 50,5 | 0,5 | 50,2 | 0,2 | 49,8 | 0,2 |
| 50°C | 86 | 51,2 | 1,2 | 51,5 | 1,5 | 51,2 | 1,2 |
| 50°C | 87 | 50,8 | 0,8 | 50,5 | 0,5 | 49,8 | 0,2 |
| 50°C | 88 | 50,5 | 0,5 | 49,8 | 0,2 | 49,5 | 0,5 |
| 50°C | 89 | 49,8 | 0,2 | 50,5 | 0,5 | 49,8 | 0,2 |
| 50°C | 90 | 50,5 | 0,5 | 50,2 | 0,2 | 50,5 | 0,5 |
| 50°C | 91 | 50,2 | 0,2 | 49,8 | 0,2 | 49,8 | 0,2 |
| 50°C | 92 | 50,5 | 0,5 | 50,5 | 0,5 | 50,5 | 0,5 |
| Total ESS | | | 4,4°C | | 3,8°C | | 3,5 °C |

Berdasarkan 3 kali percobaan dengan gangguan diperoleh parameter PID dengan respon terbaik adalah Kp : 2, Ki : 3, Kd : 3 sehingga dapat dianalisa respon transient dari sistem sebagai berikut:

1. *Time respon* tercepat dari sistem adalah 55 menit.
2. Dari grafik respon pengujian sistem terjadi overshoot suhu sebesar 1,9 $^0$C, dengan persentase sebesar 2,07%.
3. Waktu dari sistem untuk mencapai keadaan steady state adalah 80 menit dengan waktu total pengujian selama 92 menit.
4. Sistem mengendalikan suhu transformator tenaga pada *set point* 50$^0$C dengan rata-rata *error* sebesar 0.4375$^0$C dengan persentase sebesar 0,875% pada keadaan steady state.
5. Dari grafik respon pengujian sistem pada *set point* 45$^0$C dapat disimpulkan bahwa alat ini dapat bekerja dengan baik sesuai perancangan.

## V. KESIMPULAN

Dari hasil pengujian dan analisa sistem, dapat diambil kesimpulan bahwa berdasarkan total 6 kali percobaan tanpa disturbance, setting parameter PID yang dipilh adalah Kp = 2, Ki = 3, Kd = 3. Setting parameter tersebut dapat mengendalikan suhu sesuai dengan set point 45ºC dengan overshoot 4,2%, serta error steadystate yang kecil sebesar 0,76%. Sedangkan berdasarkan total 6 kali percobaan sistem dengan gangguan, setting parameter PID yang dipilh adalah Kp = 2, Ki = 3, Kd = 3. Setting parameter tersebut dapat mengendalikan suhu sesuai dengan set point 45ºC dengan overshoot sebesar 2,07% dengan error steadystate sebesar 0,875%. Secara keseluruhan sistem dapat bekerja mengendalikan suhu cairan pendingin transformator tenaga.

## REFERENSI


[1] _____ , *Transformer Tank and Cooling Sistem*, http://sisfo.itp.ac.id/bahanajar/bahanajar/Antonov/Transformator/Minggu%20ke%20IX%20ok.pdf

[2] Markus AAC, Hendik Eko, Renny R. ”*Rancang Bangun Sistem Monitoring Untuk Mengetahui Kualitas dan Pengaturan Pendingin Minyak Transformator*” Surabaya, Politeknik Elektronika Negeri Surabaya

[3] Ayi Bayinah, “*Aplikasi PID Pada Sistem Navigasi Robot Cerdas Wall Folower*”, Universitas Budi Luhur, Jakarta, 2013.

*[4]* Suseno, “*Rancang Bangun Sistem Kontrol Robot NeoGanesa (Robot Pendeteksi Warna dan Pemindah Barang)*”, Universitas Budi Luhur, Jakarta, 2013.

[5] Muslimin Zaenab, “*Pengontrolan Motor Induksi Tiga Fasa dengan inverter Berbasis Mikontroler AT89S51*”, Fakultas Teknik Universitas Hasanudin, Makasar. 2009.