

PENGENDALIAN SISTEM PEMANAS AIR BERTENAGA LISTRIK DENGAN PENGENDALI PID DAN PENGENDALI MIKRO AT89S51

Sujono

Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Budi Luhur
Jl. Ciledug Raya Petukangan Utara Jakarta Selatan 12260
E-mail : soejon@yahoo.com

Abstract— In this paper will be discussed about heating of water with electrical heater. Heating the water happened by flowing heat energy result of electrical energy conversion. Water temperature control result is done by arranging number of electric energies converted to become heat and poured into in water. Arrangement of the electric energy is done by the way of dismemberment (chopping) voltage signal passed to element heater. Source voltage chopper network for heater is made with principal components in the form of triac Q40006L4. As temperature sensor from heated water, applied LM35DZ measuring up to linear so that would more easily in operation. Controller PID applied is made from network op-amp configuration to become proportional amplifier, integrator and differentiator.

Key Words—Chopping, Q40006L4, PID.

I. PENDAHULUAN

Kontrol otomatis saat ini memberikan peran yang sangat besar dalam kehidupan manusia. Beberapa di antaranya adalah otomatisasi pada sistem robot, pengendalian suhu, pengaturan kelembaban udara dalam sebuah ruangan, dan lain sebagainya untuk mendukung jalannya proses yang ada di industri.

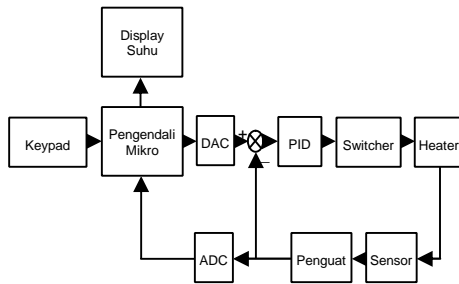
Dalam tulisan ini akan dibahas tentang perancangan suatu pengendalian

suhu pada sistem pemanas air bertenaga listrik (*electric water heater*). Bekerjanya sistem dikendalikan dengan mikrokontroler AT89C51 yang merupakan pengontrol mikro standar industri dan mudah didapatkan di pasaran[1]. Pengendalian temperatur melalui pengendali PID (*Proportional Integral Derivative*) dilakukan dengan *set point* temperatur air sebesar 50° C.

II. SISTEM PEMANAS AIR BERTENAGA LISTRIK (*ELECTRIC WATER HEATER*)

Sistem pemanas air berfungsi untuk memanaskan air dengan menggunakan elemen pemanas bertenaga listrik. Temperatur air hasil pemanasan akan sebanding dengan jumlah energi listrik yang dipasok ke sistem dan dikonversi menjadi energi panas. Pengendalian temperatur hasil pemanasan dilakukan dengan cara mengatur atau memanipulasi jumlah pasokan daya listrik yang diberikan ke elemen pemanas (*heater*).

Dalam tulisan ini akan, pengendalian temperatur dilakukan dengan memanfaatkan pengendali *Proporsional Integral* dan *Derivative* (PID) dan pengendali mikro AT89S52. Blok Diagram sistem secara lengkap adalah sebagaimana terlihat pada Gambar 1.



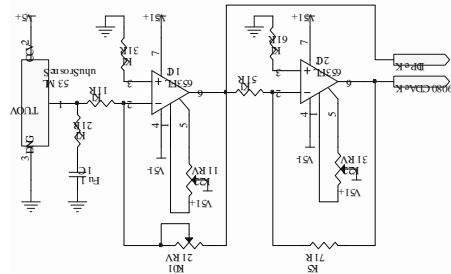
Gambar 1. Blok Diagram Sistem Pengendali Pemanas Air Bertenaga Listrik

Pada sistem ini, *keypad* difungsikan untuk memasukkan nilai *setpoint* untuk suhu hasil pemanasan yang diinginkan, sedangkan display untuk menampilkan nilai *setpoint* dan nilai aktual dari suhu hasil pemanasan.

A. Pendeteksi Suhu Air

Pendeteksi suhu air yang digunakan adalah LM35DZ. Komponen ini memiliki linearitas tegangan keluaran terhadap kenaikan suhu yang dideteksi dengan kenaikan tegangan keluaran sebesar $10 \text{ mV}/^{\circ}\text{C}$. Dengan demikian tegangan keluaran sensor terlalu kecil dan diperlukan suatu rangkaian pengkondisi sinyal tegangan berupa rangkaian

penguat. Dalam hal ini rangkaian penguat tegangan yang digunakan adalah dengan op-amp LF356N. Rangkaian lengkap seperti disajikan pada Gambar 2 berikut ini.



Gambar 2. Rangkaian Penguat Tegangan Keluaran Sensor Suhu[2]

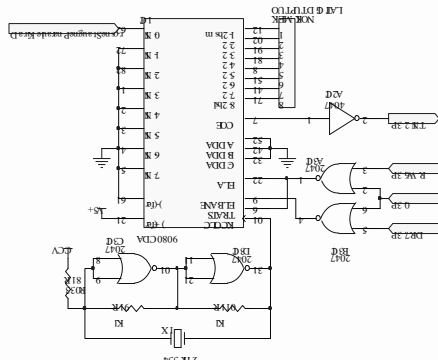
Rangkaian penguat terdiri dari dua tingkat yang masing masing akan menghasilkan tegangan analog hasil penguatan terhadap tegangan keluaran sensor suhu LM35DZ. $V_{r1.1}$ dan $V_{r1.3}$. berfungsi untuk kalibrasi besarnya faktor penguatan dari masing-masing tingkat penguat. Besarnya penguatan tiap tingkat rangkaian penguat adalah:

$$A_{v1} = -\frac{VR_{12}}{R_{11}} \text{ dan } A_{v2} = -\frac{R_{17}}{R_{15}} \quad \dots(1)$$

B. Peubah Analog ke Digital (A/D Converter) 0809

Tegangan analog keluaran dari rangkaian penguat harus dikonversi menjadi sinyal digital agar dapat diproses oleh pengendali mikro dan ditampilkan pada rangkaian display sebagai nilai suhu air aktual. Rangkaian lengkap ADC 0809

yang digunakan seperti Gambar 3 berikut ini.



Gambar 3. Rangkaian A/D Converter 0809

ADC 0809 memiliki 8 saluran masukan analog yang dapat diatur pemakaiannya. Pemilihan saluran masukan analog yang ingin digunakan dapat dilakukan dengan mengatur kombinasi bit pada ADD C, ADD B dan ADD A.

Tabel 1. Kombinasi Bit Untuk Pemilihan Saluran Masukan ADC0809

Saluran Masukan Yang digunakan	Alamat		
	ADD C	ADD B	ADD A
IN-0	L	L	L
IN-1	L	L	H
IN-2	L	H	L
IN-3	L	H	H
IN-4	H	L	L
IN-5	H	L	H
IN-6	H	H	L
IN-7	H	H	H

Ketelitian dalam mengkonversi sinyal analog dapat diatur dengan memberikan nilai tegangan referensi

(Vref) dan secara matematis dinyatakan sebagai berikut:

$$V_{(ketelitian)} = \frac{\text{Resolusi} \times V_{\text{ref maks}}}{2^8 - 1} \dots(2)$$

Untuk resolusi = 1 dan tegangan referensi Vref = 5 Volt, maka ketelitian dari ADC tersebut adalah:

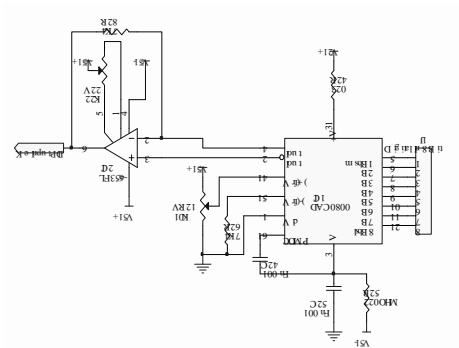
$$V_{(ketelitian)} = \frac{1 \times 5}{2^8 - 1} = 19.6078431 \text{ Volt} \dots(3)$$

Proses konversi dilakukan setelah perintah start yaitu logika HIGH diberikan pada kaki START (kaki no 6). Sedangkan hasil konversi dikirimkan ke *Tri State Output Latch Buffer* yang compatible dengan level tegangan TTL, yaitu sebuah *buffer* penahan yang bersifat tingkat dimana tingkat pertama terjadi pada saat data hasil konversi masuk ke input dari bagian ini. Tingkat kedua saat data tersebut di *latch* ke dalam *buffer internal* dan ketiga adalah saat sinyal ENABLE yang berlogika 1 diberikan ke kaki ENABLE (kaki no 9) sehingga data yang ada dalam *buffer internal* dikirim ke bagian output (*MSB 2-1 ... LSB 2-8*). Setelah konversi selesai, maka kaki End Of Conversion (EOC) akan mengeluarkan sinyal berlogika LOW, selanjutnya agar data hasil konversi tersebut dapat diakses

oleh pengendali mikro maka pada masukan RD harus diberikan sinyal berlogika LOW yang akan diteruskan ke ENABLE.

C. Peubah Digital ke Analog (D/A Converter) 0800

Peubah digital ke analog digunakan untuk mengkonversi sinyal digital menjadi sinyal analog. Pada sistem yang akan dibuat, setpoint diberikan dalam bentuk digital, sehingga sebelum diumpankan ke pengendali PID, terlebih dahulu harus dikonversi menjadi sinyal analog yang merepresentasikan nilai setpoint yang diinginkan. Rangkaian lengkap D/A Converter 0800 secara lengkap seperti disajikan dalam Gambar 4 berikut ini.



Gambar 4. D/A Converter 0800

Agar didapatkan tegangan keluaran dengan kisaran antara 0 V sampai dengan V_{ref} maka pada kaki 3 IC op-amp LF356N dihubungkan dengan ground. Batas atas tegangan keluaran yang

diinginkan dapat diatur dengan melakukan penalaan terhadap nilai $V_{r2.1}$. Besarnya tegangan keluaran mengikuti persamaan :

$$V_{out} = V_{ref} \times \frac{Y}{256} \quad \dots(4)$$

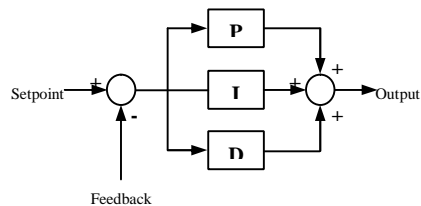
dimana :

V_{ref} = tegangan referensi skala batas atas

Y = masukan digital

D. Pengendali Proporsional Integral dan Diferensial (PID)

Pengendali PID yang digunakan adalah memiliki struktur paralel dengan blok diagram seperti pada Gambar 5. Pengendali ini akan mengolah sinyal masukan yaitu berupa nilai setpoint suhu yang diinginkan dan nilai suhu aktual yang terjadi. Selisih antara kedua nilai tersebut akan diolah untuk menentukan sinyal kendali yang harus diberikan ke sistem pemanas. Pengendali PID memiliki tiga parameter utama yaitu nilai K_p , T_i dan T_d yang harus dipilih secara tepat sehingga sistem pengendalian dapat bekerja dengan optimal.[3]

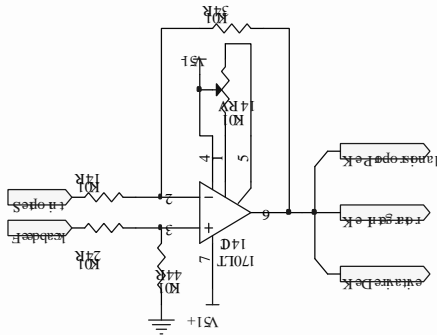


Gambar 5. Pengendali PID Struktur Paralel

Pengendali PID struktur paralel memiliki 4 bagian utama yaitu bagian pembanding, penguat proporsional, *integrator*, diferensiator dan penjumlah.

1. Bagian Pembanding Pada Pengendali PID

Bagian pembanding berfungsi untuk membandingkan masukan nilai setpoint dengan masukan nilai aktual. Dari hasil pembandingan akan didapatkan nilai selisih (error) yang menunjukkan besarnya perbedaan yang terjadi antara nilai suhu yang diinginkan dengan nilai suhu yang terjadi. Bagian pembanding tersebut dibuat dengan penguat op-amp dan dikondisikan sedemikian rupa sehingga memiliki faktor penguatan sebesar 1 kali. Rangkaian lengkapnya adalah seperti ada gambar 6.



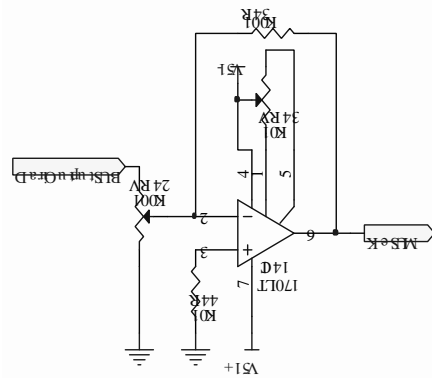
Gambar 6. Bagian Pembanding Pada Pengendali PID Struktur Paralel

Besarnya tegangan keluaran dari bagian pembanding tersebut adalah:

$$V_{out} = V_{in\ setpoint} - V_{in\ feedback} \quad \dots(5)$$

2. Bagian Penguat Proporsional Pada Pengendali PID

Pada dasarnya pengendali proportional merupakan rangkaian penguat tegangan. Rangkaian penguat tegangan yang difungsikan sebagai pengendali proportional adalah seperti pada Gambar 7 berikut ini.



Gambar 7. Penguat Proportional dengan Op-amp TL071

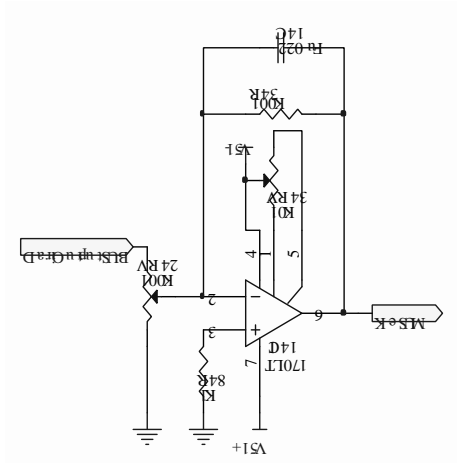
Besarnya faktor penguatan tegangan menyatakan nilai parameter pengendali propotional (K_p). Keluaran rangkaian pengendali proportional akan diumpungkan ke rangkaian penjumlah untuk dijumlahkan dengan keluaran pengendali integral dan diferensial.

$$K_p = A_v = \frac{V_{out}}{V_{in}} = - \frac{R_{43}}{VR_{42}} \quad \dots(6)$$

3. Bagian Penguat Integral Pada Pengendali PID

Bagian ini akan melakukan operasi integral secara matematis terhadap

masukan untuk menghasilkan sinyal keluaran. Sehingga jika sinyal masukan bernilai konstan, maka keluarannya akan berbentuk lereng (ramp) secara linier. Rangkaian penguat integral yang dimaksud adalah seperti pada Gambar 8 berikut ini.



Gambar 8. Penguat Integral dengan Op-amp TL071

Tegangan keluaran penguat integral merupakan hasil operasi intagrel terhadap sinyal tegangan masukan. Persamaan matematis operasi integral tersebut adalah sebagai berikut.

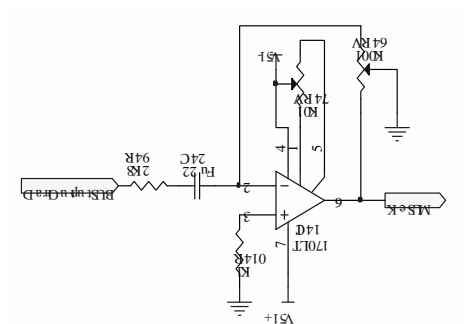
$$V_{out}(t) = -\frac{I}{VR_{44} \times C_{41}} \int_0^t dV_{in}(t) dt \dots(7)$$

dimana :

- Vin(t) = tegangan masukan
- dt = periode integrasi

4. Bagian Penguat Differensiator Pada Pengendali PID

Bagian penguat differensiator ini akan melakukan operasi diferensial secara matematis terhadap masukan untuk menghasilkan sinyal keluaran. Sehingga jika sinyal masukan bernilai konstan, maka keluarannya akan berbentuk lereng (ramp) secara linier. Rangkaian penguat integral yang dimaksud adalah seperti pada Gambar 9 berikut ini.



Gambar 9. Penguat Differensiator dengan Op-amp TL071

Tegangan keluaran dari rangkaian penguat differensiator tersebut adalah merupakan hasil operasi differensial terhadap sinyal tegangan masukan dengan persamaan matematis sebagai berikut:

$$V_{out}(t) = -VR_{46} \times C_{42} \frac{dV_{in}(t)}{dt} \dots(8)$$

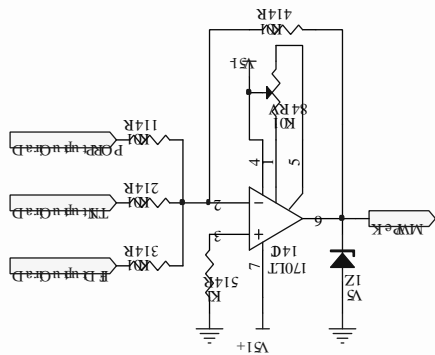
dimana :

$dV_{in}(t)$ = perubahan tegangan masukan
 dt = selang waktu yang terjadi

5. Bagian Penguat Penjumlah Pada Pengendali PID

Bagian penguat penjumlah ini akan memiliki fungsi utama yaitu sebagai penjumlah (melakukan operasi penjumlahan) secara matematis terhadap masukan untuk menghasilkan sinyal keluaran. Sinyal tegangan masukan berasal dari keluaran masing-masing bagian proporsional, integral dan differensiator. Keluaran hasil proses penjumlahan dari rangkaian ini merupakan sinyal kendali yang utuh sebagai hasil akhir dari pemrosesan terhadap masukan utama pengendali yaitu sinyal setpoint dan umpan balik.

Rangkaian penguat integral yang dimaksud adalah seperti pada Gambar 10 berikut ini.



Gambar 10. Rangkaian Penguat Penjumlah dengan Op-amp TL071

Tegangan keluaran dari rangkaian penguat penjumlah tersebut adalah sesuai dengan persamaan berikut ini.

$$V_{out} = - \left(\frac{R_{414}}{R_{411}} V_{in}(P) + \frac{R_{414}}{R_{412}} V_{in}(I) + \frac{R_{414}}{R_{413}} V_{in}(D) \right) \dots(10)$$

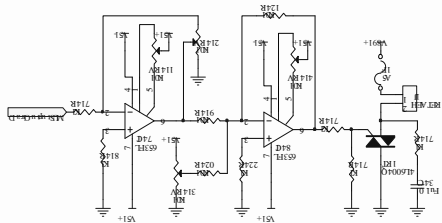
Jika dipilih tahanan yang nilainya sama yaitu $R_{411} = R_{412} = R_{413} = R_{414} = 10 \text{ k}$, maka tegangan keluarannya adalah:

$$V_{out} = - (V_{in}(P) + V_{in}(I) + V_{in}(D)) \dots(11)$$

Yaitu merupakan hasil jumlahan dari tegangan masukan.

E. Rangkaian Sulut (Trigger) pada Saklar Elektronik Untuk Pengaturan Daya Pada Heater

Rangkaian ini berfungsi sebagai catu daya pada kaki gate daripada triac Q4006L4 yang digunakan sebagai saklar elektronik untuk mengatur besarnya daya listrik yang diberikan pada elemen pemanas listrik (*Electric Heater*). Triac Q4006L4 yang digunakan memiliki kapasitas tegangan kerja sebesar 198 Volt DC. Elemen pemanas sebagai beban listrik untuk memanaskan air memiliki tahanan dalam sebesar 51 ohm. Berikut ini adalah gambar rangkaian sulut yang dimaksud di atas.



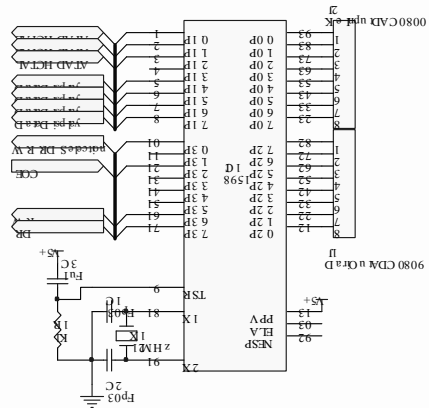
Gambar 11. Rangkaian Sulut Pada Saklar Elektronik dengan Triac Q4006L4

F. Rangkaian Pengendali Mikro AT89S51

Pengendali mikro ST89S51 digunakan untuk mengatur jalannya seluruh proses yang ada. Masukan eksternal berasal dari ADC 0809. Keluaran data digital akan digunakan masing-masing untuk tampilan nilai setpoint dan nilai aktual daripada suhu, masukan bagi DAC0800, dan sinyal kendali jalannya ADC0809. Secara rinci penggunaan port input-output pengendali mikro adalah sebagaimana tercantum pada tabel 2.

Tabel 2. Penggunaan Port Input-Output Pengendali Mikro

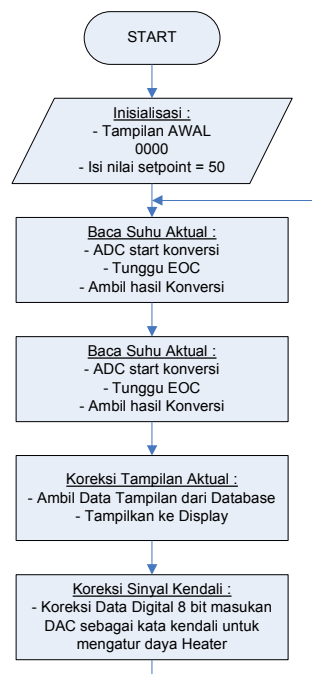
No Pin	IN/OUT	Port	Keterangan
10	Output	P3.0	Pemilih mode kerja (RD/WR) pada ADC0809
16	Output	P3.6	Bit Kendali WR bagi ADC0809
17	Output	P3.7	Bit Kendali RD bagi ADC0809
32 s/d 39	Output	P0.0 s/d P0.7	Data Digital masukan bagi DAC0800
12	Input	P3.2	Bit Tanda Akhir dari Proses Konversi ADC0809
21 s/d 28	Input	P2.0 s/d P2.7	Data Digital Hasil Konversi ADC0809



Gambar 11. Rangkaian Sistem Minimum Pengendali Mikro AT89S51

G. Diagram Alir Program

Untuk bisa berfungsi sebagai pengatur seluruh kinerja sistem, maka pengendali mikro tersebut harus diprogram. Diagram alir perangkat lunak yang digunakan adalah sebagai berikut.



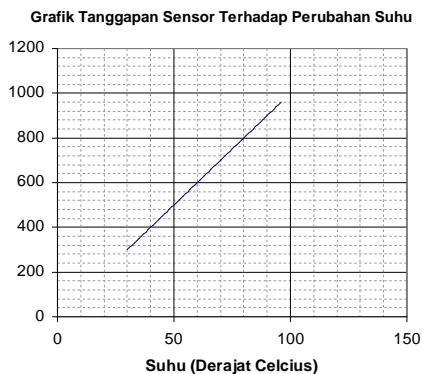
Gambar 12. Diagram Alir Perangkat Lunak

III. HASIL PENGUJIAN DAN ANALISA

Pengujian yang dilakukan meliputi pengujian rangkaian sensor suhu, pengujian rangkaian plan yang mencakup rangkaian sulut dan *heater*, dan pengujian sistem secara keseluruhan.

A. Pengujian Rangkaian Sensor Suhu

Pengujian rangkaian sensor suhu dilakukan dengan melakukan pengamatan dan pengukuran besarnya tegangan keluaran terhadap setiap perubahan suhu yang terjadi. Hasil pengujian yang didapatkan adalah seperti pada Gambar 13.

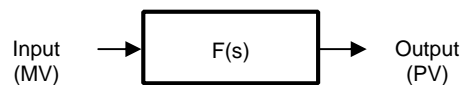


Gambar 13. Grafik Tanggapan Sensor Suhu LM35DZ terhadap Perubahan Suhu

Pengujian dilakukan untuk suhu 30°C sampai dengan 96°C . Dari hasil pengujian tersebut menunjukkan kelinieran dari sensor suhu yang digunakan. Hal ini akan memudahkan dalam pengendalian sistem.

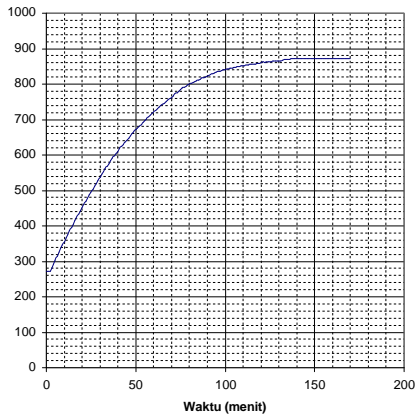
B. Pengujian Rangkaian Sulut dan *Heater* Sebagai Plan Yang Dikendalikan

Pada sistem ini rangkaian sulut dan heater merupakan bagian dari sistem keseluruhan yang berfungsi sebagai plan. Bagian ini menerima masukan masukan ($MV=Manipulated Variable$) berupa tegangan *trigger* bagi rangkaian sulut. Keluaran ($PV=Process Variable$) dari bagian ini adalah suhu air hasil dari proses pemanasan oleh heater.



Gambar 14. Blok Diagram Plan

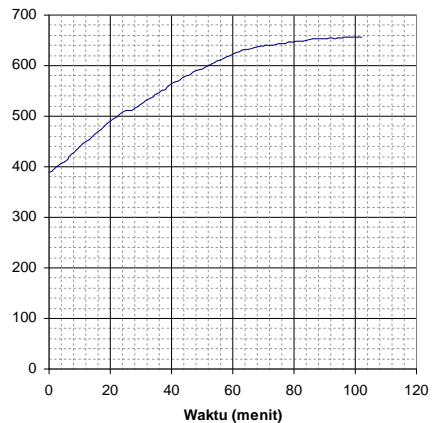
Pengujian dilakukan dengan memberikan perubahan tegangan trigger masukan kemudian diamati tegangan keluaran sensor suhu yang merepresentasikan nilai suhu hasil pemanasan oleh heater. Perubahan tersebut diberikan secara step. Waktu pengamatan dilakukan dengan jeda waktu (*sampling time*) 1 menit. Pengujian dilakukan dengan 2 jenis perubahan level tegangan *trigger* yang berbeda yaitu dari 0 ke 2 volt dan dan dari 0 ke 1 volt. Grafik hasil pengujian yang didapatkan adalah seperti pada Gambar 15 dan 16.



Gambar 15. Grafik Respon Rangkaian Plan (Rangkaian Sulut dan Heater) Untuk Tegangan Trigger berubah dari 0 ke 2 Volt.

Dari hasil pengujian yang pertama (tegangan sulut sebesar 2 Volt) nampak bahwa tegangan keluaran sensor suhu LM35DZ tidak bisa mencapai 1000mV (ekivalen dengan suhu 100°C). Walau ditunggu sampai 170 menit tegangan maksimal keluaran sensor suhu hanya mencapai 872mV (ekivalen dengan suhu 87°C). Hal ini menunjukkan bahwa untuk level tegangan trigger 2 volt, plan hanya mampu melakukan pemanasan air sampai suhu sekitar 87°C.

Untuk pengujian kedua dilakukan dengan tegangan trigger sebesar 1 volt kemudian dilakukan pengamatan dengan cara yang sama dan didapatkan hasil seperti pada Gambar 16.



Gambar 16. Grafik Respon Rangkaian Plan (Rangkaian Sulut dan Heater) Untuk Tegangan Trigger berubah dari 0 ke 1 Volt.

Dari hasil pengujian yang kedua (tegangan sulut sebesar 1 Volt) nampak bahwa tegangan keluaran sensor suhu LM35DZ juga tidak bisa mencapai 1000 mV (ekivalen dengan suhu 100 °C). Walau ditunggu sampai 102 menit tegangan maksimal keluaran sensor suhu hanya mencapai 656 mV (ekivalen dengan suhu 65 °C). Hal ini menunjukkan bahwa untuk level tegangan *trigger* 1 volt, plan hanya mampu melakukan pemanasan air sampai suhu sekitar 65 °C.

Dari kedua gambar tersebut diatas menunjukkan bahwa plan bersifat *self regulated* dan *open loop stable*. Dimana ketika diuji secara *open loop*, memberikan tanggapan yang stabil dengan sendirinya walau diperlukan waktu yang relatif lama. Hal ini dikarenakan proses pemanasan air tidak mungkin dilakukan secara instan.

Hasil pengujian ini akan digunakan untuk menentukan parameter fungsi alih yang merepresentasikan dinamika sistem tersebut. Dari kedua hasil pengujian tersebut diatas dipilih hasil pengujian pertama dengan tegangan trigger 2 volt yang akan digunakan untuk identifikasi fungsi alih plan tersebut.

IV. IDENTIFIKASI FUNGSI ALIH

Identifikasi fungsi alih dilakukan dengan asumsi bahwa fungsi alih plan tersebut merupakan fungsi orde satu dengan waktu tunda dengan bentuk umumnya adalah sebagai berikut:

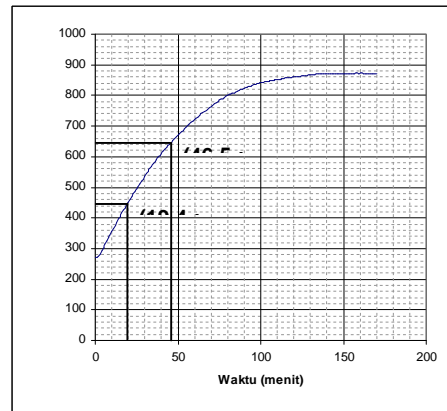
$$F(s) = \frac{K}{\tau \cdot s + 1} e^{-t_d \cdot s} \quad \dots(12)$$

dimana:

- K = proses Gain
- td = waktu tunda
- τ = konstanta waktu yaitu besarnya waktu yang dibutuhkan hingga keluaran plan mencapai 63.2 % dari keluaran steady state
- s = variabel laplace

Identifikasi dilakukan dengan maksud untuk menentukan nilai-nilai dari parameter K, td dan τ yang mewakili dinamika plan tersebut. Dalam tulisan ini metode yang digunakan untuk identifikasi adalah metode smith. Metode ini dilakukan dengan menentukan 2 titik uji dari grafik respon plan terhadap perubahan masukan secara step. Titik uji

yang pertama dipilih pada titik dimana keluaran plan berada pada level 63.2 % dari keluaran steady state. Titik kedua dipilih pada titik dimana keluaran plan berada pada level 28.3 % dari keluaran steady state. Berdasarkan hal tersebut maka didapatkanlah titik ujinya yaitu seperti Gambar 18.



Gambar 17. Identifikasi Fungsi Alih
Titik uji pertama: $t_1 = 19.4$ menit
Titik uji kedua: $t_2 = 46.5$ menit

Berdasarkan metode smith maka parameter plan td dan τ dapat ditentukan sebagai berikut:

$$\tau = \frac{3}{2}(t_2 - t_1) = \frac{3}{2}(46.5 - 19.4) = 41.25$$

dan waktu tundanya:

$$t_d = t_2 - \tau = 46.5 - 41.25 = 5.25 \text{ menit}$$

Parameter K ditentukan dari perbandingan antara perubahan keluaran saat steady state dengan perubahan masukan yang diberikan. Dari pengujian

yang dilakukan pada saat tegangan trigger diberikan, keluaran sensor LM35DZ berada pada nilai 272 mV. Setelah tegangan trigger diberikan keluaran sensor menjadi 872 mV pada saat steady state. Sedangkan untuk masukan, perubahan diberikan dari 0 menjadi 2 volt. Dengan demikian dapat ditentukan besarnya parameter K sebagai berikut ini.

$$K = \frac{\Delta PV}{\Delta MV} = \frac{0.872 - 0.272}{2 - 0} = \frac{0.600}{2} = 0.3$$

Dengan demikian fungsi alih dari plan adalah :

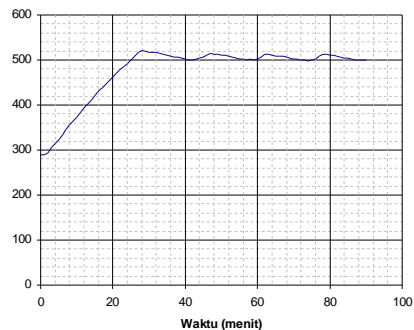
$$F(s) = \frac{0.3}{41.25s + 1} e^{-5.25s}$$

V. PENGUJIAN SISTEM KESELURUHAN DENGAN PENGENDALI PID

Berdasarkan parameter fungsi alih orde satu dengan waktu tunda seperti yang telah dibahas sebelumnya, maka dapat ditentukan parameter pengendali PID dengan metode *Quarter Decay Ratio*. Dengan metode tersebut didapatkan parameter pengendali proporsional $K_p = 4.46$, parameter integral $T_i = 8.86$ dan parameter pengendali differensial $T_d = 0.808$. Dengan *setting* PID tersebut dilakukan simulasi sistem secara keseluruhan seperti Gambar 19.

Dari Gambar 19 nampak bahwa respon sistem sangat lambat, terlihat dari waktu yang dibutuhkan sistem untuk

mencapai *output steady state* sebesar 32 menit dihitung sejak perubahan setpoint diberikan. *Output steady state* masih mengalami osilasi walaupun tidak terlalu besar. Lambatnya respon sistem bisa dikarenakan beberapa faktor antara lain *setting* parameter pengendali PID yang belum optimal, kapasitas elemen pemanas (*heater*) atau kondisi lingkungan sekitar yang turut mempengaruhi kinerja sistem pemanas ini.



Gambar 18. Tanggapan Sistem Yang Dikendalikan Dengan PID Saat Diberikan Perubahan Setpoint menjadi 50°C

VI. KESIMPULAN

Dari pembahasan yang telah dilakukan sebelumnya dapat diambil kesimpulan sebagai berikut:

1. Sensor suhu LM35DZ memiliki respon yang linear dimana tegangan keluaran berbanding lurus dengan suhu.

2. Rangkaian sulut dan heater sebagai plan yang dikendalikan memiliki sifat self regulated dan open loop stabil.
 3. Plan yang dikendalikan bisa dianggap sebagai sistem orde satu dengan waktu tunda dengan parameter $K=0.3$; $\tau=41.25$ dan $t_d=5.25$ menit .
 4. Pengendalian plan menggunakan PID dengan parameter $K_p=4.46$; $T_i=8.86$ dan $T_d=0.808$ menghasilkan respon sistem yang masih relatif lambat dimana keluaran baru mencapai titik kestabilannya dalam kurun waktu sekitar 32 menit.
 5. Output steady state masih mengalami sedikit osilasi di sekitar 50°C , hal ini dimungkinkan setting parameter PID yang harus ditala ulang.
- [4] Ogata, Katsuhiko, "*Teknik Kontrol Automatik*", Terjemahan Ir, Edi Laksono, Erlangga, Jakarta, 1991.
 - [5] Robert F Coughlin & Fredrick F Driscoil, "*Penguat Operasional dan Rangkaian Terpadu Linear*", Alih Bahasa oleh Herman Widodo Soemitro, Erlangga, Jakarta, 1983.
 - [6] Roger L Tokheim, "*Elektronika Digital*", Alih Bahasa oleh Ir. Sutisno M.Eng., Jakarta 1995.
 - [7] Budi Haryo Raharjo, "*Simulasi Sistem Pencelupan Kerangka Badan Mobil Pada Proses Perakitan Mobil Berbasis Mikro AT89C51*", Skripsi, Jakarta, 2005.

REFERENSI

- [1] Paulus Andi Nalwan, "*Panduan Praktis Teknik Antar Muka dan Pemrograman Mikrokontroler AT89S51*", Elekmedia Komputindo, Jakarta, 2003.
- [2] Fredrick W. Hughes, "*Panduan Op-Amp, Elex Media Komputindo*".
- [3] Jerald G. Graeme & Gene E. Tobey, "*Operational Amplifier*". McGraw Hill International Book Company, Singapore, 1981.