

Auto Tuning PID Berbasis Metode Osilasi Ziegler-Nichols Menggunakan Mikrokontroler AT89S52 pada Pengendalian Suhu

Eka Candra Wijaya¹, Iwan Setiawan, ST. MT.², Wahyudi, ST. MT.²

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

Abstrak

Metode kontrol Proporsional-Integral-Derivative (PID) banyak diterapkan di bidang industri. Kontroler ini memiliki parameter-parameter pengontrol, yaitu K_p , T_i , dan T_d . Ketiga parameter tersebut diturunkan dari perhitungan matematis pada metode PID konvensional. Kesulitan timbul bila plant yang dikendalikan adalah sistem dengan orde tinggi. Maka dari itu, diperlukan metode tuning PID yang dapat diterapkan dalam sistem orde tinggi.

Metode osilasi Ziegler-Nichols merupakan sebuah metode penalaan PID yang dapat dilakukan secara otomatis tanpa memodelkan sistem. Pada metode ini berlangsung dua tahap pada awal aplikasinya, yaitu tahap penalaan untuk menentukan parameter-parameter kontrol dan tahap pengontrolan dengan menerapkan parameter-parameter tersebut. Kedua tahap tersebut diterapkan dalam sebuah modul menggunakan mikrokontroler AT89S52.

Plant pengaturan suhu merupakan plant uji untuk modul penalaan dan pengendalian PID. Plant tersebut tidak memiliki waktu tunda yang sesuai dengan persyaratan metode Ziegler-Nichols, namun penalaan tetap dapat dilakukan. Karena waktu tunda yang terlalu kecil bila dibandingkan dengan konstanta waktu sistem, konstanta proporsional yang dihasilkan dari proses penalaan terlalu besar. Parameter-parameter PID yang tidak seimbang ini mengakibatkan lonjakan maksimum tanggapan suhu yang besar.

Kata kunci : PID, Osilasi Ziegler-Nichols, Mikrokontroler AT89S52, Waktu Tunda

I. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Teknik kendali PID merupakan teknik kendali yang banyak diterapkan di bidang industri pada saat ini. Respon suatu *plant* dapat diatur sedemikian baik melalui pemilihan parameter-parameter kendali yang tepat. Penentuan parameter-parameter kendali melalui perhitungan secara matematis membutuhkan pengetahuan model matematis *plant*.

Pemodelan suatu *plant* tidak sulit dilakukan selama *plant* tersebut berorde rendah. Kesulitan akan timbul saat *plant* yang dimodelkan berorde tinggi. Karena itu, penalaan parameter-parameter PID kurang efektif bila dilakukan melalui perhitungan matematis. Salah satu solusi kesulitan tersebut adalah dengan penalaan PID secara otomatis untuk *plant* yang akan dikendalikan.

Metode penalaan PID berumpan balik dengan pengendali *relay*, pengembangan metode Ziegler-Nichols, merupakan metode penalaan PID otomatis yang juga banyak digunakan pada bidang industri. Parameter-parameter PID ditentukan berdasarkan osilasi sistem saat dikendalikan dengan umpan balik *relay* dan tetapan parameter-parameter yang telah ditetapkan Ziegler-Nichols secara empiris.

Pada penerapannya di bidang industri, penalaan dan kendali yang disusun dalam perangkat lunak tidak efisien bila dikendalikan menggunakan komputer. Mikrokontroler AT89S52 merupakan media penyimpanan perangkat lunak dan pengendali yang baik untuk penalaan dan kendali PID tersebut.

Salah satu *plant* dengan orde tinggi adalah *plant* pemanas udara dengan tundaan panas yang dirasakan sensor. Unjuk kerja penalaan dan

pengendalian PID berdasarkan parameter-parameter yang didapat dari penalaan, akan diuji menggunakan *plant* pemanas udara.

1.2 Tujuan

Tujuan yang ingin dicapai adalah membuat alat berupa perangkat keras dan perangkat lunak berbasis mikrokontroler guna menerapkan metode penalaan *relay* Ziegler-Nichols pada pengendalian suhu udara dengan pengendali PID.

1.3 Batasan Masalah

Permasalahan yang dibahas terbatas pada beberapa pembatasan masalah berikut ini.

1. *Plant* yang dikendalikan adalah *plant* pengaturan suhu udara dengan PWM Driver.
2. Proses yang dilakukan hanyalah pemanasan dan suhu *plant* dianggap merata di daerah yang diatur suhunya.
3. Suhu yang dijadikan referensi perhitungan adalah suhu hasil pembacaan dari sensor suhu LM35.
4. Jangkauan pengaturan suhu udara adalah 30 °C sampai 40 °C dengan step sebesar 0,01 °C, sedangkan jangkauan pengukuran suhu adalah 25 °C sampai 45 °C.
5. Pengendali PID diterapkan menggunakan mikrokontroler AT89S52.
6. Metode penalaan PID yang digunakan adalah metode penalaan Ziegler-Nichols berdasarkan pengendali *relay*.
7. Antarmuka melalui komunikasi serial, ADC 0804, dan DAC 0808.
8. Tidak membahas *handshaking* komunikasi serial.

1) Mahasiswa Jurusan Teknik Elektro UNDIP

2) Staf Pengajar Jurusan Teknik Elektro UNDIP

II. DASAR TEORI

2.1 Pengendali PID

Pengendali PID adalah sistem pengendali gabungan antara pengendali proporsional, integral, dan turunan (*derivative*). Dalam waktu kontinyu, sinyal keluaran pengendali PID dirumuskan sebagai:

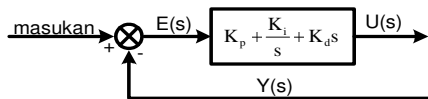
$$u(t) = K_p \left(e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt + T_d \frac{de(t)}{dt} \right) \dots \dots \dots (1)$$

dengan

- u(t) = sinyal keluaran pengendali PID
 - Kp = konstanta proporsional
 - Ti = waktu integral
 - Td = waktu turunan
 - Ki = konstanta integral
 - Kd = konstanta turunan
 - e(t) = sinyal kesalahan
- Jadi, fungsi alih pengendali PID (dalam domain s) dapat dinyatakan sebagai berikut.

$$G_c(s) = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s \dots \dots \dots (2)$$

Diagram blok pengendali PID dapat dilihat pada Gambar 1.



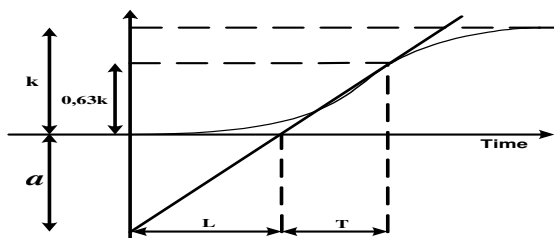
Gambar 1 Diagram blok pengendali PID.

2.2 Penalaan Pengendali PID

Penalaan pengendali PID adalah mencari nilai K_p , K_i , dan K_d . Ada beberapa metode penalaan yang dapat digunakan, salah satunya adalah metode Ziegler-Nichols. Metode dasar penalaan Ziegler-Nichols dapat dibedakan menjadi 2, yaitu:

A. Metode ke-1 Ziegler-Nichols

Metode ke-1 didasarkan pada respon *plant* terhadap masukan tangga dalam kalang terbuka. *Plant* yang tidak mempunyai integrator, menghasilkan kurva tanggapan terhadap masukan tangga seperti kurva huruf S pada Gambar 2. Kurva tanggapan *plant* digunakan untuk mencari waktu tunda L dan konstanta waktu T.



Gambar 2 Kurva tanggapan berbentuk S.

Parameter-parameter yang didapat dari kurva reaksi digunakan untuk menentukan parameter-parameter pengendali PID berdasarkan tetapan empiris Ziegler-Nichols. Rumus-rumus untuk parameter pengendali menggunakan metode kurva reaksi ditabelkan pada Tabel 1.

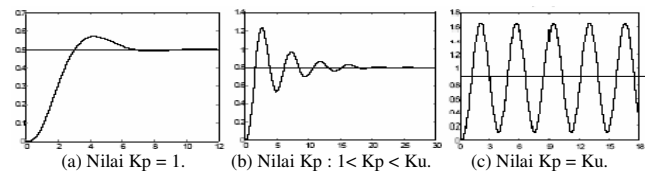
Tabel 1 Penalaan Ziegler-Nichols metode ke-1.

Pengendali	Kp	Ti	Td
P	1/a	-	-
PI	0,9/a	3L	-
PID	1,2/a	2L	L/2

B. Metode ke-2 Ziegler-Nichols

Pada metode ke-2, penalaan dilakukan dalam kalang tertutup dimana masukan referensi yang digunakan adalah fungsi tangga (*step*). Pengendali pada metode ini hanya pengendali proporsional. K_p dinaikkan dari 0 hingga nilai kritis K_p , sehingga diperoleh keluaran yang terus-menerus berosilasi dengan amplitudo yang sama. Nilai kritis K_p ini disebut sebagai *ultimated gain*.

Tanggapan keluaran yang dihasilkan pada 3 kondisi penguatan proporsional ditunjukkan pada Gambar 3. Sistem dapat berosilasi dengan stabil pada saat $K_p = K_u$.



Gambar 3 Karakteristik keluaran suatu sistem dengan penambahan K_p .

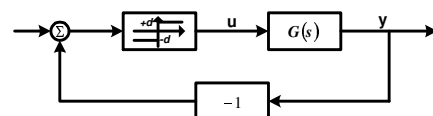
Nilai *ultimated period*, T_u , diperoleh setelah keluaran sistem mencapai kondisi yang terus-menerus berosilasi. Nilai perioda dasar, T_u , dan penguatan dasar, K_u , digunakan untuk menentukan konstanta-konstanta pengendali sesuai dengan tetapan empiris Ziegler-Nichols pada Tabel 2.

Tabel 2 Penalaan Ziegler-Nichols metode ke-2.

Pengendali	Kp	Ti	Td
P	$K_u/2$	-	-
PI	$2K_u/5$	$4T_u/5$	-
PID	$3K_u/5$	$T_u/2$	$3T_u/25$

Pengembangan Metode Penalaan Kedua Ziegler-Nichols

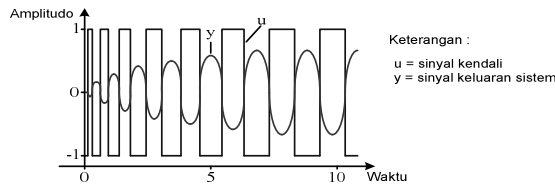
Metode penalaan kedua Ziegler-Nichols dikembangkan dengan *relay* sebagai pengendali sistem. *Relay* dianggap menggantikan fungsi pengendali proporsional yang digunakan pada metode penalaan kedua Ziegler-Nichols. Diagram blok sistem umpan balik dengan *relay* sebagai pengendali ditunjukkan Gambar 4.



Gambar 4 Diagram blok sistem umpan balik dengan kendali *relay*.

Prinsip dasar metode ini adalah adanya batas nilai perioda proses osilasi, jika dikendalikan

menggunakan metode kalang tertutup dengan *relay* sebagai pengendali. Sinyal masukan dan keluaran yang diperoleh dengan sinyal kendali, u , ditunjukkan oleh Gambar 5.



Gambar 5 Masukan dan keluaran sistem dengan umpan balik *relay*.

Proses osilasi tersebut dapat dijelaskan sebagai berikut. Sinyal masukan berupa gelombang persegi dengan frekuensi ω_u . Sinyal masukan dapat dijabarkan menggunakan deret Fourier melalui penjumlahan gelombang sinus dengan frekuensi $\omega_u, 3\omega_u$, dan seterusnya. Karena bentuk gelombang sinyal keluaran mendekati sinyal sinusoida, maka proses tersebut melemahkan harmonik-harmonik sinyal masukan. Bila amplitudo gelombang persegi, d , maka komponen dasar gelombang memiliki amplitudo sebesar $4d/\pi$. Pendekatan bahwa harmonik-harmonik yang lebih tinggi dari harmonik dasar dapat diabaikan, menyebabkan keluaran proses berupa gelombang sinusoida dengan frekuensi ω_u dan amplitudo sebesar

$$a = \frac{4d}{\pi} |G(i\omega_u)| \dots \dots \dots (3)$$

Osilasi dapat terjadi bila sinyal keluaran melalui titik nol saat *relay* berpindah posisi. Selain itu, komponen dasar dari sinyal keluaran dan masukan harus memiliki fase yang berlawanan, sehingga kondisi yang harus dipenuhi agar osilasi dapat terjadi adalah sebagai berikut.

$$\arg G(i\omega_u) = -\pi \dots \dots \dots (4)$$

dan

$$|G(i\omega_u)| = \frac{a\pi}{4d} = \frac{1}{K_u} \dots \dots \dots (5)$$

dimana K_u sebagai penguatan ekuivalen dari *relay* selama pengiriman sinyal sinusoida dengan amplitudo, a . Parameter K_u disebut juga *ultimate gain*. Penguatan ini membawa sistem dengan fungsi alih $G(s)$ ke dalam batas kestabilan di bawah kendali proporsional murni. Periode $T_u = 2\pi/\omega_u$ umumnya disebut sebagai periode dasar.

Parameter-parameter PID diperoleh dengan mengoperasikan nilai-nilai yang telah didapat dari proses penalaan dengan tetapan-tetapan empiris Ziegler-Nichols pada metode penalaan ke-2 Ziegler-Nichols yang ditunjukkan Tabel 2.

2.3 Mikrokontroler AT89S52

AT89S52 merupakan mikrokontroler yang mengkonsumsi daya rendah dengan CMOS 8 bit dan

memori *flash* internal sebesar 8 Kbyte. Perangkat keras ini kompatibel dengan pin-pin keluaran dan instruksi-instruksi standar industri 80C51. *Flash* internal memungkinkan memori program diprogram ulang dalam sistem rangkaian atau dengan memori pemrogram *non volatile* konvensional.

Mikrokontroler AT89S52 memiliki sejumlah keistimewaan sebagai berikut:

- Kompatibel dengan produk MCS51.
- Memori *Flash* internal sebesar 8 Kbyte.
- Beroperasi dalam jangkauan 4 sampai 5,5 volt.
- Operasi statis pada jangkauan frekuensi 0 sampai 33 MHz.
- Proteksi memori program sebanyak tiga tingkat.
- RAM internal sebesar 256 x 8 bit.
- Tiga puluh dua buah I/O yang dapat diprogram.
- Tiga buah *timer/counter* 16 bit.
- Delapan sumber interupsi.
- Saluran serial UART (*Universal Asynchronous Receiver/Transmitter*).
- Mode istirahat saat tidak menjalankan instruksi (*low power idle*) dan penurunan konsumsi daya (*power down*).
- Sebuah interupsi yang mengembalikan kondisi dari mode *power-down*.
- Fasilitas *watchdog timer*.
- Sepasang data pointer.

(T2) P1.0	1	40	VCC
(T2 EX) P1.1	2	39	P0.0 (AD0)
P1.2	3	38	P0.1 (AD1)
P1.3	4	37	P0.2 (AD2)
P1.4	5	36	P0.3 (AD3)
(MOSI) P1.5	6	35	P0.4 (AD4)
(MISO) P1.6	7	34	P0.5 (AD5)
(SCK) P1.7	8	33	P0.6 (AD6)
RST	9	32	P0.7 (AD7)
(RXD) P3.0	10	31	\overline{EA}/VPP
(TXD) P3.1	11	30	ALE/PROG
(INT0) P3.2	12	29	PSEN
(INT1) P3.3	13	28	P2.7 (A15)
(T0) P3.4	14	27	P2.6 (A14)
(T1) P3.5	15	26	P2.5 (A13)
(WR) P3.6	16	25	P2.4 (A12)
(RD) P3.7	17	24	P2.3 (A11)
XTAL2	18	23	P2.2 (A10)
XTAL1	19	22	P2.1 (A9)
GND	20	21	P2.0 (A8)

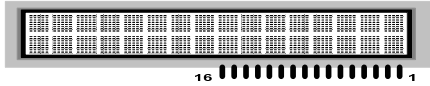
Gambar 6 Susunan kaki AT89S52.

Susunan kaki-kaki mikrokontroler AT89S52 diperlihatkan pada Gambar 6. Penjelasan dari masing-masing kaki adalah sebagai berikut:

- VCC sebagai sumber tegangan.
- GND digunakan sebagai pentanahan.
- Port 0*, *port 1*, *port 2*, dan *port 3* merupakan *port* masukan dan keluaran dua arah 8 bit.
- Reset* merupakan masukan *reset*. Sinyal berlogika '1' pada pin ini selama 2 siklus mesin saat osilator bekerja membuat perangkat *reset*.
- XTAL1 masukan untuk penguat membalik osilator dan masukan bagi rangkaian operasi detak internal.
- XTAL2 keluaran penguat membalik osilator.
- \overline{EA}/VPP adalah pin untuk mengaktifkan pengaksesan eksternal.
- \overline{PSEN} (*Program Store Enable*) adalah sinyal baca untuk memori program eksternal.
- $\overline{ALE}/\overline{PROG}$ adalah sebuah pulsa keluaran untuk mengunci alamat byte rendah selama mengakses memori eksternal.

2.4 Penampil Kristal Cair (LCD)

Penampil Kristal Cair atau *Liquid Crystal Display* (LCD) adalah peralatan yang terdiri dari kristal cair dan chip memori pengolah tampilan untuk menampilkan karakter. LCD yang digunakan adalah M1632 yang mampu menampilkan data sebanyak 16 karakter dalam 2 baris, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 7.



Gambar 7 LCD M1632 tampak atas.

LCD M1632 memiliki terminal masukan dan keluaran sebanyak 16 buah. Tiga buah terminal pertama terdiri dari terminal catu daya dan pengendali tampilan. Tiga buah terminal berikutnya merupakan terminal-terminal pengatur pengiriman dan pengambilan data ke modul LCD. Delapan terminal berikutnya, yaitu mulai terminal ketujuh sampai keempat belas, merupakan terminal yang digunakan untuk bus data. Dua terminal terakhir digunakan untuk catu daya layar LCD.

2.5 Konverter Digital ke Analog (DAC)

Konverter digital ke analog adalah suatu perangkat yang berfungsi untuk mengolah masukan digital dan mengubahnya, sehingga menghasilkan tegangan atau arus yang sebanding dengan nilai digital masukannya.

Tegangan keluaran DAC dinyatakan sebagai:

$$V_o = V_{ref} [A_1 2^{-1} + A_2 2^{-2} + \dots + A_n 2^{-n}] \dots \dots \dots (6)$$

dimana

- V_{ref} tegangan referensi
- A_1 MSB (*Most Significant Bit*)
- A_0 LSB (*Least Significant Bit*)

Nilai A_1 sampai dengan A_0 akan bernilai 1 jika bit yang bersangkutan aktif (*on*), dan akan bernilai 0 jika bit yang bersangkutan tidak aktif (*off*). Dengan demikian, n bit DAC mempunyai jangkauan tegangan yang terletak antara 0 sampai $\frac{2^n - 1}{2^n} \times V_{ref}$.

2.6 Konverter Analog ke Digital (ADC)

Konverter analog ke digital berfungsi mengubah masukan yang berupa besaran analog menjadi suatu nilai digital yang sesuai. Proses ini cukup kompleks dan membutuhkan waktu lebih lama dari proses konversi dari digital ke analog.

Secara umum, proses pada ADC dimulai dengan mengaktifkan sinyal mulai konversi (*start conversion*). Kemudian dilakukan proses konversi dengan cara membandingkan masukan analog, V_A , dengan tegangan analog yang dihasilkan oleh ADC, V_{AX} . Jika $V_A \neq V_{AX}$, angka biner di dalam register akan dimodifikasi dan proses konversi dimulai lagi. Jika V_{AX} sudah sama dengan V_A atau lebih tinggi sebesar tegangan ambang (*threshold voltage*), maka

ADC akan mengeluarkan sinyal akhir konversi (*end conversion*). Nilai digital yang dihasilkan sama dengan nilai digital pada saat V_{AX} .

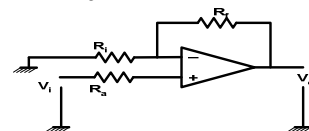
Resolusi ADC berhubungan erat dengan jumlah bit yang digunakan. Semakin banyak jumlah bit, maka semakin kecil resolusinya. Dengan demikian ADC 12 bit mempunyai resolusi yang lebih baik daripada ADC 8 bit.

2.7 Penguat Operasional

Penguat operasional adalah rangkaian terpadu (IC) dengan 5 terminal dasar. Dua terminal untuk catu daya, 2 yang lain digunakan untuk masukan membalik (-) dan masukan tak membalik (+) serta 1 terminal keluaran.

2.7.1 Penguat Tak Membalik

Penguat tak membalik merupakan penguat dimana tegangan keluarannya mempunyai polaritas sama dengan tegangan masukan. Rangkaian penguat tak membalik ditunjukkan Gambar 8.



Gambar 8 Penguat tak membalik.

Arus i mengalir ke R_i karena impedansi masukan *op-amp* sangat besar, sehingga tidak ada arus yang mengalir pada kedua terminal masukannya. Tegangan pada R_i sama dengan V_i karena perbedaan tegangan pada kedua terminal masukannya mendekati 0 V.

$$i = \frac{V_i}{R_i} \dots \dots \dots (7)$$

Tegangan pada R_f dapat dinyatakan sebagai

$$V_{Rf} = I R_f = \frac{R_f}{R_i} \times V_i \dots \dots \dots (8)$$

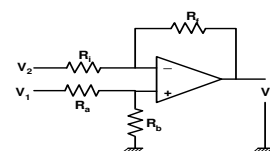
Tegangan keluaran V_o didapat dengan menambahkan tegangan pada R_i , yaitu V_i dengan tegangan pada R_f , yaitu V_{Rf} .

$$V_o = V_i + \frac{R_f}{R_i} \times V_i \dots \dots \dots (9)$$

$$\frac{V_o}{V_i} = \left(1 + \frac{R_f}{R_i} \right) \dots \dots \dots (10)$$

2.7.2 Penguat Selisih (*Differential Amplifier*)

Penguat selisih merupakan suatu penguat dimana tegangan keluarannya merupakan selisih dari tegangan masukan yang dimasukkan ke kedua terminal masukannya. Rangkaian penguat selisih ditunjukkan pada Gambar 9.

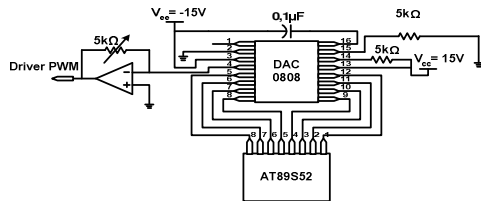


Gambar 9 Penguat selisih.

tombol lainnya untuk melakukan pengaturan selama modul dijalankan.

3.1.2 Konverter Digital ke Analog (DAC 0808)

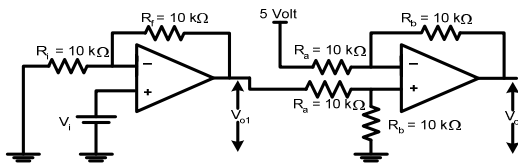
Rangkaian DAC 0808 dibuat sesuai dengan Gambar 13. Rangkaian mendapat masukan berupa sinyal kendali yang dikirim mikrokontroler dengan bentuk data biner 8 bit. Data digital dari mikrokontroler akan diubah ke dalam besaran arus.



Gambar 13 Rangkaian DAC 0808.

3.1.3 Pengkondisi Sinyal I

Rangkaian pengkondisi sinyal yang pertama digunakan untuk mengubah tegangan keluaran DAC sebesar 0 sampai 5 volt menjadi -5 sampai 5 volt. Level tegangan -5 volt sampai 5 volt digunakan sebagai masukan *PWM driver*. Rangkaian pengkondisi sinyal ini ditunjukkan pada Gambar 14.



Gambar 14 Rangkaian pengkondisi sinyal I.

3.1.4 Plant Pengatur Suhu dengan PWM Driver

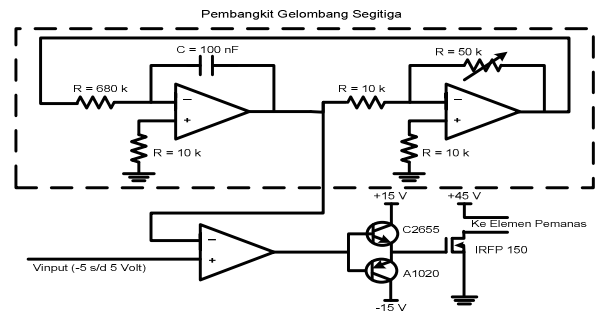
PWM driver digunakan untuk mengendalikan pemanasan yang dilakukan oleh elemen pemanas. Skema *plant* pengatur suhu ditunjukkan pada Gambar 15. *Driver* pemanas mengendalikan tegangan DC yang diumpankan ke elemen pemanas.



Gambar 15 Skema *plant* pengatur suhu dengan *PWM driver*.

Tegangan AC keluaran dari trafo (30 Vac) disearahkan dengan penyearah jembatan sehingga dihasilkan tegangan DC ± 45 Vdc. Terjadi kenaikan tegangan karena efek kapasitor yang menaikkan tegangan masukannya. MOSFET IRFP150 digunakan untuk *driver* tegangan DC tinggi ini. Keluaran PWM digunakan untuk menggerakkan MOSFET, sehingga tegangan keluaran MOSFET adalah tegangan DC ± 45 Vdc dengan frekuensi dan *duty cycle* sesuai dengan keluaran *PWM driver*.

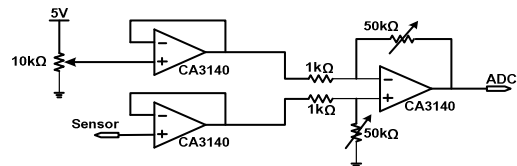
PWM driver diperoleh dengan mengkomparasi keluaran pembangkit gelombang segitiga dengan tegangan masukan melalui rangkain pembanding. Desain rangkaiannya ditunjukkan pada Gambar 16.



Gambar 16 Rangkaian *PWM driver* untuk pemanas.

3.1.5 Sensor dan Pengkondisi Sinyal II

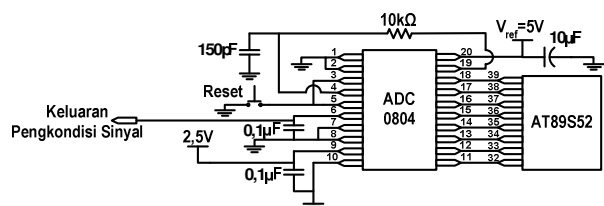
Jangkauan pengukuran sistem antara 25 °C sampai 45 °C, sehingga tegangan yang dikeluarkan sensor LM35 berada dalam jangkauan 0,25 volt sampai 0,45 volt. Tegangan keluaran sensor suhu akan dibaca oleh mikroprosesor melalui ADC, sedangkan tegangan masukan ADC berada dalam jangkauan 0 volt sampai 5 volt. Karena itu, sinyal keluaran sensor dengan jangkauan 0,1 volt sampai 0,6 volt harus dikondisikan menjadi tegangan dengan jangkauan 0 volt sampai 5 volt. Rangkaian pengkondisi sinyal yang sesuai adalah penguat selisih, seperti ditunjukkan pada Gambar 17.



Gambar 17 Rangkaian pengkondisi sinyal II.

3.1.6 Konverter Analog ke Digital (ADC 0804)

ADC 0804 digunakan untuk mengubah tegangan sensor menjadi data digital yang diolah dalam mikrokontroler. Jangkauan nilai tegangan masukan ADC 0804 sebesar 0 sampai 5 volt, yaitu jangkauan nilai tegangan kerja sensor setelah dikuatkan oleh pengkondisi sinyal. Mode kerja ADC yang digunakan adalah *free running*. Mode ini tidak membutuhkan pengontrolan kerja ADC. Rangkaian ADC ditunjukkan pada Gambar 18.

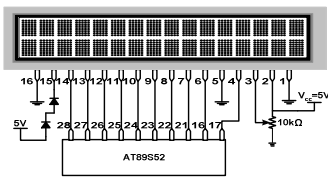


Gambar 18 Rangkaian ADC 0804.

3.1.7 Penampil Kristal Cair (LCD) M1632

LCD M1632 digunakan sebagai pemantau proses yang sedang dilakukan oleh mikrokontroler.

Rangkaian untuk mengoperasikan LCD ditunjukkan pada Gambar 19.

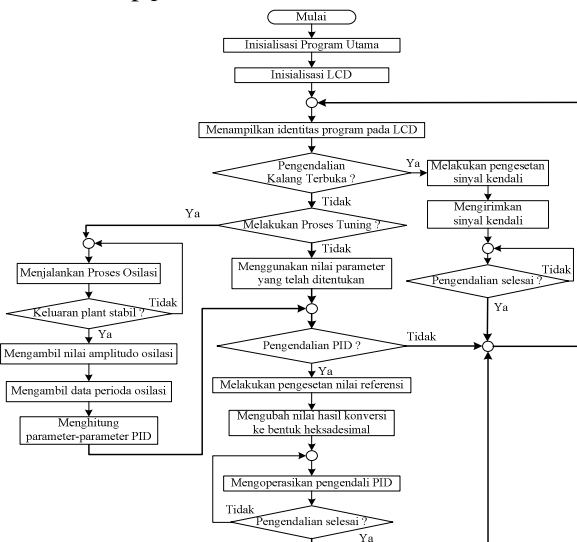


Gambar 19 Rangkaian LCD M1632.

3.2 Perancangan Perangkat Lunak

Perancangan perangkat lunak dilakukan untuk dua keperluan, yaitu pengontrolan dan pengamatan keluaran *plant*. Pengontrolan dengan mikrokontroler menggunakan bahasa assembler sebagai perangkat lunaknya, sedangkan pengamatan digunakan Delphi 6.0 yang terhubung ke mikrokontroler melalui *port* komunikasi serial.

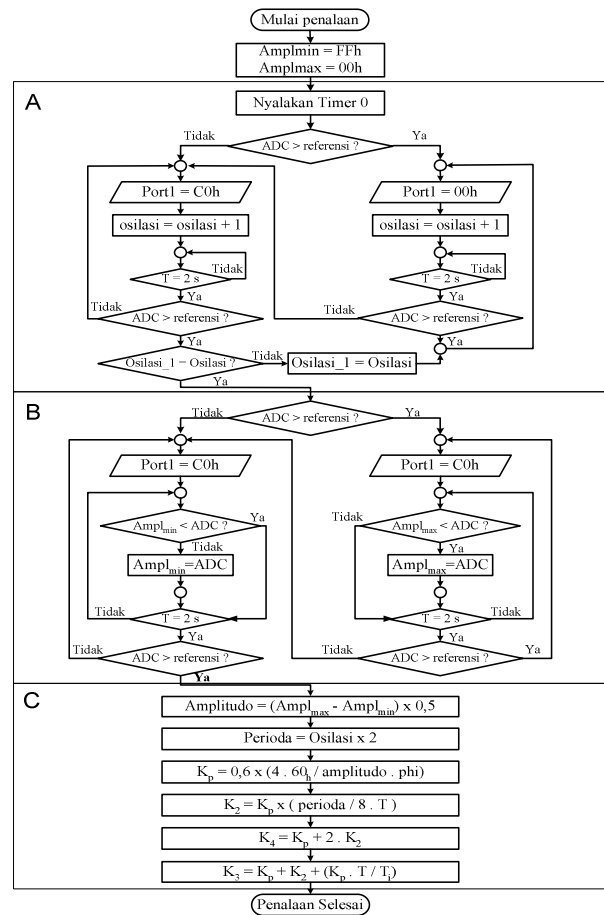
Bagian penalaan dan pengendalian merupakan dua bagian yang terpisah, namun tetap terintegrasi dalam seperangkat program kendali PID yang sesuai dengan diagram alir pada Gambar 20. Penalaan melakukan pengaturan parameter-parameter PID sesuai dengan *plant* yang akan dikendalikan. Jika penalaan tidak dilakukan, kendali PID melakukan pengendalian dengan parameter-parameter dengan nilai *default*. Pengendalian meliputi bagian pengaturan nilai referensi dan pengoperasian kendali PID terhadap *plant*.



Gambar 20 Diagram alir program secara umum.

3.2.1 Penalaan Parameter-parameter PID

Proses penalaan PID bertujuan untuk mendapatkan parameter-parameter PID sesuai dengan metode umpan balik *relay* Ziegler-Nichols. Berdasarkan persamaan (1) untuk kendali PID dan tetapan Ziegler-Nichols pada Tabel 2, maka proses penalaan yang dilakukan pada mikrokontroler sesuai dengan diagram alir pada Gambar 21. Data yang diambil dari proses penalaan adalah data amplitudo dan periode tanggapan suhu dengan kendali *relay*.



Gambar 21 Diagram alir penalaan parameter-parameter kendali PID.

Bagian A menjelaskan proses pengendalian *relay* terhadap *plant*. Pengendalian *relay* dilakukan dengan nilai referensi sebesar 60_h atau $32,5^\circ C$. Jika nilai keluaran lebih kecil daripada nilai referensi, maka sinyal kendali sebesar $C0_h$, sedangkan bila sinyal keluaran lebih besar daripada nilai referensi, maka sinyal kendali adalah 00_h . Penetapan nilai tersebut mengakibatkan nilai amplitudo sinyal kendali, d , didapatkan sebesar 60_h . Pengendalian *relay* dilakukan sampai didapatkan osilasi sinyal yang stabil. Penentuan stabilnya sinyal osilasi adalah dengan membandingkan periode osilasi sinyal sekarang dan sebelumnya.

Bagian B menjelaskan pengambilan data amplitudo. Nilai ADC disimpan dan dibandingkan dengan nilai pembacaan ADC berikutnya. Saat keluaran *plant* lebih besar dari referensi, nilai yang disimpan adalah nilai tertinggi dari sinyal tersebut. Saat keluaran *plant* lebih kecil dari referensi, nilai yang disimpan adalah nilai terendah dari sinyal keluaran *plant* selama satu siklus.

Bagian C menjelaskan perhitungan di akhir penalaan. Perhitungan ini dilakukan untuk mencari konstanta-konstanta pengali *error* yang dibutuhkan pada saat pengendalian dilakukan.

Pengolahan parameter-parameter menjadi konstanta-konstanta pengendalian PID secara diskrit sesuai dengan penjelasan perhitungan berikut.

Berdasarkan persamaan (1) dengan menggunakan transformasi Laplace, didapatkan persamaan PID dalam kawasan s berikut.

$$U(s) = K_p E(s) + \frac{K_p}{T_i} E(s) + K_p T_d s E(s)$$

$$sU(s) = K_p s E(s) + \frac{K_p}{T_i} E(s) + K_p T_d s^2 E(s) \dots \dots \dots (16)$$

Persamaan (16) diubah kembali ke kawasan waktu, sehingga menjadi:

$$\frac{du(t)}{dt} = K_p \frac{de(t)}{dt} + \frac{K_p}{T_i} e(t) + K_p T_d \frac{d^2 e(t)}{dt^2} \dots \dots \dots (17)$$

Untuk mengubah persamaan (17) ke dalam bentuk diskrit, digunakan persamaan *backward difference*, dimana:

$$\frac{dy(t)}{dt} = \frac{y(k) - y(k-1)}{T} \quad \text{dan}$$

$$\frac{d^2 y(t)}{dt^2} = \frac{y(k) - 2y(k-1) + y(k-2)}{T^2}$$

Sehingga persamaan (17) menjadi:

$$\frac{u(k) - u(k-1)}{T} = K_p \left[\frac{e(k) - e(k-1)}{T} \right] + \frac{K_p}{T_i} e(k) + K_p T_d \left[\frac{e(k) - 2e(k-1) + e(k-2)}{T^2} \right]$$

$$u(k) = u(k-1) + \left[K_p + \frac{K_p T}{T_i} + \frac{K_p T_d}{T} \right] e(k) - \left[K_p + \frac{2K_p T_d}{T} \right] e(k-1) + \frac{K_p T_d}{T} e(k-2) \dots \dots \dots (18)$$

$$u(k) = u(k-1) + K_3 e(k) - K_4 e(k-1) + K_2 e(k-2) \dots \dots (19)$$

dengan

$$K_1 = \frac{K_p T}{T_i}$$

$$K_2 = \frac{K_p T_d}{T} \dots \dots \dots (20)$$

$$K_3 = (K_p + K_2 + K_1) \dots \dots \dots (21)$$

$$K_4 = (K_p + 2K_2) \dots \dots \dots (22)$$

3.2.2 Pengendalian PID

A. Pengaturan Nilai Referensi

Pengaturan nilai referensi dilakukan sebelum pengendalian PID dijalankan. Nilai referensi dibandingkan dengan nilai keluaran *plant* yang diterima mikrokontroler melalui ADC.

ADC mengukur keluaran *plant* dalam jangkauan suhu 25 °C sampai 45 °C. Tegangan yang dihasilkan sensor pada suhu 25 °C setara dengan tegangan 0 volt pada ADC dan tegangan yang dihasilkan sensor pada suhu 45 °C setara dengan tegangan 5 volt pada ADC.

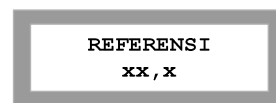
Penetapan batas bawah pengukuran dilakukan dengan pertimbangan bahwa suhu udara normal adalah sekitar 25 °C sampai dengan 28 °C, Penetapan batas atas pengukuran dilakukan dengan pertimbangan suhu tertinggi yang diterima sensor dengan adanya tundaan pada *plant* pemanas.

Nilai referensi ditetapkan dalam jangkauan 30 °C sampai dengan 40 °C. Penetapan batas bawah

pengesetan dilakukan dengan pertimbangan suhu air sebelum dilakukan pemanasan berada di bawah 30 °C. Batas atas pengesetan ditetapkan sebesar 40 °C agar lonjakan suhu yang terjadi tidak mencapai suhu 45 °C (batas atas pengukuran).

Tiga angka yang diatur menyatakan nilai suhu dalam satuan derajat Celcius. Ketiga angka ini ditunjukkan Gambar 22 sebagai 'x'. Bagian ini melibatkan 3 tombol yang terhubung P3.5, P3.4, dan P3.3 pada mikrokontroler dan LCD sebagai penampil nilai referensi. Masing-masing dari ketiga tombol diberi tanda X, Y, dan Z. Fungsi masing-masing tombol adalah sebagai berikut.

- Tombol X berfungsi sebagai penggeser *cursor*.
- Tombol Y berfungsi sebagai pengatur nilai.
- Tombol Z berfungsi untuk menyimpan nilai yang telah diatur.



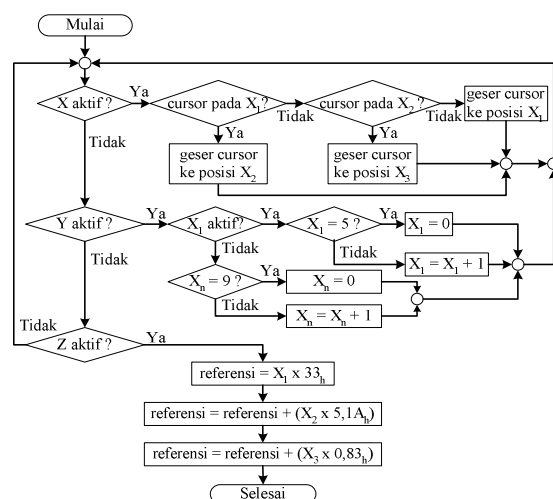
Gambar 22 Tampilan LCD saat pengaturan nilai referensi pengendalian.

Nilai referensi pengaturan dikonversi menjadi bentuk biner standar atau heksadesimal sesuai dengan persamaan (23), dengan X₁ X₂ sebagai angka di depan koma dan X₃ sebagai di belakang koma.

$$(Hasil)_h = (X_1 \times 7, F80_h) + (X_2 \times 0, CC0_h) + (X_3 \times 0, 147_h) \dots (23)$$

Karena data yang dibaca mikrokontroler dari ADC berupa bilangan biner tanpa pecahan, maka nilai hasil konversi akan dibulatkan ke atas bila nilai di belakang koma lebih besar dari 80_h.

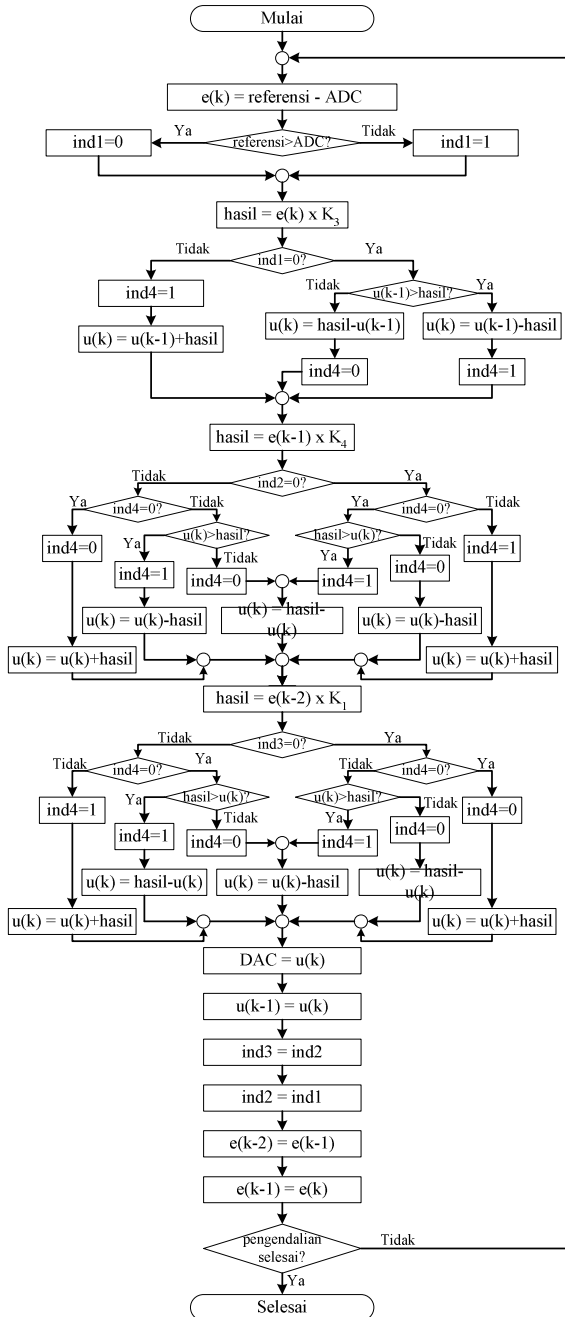
Diagram alir pengaturan nilai referensi menggunakan 3 buah tombol pengaturan ditunjukkan pada Gambar 23. Gambar tersebut menjelaskan kerja dari masing-masing tombol selama proses pengaturan nilai referensi. Konversi nilai referensi dilakukan pada akhir proses atau setelah tombol Z ditekan.



Gambar 23 Diagram alir pengaturan nilai referensi.

B. Pengoperasian Pengendali PID

Pengendali PID dioperasikan sesuai dengan persamaan (19). Pada pengendalian ini, sinyal masukan yang diolah oleh mikrokontroler adalah sinyal yang didapat dari ADC. Selisih antara sinyal referensi dengan sinyal ADC diperhitungkan sebagai sinyal kesalahan (*error*) yang menjadi nilai variabel dalam pengendali PID. Diagram alir pengendalian PID ditunjukkan pada Gambar 24.



Gambar 24 Diagram alir pengendalian PID.

Mikrokontroler AT89S52 hanya dapat melakukan operasi aritmatika antara 8 bit data dengan 8 bit data lainnya. Karena itu, perhitungan sinyal kendali dilakukan secara bertahap. Sinyal kesalahan selama pengendalian berjalan disimpan sampai sinyal kesalahan kedua, $e(k-2)$, sebelum sinyal kesalahan sekarang. Pada akhir perhitungan,

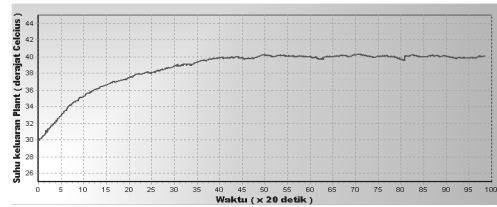
nilai sinyal kesalahan ini digeser, sehingga sinyal kesalahan sekarang, $e(k)$, menjadi sinyal kesalahan sebelumnya, $e(k-1)$, dan sinyal kesalahan sekarang akan diperbaharui pada perhitungan berikutnya.

Nilai sinyal kendali yang telah dikeluarkan juga disimpan untuk perhitungan berikutnya. Nilai sinyal kendali sebelumnya, $u(k-1)$, akan diperbaharui setelah sinyal kendali sekarang, $u(k)$, dikeluarkan. Dapat dikatakan bahwa $u(k-1)$ adalah sinyal kendali sekarang untuk perhitungan berikutnya.

IV. PENGUJIAN DAN ANALISIS

4.1 Pengujian Kalang Terbuka

Pada pengujian ini, *plant* diberi masukan berupa tegangan yang diberikan ke DAC sebesar 5 volt. Tanggapan suhu ditunjukkan pada Gambar 25.



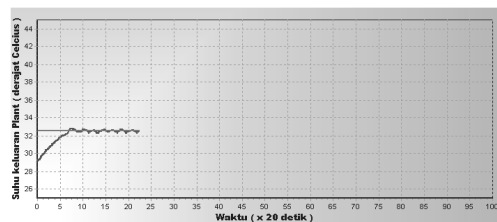
Gambar 25 Tanggapan *plant* suhu untuk kalang terbuka.

Tanggapan *plant* suhu menunjukkan adanya sedikit waktu tunda (*delay time*). Besarnya waktu tunda (L) sebesar 19 detik dan konstanta waktu (T) sebesar 245 detik. Perbandingan waktu tunda terhadap konstanta waktu (L/T) sebesar 0,078.

Pengujian ini menghasilkan tanggapan *plant* stabil pada suhu 40,1 °C. Akan tetapi, suhu yang dirasakan sensor tidak dapat tetap pada nilai 40,1 °C. Hal ini disebabkan suhu lingkungan yang berpengaruh besar pada sistem *plant* pemanas.

4.2 Pengujian Penalaan PID

Plant pemanas memberikan tanggapan suhu seperti ditunjukkan pada Gambar 26 saat penalaan PID. Referensi yang diberikan adalah sebesar 32,5 °C yang setara dengan 60_h saat diolah mikrokontroler dan sinyal kendali *relay* yang diberikan ke DAC adalah sebesar 0 volt dan 3,76 volt.



Gambar 26 Tanggapan *plant* suhu saat dilakukan penalaan parameter-parameter PID.

Tanggapan suhu *plant* dapat stabil beresilasi antara 32,3 °C sampai 32,7 °C. Suhu maksimal 32,3 °C dan suhu minimal 32,7 °C. Karena pengolahan dilakukan dalam mikrokontroler dengan bilangan

satu byte, nilai amplitudo osilasi, a , didapatkan sebesar $2h$.

Osilasi suhu *plant* pemanas dapat mencapai kestabilan dengan nilai perioda, T_u , 100 detik. Nilai ini setara dengan $64h$ dalam mikrokontroler.

Nilai amplitudo dan perioda diolah lebih lanjut untuk menghasilkan konstanta-konstanta pengendalian. Sesuai dengan persamaan pengendali PID berikut ini,

$u(k) = u(k-1) + k_3 e(k) - k_4 e(k-1) + k_2 e(k-2)$
maka didapatkan konstanta-konstanta pengendali:

$$K_p = \frac{6}{10} \cdot \frac{4 \cdot d}{a \cdot \pi} = \frac{6}{10} \cdot \frac{4 \cdot 60h}{2h \cdot \pi} = 25,00h$$

$$K_2 = K_d = \frac{K_p \cdot T_d}{T} = \frac{K_p \cdot T_u}{8 \cdot T} = \frac{25h \cdot 64h}{8 \cdot 2} = 0, E2h$$

$$K_4 = K_p + 2 \cdot K_2 = 25,00h + 2 \cdot 0, E2h = 26, C4h$$

$$K_3 = K_p + K_2 + K_i = K_p + K_2 + \frac{K_p \cdot T}{T_i}$$

$$= 25,00h + 0, E2h + \frac{25,00h \cdot 2}{64h} = 27,5C_h$$

Jika dilihat masing-masing parameter pengendali PID, maka didapat nilai parameter pengendali PID sebagai berikut.

$$K_p = 25,00h = 37,00$$

$$K_d = 0, E2h = 0,88$$

$$K_i = 0, BDh = 0,74$$

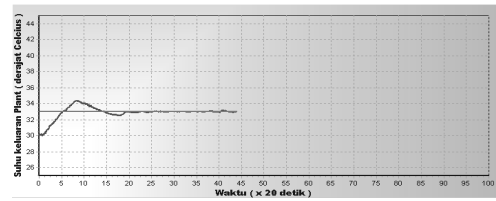
Dari ketiga parameter pengendali tersebut, terlihat bahwa nilai konstanta pengendali proporsional, K_p , nilainya sangat besar bila dibandingkan konstanta pengendali turunan, K_d , dan konstanta pengendali integral, K_i . Perbedaan nilai konstanta pengendali yang sangat besar ini terjadi akibat waktu tunda sistem terlalu kecil, sehingga perbandingan waktu tunda dan konstanta waktu sistem sebesar 0,078.

Waktu tunda sistem (L) menentukan besarnya amplitudo osilasi saat penalaan parameter-parameter PID dilakukan. Semakin kecil waktu tunda sistem, semakin cepat reaksi yang dirasakan sensor terhadap perubahan pemanas. Karena itu, amplitudo osilasi yang terjadi juga semakin kecil.

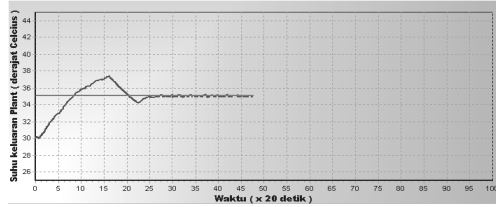
Besarnya nilai amplitudo osilasi berdampak pada konstanta proporsional dan perioda osilasi. Jika amplitudo yang terjadi besar, maka konstanta proporsional kecil, tapi perioda osilasi akan besar juga. Karena osilasi yang terjadi sangat kecil, yaitu sebesar $2h$, konstanta proporsional mempunyai nilai yang jauh lebih besar dari konstanta integral, K_i , dan konstanta turunan, K_d .

4.3 Pengujian Pengendalian PID

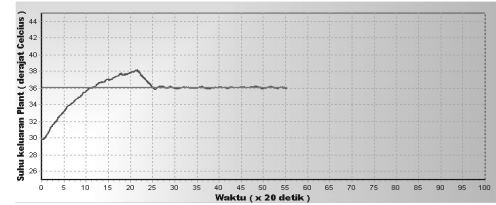
Pengendalian PID pada pengujian ini dilakukan dengan menerapkan parameter-parameter yang didapat dari pengujian penalaan. Tanggapan suhu *plant* pemanas udara ditunjukkan pada Gambar 27, Gambar 28, dan Gambar 29.



Gambar 27 Tanggapan *plant* suhu pada referensi 33 °C.



Gambar 28 Tanggapan *plant* suhu pada referensi 35 °C.



Gambar 29 Tanggapan *plant* suhu pada referensi 36 °C.

Dari ketiga gambar tanggapan *plant* terhadap kendali PID, dapat diketahui beberapa karakteristik sistem *plant* pemanas. Karakteristik sistem ditabelkan dalam Tabel 3.

Lewatan maksimum ketiga tanggapan sistem terlihat sangat besar, terutama tanggapan dengan nilai referensi 35 °C. Persentase lewatan maksimum yang cukup besar terjadi akibat konstanta proporsional yang besar. Besarnya nilai konstanta proporsional membuat sinyal kendali mempunyai nilai maksimum selama tanggapan peralihan sistem, bahkan sampai beberapa saat setelah melewati suhu referensi.

Tabel 3 Karakteristik tanggapan sistem.

Referensi (°C)	Suhu awal (°C)	t_d (s)	t_r (s)	t_p (s)	t_s (s)	Mp (%)
33,0	30,1	59,2	66,8	164,2	382,6	48,7
35,0	30,2	84,6	116,4	320	519	50,0
36,0	29,9	93,6	160,2	424,8	523,6	34,7

Lonjakan maksimum untuk referensi 36 °C terlihat kecil dibandingkan dua referensi lainnya. Hal ini terjadi karena terbatasnya kemampuan pemanas untuk memanaskan sistem. Terbatasnya kemampuan pemanas sesuai dengan tanggapan dari pengujian kalang terbuka, dimana peningkatan suhu berkurang setelah melewati suhu sekitar 35 °C.

Sinyal kendali berubah dengan cepat pada kondisi puncak dari tanggapan. Penurunan sinyal kendali terjadi sangat besar dan mengakibatkan penurunan suhu yang linier. Penurunan suhu menunjukkan bahwa sinyal kendali dalam keadaan minimum, sehingga penurunan suhu terjadi secara alami. Perubahan sinyal kendali yang cepat ini terjadi akibat K_p yang sangat besar.

Selain lonjakan maksimum, pengaruh ketidaksesuaian perbandingan waktu tunda dengan konstanta waktu (L/T) terhadap persyaratan Ziegler-Nichols, terjadi juga pada waktu penetapan. Waktu penetapan dapat lebih cepat, jika konstanta proporsional tidak terlalu besar dibandingkan dengan konstanta turunan. Peranan konstanta proporsional ini mendominasi kendali PID dan mengurangi peranan kendali oleh konstanta turunan. Dengan konstanta turunan yang berimbang dengan konstanta proporsional akan mempercepat peningkatkan kembali nilai sinyal kendali setelah tanggapan suhu berada di bawah nilai referensi.

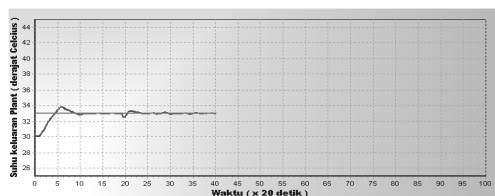
Tanggapan sistem mencapai kestabilan pada suhu referensi dengan toleransi sebesar 2 %. Kehalusan tanggapan sistem dalam kondisi stabil juga dipengaruhi konstanta proporsional. Keadaan ini mengurangi peranan konstanta integral dan konstanta turunan sebagai komponen-komponen pengendali. Peranan konstanta integral sebagai pengendali yang mendahului menjadi berkurang dalam memperhalus tanggapan terhadap perubahan sinyal kendali yang diakibatkan konstanta proporsional.

4.4 Unjuk Kerja Pengendali PID Terhadap Gangguan

Gangguan yang diberikan pada pengendali dilakukan dengan 2 variasi, yaitu gangguan yang bersifat sesaat dan gangguan yang terus-menerus. Penyemburan udara lingkungan pada sensor selama lima detik diberikan sebagai gangguan sesaat, sedangkan gangguan yang terus-menerus diberikan dengan melakukan penyedotan energi panas ke arah yang berlawanan dengan arah pemanas terhadap sensor.

4.4.1 Pengendali PID dengan Gangguan Sesaat

Gangguan sesaat diberikan terhadap tanggapan suhu sistem yang telah stabil pada referensi suhu 33 °C. Pengaruh gangguan ini dapat dilihat pada Gambar 30.



Gambar 30 Tanggapan *plant* suhu untuk pengendali PID dengan gangguan sesaat.

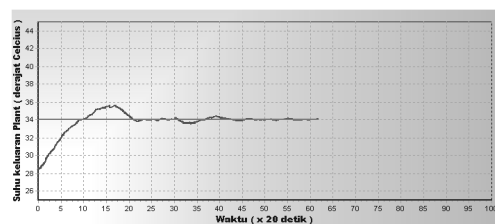
Pemberian gangguan dilakukan pada detik ke 386 dan suhu turun sebesar 0,6 °C dari referensi. Pemberian gangguan ini mempengaruhi pengendalian PID dan tanggapan suhu sistem tetap pada suhu terendah selama 6 detik. Tanggapan suhu mencapai puncak tertingginya, yaitu sebesar 33,4 °C dalam waktu 23 detik. Dari suhu tertinggi ini, sistem dapat kembali mencapai kestabilan dalam

waktu 46 detik. Jadi, waktu yang dibutuhkan kendali PID untuk mengembalikan tanggapan suhu ke referensi yang diinginkan setelah diberi gangguan sesaat adalah sebesar 75 detik.

Lonjakan suhu setelah sistem diberi gangguan terjadi cukup tinggi, yaitu sebesar 0,4 °C. Lonjakan ini adalah sebesar 66,67 % diukur dari suhu terendah, yaitu sebesar 32,4 °C. Persentase lonjakan yang cukup tinggi itu terjadi akibat konstanta proporsional yang besar. Keuntungan dari besarnya konstanta proporsional ini mempercepat tanggapan suhu kembali ke referensinya. Akan tetapi, sinyal kendali masih cukup besar untuk memanaskan sistem setelah suhu kembali mencapai referensi, sehingga terjadi lonjakan yang besar bila dibandingkan dengan penurunan suhu akibat gangguan.

4.4.2 Pengendalian PID dengan Gangguan Terus-menerus

Gangguan yang terus-menerus ini dilakukan dengan menyedot udara panas keluar dari sistem dimana arah penyedotannya berlawanan dengan posisi sensor terhadap elemen pemanas. Gangguan ini dilakukan untuk menguji kemampuan pengendali PID bekerja pada sistem dengan gangguan yang kontinyu. Tanggapan sistem terhadap gangguan ini ditunjukkan pada Gambar 31.



Gambar 31 Tanggapan *plant* suhu untuk pengendali PID dengan gangguan terus-menerus.

Gangguan mulai diberikan pada sistem setelah stabil pada suhu 34 °C. Pemberian gangguan dimulai pada detik ke 618. Suhu sistem terus menurun dalam waktu 24 detik sampai 33,6 °C. Tanggapan suhu tetap pada 33,6 °C selama 44 detik. Suhu naik kembali sampai suhu tertingginya sebesar 34,4 °C dalam waktu 88 detik. Setelah mencapai nilai tertingginya, tanggapan suhu menuju ke kestabilan tanggapan dalam waktu 74 detik. Jadi, kemampuan PID untuk mengembalikan keadaan sistem ke kondisi stabil adalah sebesar 230 detik.

Saat tanggapan suhu mulai berubah akibat gangguan, nilai kendali PID yang semula kecil mulai membesar. Walaupun demikian, pemanasan yang diberikan belum begitu berpengaruh terhadap suhu yang diterima oleh sensor. Karena itu, suhu terus menurun sampai suhu terendah. Tanggapan suhu tetap berada pada suhu terendah selama beberapa saat karena pemanasan yang diberikan belum cukup besar dengan adanya gangguan yang

diberikan. Setelah pemanasan mulai membesar dan menyebabkan suhu meningkat, sinyal kendali tetap dalam nilai yang besar pula karena akumulasi dari nilai kendali sebelumnya. Hal tersebut juga mengakibatkan terjadinya lonjakan tanggapan suhu yang mencapai 100 % dihitung dari suhu terendah yang dicapai setelah pemberian gangguan. Jadi, waktu pemulihan untuk gangguan kontinyu ini lebih besar dari waktu pemulihan untuk gangguan sesaat.

V. PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil pengujian dan analisa yang telah dilakukan, didapatkan beberapa kesimpulan sebagai berikut.

1. Perbandingan waktu tunda dengan konstanta waktu (L/T) berpengaruh terhadap hasil pengendalian bila menggunakan metode Ziegler-Nichols sebagai penala parameter-parameter pengendali yang digunakan.
2. Nilai perbandingan waktu tunda dengan konstanta waktu (L/T) tanggapan suhu di bawah 0,1, yaitu sebesar 0,078, mengakibatkan konstanta proporsional yang dihasilkan jauh lebih besar daripada parameter-parameter pengendali lainnya, K_i dan K_d .
3. Konstanta proporsional yang terlalu besar menyebabkan terjadinya lonjakan maksimum (*overshoot*) yang sangat besar.
4. Perubahan nilai referensi pengendalian berpengaruh kecil terhadap besarnya lonjakan maksimum yang terjadi selama kenaikan suhu yang disebabkan oleh elemen pemanas pada sinyal kendali maksimum, masih tetap linier.
5. Parameter-parameter pengendalian PID hasil penalaan mampu mengembalikan kestabilan tanggapan suhu pada referensi yang telah ditentukan setelah diberi gangguan, baik gangguan yang bersifat sementara maupun yang bersifat terus-menerus, walaupun terjadi *overshoot* yang sangat besar.

5.2 Saran

1. Pengaturan lamanya waktu tunda dari tanggapan sistem dapat dilakukan dengan mengatur kecepatan aliran udara antara blok pemanas dengan blok sensor.
2. Untuk mendapatkan panas yang lebih tinggi, perlu ditambahkan elemen pemanas. Penambahan pemanas ini perlu diimbangi dengan penggantian tempat (*box*) untuk elemen pemanas dengan bahan yang tahan panas.

DAFTAR PUSTAKA

- (1) Astrom, John and Bjorn Wittenmark, *Adaptive Control*, Addison-Wesley Publishing Company, Inc.

- (2) Bennett, Stuart, *Real-time Computer Control An Introduction*, Prentice Hall Inc, 1994.
- (3) Coughlin, Robert and Federick Driscoll, *Penguat Operasional dan Rangkaian Terpadu Linier*, Jakarta : Erlangga, 1994.
- (4) Garland, Harry, alih bahasa Barmawi dan Tjia M.O, *Pengantar Mikroprosesor*, Jakarta : Erlangga, 1994.
- (5) Karl Johan Astrom and Bjorn Witternmark, *Adaptive Control Second Edition*, Addison-Wesley Publishing Company Inc, 1995.
- (6) Nalwan, Paulus Andi, *Panduan Praktis Teknik Antarmuka dan Pemrograman Mikrokontroler AT89C51*. Jakarta ; PT Elex Media Komputindo. 2003.
- (7) Ogata, Katsuhiko, *Modern Control Engineering*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ.
- (8) Ogata, Katsuhiko, *Teknik Kontrol Otomatik, Jilid 1*, Jakarta : Erlangga, 1991.
- (9) Ogata, Katsuhiko, *Teknik Kontrol Otomatik, Jilid 2*, Jakarta : Erlangga, 1997.
- (10) Putra, Afgianto Eko, *Belajar Mikrokontroler AT89C51/52/55*, Edisi Pertama, Yogyakarta : Gava Media, 2002.
- (11)<http://alds.stts.edu/DIGITAL/Interrupt.htm>
- (12)<http://alds.stts.edu/DIGITAL/Timer.htm>
- (13)<http://www.eio.com:80/cgi-bin/byteserver.pl/m1632.pdf>
- (14)http://www.keil.com/dd/docs/datashts/atmel/at89s52_ds.pdf
- (15)<http://www.national.com/ds/LM/LM35.pdf>

BIOGRAFI



Eka Candra W – (L2F000596)

Tercatat sebagai mahasiswa Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik Universitas Diponegoro Semarang sejak tahun 2000. Saat ini sedang menyelesaikan pendidikan S-1 pada jurusan yang sama dengan konsentrasi yang diambil adalah kontrol. Email: eka_candra_w@yahoo.co.id

Mengetahui/Mengesahkan,

Pembimbing I,

Pembimbing II,

Wahyudi, ST. MT.
NIP. 132 086 662

Iwan Setiawan, ST.MT.
NIP. 132 283 183