

MAKALAH SEMINAR TUGAS AKHIR

APLIKASI TEKNIK KENDALI *GAIN SCHEDULING* PADA SISTEM KONTROL VALVE UNTUK PENGENDALIAN TINGGI MUKA CAIRAN PADA LIMAS TERPANCUNG

Wisnu Wibowo*, Iwan Setiawan**, Sumardi**

Abstrak – Teknik kendali *Gain Scheduling* merupakan salah satu teknik kendali yang digunakan untuk mendapatkan respon sistem yang diinginkan dengan cara melakukan perubahan nilai penguatan (*gain*) pada titik – titik respon sistem yang telah ditentukan. Tujuan dari tugas akhir ini adalah membuat sebuah aplikasi sistem kendali *Gain Scheduling* dan mengamati respon sistem yang dihasilkan.

Pada tugas akhir ini dilakukan pengujian terhadap unjuk kerja kendali *Gain Scheduling* dalam mengendalikan sistem kontrol *valve* untuk mengatur tinggi muka cairan secara *on-line* pada wadah penampung yang berbentuk limas terpancung dengan sisi atas yang lebih besar dari sisi bawahnya. Pengendalian dilakukan dengan mengatur pembukaan *valve* pengisian pada wadah penampung. Teknik pengendalian *Gain Scheduling* diimplementasikan pada sistem mikrokontroler ATMEGA8535 dan dapat dimonitoring melalui LCD dan komputer.

Dari hasil pengujian yang dilakukan dapat diketahui teknik kendali *Gain Scheduling* menghasilkan respon sistem yang cukup baik dalam menuju nilai referensi yang diberikan. Semakin besar referensi yang diberikan, waktu respon sistem untuk mencapai keadaan *steady*nya menjadi lebih lama, hal ini diakibatkan semakin besarnya luasan wadah penampung *plant* yang mengakibatkan semakin besarnya beban sistem. Pada pengujian dengan gangguan berupa penambahan bukaan *valve outlet* menunjukkan semakin besar gangguan yang diberikan, *offset* yang dihasilkan juga akan semakin besar.

Kata kunci : *Gain Scheduling*, Kontrol *Valve*, Tinggi Muka Cairan, Limas Terpancung.

I. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Dalam era globalisasi, sektor industri memegang peranan yang sangat penting. Banyak industri-industri yang berkembang pesat. Di dalam industri, sangat dibutuhkan sistem kendali yang baik untuk dapat menunjang proses berjalannya industri tersebut dan untuk meningkatkan efisiensi dalam proses produksi.

Berbagai macam metode sistem kendali sudah dikembangkan untuk mendapatkan tingkat efisiensi yang lebih baik antara lain sistem kendali *Fuzzy*, *STR* (*Self Tuning Regulator*), *MRAS* (*Model Reference Adaptive System*), dan *Gain Scheduling*

*

* Mahasiswa Jurusan Teknik Elektro UNDIP

** Staf Pengajar Jurusan Teknik Elektro UNDIP

Metode *Gain Scheduling* merupakan salah satu metode sistem kendali yang dapat digunakan pada proses industri. *Gain Scheduling* adalah sistem kendali dengan penguatan sinyal kontrol pada rentang waktu proses yang berbeda dan sudah ditentukan. Hal ini dimaksudkan agar dihasilkan respon sistem yang baik pada daerah respon yang memiliki beban yang berbeda.

1.2 Tujuan dan Manfaat

Tujuan dari tugas akhir ini adalah mengaplikasikan sistem *Gain Scheduling* untuk mengendalikan ketinggian muka cairan pada wadah penampung berbentuk limas terpancung. Ketinggian air diharapkan dapat segera mencapai referensi yang diberikan dan dapat mengantisipasi gangguan yang terjadi pada sistem.

1.3 Pembatasan Masalah

1. *Plant* yang diuji adalah wadah penampung air yang berbentuk limas terpancung dengan ukuran wadah yang sudah ditentukan.
2. Sensor pengukuran ketinggian permukaan air yang digunakan adalah sensor ultrasonik.
3. Jarak ketinggian air yang dapat diseting untuk pengendalian sistem dibatasi dari jarak 10cm – 50cm.
4. Gangguan yang diberikan berupa pengurangan jumlah debit air pada *plant*, dengan cara mengatur bukaan *valve* keluaran secara manual.

II. KAJIAN PUSTAKA

2.1 Model Kontrol Proses Level Fluida^[5]

Dalam mendapatkan model kontrol dari suatu proses level fluida dapat dilakukan dengan menerapkan hukum kesetimbangan massa yaitu: “Laju akumulasi massa = Laju massa yang masuk - Laju massa yang keluar”

$$\frac{d}{dt}(\rho Ah(t)) = \rho q_{in} - \rho q_{out} \quad (2.1)$$

Dimana :

q_{in} = Perubahan laju aliran fluida input sekitar nilai nominalnya (m^3/det)

q_{out} = Perubahan laju aliran fluida output sekitar nilai nominalnya (m^3/det)

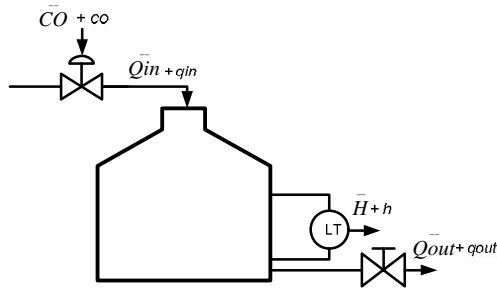
ρ = densitas (kg/m^3)

A = Luas penampang tanki (m^2)

H = Perubahan ketinggian fluida dalam tanki (m)

Model kontrol proses level fluida dapat dilihat pada

Gambar 2.1.



Gambar 2.1 Model kontrol proses level fluida.

Penurunan rumus :

$$q_{out} = K_{out} \cdot h(t) \tag{2.2}$$

K_{out} = konstanta proporsionalitas yang harganya tergantung pada bukaan valve beban
 Diasumsikan aliran input linear, maka perubahan debit fluida input akan proporsional terhadap besar perubahan sinyal kontrol penggerak .

$$q_{in} = K_{in} \cdot C_o \tag{2.3}$$

Dengan mensubstitusikan kedua persamaan diatas pada persamaan 2.4 dengan melakukan sedikit penyederhanaan, maka diperoleh persamaan diferensial linear .

$$\frac{A(H)dh(t)}{K_{out}dt} = -h(t) + \frac{K_{in}}{K_{out}} C_o(t) \tag{2.4}$$

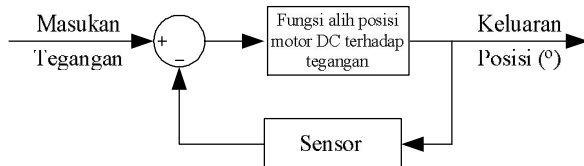
Atau dapat ditulis dalam bentuk umum .

$$\frac{h(s)}{C_o(s)} = \frac{K}{Ts + 1} \tag{2.5}$$

2.2 Servo Valve^[4]

Servo valve merupakan sebuah sistem valve yang dirancang dengan penggerak motor DC berdasar prinsip sistem servoposisi. Sistem servoposisi pada dasarnya suatu sistem pengendali yang dilengkapi jaringan umpan balik yang membentuk lup tertutup dengan keluaran berupa posisi. Penggunaan jaringan umpan balik dipakai untuk memperbaiki aksi pengendali sehingga posisi keluaran dapat dipertahankan pada harga yang diinginkan.

Hubungan antara masukan dan keluaran serta proses yang dilakukan sistem ditunjukkan pada Gambar 2.2.



Gambar 2.2. Blok diagram servoposisi.

Suatu masukan yang biasanya diwakili dengan tegangan acuan digunakan untuk mengendalikan proses. Keluaran proses berupa posisi, yang kemudian diubah oleh sensor menjadi tegangan yang bersesuaian dengan posisi keluaran. Tegangan ini

dibandingkan dengan tegangan acuan bila ada selisihnya digunakan untuk mengoreksi proses. Proses berhenti bila selisih tegangan acuan dan tegangan umpan baliknya sama dengan nol. Adanya proses koreksi yang terus menerus, menjadikan posisi keluaran dijaga pada suatu harga yang sesuai dengan tegangan masukan.

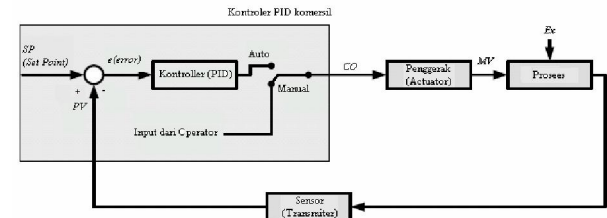
2.3 Model Self Regulating Process

Model *self regulating process* adalah model yang paling umum dijumpai di industri proses. Model ini hampir muncul pada setiap kasus pengontrolan praktis, seperti pengontrolan temperatur pada sistem heat exchanger, dan pengontrolan level fluida pada sistem tangki penampung.

Model *self regulating process* pada dasarnya dapat didekati oleh sebuah model matematis FOPDT (*First Order Plus Dead Time*) yang hanya dicirikan oleh tiga buah parameter sebagai berikut:

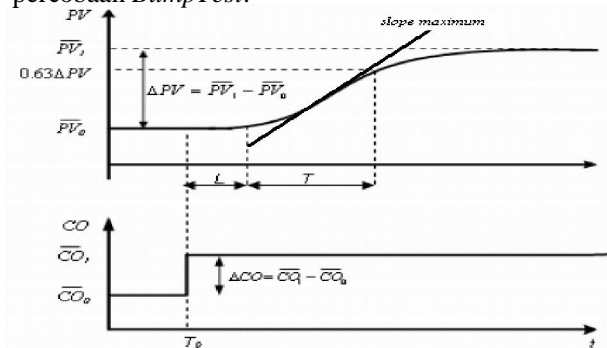
- *Process transport delay* (delay atau keterlambatan transportasi proses) - L
- *Process time constant* (konstanta waktu proses) - T
- *Process static gain* (penguatan tetap proses) - K

Ketiga parameter yang menggambarkan dinamika proses, secara praktis dapat diperoleh atau diidentifikasi melalui eksperimen sederhana *Bump Test* atau sinyal tangga secara *open loop* pada mode kontrol manual (lihat Gambar 2.3).



Gambar 2.3 Percobaan BumpTest pada kontrol manual

Secara teknis percobaan *Bump Test* dilakukan dengan cara memberi perubahan tangga (*step*) sinyal *output* kontroler (CO) oleh operator pada saat proses mengalami keadaan *steady* (menetap) disekitar titik kerja nominalnya. Gambar 2.4 menunjukkan hasil percobaan *BumpTest*.



Gambar 2.4 Respon Tangga percobaan Bump Test untuk model FOPDT

Mengacu pada Gambar 2.4 parameter - parameter proses FOPDT dapat dicari sebagai berikut:

- *Process Transport Delay* (Keterlambatan Transportasi Proses) - L

Waktu keterlambatan transportasi proses dihitung sejak terjadi perubahan tangga pada CO sampai variabel proses (PV) yang dikontrol mulai menanggapi perubahan input CO .

- *Process Time Constant* (Konstanta Waktu Proses) - T

Waktu yang diperlukan sehingga nilai PV mencapai kurang lebih 63% dari keadaan *steady* akhirnya. selain dengan cara mengamati respon dari grafik, konstanta waktu proses dapat juga dihitung berdasarkan gradien atau *slope* maksimum yang terjadi pada saat transien.

$$T = \frac{\Delta PV}{Slope Max.} \tag{2.6}$$

Dalam hal ini, ΔPV dan *slope max* adalah deviasi dan gradien output proses maksimum.

- *Process Static Gain* (Penguatan Tetap Proses) - K
- Penguatan tetap proses adalah perbandingan perubahan PV terhadap perubahan CO dalam keadaan *steady*-nya.

$$K = \frac{\Delta PV}{\Delta CO} = \frac{\overline{PV}_1 - \overline{PV}_0}{\overline{CO}_1 - \overline{CO}_0} \tag{2.7}$$

Nilai *gain* proses ini secara langsung menunjukkan kesensitifan proses, semakin besar nilai *gain* maka proses semakin sensitif (perubahan kecil CO menghasilkan deviasi PV yang relatif besar).

2.3.1 Representasi Matematis Proses FOPDT

Pada model FOPDT, dinamika perubahan atau deviasi output proses terhadap perubahan sinyal kontrol di sekitar nilai *steady* nominalnya dapat direpresentasikan dalam bentuk persamaan diferensial linier berikut:

$$T \frac{dpv(t)}{dt} = -pv(t) + K.co(t - L), pv(0) = 0 \tag{2.8}$$

K : *gain* statis proses

L : *delay* transportasi proses

T : konstanta waktu proses

co : *input* proses disekitar nilai *steady*-nya

pv : *output* proses disekitar nilai *steady*-nya

dpv / dt : laju perubahan output proses disekitar nilai *steady*-nya

$pv(0)$: *output* proses awal sebelum terjadi perubahan input

Untuk tujuan analisis dan perancangan, persamaan diferensial yang menggambarkan perilaku proses di atas secara umum dapat representasikan ke dalam bentuk fungsi alih proses dengan Transformasi *Laplace*.

$$H(s) = \frac{pv(s)}{co(s)} = \frac{K}{Ts + 1} e^{-sL} \tag{2.9}$$

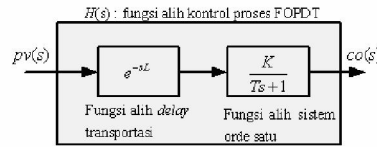
dengan

$H(s)$: fungsi alih kontrol proses FOPDT

$pv(s)$: Transformasi *Laplace* deviasi output proses

$co(s)$: Transformasi *Laplace* deviasi input proses

Dalam bentuk diagram blok, fungsi alih kontrol proses FOPDT ditunjukkan Gambar 2.5 .



Gambar 2.5 Diagram blok model proses FOPDT

2.4 Pengendali PID (*Proporsional-Integral-Derivative*)

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

$$u(t) = K_p \left(e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt + T_d \cdot \frac{de(t)}{dt} \right) \tag{2.10}$$

atau

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt} \tag{2.11}$$

dengan

$u(t)$ = sinyal keluaran pengendali PID

K_p = konstanta proporsional

T_i = waktu integral

T_d = waktu turunan

K_i = konstanta integral

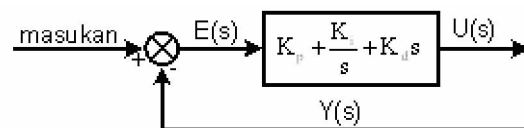
K_d = konstanta turunan

$e(t)$ = sinyal kesalahan ($e(t)$ = referensi – keluaran *plant*)

Jadi, fungsi alih pengendali PID (dalam domain s) dapat dinyatakan sebagai berikut.

$$G_c(s) = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s \tag{2.12}$$

Diagram blok pengendali PID dapat dilihat pada Gambar 2.6.



Gambar 2.6 Diagram blok pengendali PID.

Sedangkan dalam kawasan sistem diskret, pengendali PID dapat dituliskan dalam bentuk persamaan beda sebagai berikut:

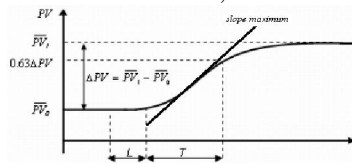
$$u(k) = K_p e(k) + K_i T \sum_{i=0}^{k-1} e(i) + K_d \frac{(e(k) - e(k-1)))}{T} \tag{2.13}$$

2.5 Penalaan Pengendali PID

Penalaan pengendali PID pada dasarnya adalah mencari nilai konstanta-konstanta K_p , K_i , dan K_d . Ada beberapa metode penalaan yang dapat digunakan, salah satunya adalah metode Ziegler-Nichols.

2.5.1 Metode Ziegler-Nichols

Metode didasarkan pada respon *plant* terhadap masukan tangga (*step*) dalam kalang terbuka. *Plant* yang tidak mempunyai *integrator*, akan menghasilkan kurva tanggapan terhadap masukan tangga, seperti kurva yang berbentuk huruf S pada Gambar 2.10. Jika ditarik garis singgung pada titik peralihan kurva S dan melanjutkannya sampai memotong garis kondisi tunak, maka diperoleh parameter waktu mati (*dead time*), L , dan konstanta waktu, T .



Gambar 2.7 Kurva tanggapan berbentuk S.

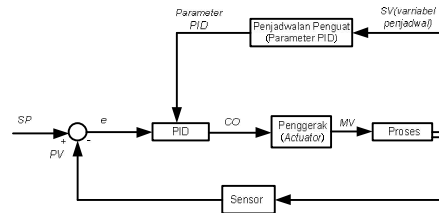
Parameter-parameter yang didapat dari kurva reaksi digunakan untuk menentukan parameter-parameter pengendali PID berdasarkan tetapan-tetapan empiris Ziegler-Nichols. Rumus-rumus untuk mencari parameter pengendali menggunakan metode kurva reaksi ditabelkan pada Tabel 2.1.

Tabel 2.1 Rumus parameter PID dengan penalaan Ziegler-Nichols metode ke-1.

Pengendali	K_p	T_i	T_d
P	$\frac{T}{K.L}$	-	-
PI	$0,9 \frac{T}{K.L}$	$3,33L$	-
PID	$1,2 \frac{T}{K.L}$	$2L$	$0,5L$

2.6 Gain Scheduling

Gain scheduling adalah sebuah metode kontrol dimana besar parameter PID yang digunakan oleh modul kontrol dijadwal berdasarkan titik kerja atau kondisi operasi yang dihadapi. Agar setiap saat kontroler mengetahui kondisi proses, maka dalam skema kontrol ini diperlukan pengukuran variabel tambahan (*auxillaries variable*) yang secara teknis digunakan sebagai variabel penjadwal—*scheduled variable*. Diagram blok sistem kontrol *Gain Scheduling* ditunjukkan Gambar 2.8.



Gambar 2.8 Diagram blok sistem kontrol *Gain Scheduling*

Dalam bentuknya yang sederhana, metode kontrol *Gain Scheduling* ini dapat direalisasikan dalam sebuah tabel tengok (*look up table*) yang berisi himpunan parameter PID untuk berbagai kondisi yang mungkin terjadi selama pengontrolan proses berlangsung. Tabel 2.2 berikut memperlihatkan ilustrasi tabel penjadwal pada skema kontrol gain scheduling.

Tabel 2.2 Himpunan parameter PID untuk berbagai proses.

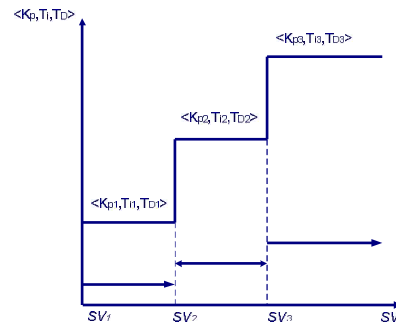
	K_p	T_i	T_D
Kondisi 1	K_{p1}	T_{i1}	T_{D1}
Kondisi 2	K_{p2}	T_{i2}	T_{D2}
Kondisi --	--	--	--
Kondisi n	K_{pn}	T_{in}	T_{Dn}

Dalam perancangan awal, kita terlebih dahulu harus menentukan jangkauan nilai variabel penjadwal (*SV*) untuk setiap kondisi dinamika proses yang sedang dihadapi. Tabel 2.3 memperlihatkan salah satu contoh rancangan tabel penguat.

Tabel 2.3 Tiga himpunan parameter PID untuk tiga kondisi proses.

	K_p	T_i	T_D
Kondisi 1 : $SV1 < SV < SV2$	K_{p1}	T_{i1}	T_{D1}
Kondisi 2 : $SV2 < SV < SV3$	K_{p2}	T_{i2}	T_{D2}
Kondisi 3 : $SV > SV3$	K_{p3}	T_{i3}	T_{D3}

Dari Tabel 2.3 dapat diilustrasikan kedalam grafik oleh Gambar 2.9 berikut.



Gambar 2.9 Ilustrasi hubungan nilai variabel penjadwal dengan parameter PID

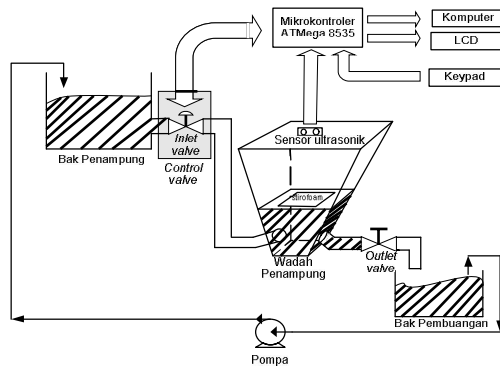
III. PERANCANGAN PERANGKAT KERAS DAN PERANGKAT LUNAK

Perancangan perangkat pada sistem pengendalian tinggi muka cairan ini meliputi wadah limas terpancung, sistem minimum pengontrolan dan alat – alat pendukung yang digunakan. Sedangkan, pada perancangan perangkat lunak meliputi program mikrokontroler pengendali plant dan logika pengendali *Gain Scheduling*.

3.1 Perancangan Perangkat Keras (Hardware)

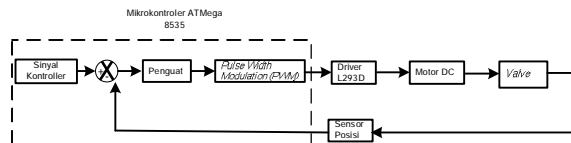
Perancangan perangkat keras sistem pengendalian tinggi muka cairan ini terdiri dari mikrokontroler AVR ATmega 8535, sensor PING™, Keypad, LCD, Valve pengendali dan wadah penampung limas terpancung.

Secara umum perancangan perangkat keras sistem ditunjukkan pada gambar 3.1.



Gambar 3.1 Skematis sistem pengendalian tinggi muka cairan

Dari gambar 3.1 diketahui, cara kerja dari plant pengaturan tinggi muka cairan adalah pada saat nilai referensi diberikan oleh operator melalui keypad, terjadi proses pengiriman data oleh keypad menuju mikrokontroler. Data yang diterima mikrokontroler dari keypad akan diproses dengan data yang diterima dari sensor ultrasonik. Kemudian mikrokontroler akan menghasilkan sinyal kontroler yang akan digunakan untuk menggerakkan aktuator plant yaitu valve. Pada control valve ini terjadi proses umpan balik sinyal dengan mikrokontroler. Gambar 3.2 menjelaskan alur kerja sistem control valve.



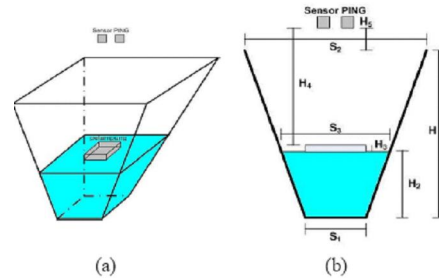
Gambar 3.2 Diagram blok sistem control valve

Dari gambar 3.2, terlihat nilai dari sinyal kontroler akan dikurangkan dengan nilai dari sensor posisi, hasil dari proses pengurangan ini akan diperoleh nilai berupa besaran *Pulse Width Modulation (PWM)*.

Sinyal dari PWM ini akan masuk kedalam rangkaian driver L293D dan diperoleh sinyal kontrol analog yang akan menggerakkan motor DC. Motor DC ini berfungsi sebagai aktuator dengan valve. Nilai dari putaran valve akan dikirimkan kepada sensor posisi, sebagai indikator bukaan dan pembatas buka – tutup valve. Sensor posisi yang digunakan pada sistem control valve ini adalah berupa komponen potensiometer. Dengan memanfaatkan roda – roda gigi, putaran potensiometer dikopel dengan putaran motor DC.

3.1.1 Perancangan Wadah Penampung^[8]

Wadah penampung zat cair dalam Tugas akhir ini berbentuk limas terpancung yang ditunjukkan pada gambar 3.3.



Gambar 3.3 Wadah penampung air berbentuk limas terpancung (a) Bentuk 3D (b) Bentuk 2D

Adapun keterangan dari Gambar 3.3 di atas adalah : H₅ : Jarak alat ukur (sensor PING) ke tepi atas objek (cm)

H₃ : Tebal pemantul (gabus) (cm)

H₂ : Tinggi cairan (cm)

H₄ : Jarak terukur (antara sensor PING dan permukaan atas pemantul) (cm)

S₁ : Lebar sisi bawah objek (cm)

S₂ : Lebar sisi atas objek (cm)

S₃ : Lebar cairan pada saat terukur (cm)

H : Tinggi objek (cm)

Untuk mendapatkan besar volume cairan, harus diketahui tinggi muka cairan wadah penampung (H₂), dan lebar sisi atas cairan pada saat terukur (S₃). H₂ diperoleh setelah sensor ultrasonik melakukan pembacaan jarak pantul gelombang ultrasonik terhadap styrofoam (H₄).

$$H_2 = H + H_5 - H_4 - H_3 \tag{3.1}$$

Kemudian untuk mengetahui lebar sisi atas cairan pada saat terukur dibutuhkan data tinggi total objek limas (Ht) yang didapat dari :

$$H_t = \frac{S_2 \times H}{S_2 - S_1} \tag{3.2}$$

Dengan demikian lebar sisi atas cairan pada saat terukur (S₃) adalah,

$$S_3 = \frac{(H - H_t + H_2) \times S_2}{H_t} \tag{3.3}$$

Maka volume cairan dapat diketahui sebagai berikut,

$$V = \frac{1}{3} H_2 (S_1^2 + S_1 S_3 + S_3^2) \tag{3.4}$$

diberikan mikrokontroler menjadi nol sehingga menghentikan pergerakan motor DC.

Jika Ketinggian muka cairan lebih kecil dari pada nilai referensi, *state* kembali mengalami transisi kembali menuju *state* Motor Hidup. Pada *state* Motor Hidup dan *state* Motor Mati, dapat mengalami transisi *state* menuju *state* Menu Utama, jika melakukan perintah *Reset* pada *Keypad*.

3.2.2 Pembacaan Sensor Posisi

Sensor posisi yang digunakan pada kontrol *valve* adalah potensiometer. Untuk membaca tegangan keluaran dari potensiometer dibutuhkan fungsi ADC dari mikrokontroler. Pin A.0 mikrokontroler digunakan sebagai pembacaan mikrokontroler.

```
void baca_adc(void){
unsigned char k;
baca=0;
for(k=0;k<10;k++) {
baca+=((float)read_adc(0)/MAX_ADC)*255;} //
melakukan penjumlahan dari sepuluh kali
pembacaan ADC
baca = baca/10; }// hasil akhir pembacaan
ADC dengan membagi sepuluh dari penjumlahan.
```

3.2.3 Kendali Posisi Valve

Aktuator pada plant Tugas Akhir ini adalah *valve*. Untuk mendapatkan posisi bukaan, *valve* dikopel dengan motor DC. Agar putaran motor DC tidak melebihi batas maksimal dan minimal bukaan *valve* maka diperlukan umpan balik terhadap sinyal kontrol yang akan mengendalikan motor DC.

```
void set_valve(float data){
float control_v; // control valve memiliki
tipe data float
kp_V=10; // konstanta proposional valve = 10
Ti_V=4; // konstanta integral valve = 4
PI_Initialize(kp_V,Ti_V,step_time); //
inisialisasi PI
baca_adc(); // membaca ADC
if (baca>255) baca=255; // batas maksimal
bukaan valve
if (baca<0) baca=0; // batas minimal bukaan
valve
error_V= data - baca; // error valve
control_v=PI_Update(error_V); // aksi
kontrol PI
if (control_v<0) // putaran motor mundur{
PORTD.2=0;
PORTD.3=1;}
else{ // putaran motor maju
PORTD.2=1;
PORTD.3=0; }
if (control_v>140) control_v = 140; // batas
maksimal nilai sinyal kontrol valve
if (control_v<-140) control_v = -140; //
batas minimal nilai sinyal kontrol valve
if (control_v==0) pwm=0; // motor berhenti
else pwm=115+fabs(control_v); // nilai PWM
OCR2=pwm; //PWM = Timer 2}
```

3.2.4 Kendali Gain Scheduling

Pada Tugas Akhir ini digunakan kendali *Gain Scheduling* sebagai kendali utama sistem. Kendali *Gain Scheduling* yang digunakan, merupakan penjadwalan nilai parameter KP dan KI pada kontroler PI (*Proposional – Integral*) terhadap perubahan rentang ketinggian wadah penampung. Besarnya nilai parameter KP dan KI ditentukan melalui uji *Bump Test*. Nilai *offset* ditambahkan, sesuai dengan bukaan pada *outlet valve*.

```
if (sp_level<17.5){ // set point level <
17,5
offset=40; // offset ditambahkan 40
Kp=19.17; // konstanta proposional = 19,17
Ki=6.66; } // konstanta integral = 6,66
else if (sp_level>=17,5){ // set point level
17,5
offset=45; // offset ditambahkan = 45
Kp=37.46; // konstanta proposional = 37,46
Ki=6; } // konstanta integral = 6
```

3.2.5 Kendali PI (*Proposional – Integral*)

Kendali PI pada perancangan Tugas Akhir ini, digunakan untuk menghasilkan sinyal kontrol sistem. Nilai KP dan KI diperoleh dari kendali *Gain Scheduling* pada mode otomatis atau dari masukan *keypad* pada mode manual. Perhitungan dengan algoritma PI dimulai dengan menghitung *error* antara nilai referensi dengan ketinggian muka cairan sebenarnya.

```
void PI_Initialize(float kp,float ti,float
step_time){
step_time=0.5; // waktu cuplik 0,5 detik
m_kp = kp; // konstanta proposional
m_ti = ti; // waktu integral
m_h = step_time;
m_integral= 0;}// nilai awal output integral
float PI_Update(float error){
m_integral+=(m_kp*m_h*error)/m_ti; // hitung
ouput integral
m_proposional=m_kp*error; // hitung output
itegral
return m_proposional + m_integral;}// hitung
output PI
```

IV. PENGUJIAN DAN ANALISIS

Pengujian yang dilakukan adalah pengujian terhadap volume cairan dari ketinggian yang terukur dan perhitungan matematis. Kemudian dilakukan pengujian *Bump Test*, untuk mendapatkan nilai parameter kontroler PI dari *Gain Scheduling*. Untuk pengujian sistem kendali *Gain Scheduling* dilakukan pengujian dengan referensi naik, referensi turun, dan gangguan plant berupa penambahan bukaan *valve outlet*.

4.1 Pengujian Volume Cairan

Untuk memperoleh besarnya volume cairan, diperlukan nilai tinggi muka cairan (H_2), dan lebar sisi atas cairan pada saat terukur (S_3). Berdasarkan persamaan 3.1 diketahui tinggi objek (H) 60 cm, tebal

Styrofoam (H_3) 1,5 cm, dan tinggi jarak terukur (antara sensor PING dan *styrofoam*) (H_4).

$$\text{Tinggi cairan } (H_2) = 58,5 - H_4$$

Kemudian untuk mengetahui lebar sisi atas cairan pada saat terukur dibutuhkan data tinggi total objek limas (H_t) yang didapat dari persamaan 3.2, dengan data panjang sisi atas wadah penampung 50 cm, panjang sisi bawah wadah penampung 15 cm.

$$H_t = \frac{50 \times 60}{50 - 15} = 85,71$$

Maka lebar sisi atas cairan (S_3) dapat dihitung berdasarkan persamaan 3.3.

$$S_3 = \frac{(60 - 85,71 + H_2) \times 50}{85,71}$$

Volume cairan dapat diketahui berdasarkan persamaan 3.4.

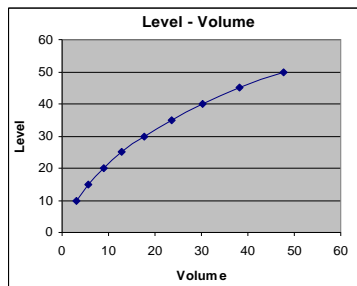
$$V = \frac{1}{3} H_2 ((15)^2 + (15 \times S_3) + S_3^2)$$

Pengujian volume cairan dilakukan dengan perbandingan volume yang ditampilkan program (Gambar 3.11) dengan perhitungan matematis.

Tabel 4.1 Perbandingan volume cairan terukur dengan perhitungan matematis.

Referensi (cm)	Volume tertampil (liter)	Volume (liter)	Error (%)
10	3,2	3,2	0
15	5,7	5,7	0
20	8,9	8,9	0
25	12,8	12,9	0,2
30	17,6	17,7	0,2
35	23,6	23,5	0,2
40	30,4	30,3	0,2
45	38,2	38,2	0
50	47,3	47,7	0,8

Dari Tabel 4.1, diketahui adanya perbedaan antara volume yang terukur pada program dan volume yang berdasarkan perhitungan manual, hal ini disebabkan adanya pembulatan angka pada senarai program dan ketinggian muka cairan yang terukur dengan PING tidak tepat dengan referensi (berosilasi). Hubungan antara laju perubahan ketinggian dengan laju perubahan volume ditunjukkan pada gambar 4.1.



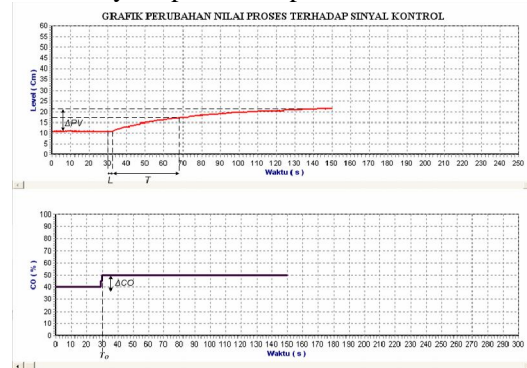
Gambar 4.1 Grafik hubungan ketinggian dan volume plant limas terpancung

4.2 Pengujian *Bump Test*

Pengujian *Bump Test* dilakukan untuk mendapatkan parameter – parameter dari karakteristik sistem.

4.2.1 Pengujian *Bump Test* pada Ketinggian 10 cm

Pengujian *Bump Test* yang dilakukan adalah dengan memberi respon tangga sinyal kontrol (CO) pada keadaan tetap muka cairan di ketinggian 10 cm. Untuk hasilnya dapat dilihat pada Gambar 4.2.



Gambar 4.2 Pengujian *Bump Test* ketinggian 10 cm

Dari Gambar 4.2, diketahui waktu keterlambatan proses (L) = 2 s, waktu naik proses (T) = 46 s, nilai perubahan proses (PV) = 10,8 cm, dan nilai perubahan respon tangga sinyal kontrol (CO) = 10 % . Sehingga didapatkan nilai penguatan proses (K).

$$K = \frac{\Delta PV}{\Delta CO} = \frac{\overline{PV}_1 - \overline{PV}_0}{\overline{CO}_1 - \overline{CO}_0}$$

$$K = \frac{(10,8) (cm)}{(10) (\%)} = 1,08 cm/\%$$

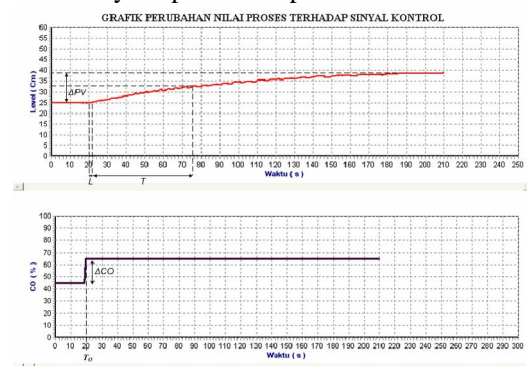
Dari nilai - nilai yang diketahui diperoleh persamaan matematis fungsi alih sistem di sekitar ketinggian muka cairan 10 cm.

$$H(s) = \frac{PV(s)}{CO(s)} = \frac{K}{Ts + 1} e^{-sL}$$

$$H(s) = \frac{1,08}{46s + 1} e^{-2s}$$

4.2.2 Pengujian *Bump Test* pada Ketinggian 25 cm

Pengujian *Bump Test* yang dilakukan adalah dengan memberi respon tangga sinyal kontrol (CO) pada keadaan tetap muka cairan di ketinggian 25 cm. Untuk hasilnya dapat dilihat pada Gambar 4.3.



Gambar 4.3 Pengujian *Bump Test* ketinggian 25 cm

Dari Gambar 4.3, diketahui waktu keterlambatan proses (L) = 1,8 s, waktu naik proses (T) = 53,2 s, nilai perubahan proses (PV) = 14,2 cm, dan nilai perubahan respon tangga sinyal kontrol (CO) = 20 % . Sehingga didapatkan nilai penguatan proses (K).

$$K = \frac{\Delta PV}{\Delta CO} = \frac{\overline{PV}_1 - \overline{PV}_0}{\overline{CO}_1 - \overline{CO}_0}$$

$$K = \frac{(14,2)(cm)}{(20)(\%)} = 0,71 cm/\%$$

Dari nilai - nilai yang diketahui diperoleh persamaan matematis fungsi alih sistem disekitar ketinggian muka cairan 25 cm.

$$H(s) = \frac{pv(s)}{co(s)} = \frac{K}{Ts+1} e^{-sL}$$

$$H(s) = \frac{0,71}{53,2s+1} e^{-1,8s}$$

4.3 Penentuan Parameter Gain Scheduling

Untuk mendapatkan parameter *Gain Scheduling*, diperlukan tuning kendali PI (*Propositional-Integral*) dari persamaan matematis fungsi alih sistem. Metode tuning yang digunakan adalah metode Ziegler – Nichols.

$$K_p = \frac{0,9T}{KL}$$

$$T_i = 3,33L$$

Sedangkan, untuk menentukan titik ketinggian perubahan variabel penjadwalan (SV) ditentukan berdasarkan titik tengah antara kedua ketinggian pengujian *Bump Test*.

$$\frac{10+25}{2} = 17,5 \text{ cm}$$

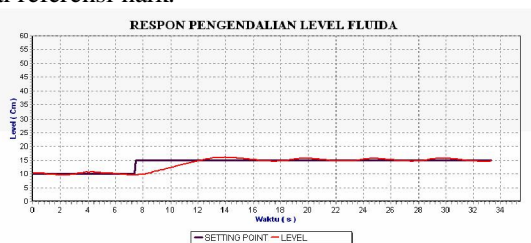
Maka diperoleh variabel penjadwalan (SV) kendali PI pada sistem *Gain Scheduling*, yang ditunjukkan pada tabel 4.2.

Tabel 4.2 Dua himpunan parameter PI untuk dua kondisi proses.

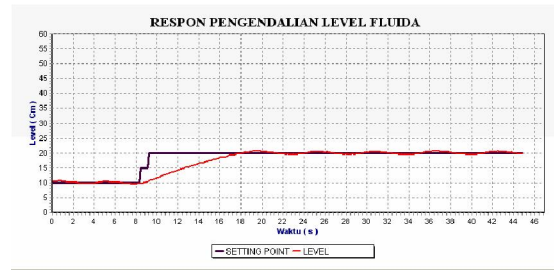
	K_p	T_i
Ketinggian (cm) : $SV < 17,5$	19,17	6,66
Ketinggian (cm) : $SV > 17,5$	37,46	6

4.4 Pengujian dengan Nilai Referensi Naik

Pengujian dilakukan dengan cara memberikan nilai referensi naik.



Gambar 4.4 Respon sistem dengan pemberian referensi naik 15 cm



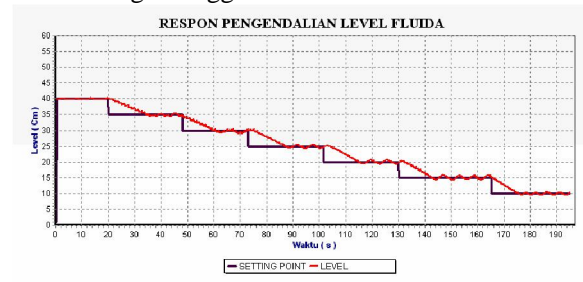
Gambar 4.5 Respon sistem dengan pemberian referensi naik 20 cm

Tabel 4.3 Perbandingan respon sistem pada referensi naik.

Referensi (cm)	Ketinggian awal (cm)	Waktu Naik / t_r (detik)	Waktu Penetapan / t_s (detik)	Offset (%)
15	10	3,8	9,6	8
20	10	9	14,5	3,5
30	10	26,9	30,8	2,6
40	10	66,8	68,9	0,75
50	10	175,8	178,9	0,2

4.5 Pengujian dengan Referensi Turun

Pengujian dengan referensi turun ini bertujuan untuk mengetahui kecepatan respon kendali *Gain Scheduling* terhadap perubahan penurunan referensi. Pengujian dilakukan dengan cara memberikan perubahan referensi ketinggian dengan penurunan 5 cm dari ketinggian awalnya, pengujian ini dilakukan dari rentang ketinggian 40 – 10 cm.



Gambar 4.6 Respon sistem dengan pemberian referensi turun

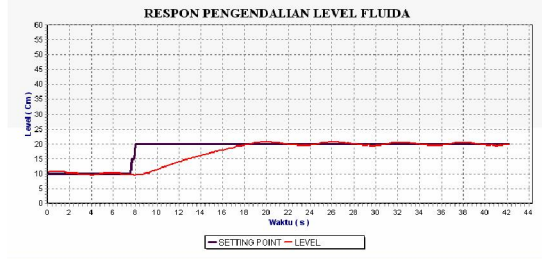
Tabel 4.4 Perbandingan respon sistem pada referensi turun

Referensi (cm)	Ketinggian awal (cm)	Waktu Turun / t_r (detik)	Waktu Penetapan / t_s (detik)	Offset (%)
35	40	13,8	14,9	2
30	35	13,3	15,9	3
25	30	11,6	17,7	2,4
20	25	10,9	17,4	3,5
15	20	10	16,4	4,6
10	15	9,7	13,4	3

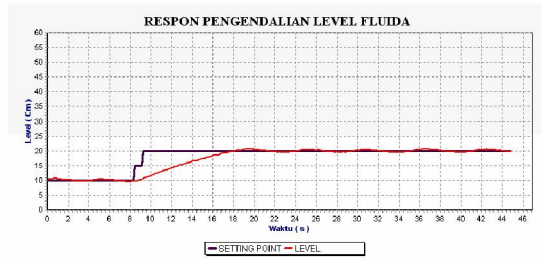
4.6 Perbandingan Respon Gain Scheduling dengan Fixed Parameters

Untuk mengetahui kehandalan teknik kendali *Gain Scheduling* dalam memperoleh respon sistem sesuai yang diinginkan, maka perlu adanya

perbandingan respon sistem dengan metode lain. Metode yang dibandingkan adalah *Fixed Parameters* yang merupakan kontroler PI (*Propositional-Integral*) dengan nilai Kp dan Ti tetap dari pengujian *Bump Test* pada ketinggian 10 cm (Kp=19,17 dan Ti = 6,66).



Gambar 4.7 Respon sistem *Fixed Parameters* dengan referensi naik 20 cm



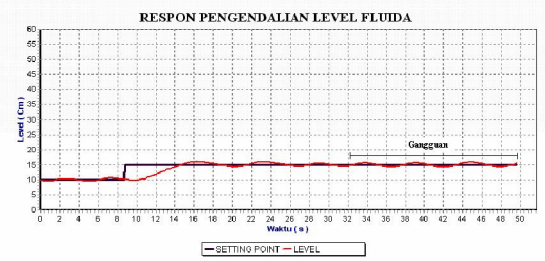
Gambar 4.8 Respon sistem *Gain Scheduling* dengan referensi naik 20 cm

Tabel 4.5 Perbandingan respon sistem *Fixed Parameters* dan *Gain Scheduling*.

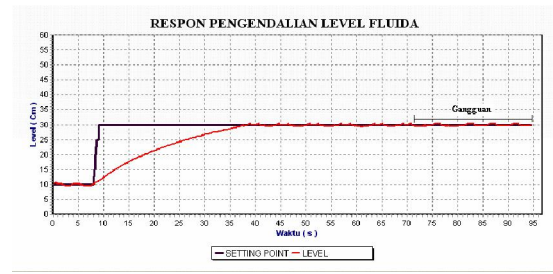
Ref. (cm)	<i>Fixed Parameters</i>			<i>Gain Scheduling</i>		
	t_r (detik)	t_s (detik)	Off. (%)	t_r (detik)	t_s (detik)	Off. (%)
20	9,5	13,1	3,5	9	14,5	3,5
30	30	32,3	2,3	26,9	30,8	2,6
40	68,5	76,8	1	66,8	68,9	0,75

4.7 Pengujian dengan Gangguan

Daya tahan sistem terhadap gangguan dan kecepatan respon sistem untuk kembali ke referensi sebelum gangguan, dapat diketahui dengan melakukan pengujian dengan memberikan gangguan berupa penambahan pembukaan *valve* pada *outlet* dari bukaan *valve outlet* normal pada sistem yang telah mencapai kestabilan pada suatu nilai referensi..



Gambar 4.9 Referensi 15 cm dengan gangguan bukaan *valve* keluaran sebesar 1/2 putaran



Gambar 4.10 Referensi 30 cm dengan gangguan bukaan *valve* keluaran sebesar 1/2 putaran

Tabel 4.6 Perbandingan respon sistem pada referensi tetap dengan gangguan *valve* keluaran.

Gangguan	Referensi 15 cm			Referensi 30 cm		
	Penurunan (cm)	pemulihian (detik)	Off. (%)	Penurunan (cm)	pemulihian (detik)	Off. (%)
1/2 bukaan	0,7	1,8	4,6	0,9	1,2	2
3/4 bukaan	0,9	1,5	6	0,9	2,7	1,3
1 bukaan	1,2	2,3	8	1,1	11,7	2

V. PENUTUP

5.1 KESIMPULAN

Berdasarkan pengujian dan analisis yang dilakukan pada sistem pengendalian ketinggian muka cairan, didapatkan kesimpulan sebagai berikut :

- Berdasarkan pengujian *Bump Test*, kendali *Gain Scheduling* membagi dua daerah proses untuk variasi penjadwalan sistem (*SV*), yaitu $SV < 17,5$ dengan nilai Kp = 19,17 dan Ti = 6,66. Dan $SV > 17,5$ dengan nilai Kp = 37,46 dan Ti = 6.
- Pada pengujian referensi naik, menunjukkan semakin tinggi referensi yang diberikan semakin besar nilai respon sistem waktu naik (t_r) dan waktu penetapan (t_s). Hal ini disebabkan bertambahnya luasan yang dimiliki *plant* limas terpancung pada kenaikan ketinggian *plant*.
- Pada pengujian referensi turun, menunjukkan penurunan ketinggian muka cairan mengakibatkan nilai respon sistem waktu turun (t_r) semakin kecil. Pada referensi 35 cm dengan ketinggian awal 40 cm, memiliki waktu turun (t_r) sebesar 13,8 detik. Pada referensi 10 cm dengan ketinggian awal 15 cm, memiliki waktu turun (t_r) sebesar 9,7 detik. Hal ini disebabkan luasan *plant* limas terpancung semakin berkurang besarnya.
- Respon sistem mengalami *offset* yang lebih besar pada daerah sekitar perubahan penjadwalan sistem (17,5 cm). Yang disebabkan adanya perubahan nilai parameter sistem dari sistem *Gain Scheduling*.

5. Pada perbandingan respon sistem antara metode *Fixed Parameters* dan *Gain Scheduling* menunjukkan respon sistem *Gain Scheduling* memiliki waktu naik (t_r) respon sistem lebih cepat daripada respon sistem dengan metode *Fixed Parameters*.
6. Pada pengujian dengan gangguan, menunjukkan respon sistem pada referensi 30 cm lebih baik daripada respon sistem pada referensi 15 cm. Hal ini disebabkan dinamika fluida yang terjadi pada ketinggian rendah lebih cepat daripada aksi kontrol aktuatur sistem (*valve*).



Wisnu Wibowo (L2F004527)
Lahir di Jakarta, 4 November 1986.
Mahasiswa Teknik Elektro Reguler
2004, Konsentrasi Kontrol dan
Automatik, Universitas Diponegoro.
Email : emailwisnuw@gmail.com
“ *It's Automatic* “

Menyetujui dan Mengesahkan

Pembimbing I

5.2 SARAN

Untuk dapat melakukan pengembangan sistem lebih lanjut, penulis memberikan beberapa saran sebagai berikut:

1. Dapat dilakukan penambahan sistem kontrol *valve* pada sisi *outlet* untuk memperoleh respon sistem yang lebih baik lagi.
2. Diperlukan perubahan bentuk wadah penampung cairan untuk mendapatkan respon sistem yang lebih non linear, seperti tabung posisi mendatar.
3. Perlu adanya penelitian lebih lanjut tentang pengaturan tinggi muka cairan dengan menggunakan sistem *valve* standar industri.

Iwan Setiawan, S.T., M.T.

NIP. 132 283 183

Tanggal.....

Pembimbing II

Sumardi, S.T., M.T.

NIP. 132 125 670

Tanggal.....

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Johnson, Curtis, *Process Control Instrumentation Technology*, John Wiley & Sons, New York, 1977.
- [2] King, R. E. And A. Stathaki., *Fuzzy Gain-Scheduling Control of Nonlinear Processes*, <http://www.lar.ee.upatras.gr>, Maret 2008.
- [3] Kusuma, Isma Candra Jati., *Perancangan Simulator Pengendalian Posisi Turret Pada Mobil Pemadam Kebakaran*, Skripsi S-1, Universitas Diponegoro, Semarang, 2007.
- [4] Ogata, K., *Teknik Kontrol Automatik Jilid 1*, Erlangga, Jakarta, 1991.
- [5] Setiawan, Iwan., *Kontrol PID untuk Proses Industri*, PT. Elex Media Komputindo, Jakarta, 2008.
- [6] Wasito, S., *Vademakum Elektronika*, Gramedia Pustaka Utama, Jakarta, 2001.
- [7] Widosari, Andhini., *Aplikasi Teknik Kendali Hibrid PI – Fuzzy Pada Sistem Kontrol Valve untuk Pengendalian Tinggi Muka Cairan*, Skripsi S-1, Universitas Diponegoro, Semarang, 2006.
- [8] Wiguna, Teguh., *Pengukur Volume Zat Cair Menggunakan Gelombang Ultrasonik Berbasis Mikrokontroler AT89S5*, Skripsi S-1, Universitas Diponegoro, Semarang, 2007.