

Makalah Seminar Tugas Akhir

Penerapan Metode *Auto Tuning PI Relay Feedback Ziegler-Nichols* pada Pengendalian Level Ketinggian Cairan Menggunakan Mikrokontroler ATmega 8535

Bakhtiar Indra K^[1], Wahyudi, S.T, M.T^[2], Iwan Setiawan, S.T, M.T^[2]

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

Abstrak

Metode kontrol Proporsional-Integral (PI) merupakan sebuah metode kontrol yang banyak diterapkan di bidang industri sampai saat ini. Kontroler ini memiliki parameter-parameter pengontrol, yaitu konstanta proporsional (K_p) dan konstanta waktu integral (T_i). Pada metode PI konvensional, kedua parameter tersebut diturunkan dari perhitungan matematis. Kesulitan penalaan parameter-parameter tersebut akan ditemui bila plant yang dikendalikan adalah sistem dengan orde tinggi. Maka dari itu, diperlukan suatu metode penala PI yang lebih baik dan dapat diterapkan dalam sistem orde tinggi.

Metode penalaan PI berumpan balik dengan pengendali relay merupakan pengembangan metode Ziegler-Nichols yang dapat dilakukan secara otomatis tanpa melakukan pemodelan sistem. Pada metode ini berlangsung dua tahap pada aplikasinya, yaitu tahap penalaan untuk menentukan parameter-parameter kendali yang diperlukan berdasarkan osilasi sistem yang terjadi saat dikendalikan dengan pengendali relay dan tahap pengendalian yang dilakukan dengan menerapkan parameter-parameter yang telah didapatkan.

Plant pengendalian level ketinggian cairan menggunakan mikrokontroler ATmega 8535 sebagai kontroler dan pompa sebagai aktuator yang dikendalikan debit alirannya, merupakan plant uji untuk modul pengendali PI dengan metode relay feedback Ziegler-Nichols sebagai penalaannya. Pada pengujian didapatkan hasil penalaan parameter PI yang mampu menghasilkan tanggapan keluaran dengan rise time yang cepat, selisih tunak yang kecil, overshoot yang sangat kecil, dan ketika sistem diberi gangguan, tanggapan keluaran akan tetap terjaga dalam kestabilan.

Kata kunci : PI (Proporsional-Integral), metode relay feedback Ziegler-Nichols, Mikrokontroler ATmega 8535.

I. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Perkembangan teknologi yang semakin pesat telah membawa banyak pengaruh dalam berbagai aspek kehidupan terutama dibidang industri. Di dalam industri, sangat dibutuhkan sistem kendali yang baik agar dapat menunjang dan meningkatkan efisiensi dalam proses produksi. Sebagai contoh, otomatisasi baik dalam segi proses maupun peralatan yang digunakan dibidang industri seperti dalam proses pengisian dan pembuangan cairan dalam tangki penampungan.

Masalah yang muncul ketika level ketinggian cairan dalam tangki penampung tidak diketahui, sehingga dimungkinkan terjadi keadaan tangki yang meluap atau kosong dikarenakan kurangnya pengawasan terhadap tangki penampung. Pada industri kimia terdapat proses pemisahan cairan (*destilasi*) yang membutuhkan pengaturan level ketinggian cairan, apabila ada perubahan (*deviasi*) laju aliran masukan yang disebabkan perubahan tekanan aliran inlet atau juga disebabkan timbulnya gaya gesek pada pipa saluran, maka akan mengakibatkan perubahan

debit masukan yang membuat level cairan berubah-ubah.

Teknik kendali konvensional seperti PI merupakan sebuah teknik kendali yang banyak diterapkan di bidang industri pada saat ini, namun kendala dari sistem kendali konvensional ini membutuhkan pengetahuan tentang parameter-parameter sistem terlebih dahulu. Pada sistem yang kompleks terdapat kendala dalam menentukan parameter-parameter yang sesuai agar mendapatkan respon keluaran yang stabil. Salah satu solusi terhadap kesulitan tersebut adalah dengan melakukan penalaan PI secara otomatis pada sebuah *plant* yang akan dikendalikan.

Metode penalaan PI berumpan balik dengan pengendali relay merupakan salah satu pengembangan metode Ziegler-Nichols. Pada metode ini, parameter-parameter PI akan ditentukan berdasarkan osilasi sistem yang terjadi saat dikendalikan dengan pengendali relay dan tetapan-tetapan parameter-parameter PI yang telah ditetapkan Ziegler-Nichols secara empiris.

Pada tugas akhir ini dirancang suatu sistem pengendalian level ketinggian cairan dengan memanfaatkan mikrokontroler ATmega 8535

¹ Mahasiswa Jurusan Teknik Elektro UNDIP

² Staf Pengajar Jurusan Teknik Elektro UNDIP

sebagai kontroler dan *auto tuning relay feedback* Ziegler-Nichols sebagai metode penalaan kendali PI. Pompa digunakan sebagai aktuator yang dikendalikan debit alirannya agar level ketinggian cairan dalam tangki dapat sesuai dengan *setting point*. Penalaan pengendali PI dengan metode *auto tuning relay feedback* Ziegler-Nichols dapat digunakan untuk mengatur level ketinggian cairan dalam tangki dengan kesalahan yang minimal.

1.2 Tujuan

Tujuan dari penelitian tugas akhir ini adalah membuat alat berupa perangkat keras dan perangkat lunak berbasis mikrokontroler ATmega 8535 guna menerapkan metode *auto tuning relay feedback* Ziegler-Nichols pada pengendalian level ketinggian cairan dengan pengendali PI.

1.3 Pembatasan Masalah

Pembatasan masalah pada tugas akhir ini sebagai berikut :

1. *Plant* yang digunakan adalah *plant* pengendalian level ketinggian cairan dengan *range* 5 cm – 40 cm menggunakan pompa (*pump*) sebagai aktuatornya.
2. Sensor PING™ *ultrasonic range finder* digunakan untuk mengetahui level ketinggian cairan.
3. Pengujian dilakukan pada perubahan referensi ketinggian dan pemberian gangguan.
4. Metode penalaan PI yang digunakan adalah metode *auto tuning relay feedback* Ziegler-Nichols.
5. Pengendali PI diterapkan menggunakan bahasa C pada mikrokontroler ATmega 8535.
6. Pembuatan program bantu menggunakan bahasa visual Delphi 6.0 dan antarmuka melalui komunikasi serial.
7. Tidak membahas *hand shaking* komunikasi serial.

II. DASAR TEORI

2.1 Pengendali PI [2]

Gabungan aksi kontrol proporsional dan aksi kontrol integral membentuk aksi kontrol proporsional plus integral (*controller* PI). Gabungan aksi ini mempunyai keunggulan dibandingkan dengan masing-masing penyusunnya. Keunggulan utamanya adalah diperolehnya keuntungan dari masing-masing aksi kontrol dan kekurangan aksi kontrol yang satu dapat diatasi. Dengan kata lain elemen-elemen

controller P dan I secara keseluruhan bertujuan untuk mempercepat reaksi sebuah sistem dan menghilangkan offset.

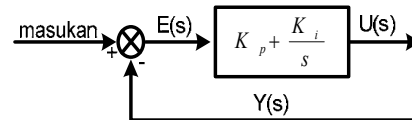
Dalam waktu kontinyu, sinyal keluaran pengendali PI dapat dirumuskan sebagai berikut.

$$Co(t) = K_p \left(e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt \right) \quad (1)$$

dengan

$$\begin{aligned} Co(t) &= \text{sinyal keluaran pengendali PI} \\ K_p &= \text{konstanta proporsional} \\ T_i &= \text{waktu integral} \\ K_i &= \text{konstanta integral} \\ e(t) &= \text{sinyal kesalahan} \\ (e(t)) &= \text{referensi - keluaran plant} \end{aligned}$$

Diagram blok pengendali PI dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1 Diagram blok pengendali PI.

Pengolahan parameter-parameter PI menjadi konstanta-konstanta pengendalian secara diskrit sesuai dengan penjelasan perhitungan berikut. Berdasarkan persamaan 1 dan dengan menggunakan Transformasi *Laplace*, didapatkan persamaan PI dalam kawasan *s* sebagai berikut.

$$\begin{aligned} co(s) &= K_p E(s) + \frac{K_p}{T_i s} E(s) \\ co(s) &= \frac{K_p s E(s) + \frac{K_p}{T_i} E(s)}{s} \\ sco(s) &= K_p s E(s) + \frac{K_p}{T_i} E(s) \end{aligned} \quad (2)$$

Persamaan 1 diubah kembali ke kawasan waktu, sehingga menjadi :

$$\frac{dco(t)}{dt} = K_p \frac{de(t)}{dt} + \frac{K_p}{T_i} e(t) \quad (3)$$

Untuk mengubah persamaan 3 ke dalam bentuk diskrit, digunakan persamaan *backward difference*, di mana :

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

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

Sehingga persamaan (3) menjadi:

$$\begin{aligned} \frac{co(k) - co(k-1)}{T} &= K_p \left[\frac{e(k) - e(k-1)}{T} \right] + \frac{K_p}{T_i} e(k) \\ co(k) - co(k-1) &= K_p [e(k) - e(k-1)] + \frac{K_p T}{T_i} e(k) \\ co(k) &= co(k-1) + \left[K_p + \frac{K_p T}{T_i} \right] e(k) - [K_p] e(k-1) \end{aligned} \quad (4)$$

persamaan 4 menunjukkan persamaan pengendali PI dalam bentuk diskrit. Dari persamaan 4 dapat diketahui bahwa pengendali PI menggunakan konstanta-konstanta pengendalian sebagai berikut.

$$C\alpha(k) = c\alpha(k-1) + K_2 e(k) - K_3 e(k-1) \quad (5)$$

dengan

$$K_2 = (K_p + K_i) \Rightarrow K_i = \frac{K_p T}{T_i} \quad (6)$$

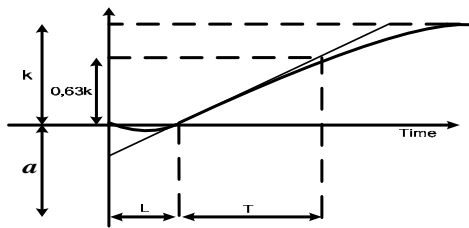
$$K_3 = K_p \quad (7)$$

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:

2.2.1 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.

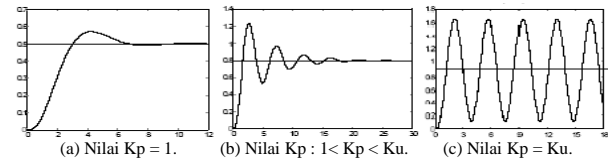
Pengendali	K_p	T_i	T_d
P	$1/a$	-	-
PI	$0,9/a$	$3L$	-
PID	$1,2/a$	$2L$	$L/2$

2.2.2 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_u , 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 $K_p = K_u$.



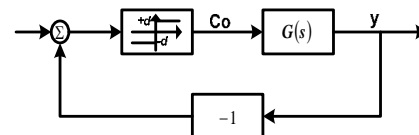
Gambar 3 Karakteristik keluaran suatu sistem dengan penambahan K_p .

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.

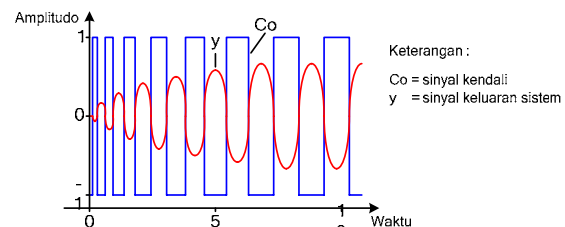
Pengendali	K_p	T_i	T_d
P	$K_u/2$	-	-
PI	$2K_u/5$	$4T_u/5$	-
PID	$3K_u/5$	$T_u/2$	$3T_u/25$

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, C_o , 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

$$a = \frac{4d}{\pi} |G(i\omega_u)| \quad (8)$$

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.

$$\arg G(i\omega_u) = -\pi \quad (9)$$

dan

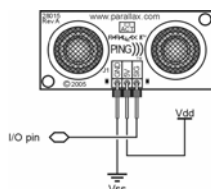
$$|G(i\omega_u)| = \frac{a\pi}{4d} = \frac{1}{K_u} \quad (10)$$

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.

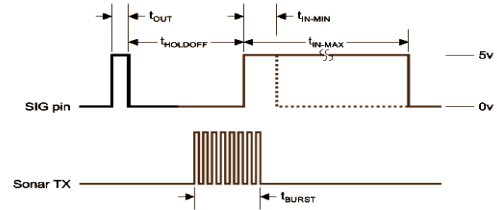
2.3 Sensor Jarak Ultrasonik PING)))™

Sensor yang digunakan adalah “PING)))™ *Ultrasonic Range Finder*”, buatan Parallax. Sensor ini digunakan untuk mengukur level ketinggian cairan. Sensor jarak ditunjukkan pada Gambar 6.



Gambar 6 Sensor PING Ultrasonik *Range Finder*.

Berdasarkan Gambar 6 dapat diketahui bahwa sensor jarak memiliki 3 buah terminal, yaitu terminal tegangan catu 5 volt, terminal pentanahan, dan terminal sinyal yang dapat berfungsi sebagai masukan dan keluaran. Sensor jarak ini hanya memerlukan 1 buah pin pada mikrokontroler untuk dapat mengatur proses pengukuran jarak. Diagram pewaktuan sensor ditunjukkan pada Gambar 7.

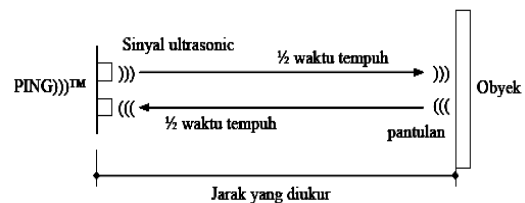


Gambar 7 Diagram pewaktuan sensor PING)))™.

Berdasarkan Gambar 7 untuk memulai pengukuran sensor perlu dipicu dengan sinyal *high* selama t_{OUT} , kemudian menunggu selama $t_{HOLDOFF}$ baru sensor memancarkan sinyal ultrasonik dan siap untuk menerima kembali sinyal pantulan. Sensor memiliki karakteristik sebagai berikut:

1. Waktu picu keluaran (t_{OUT}) : 2 μ detik (minimum), 5 μ detik.
2. Waktu tunggu ($t_{HOLDOFF}$) : 750 μ detik.
3. Waktu transmit sinyal (t_{BURST}) : 200 μ detik.
4. Waktu masukan minimal ($t_{IN MIN}$) : 115 μ detik.
5. Waktu masukan maksimal ($t_{IN MAX}$) : 18,5 milidetik.

Agar sensor ini dapat digunakan untuk mengukur jarak dibutuhkan sebuah mikrokontroler untuk mengukur waktu tempuh sinyal ultrasonik dari sensor, memantul pada benda yang akan diukur, dan diterima kembali oleh sensor. Ilustrasi cara kerja sensor ditunjukkan pada Gambar 8.^[17]



Gambar 8 Ilustrasi cara kerja Ping)))™.

Berdasarkan Gambar 8 besarnya jarak yang diukur dapat dihitung dengan menggunakan persamaan :

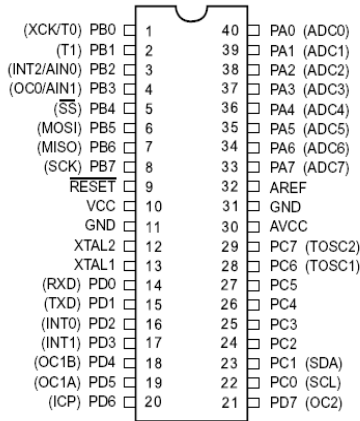
$$s = \frac{v \cdot t}{2} \quad (11)$$

Dengan :

- s = jarak yang diukur (meter)
- v = kecepatan suara (344 m/detik)
- t = waktu tempuh (detik)

2.4 Mikrokontroler ATmega 8535 [13]

Mikrokontroler AVR ATmega 8535 telah didukung penuh dengan program dan sarana pengembangan seperti: kompilator-kompilator C, simulator program, emulator dalam rangkaian, dan *kit* evaluasi. Konfigurasi pin-pin ATmega 8535 ditunjukkan pada Gambar 9.

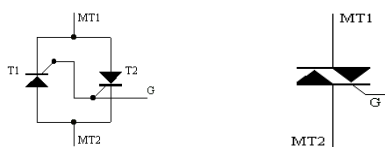


Gambar 9 Konfigurasi pin-pin ATmega 8535.

Mikrokontroler AVR ATmega 8535 mempunyai kapasitas memori program sebesar 8 *Kbytes*. Semua format instruksi berupa kata (*word*) 16-32 bit maka format memori program ini adalah 4Kx16 bit. Memori *Flash* ini dirancang untuk dapat di hapus dan tulis sebanyak seribu kali. ATmega 8535 memiliki 12 bit *Program Counter* (PC) sehingga mampu mengakses hingga 4096 lokasi memori.

2.5 Triac [9]

Pada pengendalian tegangan AC, digunakan *bidirectional triode thyristor* atau yang biasa dikenal sebagai *triac*. *Triac* dianggap sebagai dua buah *thyristor* tersambung secara antiparalel dengan koneksi gerbang seperti ditunjukkan pada Gambar 10.

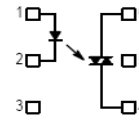


Gambar 10 Komponen *triac*.

2.6 Optokopler

Optokopler adalah suatu alat yang mengkombinasikan suatu diode pemancar cahaya inframerah (ILED) pada sisi masukan dan komponen yang peka cahaya pada sisi keluaran. MOC 3021 merupakan jenis optokopler dengan sisi keluaran berupa *triac* yang diaktifkan oleh cahaya pada sisi masukan. MOC3021 dapat

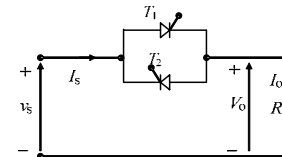
diaktifkan dengan arus diatas 15 mA pada sisi masukan. Susunan rangkaian MOC 3021 seperti Gambar 11



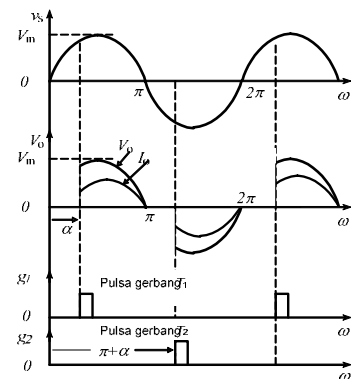
Gambar 11 Skematik MOC 3021.

2.7 Pengontrol Tegangan AC [12]

Prinsip dari pengontrol tegangan AC untuk gelombang penuh satu fasa dapat dijelaskan berdasarkan rangkaian pada Gambar 12. Gambar 12 merupakan pengontrol dua arah satu. Energi mengalir ke beban dikontrol dengan menunda sudut pemucuan (*firing angle*) *thyristor* T_1 dan sudut pemucuan *thyristor* T_2 . Selama tegangan masukan setengah siklus positif, daya yang mengalir dikontrol oleh beberapa sudut tunda dari *thyristor* T_1 , dan *thyristor* T_2 mengontrol daya selama tegangan masukan setengah siklus negatif. Pulsa-pulsa yang dihasilkan pada T_1 dan T_2 terpisah 180° . Bentuk gelombang untuk tegangan masukan, tegangan keluaran, dan sinyal gerbang untuk T_1 dan T_2 ditunjukkan pada Gambar 13.



Gambar 12 Rangkaian pengontrol gelombang penuh satu fasa.



Gambar 13 Bentuk gelombang pengontrol gelombang penuh satu fasa.

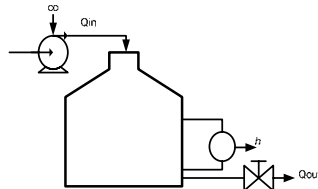
2.8 Model Kontrol Proses Level Fluida [3]

Model kontrol diperoleh dari suatu proses level fluida dapat dilakukan dengan menerapkan hukum kesetimbangan massa yaitu: "Laju akumulasi massa = Laju massa yang masuk - Laju massa yang keluar". Gambar 14 merupakan model kontrol proses fluida.

$$\frac{d}{dt}(\rho Ah(t)) = \rho q_{in} - \rho q_{out} \quad (12)$$

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 tangki (m^2).
- H = Perubahan ketinggian fluida dalam tangki (m).



Gambar 14 Model kontrol proses level fluida.

Penurunan rumus :

$$q_{out} = K_{out} \cdot h(t) \quad (13)$$

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 (co) penggerak .

$$q_{in} = K_{in} \cdot co \quad (14)$$

K_{in} = konstanta proporsionalitas yang harganya tergantung pada debit keluaran pompa beban.

Substitusikan persamaan 13 dan persamaan 14 pada persamaan 12 dengan melakukan sedikit penyederhanaan, maka diperoleh persamaan diferensial linear.

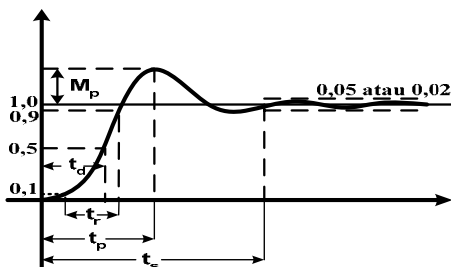
$$\frac{A dh(t)}{K_{out} dt} = -h(t) + \frac{K_{in}}{K_{out}} co(t) \quad (15)$$

Atau dapat ditulis dalam bentuk umum .

$$T \frac{dh(t)}{dt} = -h(t) + K \cdot co(t) \quad \longrightarrow \quad \frac{h(s)}{co(s)} = \frac{K}{Ts + 1}$$

2.9 Analisis Tanggapan Peralihan ^[10]

Karakteristik kinerja sistem kendali dapat dinyatakan dalam bentuk tanggapan peralihan terhadap masukan tangga (*step*), dapat dilihat pada Gambar 15. Beberapa parameter yang dapat ditentukan antara lain :

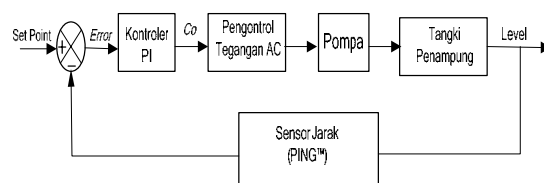


Gambar 15 Kurva tanggapan sistem dengan masukan tangga.

1. Waktu naik (*rise time*), t_r , adalah waktu yang diperlukan tanggapan untuk naik dari persentase 10 % hingga 90 % dari nilai akhir atau dari 0% hingga 100 % dari nilai akhir.
 2. Waktu tunda (*delay time*), t_d adalah waktu yang diperlukan tanggapan untuk mencapai setengah nilai akhir yang pertama kali.
 3. Waktu puncak (*peak time*), t_p adalah waktu yang diperlukan tanggapan untuk mencapai puncak lewat yang pertama kali.
 4. Lonjakan maksimum (*maximum overshoot*), M_s , adalah persentase nilai puncak maksimum kurva tanggapan terhadap nilai pada keadaan tunaknya. Lonjakan maksimum dapat dinyatakan sesuai persamaan 16.
- $$M_p = \frac{y(t_p) - y(\infty)}{y(\infty)} \times 100\% \quad (16)$$
5. Waktu penetapan (*settling time*), T_s , adalah waktu yang diperlukan kurva tanggapan untuk menetap dalam daerah di sekitar nilai akhir yang ukurannya ditentukan dengan persentase mutlak dari nilai akhir (biasanya 5 % atau 2 %).

III. PERANCANGAN

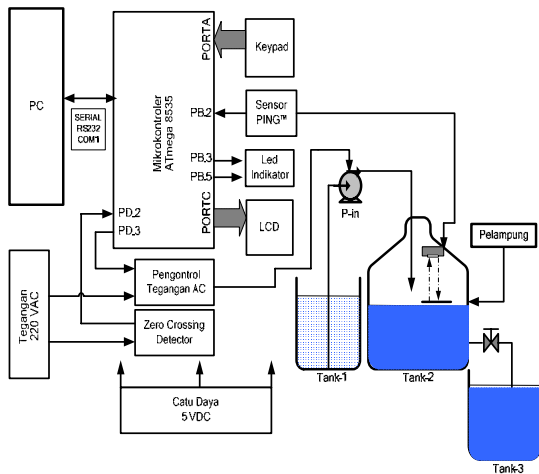
Kendali PI yang digunakan untuk mengendalikan aktuator (pompa) ditulis dengan menggunakan bahasa C dan dijalankan pada sebuah mikrokontroler ATmega 8535. Program ini dihubungkan pada komputer dengan komunikasi serial. Blok diagram dari pengendalian level ketinggian cairan dapat dilihat pada Gambar 16.



Gambar 16 Diagram blok dasar sistem pengendalian level ketinggian cairan.

3.1 Perancangan Perangkat Keras

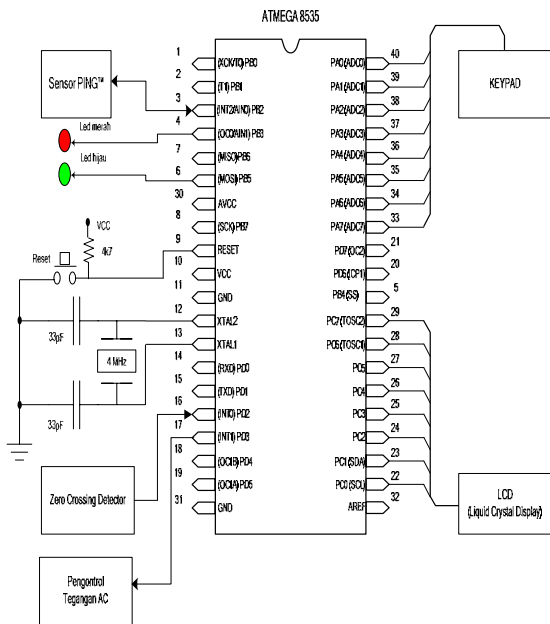
Blok rancangan perangkat keras sistem pengendali level ketinggian cairan pada tugas akhir ini dapat dilihat pada Gambar 17. Perancangan perangkat keras meliputi mikrokontroler pengendali, perancangan tangki penampung, pengontrol tegangan AC sebagai pengaturan debit pompa, pompa sebagai penggerak, *keypad*, LCD, dan sensor level.



Gambar 17 Diagram blok perancangan perangkat keras.

3.1.1 Rangkaian sistem minimum Mikrokontroler ATmega 8535

Sistem mikrokontroler digunakan sebagai unit kendali utama. Secara umum, alokasi penggunaan *port* pada rangkaian ATmega 8535 dapat dilihat pada Gambar 18.



Gambar 18 Alokasi port Mikrokontroler ATmega 8535.

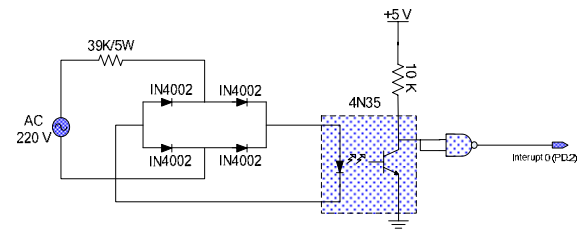
Port A.0 - Port A.7 mikrokontroler digunakan sebagai masukan *keypad* 4x4. *Port B.2* dihubungkan dengan data serial sensor PING™, data ini yang nantinya digunakan sebagai pentransferan data level dari sensor ke mikrokontroler. *Port B.3* digunakan untuk menyalakan lampu indikator berwarna merah, menunjukkan bahwa pengendalian yang sedang berjalan adalah manual. *Port B.5* digunakan untuk menyalakan lampu indikator berwarna hijau,

menunjukkan bahwa pengendalian yang sedang berjalan adalah otomatis.

Port C dihubungkan untuk tampilan LCD, mode antarmuka LCD yang digunakan adalah *mode* 4 bit. *Port D.2* adalah input dari rangkaian *Zero Crossing Detector* yang akan mengaktifkan interupsi *external 0*. *Port D.3* pada mikrokontroler berfungsi sebagai PWM untuk mengatur besarnya pulsa yang masuk ke *driver* MOC3021, yang kemudian digunakan sebagai sinyal pemicuan untuk mengontrol tegangan AC sebagai tegangan input pompa.

3.1.2 Zero Crossing Detector

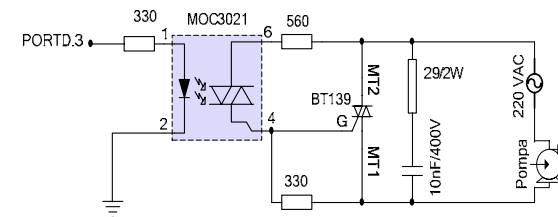
Zero crossing detector adalah rangkaian yang digunakan untuk mendeteksi gelombang sinus AC 220 volt saat melewati titik tegangan nol. Seberangan titik nol yang dideteksi adalah peralihan dari positif menuju negatif dan peralihan dari negatif menuju positif. Seberangan-seberangan titik nol ini merupakan acuan yang digunakan sebagai awal pemberian nilai waktu tunda untuk pemicuan *triac*. Rangkaian *zero crossing detector* ditunjukkan pada Gambar 19.



Gambar 19 Rangkaian *zero crossing detector*.

3.1.3 Pengontrol Tegangan AC

Rangkaian pengontrol tegangan AC yang dirancang adalah seperti ditunjukkan pada Gambar 20.

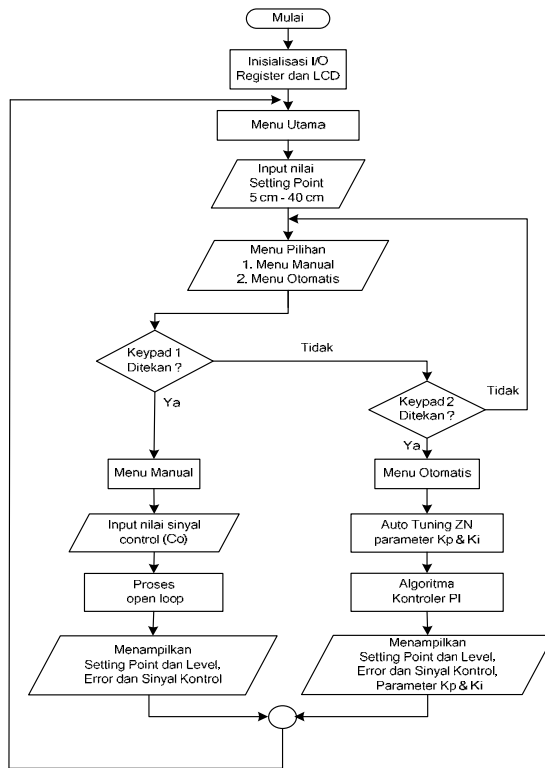


Gambar 20 Rangkaian pengontrol Tegangan AC.

Rangkaian tersebut merupakan rangkaian untuk pengontrol tegangan AC gelombang penuh satu fasa. Sebagai komponen utama pada rangkaian ini adalah *triac* BT 139. *Triac* berhubungan langsung dengan beban yaitu pompa yang berhubungan langsung dengan tegangan jala-jala listrik 220 volt. *Triac* BT 139 mempunyai nilai arus rms maksimal sebesar 16 A dan tegangan maksimal sebesar 800 VAC.

3.2 Perancangan Perangkat Lunak

Program utama mengatur keseluruhan jalannya program yang meliputi sub rutin-sub rutin. Sub rutin akan melaksanakan fungsi-fungsi tertentu yang dibutuhkan untuk sistem pengendalian. Adapun diagram alir dari program utama ditunjukkan pada Gambar 21.



Gambar 21 Diagram alir program utama.

Program utama dimulai dengan inisialisasi awal untuk masing-masing *Port* dan *register*. Setelah inisialisasi, program akan ke menu utama yang berfungsi sebagai *default*. Pada menu utama akan menampilkan *setting point* dan level *plant (actual value)* pada LCD. Program akan ke menu berikutnya setelah terdapat interupsi untuk `scan_keypad()`.

Pada menu pilihan terdapat pilihan mode manual dan mode otomatis untuk mengendalikan level menggunakan pengendali PI. Pada mode manual memberikan masukan berupa nilai sinyal kontrol C_o (%), sedangkan pada mode otomatis akan melakukan *auto tuning* untuk menghasilkan nilai-nilai parameter K_p dan K_i . Apabila tidak memilih mode operasi pada menu pilihan, maka nilai parameter-parameter PI sesuai dengan *default*. Pada mode otomatis, pengendalian level dilakukan, ketika hasil perhitungan nilai sinyal kontrol C_o (%) atau parameter PI sudah didapatkan. Pada pengendalian level secara manual akan menampilkan *setting point*, level

plant (actual value), *error*, dan sinyal kontrol. Pada pengendalian level secara otomatis akan menampilkan *setting point*, level *plant (actual value)*, *error*, parameter K_p dan K_i , serta sinyal kontrol.

3.2.1 Sub Rutin Interrupt External Timer 0

Subrutin *interrupt external timer 0* digunakan sebagai awal pemberian pemicuan pada *triac*. Masukan untuk *interrupt external timer 0* berasal dari rangkaian *zero crossing detector*. *interrupt external timer 0* dapat dikatakan juga terjadi secara periodik yaitu setiap tegangan AC melewati titik nol. Interupsi eksternal 0 yang terjadi karena tegangan AC melewati titik nol, inilah yang dijadikan sebagai waktu awal bagi pemberian nilai tundaan untuk pemicuan *triac*.

3.2.2 Sub Rutin Interrupt Overflow Timer 0

Subrutin *Interrupt Overflow Timer 0* aktif ketika terjadi *overflow* dan digunakan untuk menghidupkan pompa.

3.2.3 Sub Rutin Interrupt Overflow Timer 1

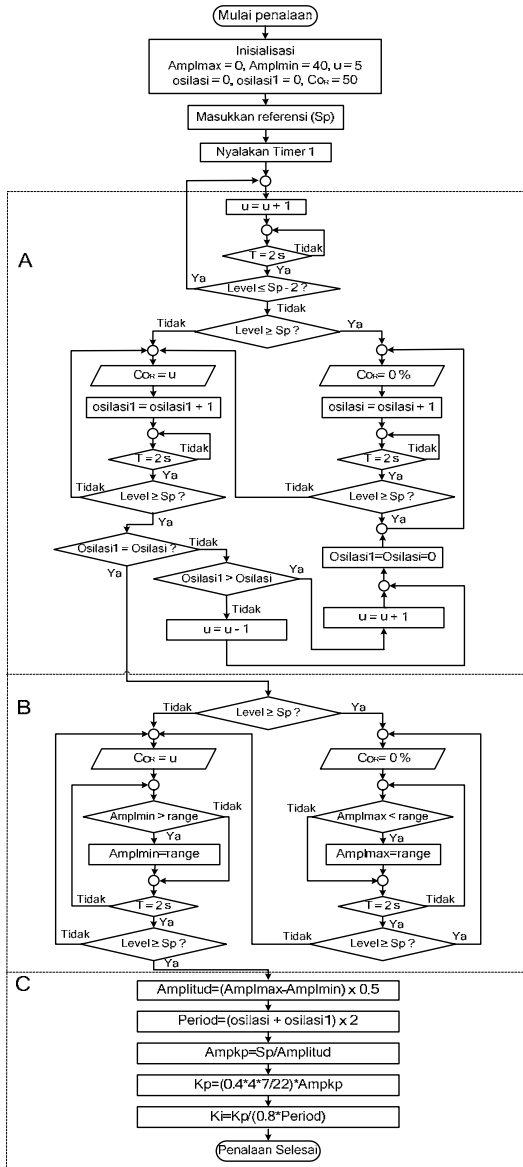
Sub rutin interupsi *timer 1* digunakan untuk waktu cuplik pengambilan data level ketinggian cairan selain itu juga sebagai waktu cuplik *auto tuning* dan kendali PI.

3.2.4 Sub Rutin Auto Tuning Ziegler-Nichols

Proses penalaan PI bertujuan untuk mendapatkan parameter-parameter PI sesuai dengan metode *relay feedback* Ziegler-Nichols. Berdasarkan persamaan 1 untuk kendali PI dan tetapan Ziegler-Nichols pada Tabel 2, maka proses penalaan yang dilakukan pada mikrokontroler sesuai dengan diagram alir pada Gambar 22. Data yang diambil dari proses penalaan adalah data amplitudo dan perioda tanggapan level dengan kendali *relay*.

Diagram alir pada Gambar 22 dapat dipisahkan menjadi 3 bagian utama. Bagian A menjelaskan proses pemberian pengendalian *relay* terhadap *plant*. Pengendalian *relay* ini dilakukan dengan memasukkan nilai referensi, jika nilai keluaran *plant* lebih kecil daripada nilai referensi, maka mikrokontroler memberikan sinyal kendali sebesar $C_o = u$, dengan nilai awal $u = 5$ yang dianggap sebagai sinyal kendali *relay* terkecil. Saat sinyal keluaran *plant* lebih besar daripada nilai referensi, maka sinyal kendali yang diberikan sebesar $C_o = 0$. Pengendalian *relay* pada bagian A ini terus dilakukan sampai didapatkan sinyal osilasi yang stabil. Penentuan stabilnya sinyal osilasi adalah dengan membandingkan perioda osilasi sinyal sekarang dan sebelumnya, atau

banyaknya siklus pemberian sinyal kendali saat ini dengan siklus sebelumnya, jika perioda osilasi sinyal sekarang lebih besar dari sebelumnya maka nilai $u = u + 1$, jika perioda osilasi sinyal sekarang lebih kecil dari sebelumnya maka nilai $u = u - 1$. Hasil yang didapatkan dari proses ini adalah nilai perioda osilasi tanggapan level. Penetapan nilai u tersebut mengakibatkan nilai amplitudo sinyal kendali, d , didapatkan sebesar referensi (Sp).



Gambar 22 Diagram alir penalaan parameter-parameter kendali PI.

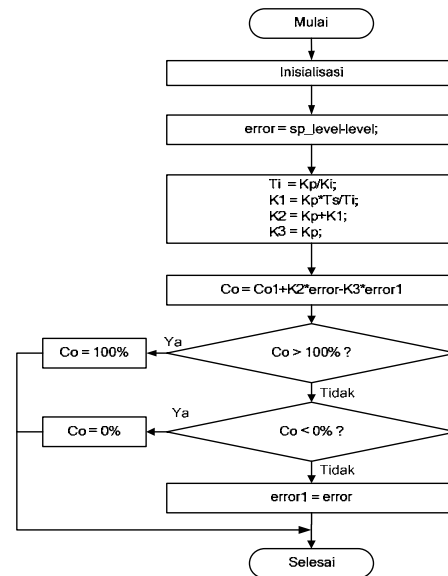
Bagian B pada Gambar 22 menjelaskan pengambilan data amplitudo. Nilai yang dibaca dari $PING^{TM}$ disimpan untuk dibandingkan dengan nilai pembacaan $PING^{TM}$ berikutnya. Saat sinyal keluaran *plant* lebih besar dari referensi, nilai yang disimpan adalah nilai tertinggi dari sinyal tersebut. Saat sinyal keluaran *plant* lebih kecil dari referensi, nilai yang disimpan adalah

nilai terendah dari sinyal keluaran *plant* selama satu siklus.

Bagian C pada Gambar 22 menjelaskan perhitungan yang dilakukan di akhir penalaan. Perhitungan ini tidak hanya dilakukan untuk mencari parameter-parameter pengendalian, tetapi juga mencari langsung konstanta-konstanta pengali *error* yang dibutuhkan pada saat pengendalian dilakukan.

3.2.5 Sub Rutin Algoritma Pengendali PI

Pada tugas akhir ini digunakan kendali PI untuk mendapatkan level ketinggian cairan yang diinginkan. Nilai konstanta K_p dan K_i diperoleh dari *tuning* parameter PI secara *auto* dengan metode *relay feedback* Ziegler-Nichols.



Gambar 23 Diagram alir perhitungan pengendali PI.

Pada Gambar 23 adalah diagram alir proses pengontrolan dengan menggunakan algoritma kontrol PI digital. Perhitungan dengan algoritma PI dimulai dengan menghitung *error* antara *setpoint* level dengan level sebenarnya. *Error* digunakan sebagai masukan pada kendali PI. Sinyal kontrol yang dikirimkan ke pengatur tegangan AC berasal dari keluaran kendali PI. Perhitungan PI secara diskrit sesuai dengan persamaan 5.

Pada algoritma kontrol PI untuk keluaran sinyal kontrol (Co) apabila nilai keluaran sinyal melebihi dari nilai 100 maka sinyal kontrol dianggap sama dengan 100 dan jika nilai keluaran sinyal kurang dari nilai 0 maka sinyal kontrol dianggap sama dengan 0. Hal ini dilakukan untuk membatasi dari nilai sinyal keluaran dari nilai minimal dan maksimal. Karena nilai sinyal kontrol yang digunakan untuk mengatur tegangan AC adalah antara 0% – 100%.

IV. PENGUJIAN DAN ANALISIS

Pengujian pengendalian level ketinggian cairan dengan kendali PI dilakukan pada *plant* model tangki berbentuk tabung dengan ukuran jari-jari = 14 cm dan tinggi = 50 cm.

4.1 Pengujian Perangkat Keras

4.1.1 Pengujian Sensor PING™

Pengujian terhadap sensor PING™ sebagai sensor level dilakukan dengan meletakkan sensor tegak lurus dengan pelampung dari dasar tangki berjarak 45,5 cm. Pembacaan sensor dibatasi pada jarak 5 cm – 40 cm, besarnya level pada *plant* model yang diperoleh dari hasil pembacaan PING™ berupa jarak sensor dari dasar tangki, dikurangi perubahan jarak pelampung dari sensor. Data hasil pengukuran yang dilakukan dapat dilihat pada Tabel 3.

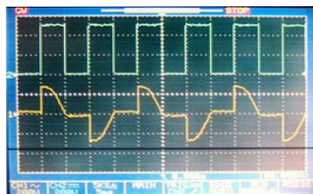
Tabel 3 Hasil perbandingan level terukur dengan pembacaan sensor PING™.

No	Level terukur (cm)	Sensor PING
1	5	5,1
2	10	10,1
3	15	15,1
4	20	20
5	25	24,9
6	30	29,8
7	35	34,8
8	40	39,9

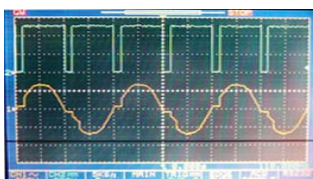
Dari Tabel 3 terlihat bahwa hasil pengujian terdapat sedikit selisih *error* sebesar 0,1 cm – 0,2 cm, hal tersebut dianggap sebagai toleransi pengukuran.

4.1.2 Pengujian Rangkaian Pengontrol Tegangan AC

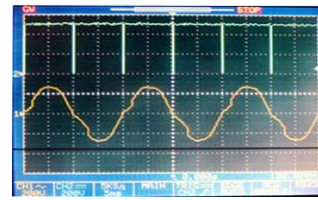
Pengamatan dilakukan dengan osiloskop terhadap gelombang picu dari mikrokontroler dan keluaran pengontrol tegangan AC yang diberikan ke beban berdasarkan pengaturan sinyal kontrol. Hasil pengujiannya adalah :



Gambar 24 Sinyal picu dan tegangan beban untuk $C_o = 0\%$.



Gambar 25 Sinyal picu dan tegangan beban untuk $C_o = 80\%$.



Gambar 26 Sinyal picu dan tegangan beban untuk $C_o = 100\%$.

Dari ketiga bentuk gelombang tegangan pada beban yang diuji, dapat diketahui bahwa semakin besar sinyal kontrol yang diberikan ke pemicu (TCNT0), maka bagian dari tegangan AC yang diberikan ke beban untuk tiap fasanya (fasa positif dan fasa negatif) akan semakin besar, yang berarti bahwa tegangan listrik yang diberikan ke beban akan semakin besar.

Pengujian juga dilakukan dengan cara mengukur tegangan keluaran dari rangkaian pengontrol tegangan AC dengan variasi berdasarkan sinyal kontrol yang diberikan ke pemacu. Data hasil pengukuran dapat dilihat pada Tabel 4.

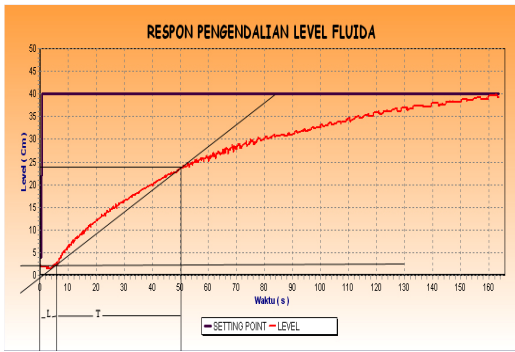
Tabel 4 Data pengujian pengontrol tegangan AC.

No	Nilai kontrol (%)	Nilai TCNT0	Tegangan ke beban (Volt)
1	0	148 (94h)	140
2	10	159 (9Fh)	155
3	20	169 (A9h)	180
4	30	180 (B4h)	195
5	40	191 (BFh)	200
6	50	201 (C9h)	204
7	60	212 (D4h)	205
8	70	223 (DFh)	206
9	80	234 (Eah)	210
10	90	244 (F4h)	215
11	100	255 (FFh)	225

4.2 Pengujian Perangkat Lunak

4.2.1 Pengujian Kalang Terbuka

Tanggapan keluaran pada pengujian kalang terbuka akan memberi tahu kelayakan *auto tuning relay feedback* Ziegler-Nichols ini dalam mencari parameter proporsional dan integral ($0,1 < L/T < 1$). Pada pengujian kalang terbuka, mikrokontroler memberi masukan berupa sinyal kendali C_o ke pengontrol tegangan AC sebesar 100 %. Tanggapan keluaran level ketinggian cairan pada *plant* ditunjukkan pada Gambar 27.

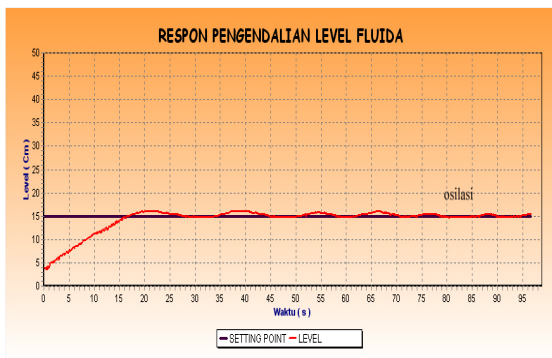


Gambar 27 Tanggapan keluaran sistem pengendalian level untuk kalang terbuka.

Tanggapan keluaran menunjukkan *plant* level memiliki waktu mati (*dead time*) L sebesar 6 detik dan konstanta waktu T sebesar 44 detik setelah pompa mendapatkan sinyal kontrol. Perbandingan besar waktu tunda terhadap konstanta waktu (L/T) menghasilkan nilai $6/44 = 0,136$. Karakteristik ini memenuhi persyaratan Ziegler-Nichols, sehingga untuk metode kedua yaitu *relay feedback* Ziegler-Nichols sebagai penalaannya bisa diterapkan.

4.2.2 Pengujian Penalaan PI

Penalaan parameter-parameter PI dilakukan agar dapat diperoleh parameter-parameter yang sesuai untuk *plant* model. *Plant* level ketinggian cairan memberikan tanggapan level, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.5 saat dilakukan penalaan PI secara *otomatis*. Referensi yang diberikan adalah sebesar 15 cm dengan periode cuplik *tuning* tiap 2 detik pada program. Mikrokontroler akan memberikan sinyal kendali *relay* ketika keadaan *off* ke pengontrol tegangan AC sebesar 0% yang setara dengan 140 volt AC, ketika keadaan *on*, sinyal kendali *relay* yang diberikan ke pengontrol tegangan AC sebesar u dimana u akan dicari sesuai dengan stabilnya osilasi.



Gambar 28 Tanggapan keluaran sistem pengendalian level untuk penalaan PI.

Tanggapan level pada *plant* berhasil dengan level minimal 14,9 cm sampai dengan

level maksimal 15,4 cm. Perhitungan nilai parameter PI didapatkan dari rutin *tuning* pada perangkat lunak, persamaan 10, dan Tabel 2.

- Nilai amplitudo osilasi (a) didapatkan :
 $d = \text{nilai referensi}$
 $a = (\text{Amplmax} - \text{Amplmin}) \times 0,5 = (15,4 - 14,9) \times 0,5 = 0,25$
- Nilai perioda osilasi (T_u) didapatkan :
 $T_u = (\text{osilasi} + \text{osilasi}1) \times 2 = (3 + 3) \times 2 = 12$ detik
- Nilai perhitungan K_p dan K_i sebesar :

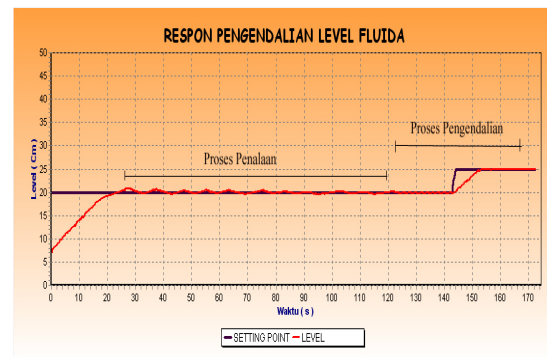
$$K_p = \frac{2}{5} K_u = \frac{2 \times 4 \times d}{5 \times a \times \pi} = \frac{2 \times 4 \times 15}{5 \times 0,25 \times 3,14} = 30,54$$

$$K_i = \frac{K_p}{4/5 \times T_u} = \frac{30,54}{0,8 \times 12} = 3,18$$



Gambar 29 Tampilan hasil penalaan parameter PI pada LCD.

Dari hasil eksekusi program pada Gambar 29 didapatkan nilai yang relatif sama dengan hasil penalaan parameter PI secara perhitungan. Respon pengendalian dengan menggunakan hasil penalaan PI dapat dilihat pada Gambar 30.



Gambar 30 Tanggapan keluaran dari proses penalaan dan pengendalian PI.

Gambar 30 adalah grafik respon penalaan dan pengendalian level dengan referensi 20 cm. Sebelum dilakukan proses pengendalian proses penalaan dilakukan terlebih dahulu, secara perhitungan pada kontroler didapatkan nilai parameter $K_p = 59,2$ dan $K_i = 9,25$. Terlihat bahwa hasil penalaan mampu membuat respon sistem stabil dan tidak terjadi kesalahan keadaan tunak. Pengendalian level dengan referensi 25 di butuhkan waktu tunda sebesar (t_d) 5 detik, waktu naik (t_r) sebesar 8 detik, dan waktu penetapan (t_s) sebesar 10 detik.

4.2.3 Pengujian Algoritma Kendali PI

Pengujian program Kendali PI bertujuan untuk mengetahui nilai sinyal kontrol hasil eksekusi program. Contoh perhitungan nilai sinyal kontrol (Co) didapatkan dari rutin pi pada perangkat lunak dan persamaan 5.

error = 5 ; error1 = 0 ; $K_p = 9,87$; $K_i = 1,03$; $T_s = 0,1$; $Co1 = 0$

$$Ti = 9,87/1,03 = 9,58$$

$$K1 = 9,87 \times 0,1/9,58 = 0,1$$

$$K2 = 9,87 + 0,1 = 9,97$$

$$K3 = 9,87$$

$$Co = 0 + 9,97 \times 5 - 9,87 \times 0 = 49,85$$

Untuk $Co > 100$, maka $Co = 100\%$

Untuk $Co < 0$, maka $Co = 0\%$

Perhitungan kendali PI untuk menghasilkan sinyal kontrol (Co) dapat dilihat pada Tabel 5.

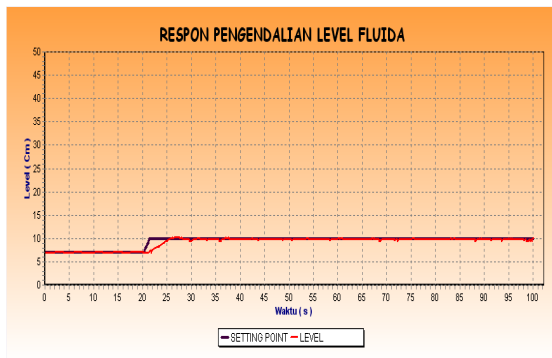
Tabel 5 Hasil perhitungan program nilai Co, Kp, Ki terhadap error dan error1.

No	Error (cm)	Error1 (cm)	Kp	Ki	Co (%)
1	5	0	9,87	1,03	49,85
2	0	5	9,87	1,03	0,5
3	8	0	9,87	1,03	80,26
4	2	6	22,2	2,31	0
5	4	2	22,2	2,31	37,24

4.2.4 Pengujian Kalang Tertutup Dengan Kendali PI Dari Hasil Penalaan

A. Respon Pengendalian Level Tanpa Gangguan

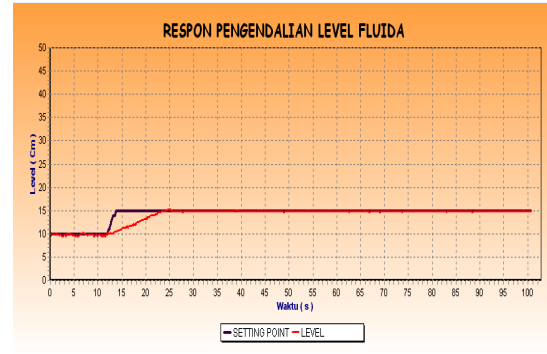
Tanggapan pengendalian sistem level ketinggian cairan tanpa gangguan dengan memberikan nilai referensi level yang berbeda yaitu 10 cm, 15 cm, 18 cm, dan 25 cm. Respon sistem dapat dilihat pada Gambar 31, Gambar 32, Gambar 33, dan Gambar 34.



Gambar 31 Tanggapan sistem pengendalian level tanpa gangguan dengan referensi 10 cm.

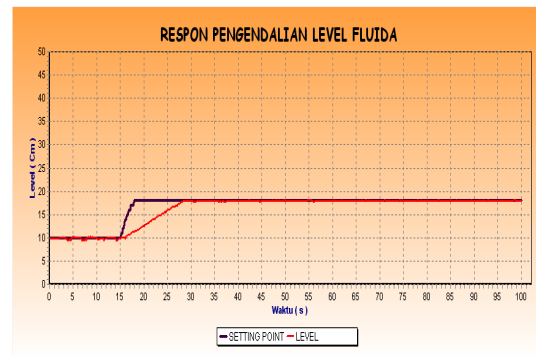
Gambar 31 adalah grafik respon pengendalian level dengan referensi 10 cm

dengan nilai parameter PI dari hasil penalaan, yaitu $K_p = 44,4$ dan $K_i = 6,94$. Terlihat bahwa hasil pengendalian mampu membuat respon sistem stabil dan tidak terjadi kesalahan keadaan tunak. Waktu tunda (t_d) yang diperlukan adalah 2 detik, waktu naik (t_r) sebesar 4 detik, waktu puncak (t_p) sebesar 6 detik, dan waktu penetapan (t_s) sebesar 9 detik.



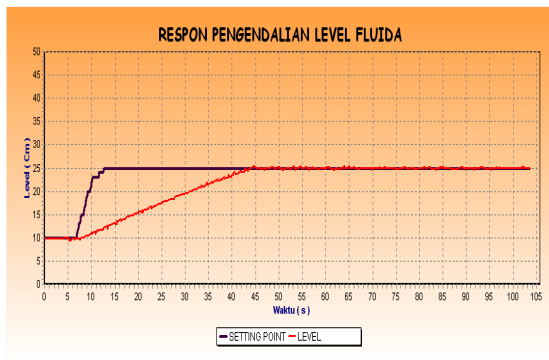
Gambar 32 Tanggapan sistem pengendalian level tanpa gangguan dengan referensi 15 cm.

Gambar 32 adalah grafik respon pengendalian level dengan referensi 15 cm dengan nilai parameter PI dari hasil penalaan, yaitu $K_p = 44,4$ dan $K_i = 6,94$. Terlihat bahwa hasil pengendalian mampu membuat respon sistem stabil dan tidak terjadi kesalahan keadaan tunak. Waktu tunda (t_d) yang diperlukan adalah 6 detik, waktu naik (t_r) sebesar 9 detik, waktu puncak (t_p) sebesar 13 detik, dan waktu penetapan (t_s) sebesar 14 detik.



Gambar 33 Tanggapan sistem pengendalian level tanpa gangguan dengan referensi 18 cm.

Gambar 33 adalah grafik respon pengendalian level dengan referensi 18 cm dengan nilai parameter PI dari hasil penalaan, yaitu $K_p = 44,4$ dan $K_i = 6,94$. Terlihat bahwa hasil pengendalian mampu membuat respon sistem stabil dan tidak terjadi kesalahan keadaan tunak. Waktu tunda (t_d) yang diperlukan adalah 6,5 detik, waktu naik (t_r) sebesar 11 detik, waktu puncak (t_p) tidak ada, dan waktu penetapan (t_s) sebesar 16 detik.



Gambar 34 Tanggapan sistem pengendalian level tanpa gangguan dengan referensi 25 cm.

Gambar 34 adalah grafik respon pengendalian level dengan referensi 25 cm dengan nilai parameter PI dari hasil penalaan, yaitu $K_p = 44,4$ dan $K_i = 6,94$. Terlihat bahwa hasil pengendalian mampu membuat respon sistem stabil dan tidak terjadi kesalahan keadaan tunak. Waktu tunda (t_d) yang diperlukan adalah 18 detik, waktu naik (t_r) sebesar 31 detik, waktu puncak (t_p) tidak ada, dan waktu penetapan (t_s) sebesar 40 detik.

Dari keempat hasil pengujian yaitu referensi 10 cm, 15 cm, 18 cm, dan 25 cm pada sistem pengendalian level tanpa gangguan, dapat dikatakan bahwa semakin besar referensi level yang diberikan, maka waktu yang diperlukan untuk mencapai keadaan stabil atau waktu penetapannya akan semakin lama, dengan level awal sama. Kendali PI dengan *auto tuning relay feedback* Ziegler-Nichols pada sistem tanpa gangguan yang diuji (Gambar 31 - Gambar 34) sudah bekerja secara optimal, dimana semua respon sistem untuk referensi yang berbeda dapat mencapai keadaan stabil dan tanpa *overshoot* (M_p). Data parameter unjuk kerja pengujian dengan referensi 10 cm, 15 cm, 18 cm, dan 25 cm diperlihatkan pada Tabel 6.

Tabel 6 Karakteristik tanggapan sistem kendali PI tanpa gangguan.

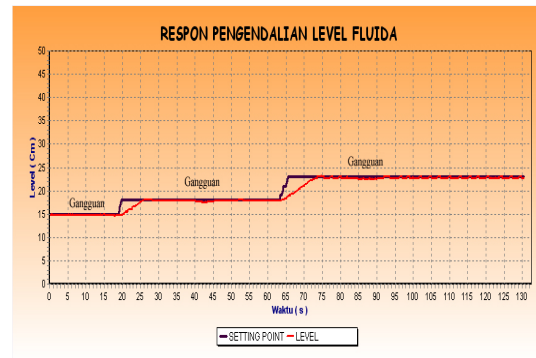
Referensi (cm)	Waktu tunda t_d (detik)	Waktu naik t_r (detik)	Waktu puncak t_p (detik)	Waktu penetapan t_s (detik)	Lonjakan maksimum M_p (%)
5	10	2	4	9	0
10	15	6	9	14	0
10	18	6.5	11	16	0
10	25	18	31	40	0

B. Respon Pengendalian Level terhadap Gangguan

Pengujian terhadap pengaruh gangguan pada sistem pengendalian level dilakukan dengan dua variasi, yaitu pengujian pengaruh gangguan sesaat pada sistem dan pengaruh gangguan kontinyu. Pengujian ini dilakukan untuk

mengetahui kemampuan atau unjuk kerja kendali PI dengan penalaan *relay feedback* Ziegler-Nichols terhadap gangguan luar. Pengendalian PI untuk pengujian terhadap gangguan dilakukan dengan nilai parameter PI dari hasil penalaan, yaitu $K_p = 29,6$ dan $K_i = 4,62$.

Pengaruh gangguan sesaat pada sistem pengendalian level pada referensi level yang berbeda, dilakukan dengan cara penambahan bukaan *valve* outlet, sehingga debit aliran outlet *plant* bertambah. Pemberian gangguan dilakukan ketika mencapai keadaan stabil, sesuai dengan referensinya. Pemberian gangguan sesaat dilakukan selama 10 detik setelah itu *valve* outlet dinormalkan kembali. Gangguan dilakukan pada referensi 15 cm, 18 cm, dan 23 cm. Hasil pengujian respon sistem ditunjukkan pada Gambar 35.



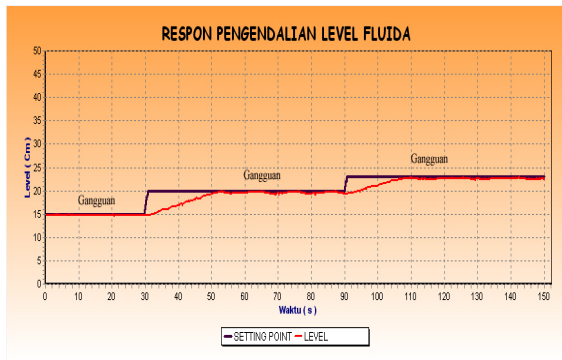
Gambar 35 Tanggapan sistem pengendalian level dengan gangguan sesaat dengan referensi 15 cm, 18 cm, dan 23 cm.

Pada Gambar 35 menunjukkan respon sistem pengendalian level dengan gangguan sesaat pada referensi 15 cm, pada detik ke 10 gangguan diberikan dengan menambah bukaan *valve* pada outlet, selama 10 detik level respon sistem tetap stabil dan tidak terjadi kesalahan keadaan tunak, walaupun diberi gangguan Setelah itu *valve* outlet dinormalkan kembali.

Pada referensi 18 cm, gangguan sesaat diberikan dengan menambah bukaan *valve* pada outlet pada detik ke 40, selama 3 detik level sistem berangsur-angsur turun sampai level terendah yaitu 17 cm. Setelah *valve* outlet dinormalkan kembali, waktu pemulihan menuju kestabilan didapatkan 5 detik setelah terjadi penurunan.

Pada referensi 23 cm, gangguan diberikan dengan menambah bukaan *valve* pada outlet pada detik ke 80, selama 8 detik level sistem berangsur-angsur turun sampai level terendah yaitu 22 cm. Setelah *valve* outlet dinormalkan kembali, waktu pemulihan menuju kestabilan didapatkan 2 detik setelah terjadi penurunan.

Pengaruh gangguan kontinyu pada sistem pengendalian level dengan referensi level yang berbeda, dilakukan dengan cara menambah bukaan *valve* pada outlet secara kontinyu. Pemberian gangguan dilakukan ketika mencapai keadaan stabil, sesuai dengan referensinya. Gangguan dilakukan pada referensi 15 cm, 20 cm, dan 23 cm. Hasil pengujian respon sistem ditunjukkan pada Gambar 36.



Gambar 36 Tanggapan sistem pengendalian level dengan gangguan kontinyu dengan referensi 15 cm, 18 cm, dan 23 cm.

Pada Gambar 36 menunjukkan respon sistem pengendalian level dengan gangguan kontinyu pada referensi 15 cm, gangguan kontinyu diberikan dengan menambah bukaan *valve* pada outlet pada detik ke 10. Terlihat bahwa sistem tetap stabil dan tidak terjadi kesalahan keadaan tunak (*offset*) ketika mendapat gangguan. Langkah selanjutnya adalah mengubah referensi menjadi 20 cm.

Pada referensi 20 cm, gangguan kontinyu tetap diberikan dengan menambah bukaan *valve* pada outlet. Ketika terjadi perubahan referensi terlihat bahwa sistem dapat mencapai referensi akan tetapi masih terjadi sedikit *offset*. Langkah selanjutnya adalah mengubah referensi menjadi 23 cm.

Pada referensi 23 cm, gangguan kontinyu tetap diberikan dengan menambah bukaan *valve* pada outlet. Ketika terjadi perubahan referensi terlihat bahwa sistem dapat mencapai referensi, akan tetapi masih terjadi sedikit *offset*. Secara umum dapat dikatakan bahwa untuk pengujian terhadap gangguan kontinyu, kontroler mampu memperbaiki respon sistem menuju kestabilan akan tetapi masih terjadi sedikit *offset*. Pada pengujian terhadap gangguan sesaat, kontroler mampu memperbaiki respon sistem menuju kestabilan tanpa terjadi *offset*.

V. PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil pengujian dan analisis yang dilakukan didapatkan hal-hal penting sebagai berikut:

1. Perbandingan waktu mati dengan konstanta waktu (L/T) harus memenuhi persyaratan ($0,1 < L/T < 1$) bila menggunakan metode Ziegler-Nichols sebagai penala parameter-parameter pengendali yang digunakan. Pada *plant* pengendali ketinggian level cairan ini, didapatkan perbandingan waktu mati terhadap konstanta waktu (L/T) sebesar 0,136.
2. Penalaan dengan menggunakan metode *relay feedback* Ziegler-Nichols pada aksi kontrol PI akan didapatkan parameter K_p dan K_i secara *otomatis*, agar menghasilkan respon sistem pengendalian level ketinggian cairan yang stabil, serta mampu mempertahankan referensi level yang diberikan.
3. Pada pengujian tanpa gangguan, pengendalian dilakukan dengan parameter PI hasil penalaan, yaitu $K_p = 44,4$ dan $K_i = 6,94$. Pengendalian level ketinggian cairan dengan PI mampu menghasilkan respon keluaran, dengan *rise time* yang cepat, tanpa *overshoot* dan tanpa terjadi selisih tunak (*offset*).
4. Pada pengujian dengan gangguan, pengendalian dilakukan dengan parameter PI hasil penalaan, yaitu $K_p = 29,6$ dan $K_i = 4,62$. Sistem pengendalian dengan kontroler PI mampu memperbaiki respon sistem menuju kestabilan tanpa terjadi *offset*, ketika diberi gangguan sesaat. Pada pengujian terhadap gangguan kontinyu, kontroler PI mampu memperbaiki respon sistem menuju kestabilan akan tetapi masih terjadi sedikit *offset*.

5.2 Saran

Beberapa saran yang dapat dilakukan untuk pengembangan sistem lebih lanjut, yaitu sebagai berikut:

1. Agar dapat memperoleh respon sistem yang lebih baik lagi, maka dapat dicoba dengan:
 - Menggunakan sensor yang memiliki keakuratan dan stabilitas yang lebih baik misalnya *differential pressure transmitter*.
 - Menggunakan metode pengontrolan lain seperti *fuzzy*, *fuzzy* hibrid, *fuzzy* sebagai tuning PI, jaringan syaraf tiruan.
2. Dapat dikembangkan dengan membuat pengendalian jarak jauh (*remote*) dengan

- perantara komputer. Hal ini dikarenakan untuk memudahkan operator untuk mengendalikan banyak *plant* dalam satu komputer.
3. Sistem pengendalian level ketinggian cairan dapat dikembangkan untuk meningkatkan unjuk kerja dengan menambahkan *valve* pengaturan pembuangan cairan sebagai pengendali aliran outlet, sehingga bila level ketinggian cairan melebihi referensi dapat segera dikurangi agar respon lebih cepat.

DAFTAR PUSTAKA

- (1) Astrom, John and Bjorn Wittenmark, *Adaptive Control Second Edition*, Addison-Wesley Publishing Company Inc, 1995.
- (2) Bakti, Dheka K.W, *Skripsi: Pengendalian Suhu secara Cascade Control Menggunakan Proporsional - Integral Berbasis Mikrokontroler ATmega 8535*, Teknik Elektro, Universitas Diponegoro, Semarang.
- (3) Benjamin C. Kuo, *Automatic Control System Sixth Edition*, Prentice-Hall, New Jersey, 1991.
- (4) Brosilow, Coleman and Babu Joseph, *Techniques of Model-Based Control*, Prentice Hall International Series, New Jersey, 2001.
- (5) Budiharto Widodo, *Panduan Praktikum Mikrokontroler AVR ATmega16*, PT Elex Media Komputindo, Jakarta, 2008.
- (6) Gunterus, Frans, *Falsafah Dasar: Sistem Pengendalian Proses*, PT Elex Media Komputindo, Jakarta, 1997.
- (7) Heryanto, M. Ary dan Wisnu Adi P, *Pemrograman Bahasa C Untuk Mikrokontroler ATMEGA 8535*, Penerbit Andi, Yogyakarta, 2008.
- (8) Indra, Bakhtiar K, *Tugas Akhir: Pengendali Pompa dan Monitoring Ketinggian Air Jarak Jauh Menggunakan Komputer dan Mikrokontroler AT89S51*, Diploma III Instrumentasi dan Elektronika, Universitas Diponegoro, Semarang.
- (9) Malvino. "Prinsip – Prinsip Elektronika". Jakarta : Erlangga, 1996.
- (10) Ogata, Katsuhiko, *Teknik Kontrol Automatik Jilid 1*, diterjemahkan oleh Edi Leksono, Erlangga, Jakarta, 1994.
- (11) Ogata, Katsuhiko, *Teknik Kontrol Automatik Jilid 2*, diterjemahkan oleh Edi Leksono, Erlangga, Jakarta, 1994.
- (12) Syahadi, Mohamad, *Skripsi : Aplikasi Kontrol Proporsional Integral Berbasis Mikrokontroler Atmega 8535 Untuk Pengaturan Suhu Pada Alat Pengereng Kertas*, Teknik Elektro, Universitas Diponegoro, Semarang.
- (13) Wardhana L, *Belajar Sendiri Mikrokontroler AVR Seri ATmega8535 Simulasi, Hardware, dan Aplikasi*, Penerbit Andi, Yogyakarta, 2006.
- (14) Wijaya, Eka Chandra, *Skripsi: Aplikasi Penalaan PID Berbasis Metode Osilasi Ziegler-Nichols Menggunakan Mikrokontroler AT89S52 pada Pengendalian Suhu*, Teknik Elektro, Universitas Diponegoro, Semarang.
- (15) -----, *ATmega 8535 Data Sheet*, <http://www.atmel.com>.
- (16) -----, *Liquid Crystal Display Module M1632 : User Manual*, Seiko Instrument Inc., Japan, 1987.
- (17) -----, *PING)))™ Ultrasonic Distance Sensor Data Sheet*, <http://www.parallax.com>.

BIODATA MAHASISWA



**Bakhtiar Indra K
(L2F 306 012)**

Lahir di Semarang, 4 Desember 1984. Saat ini sedang melanjutkan studi pendidikan strata I di Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik Universitas Diponegoro Konsentrasi Kontrol.

Mengetahui dan mengesahkan,

Dosen Pembimbing I Dosen Pembimbing II

<u>Wahyudi, ST, MT</u> NIP. 132 086 662	<u>Iwan Setiawan, ST, MT</u> NIP. 132 283 183
Tanggal: _____	Tanggal: _____