

SIMULASI KESTABILAN SISTEM KONTROL PADA PERMUKAAN CAIRAN MENGGUNAKAN METODE KURVA REAKSI PADA METODE ZIEGLER-NICHOLS BERBASIS BAHASA DELPHI

Munhidhotul Ummah

ABSTRAK

Dalam bidang teknologi telah dikembangkan suatu pengontrol yang dapat mengatur ketinggian cairan atau yang biasa disebut pengontrol ketinggian volume cairan. Pengontrol ketinggian volum ini telah banyak dimanfaatkan dalam rumah tangga ataupun industri. Skripsi ini berusaha membuat simulasi kestabilan dari sistem permukaan cairan pada program delphi untuk mempermudah mensimulasikan respon transiennya, serta dapat menghasilkan respon transien yang menunjukkan kestabilan dan performansi yang baik dengan metode kurva reaksi pada metode Ziegler-Nichols. Sistem dikatakan stabil apabila masukan acuan dan keluaran yang diinginkan terjadi suatu keseimbangan.

Sistem tangki air dimodelkan berdasarkan persamaan-persamaan yang ada pada tangki air sehingga menjadi persamaan differensial. Kemudian persamaan differensial diubah menjadi transformasi laplace (domain frekuensi) untuk memperoleh fungsi alih sistem, agar dapat disimulasikan pada program Delphi versi 7.0 maka fungsi alih diubah dalam domain waktu dengan cara me-laplace balikkan. Penalaan (*tuning*) parameter pengontrol berdasarkan metode kurva reaksi pada metode Ziegler-Nichols. Dari hasil pengujian terhadap pengontrol, baik pengontrol proporsional (P), derivatif (D) maupun proporsional derivatif (PD) dapat disimpulkan bahwa hasil respon transien yang terbaik dihasilkan oleh pengontrol PD dengan $K_p= 0,1$ dan $K_d=0,5$ yang menunjukkan *settling time* sebesar 0,12s dan *overshoot* sebesar 0,05 serta tidak ada kesalahan keadaan tunak.

Kata kunci : Simulasi, Kestabilan, Sistem Kontrol, Ziegler-Nichos

1. PENDAHULUAN

Dalam bidang teknologi telah dikembangkan suatu pengontrol yang dapat mengatur aliran cairan atau biasa disebut pengontrol ketinggian volume cairan, sehingga pemakaian cairan atau air tersebut sesuai dengan takaran yang telah di tentukan. Pengontrolan ketinggian volume ini dimaksudkan untuk menghindari adanya luberan cairan, menghindari terjadinya keterlambatan waktu antara pemberian perintah untuk mengatur aliran terhadap pelaksanaan pengaturan keran sehingga berakibat pada penunjukan indikator ketinggian air memberikan harga yang tidak tepat, menghindari adanya penempatan tenaga operator (pengatur keran) terutama ditempat-tempat yang sukar dicapai dan dilihat, serta dapat memberikan ketepatan (presisi) untuk kondisi-kondisi tertentu, seperti harga variabel yang tetap.

Suatu sistem diharapkan mempunyai performansi yang baik ditinjau dari respon sistem terhadap masukan yang disengaja, seperti perubahan set point ataupun yang tidak disengaja seperti gangguan dari luar sistem dan dalam sistem itu sendiri. Suatu sistem dikatakan tidak stabil jika responnya terhadap suatu masukan menghasilkan osilasi yang bergetar pada suatu harga amplitudo tertentu, sebaliknya suatu sistem disebut stabil jika sistem tersebut akan tetap dalam keadaan diam atau berhenti kecuali dirangsang oleh suatu fungsi masukan dan akan kembali dalam keadaan diam jika fungsi masukan dihilangkan. Ketidakstabilan merupakan suatu keadaan yang tidak menguntungkan bagi sistem loop tertutup, demikian juga bagi sistem loop terbuka. Dengan demikian dapat dikatakan bahwa untuk memperoleh nilai yang memberikan manfaat praktis, sebuah sistem kontrol harus stabil.

Penelitian ini bertujuan untuk membuat simulasi kestabilan dari sistem permukaan cairan dengan metode kurva reaksi dalam metode *Ziegler-Nichols* pada program Delphi

untuk mempermudah mensimulasikan respon transien, serta menghasilkan respon transien yang menunjukkan kestabilan dan performansi (kinerja sistem) yang baik pada sistem permukaan cairan dengan metode kurva reaksi dalam metode *Ziegler-Nichols*.

2. TINJAUAN PUSTAKA

Sistem Linear

Sistem adalah kombinasi dari beberapa komponen yang bekerja bersama-sama dan melakukan sasaran tertentu (Philips, 1998). Sistem dikatakan linear jika berlaku prinsip-prinsip superposisi. Prinsip superposisi menyatakan bahwa tanggapan yang dihasilkan dengan mengaplikasikan dua fungsi gaya berbeda secara bersamaan adalah jumlah dari dua tanggapan terhadap aplikasi fungsi tadi secara sendiri-sendiri. Jadi untuk sistem linear, tanggapan terhadap beberapa masukan dapat dihitung dengan mengerjakan masukan satu persatu dan menjumlahkan hasilnya. (Ogata, 1996, 101)

Persamaan Differensial

Pernyataan lain secara matematis untuk sebuah sistem adalah persamaan differensial. Persamaan differensial adalah persamaan yang mengandung suku-suku variabel bebas dan tidak bebas, dimana terdapat bentuk differensial (turunan). Persamaan differensial dapat dikelompokkan sebagai berikut (Pakpahan, 1994, 53) :

- a. Persamaan differensial parsial (tidak banyak terdapat dalam sistem kontrol)
- b. Persamaan differensial biasa
 - Persamaan differensial linear
 - Persamaan differensial non linear

Persamaan Differensial Linear

Secara umum persamaan differensial dari sistem orde-n ditulis :

$$\frac{d^n y(t)}{dt^n} + a_{n-1} \frac{d^{n-1} y(t)}{dt^{n-1}} + a_1 \frac{dy(t)}{dt} + a_0 y(t) = f(t) \quad (2.1)$$

Dari persamaan di atas, dikenal dengan persamaan differensial linear biasa jika koefisien a_0, a_1, \dots, a_{n-1} bukan merupakan fungsi dari $y(t)$. (Benjamin C. kou, 1995, 19)

Transformasi Laplace

Metode transformasi laplace adalah suatu metode operasional yang dapat digunakan secara mudah untuk menyelesaikan persamaan differensial linear. Dengan transformasi laplace, kita dapat mengubah beberapa fungsi umum (seperti fungsi sinusoida, fungsi sinusoida terendam dan fungsi eksponensial) menjadi fungsi-fungsi variabel kompleks s . Bila persamaan aljabar dalam s dipecahkan, maka penyelesaian dari persamaan differensial (transformasi laplace balik dari variabel tak bebas) dapat diperoleh dengan menggunakan tabel transformasi laplace atau dengan teknik uraian pecahan parsial. Transformasi laplace dari $f(t)$ didefinisikan sebagai berikut (Ogata, 1996,14-19) :

$$\mathcal{L}[f(t)] = F(s) = \int_0^{\infty} e^{-st} dt [f(t)] = \int_0^{\infty} f(t) e^{-st} dt \quad (2.3)$$

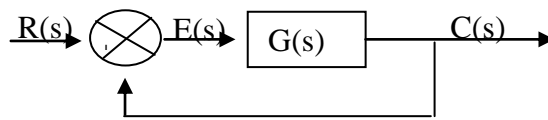
dimana :

- $f(t)$ = fungsi waktu t sedemikian rupa sehingga $f(t) = 0$ untuk $t < 0$
- s = Variabel kompleks
- \mathcal{L} = Simbol operasional yang menunjukkan bahwa besaran yang didahuluinya ditransformasi dengan integral laplace
- $F(s)$ = Transformasi laplace dari $f(t)$.

Diagram Blok

Diagram blok suatu sistem adalah suatu penyajian bergambar dari fungsi yang dilakukan oleh tiap komponen dan aliran sinyalnya. Dalam diagram blok, semua variabel sistem saling dihubungkan dengan menggunakan blok fungsional. Blok fungsional atau

biasa disebut blok adalah suatu simbol operasional matematik pada sinyal masukan blok yang menghasilkan keluaran. Fungsi alih dari komponen biasanya ditulis didalam blok, yang dihungkan dengan anak panah untuk menunjukkan arah aliran sinyal.

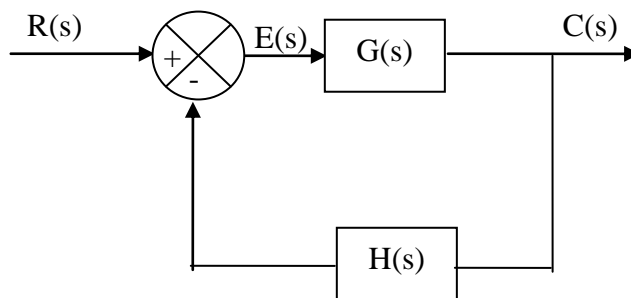


Gambar 2.1 Diagram blok rangkaian loop tertutup

Gambar di atas menunjukkan suatu contoh diagram blok sistem tertutup. Keluaran $C(s)$ diumpan balikkan ke titik penjumlahan untuk dibandingkan dengan masukan acuan $R(s)$. Keluaran blok, $C(s)$ dalam hal ini diperoleh dengan mengalikan fungsi alih $G(s)$ dengan masukan blok, $E(s)$. Setiap sistem kontrol linier dapat dinyatakan dengan suatu diagram blok yang terdiri dari beberapa blok, titik penjumlahan, dan titik cabang. Jika keluaran diumpan-balikkan ke titik penjumlahan untuk dibandingkan dengan masukan, maka perlu mengubah bentuk sinyal keluaran agar sama dengan bentuk sinyal masukan. (Ogata, 1996 : 47-49)

Fungsi Alih

Fungsi alih adalah perbandingan antara besaran keluaran terhadap masukan yang terdapat pada sebuah diagram blok. Pada umumnya suatu sistem kontrol rangkaian tertutup terjadi proses perubahan keluaran yang dikembalikan sebagian melalui proses umpan balik yang diberi notasi H . Diagram blok ditunjukkan pada gambar dibawah ini (Pakpahan, 1994) :



Gambar 2.2 Diagram Blok Rangkaian Loop Tertutup

Persamaan Karakteristik Fungsi Alih

Persamaan karakteristik fungsi alih didefinisikan sebagai perbandingan antara transformasi laplace keluaran (fungsi tanggapan) terhadap transformasi laplace masukan (fungsi penentu) dengan anggapan bahwa semua syarat awal nol (Ogata, 1996, 45). Fungsi alih sistem pada diagram blok di atas dapat dirumuskan sebagai berikut (Pakpahan, 1994, 23) :

$$\frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{G(s)}{1 + G(s)H(s)} \quad (2.4)$$

sehingga :

$$Y(s) = \frac{1}{1 + G(s)H(s)} G(s)X(s) \quad (2.5)$$

Dapat dikatakan bahwa respon adalah perkalian fungsi sistem terhadap fungsi masukan. Karena bentuk fungsi alih tidak dipengaruhi fungsi masukan maka tidak ada hubungan apakah sistem tersebut stabil atau tidak. Dengan demikian fungsi masukan adalah pembilang. Dalam persamaan di atas fungsi masukan dapat dibuat nol sehingga :

$$1 + G(s)H(s) = 0 \quad (2.6)$$

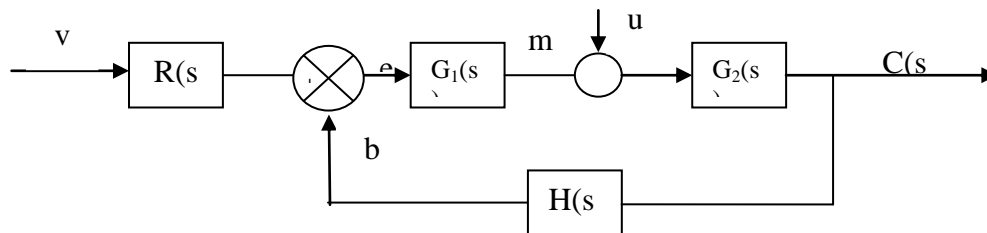
Persamaan di atas disebut persamaan karakteristik tertutup, dimana selanjutnya dari persamaan di atas dapat ditentukan suatu sistem akan stabil atau tidak. Persamaan di atas

dapat dituliskan dalam bentuk yang lebih umum untuk orde-n sebagai berikut (Pakpahan, 1994, 24) :

$$a_0s^n + a_1s^{n-1} + \dots + a_{n-1} + a^n = 0 \quad (2.7)$$

Sistem Kontrol

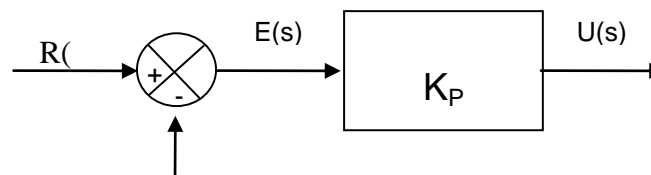
Setiap proses kontrol terdiri dari unit yang membentuknya yang disebut elemen sistem dan selanjutnya elemen ini terdiri komponen-komponen. Suatu proses kontrol secara fungsional dapat dinyatakan oleh diagram blok yang bentuknya bergantung pada jumlah elemen. Diagram blok secara umum dapat dilihat pada gambar dibawah ini



Gambar 2.3 : Diagram blok sistem kontrol rangkaian tertutup

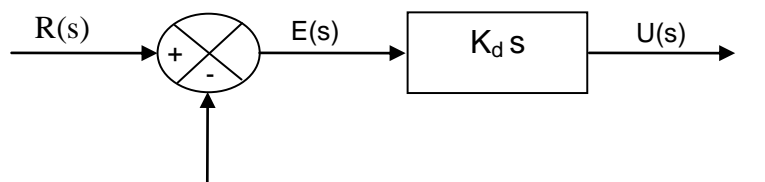
Aksi Kontrol Proporsional (P)

Kontroler proporsional memiliki keluaran yang sebanding / proporsional dengan besarnya sinyal kesalahan (selisih antara besaran yang diinginkan dengan harga aktualnya) [Sharon, 1992, 19]. Secara lebih sederhana dapat dikatakan, bahwa keluaran controller proporsional merupakan perkalian antara konstanta proporsional dengan masukannya. Perubahan pada sinyal masukan akan segera menyebabkan sistem secara langsung mengubah keluarannya sebesar konstanta pengalinya. (Choiruzzani, 1998



Gambar 2.4 Diagram blok kontroler proporsional

Aksi Kontrol Derivatif (D)



Gambar 2.5 Diagram blok kontroler derivatif

Kontrol derivatif menghasilkan keluaran yang tergantung pada laju perubahan sinyal kesalahan yang terjadi. Persamaan masukan dan keluaran kontrol derivatif adalah

$$u(t) = Kd \frac{de(t)}{dt} \quad (2.10)$$

atau

$$\frac{U(s)}{E(s)} = KdTds \quad (2.11)$$

Aksi Kontrol Proporsional Derivatif (PD)

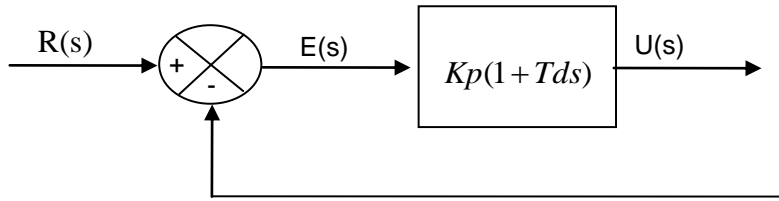


Diagram 2.6 : Blok kontroler Proporsional Derivatif

Gambar 2.6 menunjukkan diagram blok kontroler proporsional ditambah derivatif. Aksi kontrol proporsional derivatif didefinisikan dengan persamaan berikut :

$$U(t) = K_p e(t) + K_p T_d \frac{de(t)}{dt} \quad (2.13)$$

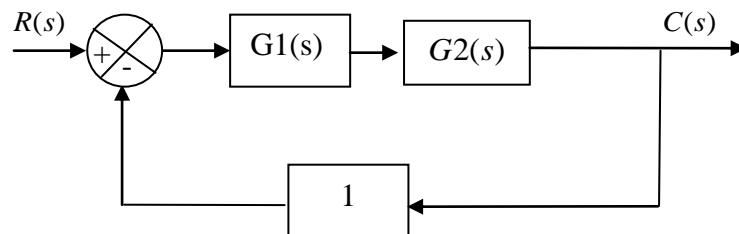
Atau fungsi alih kontroler ini adalah :

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_p (1 + T_d s) \quad (2.14)$$

Dengan K_p adalah penguatan proporsional dan T_d konstanta yang disebut waktu turun. K_p dan T_d keduanya dapat ditentukan. Aksi kontrol derivatif kadang-kadang disebut dengan laju kontrol dengan besaran keluaran kontroler proporsional ke laju perubahan sinyal pembangkit kesalahan. Waktu turunan T_d adalah waktu interval dengan laju aksi memberikan pengaruh pada aksi kontrol proporsional.

Kestabilan

Dalam teori Kontrol, benda-benda langit berlaku sebagai sistem (*plant*) yang selalu dikontrol oleh pengontrol yaitu *field force* (Allah Swt.) agar gaya gravitasi (masukan acuan) yang menarik benda-benda langit tetap seimbang dan daya geraknya (keluaran/ *set point*) yang diperoleh dari gaya tolak, dan loop tertutup (*close loop*) umpan balik akan membantu pengontrol untuk menentukannilai respon yang dihasilkan *input* (gaya gravitasi) maupun *out put* (daya gerak) sehingga nantinya terjadi keseimbangan. Dengan terjadinya keseimbangan antara kekuatan atau gaya pengangkat dan kekuatan atau gaya pengikat menyebabkan enda-benda langit pada porosnya dapat berlangsung dengan baik dan stabil. Demikianlah seluruh komponen alam raya yang besar ini diatur sedemikian rupa oleh sistem yang sangat rapi untuk menunjukkan kekuasaan dan kebesaran Allah Swt. Komponen-komponen keseimbangan alam raya dapat digambarkan dalam diagram blok seperti dibawah ini



Gambar 2.7 Diagram blok keseimbangan alam

Keterangan :

$R(s)$ = gaya gravitasi (masukan acuan)

$G_1(s)$ = *field force* (pengontrol dalam hal ini Allah Swt.)

$G_2(s)$ = benda benda langit (sistem atau plant)

$C(s)$ = daya gerak (keluaran)

$H(s)$ = umpan balik berupa satuan

Sebuah sistem dikatakan tidak stabil, jika responnya terhadap suatu masukan menghasilkan osilasi yang keras atau bergetar pada suatu amplitude tertentu. Sebaliknya suatu sistem disebut stabil jika sistem tersebut akan tetap dalam keadaan diam atau berhenti kecuali dirangsang oleh suatu fungsi masukan dan akan kembali dalam keadaan diam jika rangsangan fungsi masukan dihilangkan. Ketidakstabilan merupakan suatu keadaan yang tidak menguntungkan bagi suatu sistem loop tertutup, demikian juga pada sistem loop terbuka. Jelas untuk memperoleh nilai yang memberikan manfaat praktis sebuah sistem kontrol harus stabil. Masukan sistem tidak memberikan pengaruh terhadap kestabilan suatu sistem, sehingga jika sistem tersebut stabil terhadap suatu masukan maka dia akan stabil untuk masukan yang ada. Sebaliknya stabilitas hanya bergantung pada karakteristik daripada sistem itu sendiri (Pakpahan, 1994, 114).

Respon Transien

Dalam beberapa kasus praktek, karakteristik kinerja yang diinginkan dari suatu sistem kontrol dicirikan oleh suku besaran berdomain waktu. Sistem dengan tenaga tidak dapat memberikan tanggapan seketika dan akan menunjukkan tanggapan transien walaupun diberi masukan atau gangguan.

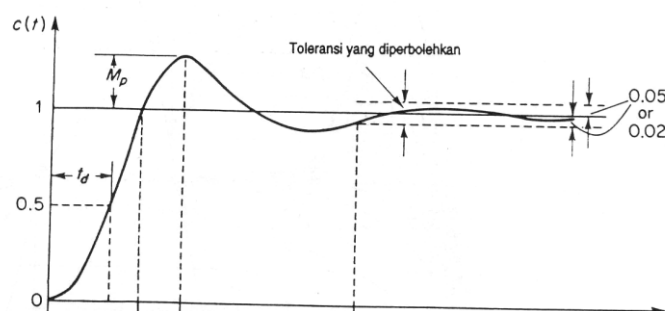
Tanggapan transien suatu sistem kontrol secara praktek selalu menunjukkan osilasi terendam sebelum mencapai keadaan tunaknya. Dalam menggolongkan karakteristik tanggapan transien suatu sistem kontrol terhadap masukan tangga satuan, umumnya dikelompokkan sebagai berikut :

- a. Waktu tunda, t_d
- b. Waktu naik, t_r
- c. Waktu puncak, t_p
- d. Overshoot maksimum, M_p
- e. Waktu turun, t_s

Pengelompokan ini didefinisikan sebagai berikut :

- a. Waktu tunda : waktu tunda adalah waktu yang diperlukan oleh tanggapan untuk mencapai setengah nilai akhir untuk waktu yang pertama.
- b. Waktu naik : waktu naik adalah waktu yang diperlukan oleh tanggapan untuk naik dari 10% menjadi 90%, 5% menjadi 95%, atau 0% menjadi 100% dari nilai akhir yang biasa digunakan. Untuk sistem atas redaman waktu naik yang biasa digunakan 10% menjadi 90%.
- c. Waktu puncak : waktu puncak adalah waktu yang diperlukan tanggapan untuk mencapai puncak pertama overshoot.
- d. Maksimum (persen) overshoot : overshoot maksimum adalah nilai puncak kurva tanggapan diukur dari satuan. Apabila nilai akhir keadaan tunak tanggapannya jauh dari satu, maka biasa digunakan persen overshoot maksimum.
- e. Waktu turun : waktu turun adalah waktu yang diperlukan untuk menanggapi kurva agar dapat mencapai dan tetap berada dalam gugus nilai akhir ukuran yang disederhanakan dengan presentase mutlak harga akhirnya (biasanya 2% atau 5%). Waktu turun tadi dihubungkan dengan tetapan waktu terbesar sistem kontrol.

Spesifikasi daerah waktu menjadi penting karena kebanyakan sistem kontrol merupakan sistem daerah waktu yaitu dapat menerima tanggapan waktu. (Ogata, 1996 : 285-287)



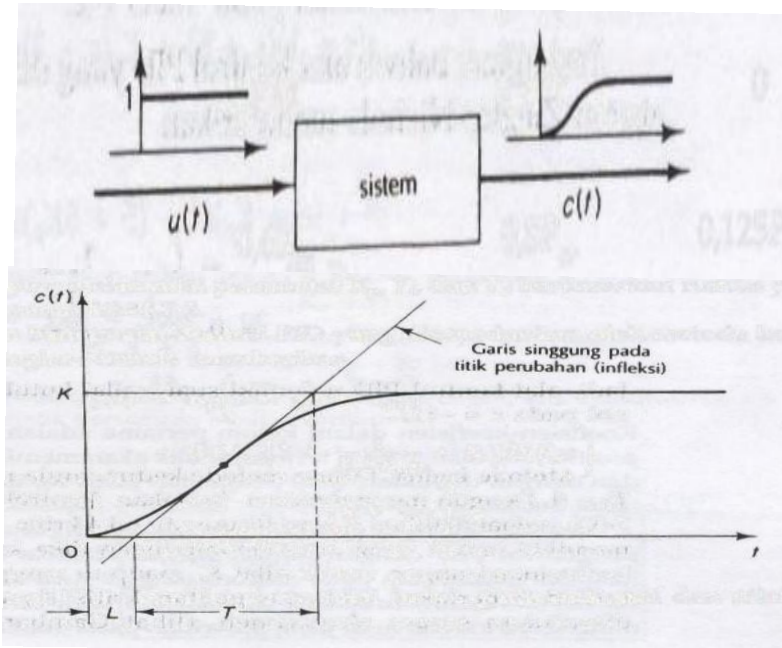
Gambar 2.8 Kurva tanggapan tangga satuan menunjukkan t_d , t_r , t_p dan t_s .

Metode Ziegler-Nichols

Zieger-Nichols pertama kali memperkenalkan metodenya pada tahun 1942. metode ini memiliki dua cara yaitu metode kurva reaksi dan metode osilasi.

Metode Kurva Reaksi

Metode ini didasarkan terhadap reaksi sistem untaiian terbuka. Plant sebagai untaiian terbuka dikenai sinyal fungsi tangga satuan, jika pant minimal tidak mengandung unsur integrator ataupun pole-pole kompleks, maka reaksi sistem akan berbentuk s. Kurva berbentuk s mempunyai dua konstanta, yaitu : waktu mati (*dead time*) L dan waktu tunda T . Konstanta waktu ditentukan dengan menggambarkan garis singgung pada titik perubahan kurva berbentuk s dan menentukan perpotongan garis singgung dengan sumbu waktu dan garis $c(t)=K$, seperti pada gambar dibawah. Penalaan parameter PID didasarkan pada perolehan kedua konstanta itu.



Gambar 2.9 Diagram blok sistem loop tertutup dan kurva tanggapan pada metode kurva reaksi

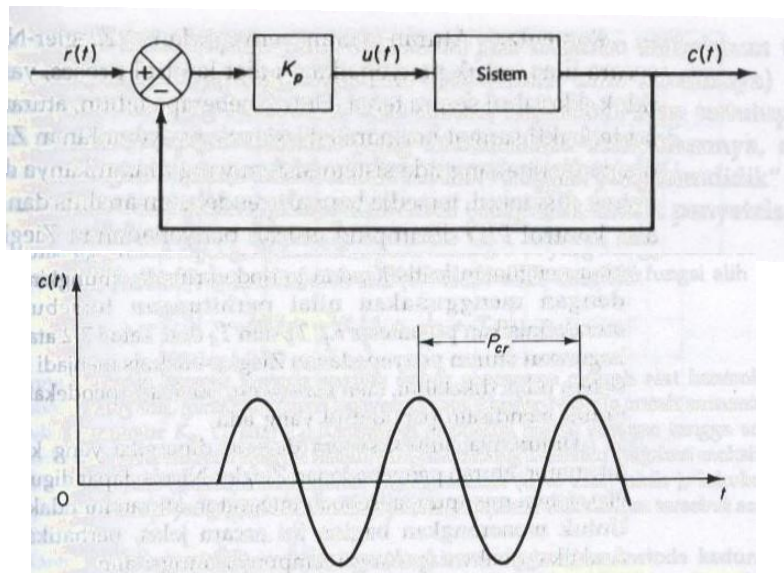
Rumus penalaan parameter PID berdasarkan cara kurva reaksi dapat dilihat pada table berikut :

Tabel 1. Rumus penalaan parameter dengan metode kurva reaksi

| Type kontroler | K_p | T_i | T_d |
|----------------|-----------|---------|---------|
| P | T/L | \sim | 0 |
| PI | $0.9 T/L$ | $L/0.3$ | 0 |
| PID | $1.2 T/L$ | $2 L$ | $0.5 L$ |

Metode Osilasi

Metode ini didasarkan pada reaksi sistem untai tertutup. Plant disusun serial dengan kontroler PID. Semula parameter-parameter integrator disetel tak berhingga dan parameter diferensial disetel nol ($T_i = \infty, T_d = 0$), parameter proporsional dinaikkan bertahap. Mulai dari nol sampai mencapai harga yang mengakibatkan reaksi sistem berosilasi. Reaksi sistem harus berosilasi dengan magnitude tetap (sustain oscillation). Nilai penguatan proportional pada saat sistem mencapai kondisi sustain oscillation disebut ultimate gain K_u . Periode dari *sustained oscillation* disebut periode T_u .



Gambar 2.10 Diagram blok sistem loop tertutup dengan kontroler proporsional dan kurva tanggapan $c(t)$ terhadap t pada metode osilasi

Rumus penalaan parameter PID dengan metode osilasi dapat dilihat pada table berikut :

Tabel 2. rumus penalaan parameter dengan metode osilasi

| Tipe alat kontrol | K_p | T_i | T_d |
|-------------------|---------------|----------------|----------------|
| P | $0.5 K_{cr}$ | \sim | 0 |
| PI | $0.45 K_{cr}$ | $1/1.2 P_{cr}$ | 0 |
| PID | $0.6 K_{cr}$ | $0.5 P_{cr}$ | $0.125 P_{cr}$ |

Sistem Permukaan Cairan Dengan Interaksi

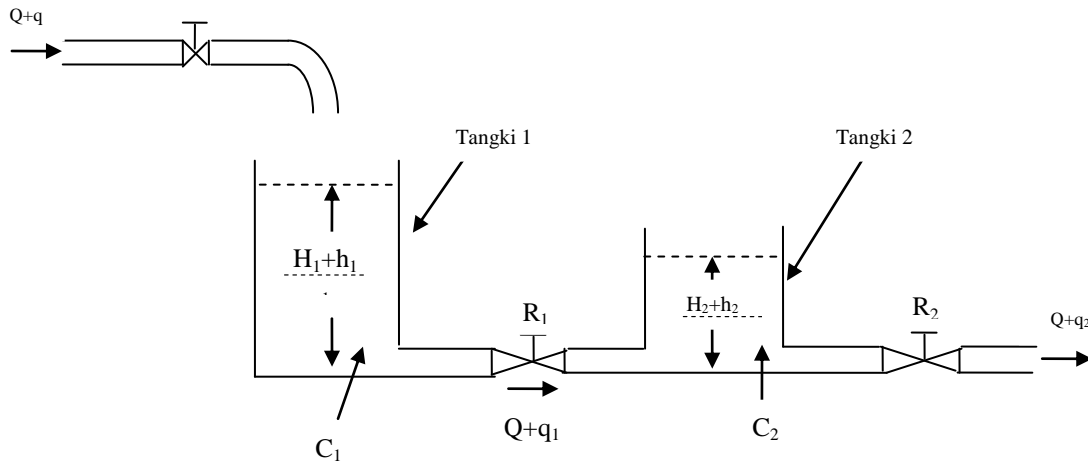
Gejala yang tampak di permukaan zat cair pada umumnya, air pada khususnya tidak terlepas dari adanya gaya-gaya antara partikel atau antara molekul suatu zat yang pada umumnya berasal dari kelistrikan yang secara umum gaya ini berbanding terbalik dengan kuadrat jaraknya. Jika jarak antara molekul-molekul itu besar, misalnya pada gas, maka gaya ini sangat kecil dan hanya berupa suatu tarikan. Gaya tarik ini akan bertambah besar jika gas dimampatkan dan jarak antara molekulnya diperkecil. Karena untuk memampatkan zat cair diperlukan tekanan yang besar yaitu untuk memaksa agar molekul-molekul bertambah dekat, maka pada jarak yang sedikit lebih kecil dari pada dimensi molekul, gaya itu merupakan gaya tolak yang relatif besar.

Gaya tarik-menarik antara partikel atau molekul sejenis sebagai akibat peristiwa kelistrikan (listrik statis) dikenal dengan gaya kohesi. Dari gaya seperti inilah seolah-olah

terdapat selaput tipis yang memisahkan antara zat cair yang satu dengan yang lain, serta mampu menahan benda-benda kecil di permukaannya. Karena gaya-gaya kohesi resultan ini menyebabkan permukaan zat cair menjadi tegang, maka sifat ini disebut dengan tegangan permukaan.

Jika dua lapis ganda listrik saling mendekati satu sama lain, maka akan terjadi interaksi tolak menolak antara kedua permukaannya. Hal ini menyebabkan kedua zat cair itu tidak dapat bercampur, tampak seperti ada pembatas antara keduanya.

Tinjau sistem dibawah ini :



Gambar 2.11 Sistem permukaan cairan dengan interaksi

Keterangan :

Q = laju keadaan tunak (sebelum ada perubahan), (m/s)

q = penyimpangan kecil laju aliran masuk pada keadaan tunak, (m/s)

q_1 = penyimpangan kecil laju aliran keluar tangki 1 keadaan tunak, (m/s)

q_2 = penyimpangan kecil laju aliran keluar tangki 2 keadaan tunak, (m/s)

H = tinggi permukaan zat cair pada keadaan tunak, (m)

h = penyimpangan kecil permukaan zat cair pada keadaan tunak, (m)

R = resistensi, (s/m²)

C = kapasitansi, (m²)

Dalam sistem ini, dua tangki berinteraksi, sehingga fungsi alih sistem ini bukan merupakan hasil kali dua fungsi alih orde pertama. Dengan simbol seperti gambar, maka diperoleh persamaan berikut (Ogata, 1996, 140)

$$\frac{h_1 - h_2}{R_1} = q_1 \quad (2.17)$$

$$C_1 \frac{dh_1}{dt} = q - q_1 \quad (2.18)$$

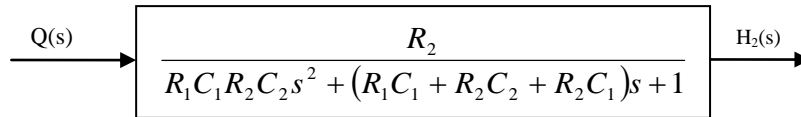
$$\frac{h_2}{R_2} = q_2 \quad (2.19)$$

$$C_2 \frac{dh_2}{dt} = q_1 - q_2 \quad (2.20)$$

Jika Q merupakan masukan dan H_2 adalah keluaran, maka fungsi alih sistem adalah

$$\frac{H_2(s)}{Q(s)} = \frac{R_2}{R_1 C_1 R_2 C_2 s^2 + (R_1 C_1 + R_2 C_2 + R_2 C_1) s + 1} \quad (2.21)$$

Diagram blok untuk sistem kontrol permukaan cairan dengan interaksi adalah sebagai berikut (Ogata, 1996, 140)



Gambar 2.12 Diagram blok sistem permukaan cairan dengan interaksi

3. METODE PENELITIAN

Waktu dan Tempat Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan mulai bulan Desember 2007 sampai dengan bulan Maret 2008. Sedangkan lokasi penelitian bertempat di Lab Fisika Komputasi Universitas Islam Negeri (UIN) Malang.

Alat-alat Penelitian

1. Seperangkat komputer personal pentium 4, CPU 2,66 GHz, Hardisk 80 Gbyte, Memori 246 Mbyte, sistem operasi microsoft windows Xp profesional untuk membut program dan penulisan laporan
2. Perangkat lunak (*software*) Delphi versi 7.0 untuk membuat program simulasi sistem kontrol.

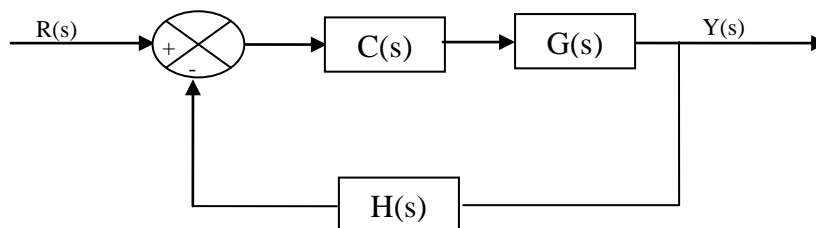
Pemodelan

Pemodelan merupakan proses pembuatan model matematika dari suatu sistem fisis dengan menelaah dan menganalisis karakter dinamika sistemnya. Adapun langkah-langkah yang harus dilakukan dalam pemodelan ini adalah :

- a. Menentukan pengaturan fisik sistem tangki air
- b. Menentukan persamaan matematik sistem tangki air
- c. Menentukan diagram blok sistem tangki air
- d. Mentukan fungsi alih sistem tangki air
- e. Menentukan laplace balik (*invers laplace*) sistem tangki air.

Diagram Blok Sistem Loop Tertutup

Tinggi cairan atau air (*head*) menghasilkan suatu tekanan yang menimbulkan aliran cairan dari tangki. Tinggi cairan atau air dapat diatur dengan menggunakan pengontrol. Ilustrasi sistem pengontrol tinggi cairan dapa dilihat pada gambar 3.6:



Gambar 3.6 Diagram blok loop tertutup

Dimana $G(s)$ adalah fungsi alih sistem, $H(s)$ adalah fungsi alih umpan balik, $C(s)$ adalah fungsi alih kontrol, $R(s)$ adalah masukan loop tertutup dan $Y(s)$ adalah keluaran loop tertutup. Fungsi alih sistem loop tertutup pada gambar 3.6 adalah

$$Y(s) = \frac{C(s)G(s)}{1 + C(s)G(s)H(s)} R(s) \quad (3.1)$$

Dari gambar 3.7 dapat dilihat prinsip kerja pengontrol yang berguna untuk mempertahankan kondisi ketinggian cairan, yang mana akibat ketinggian cairan ini akan menghasilkan suatu tekanan yang menimbulkan aliran cairan dari tangki. Pengontrol dapat digunakan untuk mempertahankan kondisi ketinggian cairan, dan loop tertutup umpan balik akan membantu pengontrol untuk menentukan nilai respon yang dihasilkan input R (masukan) maupun output Y (keluaran), sehingga hasil keluaran sistem sesuai dengan yang

diharapkan. Adapun keluaran merupakan ketinggian cairan dari sistem tangki air yang berbasis pada simulasi komputer dengan *software* Delphi. Keluaran sistem akan diberikan kembali sebagai umpan balik kepada pengontrol.

Penalaan Parameter Kontrol / Tahap Pengujian

Setelah pembuatan simulasi pada program delphi, maka tahap berikutnya adalah tahap pengujian dan penalaan parameter kontrol P, D, dan PD. Pada tahap pengujian ini, peneliti menguji sistem dengan cara mensimulasikan sistem permukaan cairan sebelum diberikan pengontrol (*open loop*), Untuk mengetahui hasil respon transien sistem sebelum diberi kontrol.

Setelah tahu respon transien sistem permukaan cairan yang telah dibuat, maka tahap berikutnya adalah tahap penalaan parameter kontrol P, D dan PD. Pada tahap ini peneliti menggunakan metode kurva reaksi dalam metode Zigler-Nichols. Penggunaan metode ini dimaksudkan untuk mempermudah peneliti dalam penalaan parameter.

Tahap Analisis

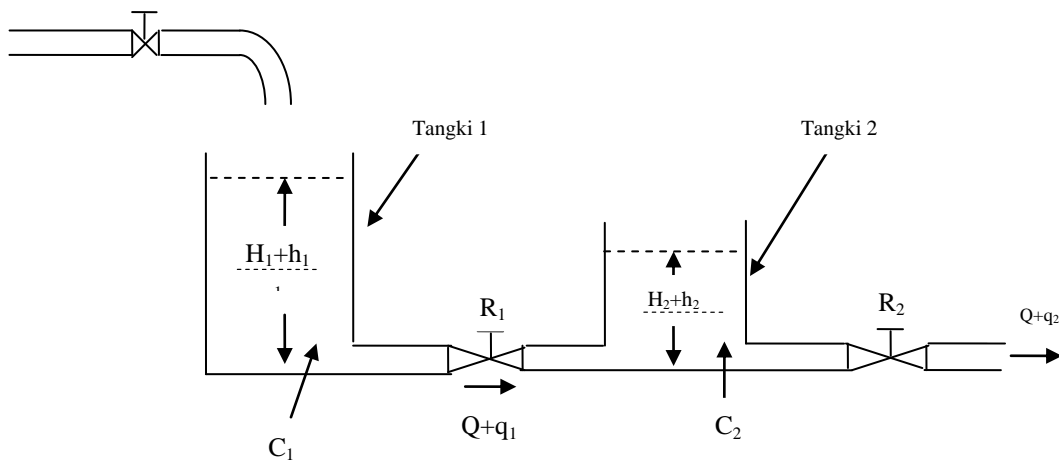
Analisis respon sistem meliputi tingkat kecepatan respon transien untuk mencapai keadaan tunak, lonjakan (*overshoot*) terhadap perubahan sinyal rujukan, kinerja peredaman gangguan dan variasi parameter sistem atau perubahan kondisi lingkungan operasi. Langkah selanjutnya, hasil analisis tersebut dibahas berdasarkan karakteristik-karakteristik yang ada untuk kemudian ditarik suatu kesimpulan.

D. HASIL DAN PEMBAHASAN

Pemodelan

Pengaturan Fisik

Plant dalam sistem ini adalah dua buah tangki yang saling berinteraksi, seperti ditunjukkan pada gambar 4.1



Gambar 4.1 sistem permukaan cairan dengan interaksi

Dimana :

- Q = laju keadaan tunak (sebelum ada perubahan), (m/s)
- q = Penyimpangan kecil laju aliran masuk pada keadaan tunak, (m/s)
- q_1 = Penyimpangan kecil laju aliran keluar tangki 1 keadaan tunak, (m/s)
- q_2 = Penyimpangan kecil laju aliran keluar tangki 2 keadaan tunak, (m/s)
- H = Tinggi permukaan zat cair pada keadaan tunak, (m)
- h = Penyimpangan kecil permukaan zat cair pada keadaan tunak, (m)
- R = Resistensi, (s/m²)
- C = Kapasitansi, (m²)

Persamaan Sistem

Berdasarkan gambar 4.1, maka persamaan sistem fisis dapat diturunkan sebagai berikut :

$$\frac{h_1 - h_2}{R_1} = q_1 \quad (4.1)$$

$$C_1 \frac{dh_1}{dt} = q - q_1 \quad (4.2)$$

$$\frac{h_2}{R_2} = q_2 \quad (4.3)$$

$$C_2 \frac{dh_2}{dt} = q_1 - q_2 \quad (4.4)$$

Substitusi persamaan 4.1 kedalam persamaan 4.2, maka diperoleh

$$C_1 \frac{dh_1}{dt} = q - \frac{h_1 - h_2}{R_1}$$

$$C_1 \frac{dh_1}{dt} = \frac{qR_1 - (h_1 - h_2)}{R_1}$$

$$C_1 R_1 \frac{dh_1}{dt} = qR_1 - (h_1 - h_2)$$

$$C_1 R_1 \frac{dh_1}{dt} + h_1 = qR_1 + h_2 \quad (4.5)$$

Substitusi persamaan 4.3 kedalam persamaan 4.4, maka diperoleh

$$C_2 \frac{dh_2}{dt} = q_1 - \frac{h_2}{R_2}$$

$$C_2 \frac{dh_2}{dt} = \frac{q_1 R_2 - h_2}{R_2}$$

$$C_2 R_2 \frac{dh_2}{dt} = q_1 R_2 - h_2$$

$$C_2 R_2 \frac{dh_2}{dt} + h_2 = q_1 R_2 \quad (4.6)$$

Fungsi Alih Sistem

Dengan menggunakan transformasi laplace persamaan 4.5 maka dapat diekspresikan dalam suku s (domain frekuensi)

$$LC_1 R_1 \frac{dh_1}{dt} + Lh_1 = LqR_1 + Lh_2$$

$$C_1 R_1 s H_1(s) + H_1 s = R_1 Qs + H_2 s$$

$$(C_1 R_1 s + 1) H_1 s = R_1 Q(s) + H_2 s \quad (4.7)$$

$$H_1 s = \frac{R_1 Qs + H_2 s}{C_1 R_1 s + 1} \quad (4.8)$$

Dengan menggunakan transformasi laplace persamaan 4.6 maka dapat diekspresikan dalam suku s

$$LC_2 R_2 \frac{dh_2}{dt} + Lh_2 = Lq_1 R_2$$

$$C_2 R_2 s H_2 s + H_2 s = R_2 Q_1 s \quad (4.9)$$

Dengan mensubstitusi persamaan 4.1 kedalam persamaan 4.9 maka diperoleh

$$C_2 R_2 s H_2 s + H_2 s = R_2 \left(\frac{H_1 s - H_2 s}{R_1} \right)$$

$$\begin{aligned}
 (C_2 R_2 s + 1)H_2 s R_1 &= R_2 (H_1 s - H_2 s) \\
 (C_2 R_2 s + 1)H_2 s R_1 + H_2 s R_2 &= H_1 s R_2 \quad (4.10)
 \end{aligned}$$

Substitusi persamaan 4.8 kedalam persamaan 4.10

$$\begin{aligned}
 (C_2 R_2 s + 1)H_2 s R_1 + H_2 s R_2 &= R_2 \left(\frac{R_1 Q s + H_2 s}{C_1 R_1 s + 1} \right) \\
 ((C_2 R_2 s + 1)H_2 s R_1 + H_2 s R_2)C_1 R_1 s + 1 &= R_2 (R_1 Q s + H_2 s) \\
 ((C_2 R_2 s H_2 s R_1) + (H_2 s R_1) + H_2 s R_2)C_1 R_1 s + 1 &= R_2 (R_1 Q s + H_2 s) \\
 C_1 R_1 s H_2 s R_1 C_2 R_2 s + C_1 R_1 s H_2 s R_1 + C_1 R_1 s H_2 s R_2 + C_2 R_2 s H_2 s R_1 + \\
 H_2 s R_1 + H_2 s R_2 &= R_2 (R_1 Q s + H_2 s) \\
 C_1 R_1 s H_2 s R_1 C_2 R_2 s + C_1 R_1 s H_2 s R_1 + C_1 R_1 s H_2 s R_2 + C_2 R_2 s H_2 s R_1 + \\
 H_2 s R_1 + H_2 s R_2 - H_2 s R_2 &= R_2 (R_1 Q s)
 \end{aligned}$$

Jika dikalikan $\frac{1}{R_1}$, maka menjadi

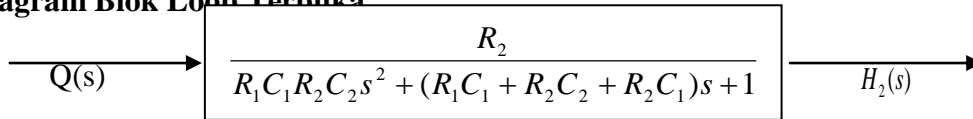
$$\begin{aligned}
 C_1 R_1 s H_2 s C_2 R_2 s + C_1 R_1 s H_2 s + C_1 R_2 s H_2 s + C_2 R_2 s H_2 s + H_2 s &= R_2 Q s \\
 (C_1 R_1 C_2 R_2 s^2 + (C_1 R_1 + C_1 R_2 + C_2 R_2)s + 1)H_2 s &= R_2 Q s
 \end{aligned}$$

Jika $H_2(s)$ dianggap sebagai keluaran dan Qs sebagai masukan maka fungsi alih sistem tangki air dengan interaksi menjadi :

$$\frac{H_2(s)}{Q(s)} = \frac{R_2}{(C_1 R_1 C_2 R_2 s^2 + (C_1 R_1 + C_1 R_2 + C_2 R_2)s + 1)} \quad (4.11)$$

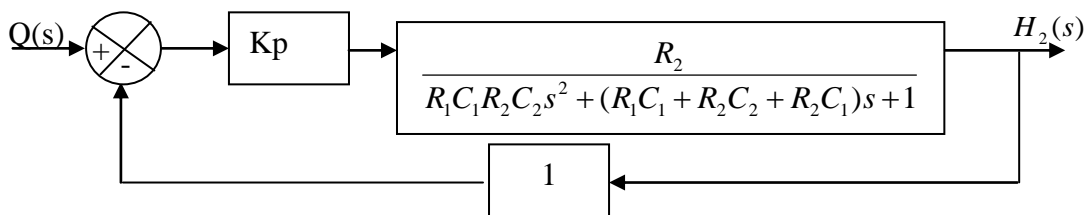
Diagram Blok Loop Terbuka Dan Loop Tertutup

Diagram Blok Loop Terbuka

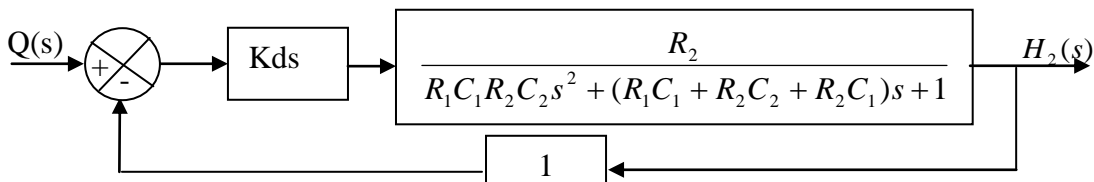


Gambar 4.2 Diagram Blok sistem Loop Terbuka

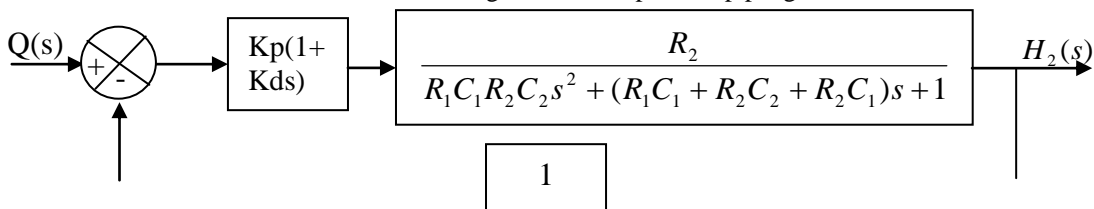
Diagram Blok Loop Tertutup



Gambar 4.3 Diagram blok loop tertutup pengontrol P



Gambar 4.4. Diagram blok loop tertutup pengontrol D





Gambar 4.5. diagram blok loop tertutup pengontrol P.D

Keterangan : Kp, Kds, Kp(1+Kds) adalah pengontrol

$H_2(s)$ adalah keluaran dan $Q(s)$ adalah masukan

$$\frac{R_2}{R_1C_1R_2C_2s^2 + (R_1C_1 + R_2C_2 + R_2C_1)s + 1} \text{ adalah plant}$$

Transformasi Laplace Balik Dan Representasi Program Delphi Loop Terbuka (*Open Loop*)

Dalam domain waktu (fungsi t), solusi dapat diperoleh melalui transformasi laplace balik (*invers laplace*) yaitu dengan menggunakan tabel transformasi. Untuk tujuan ini penyebut dalam persamaan 4.12 dapat diuraikan dalam akar-akarnya.

Dengan memisalkan $R_1C_1 R_2C_2 = A$, dan $(R_1C_1 + R_2C_2 + R_2C_1) = B$, Maka persamaan 4.11 menjadi

$$H_2(s) = \frac{R_2}{As^2 + Bs + 1} \quad (4.12)$$

Dengan menggunakan rumus ABC, maka akar-akar dari persamaan 4.12 dapat diperoleh sebagai berikut :

$$X_1 = \frac{-B - \sqrt{B^2 - 4A}}{2A}, \quad \text{dan} \quad X_2 = \frac{-B + \sqrt{B^2 - 4A}}{2A}$$

sehingga

$$H_2(s) = \frac{a}{\left(s - \left(\frac{-B - \sqrt{B^2 - 4A}}{2A} \right) \right)} + \frac{b}{\left(s - \left(\frac{-B + \sqrt{B^2 - 4A}}{2A} \right) \right)}$$

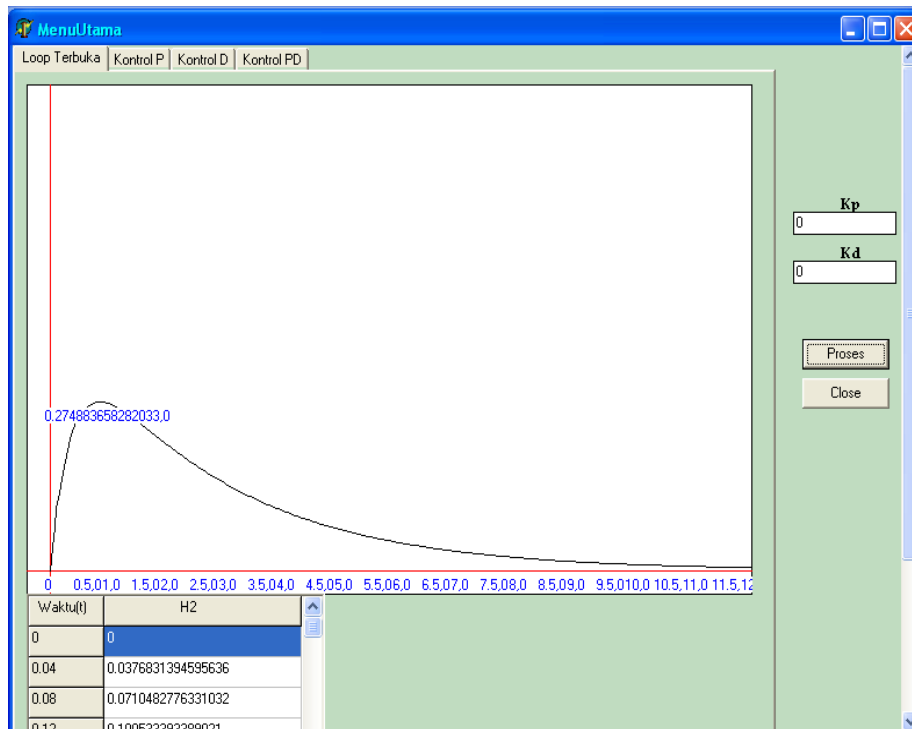
Dimana a dan b merupakan bilangan-bilangan konstan yang akan ditentukan dari pengubahan bentuk

$$H_2s = \frac{R_2}{\left(s - \left(\frac{-B - \sqrt{B^2 - 4A}}{2A} \right) \right) \left(s - \left(\frac{-B + \sqrt{B^2 - 4A}}{2A} \right) \right)} \quad (4.13)$$

Dengan membandingkan bentuk persamaan 4.13 terhadap tabel transformasi laplace, maka dapat ditentukan fungsi alih sistem dalam domain waktu ($h_2(t)$), yaitu :

$$h_2(t) = \frac{R_2}{\left(\left(\frac{-B + \sqrt{B^2 - 4A}}{2A} \right) \right) - \left(\left(\frac{-B - \sqrt{B^2 - 4A}}{2A} \right) \right)} e^{\left(\frac{-B + \sqrt{B^2 - 4A}}{2A} \right) t} - e^{\left(\frac{-B - \sqrt{B^2 - 4A}}{2A} \right) t} \quad (4.14)$$

Dengan meletakkan persamaan 4.14 kedalam program Delphi, diperoleh hasil grafik respon transient *open loop*(loop terbuka) seperti tertera pada gambar 4.6.



Gambar 4.6. Grafik respon transient *open loop* (loop terbuka)

Respon transient *open loop* (loop terbuka) pada sistem dua tangki air yang berinteraksi menunjukkan bahwa tangki ini masih kurang sempurna, hal ini dikarenakan pada sistem ini masih membutuhkan waktu penetapan (*settling time*) yang lama untuk mencapai keadaan tunak atau stabil, yaitu 14,5 s. Dan memiliki *overshoot* yang besar 0.27 seperti terlihat pada gambar 4.6, sehingga sistem ini kurang praktis. Desain yang diinginkan adalah ketika air mengalir dari kran, tangki air harus berkombinasi secepat mungkin dan sistem mencapai keadaan tunak atau kestabilan dengan waktu yang cepat. Oleh karena itu perlu adanya pengontrol yang sesuai untuk mengontrol sistem tersebut, sehingga tinggi permukaan air dapat konstan dan seimbang dengan *overshoot* sekecil mungkin.

Loop Tertutup Dengan Kontrol Proporsional

Dengan memasukkan persamaan 2.9 (persamaan kontrol P) pada persamaan 4.11 (persamaan fungsi alih *open loop*) maka dapat diperoleh rumus baru loop tertutup dengan kontrol proporsional sebagai berikut:

$$H_2(s) = \frac{R_2 K_p}{R_1 C_1 R_2 C_2 s^2 + (R_1 C_1 + R_2 C_2 + R_2 C_1) s + (1 + R_2 K_p)}$$

Dengan memisalkan $R_2 K_p = k$, $R_1 C_1 R_2 C_2 = A$, dan $(R_1 C_1 + R_2 C_2 + R_2 C_1) = B$, Maka,

$$H_2(s) = \frac{k}{As^2 + Bs + 1 + k} \quad (4.15)$$

Dengan menggunakan rumus ABC, maka dapat diperoleh akar-akar dari persamaan 4.15, sebagai berikut :

$$X_1 = \frac{-B - \sqrt{B^2 - 4A(1+k)}}{2A}, \quad \text{dan} \quad X_2 = \frac{-B + \sqrt{B^2 - 4A(1+k)}}{2A}$$

Sehingga,

$$H_2(s) = \frac{a}{\left(s - \left(\frac{-B - \sqrt{B^2 - 4A(1+k)}}{2A} \right) \right)} + \frac{b}{\left(s - \left(\frac{-B + \sqrt{B^2 - 4A(1+k)}}{2A} \right) \right)}$$

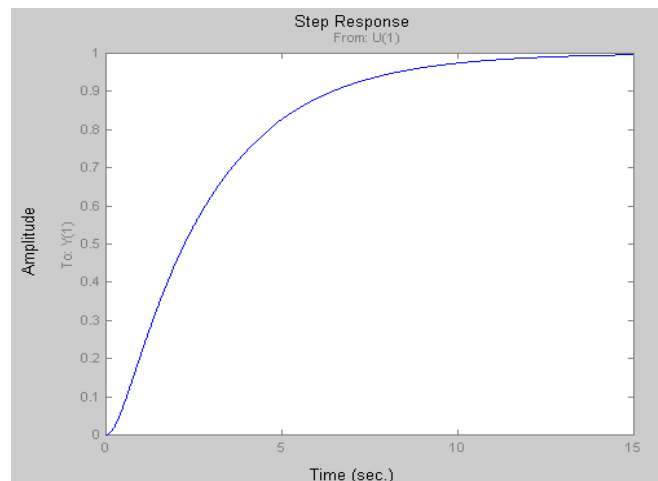
Dimana a dan b merupakan bilangan-bilangan konstan yang akan ditentukan dari pengubahan bentuk

$$H_2(s) = \frac{k}{\left(s - \left(\frac{-B - \sqrt{B^2 - 4A(1+k)}}{2A} \right) \right) \left(s - \left(\frac{-B + \sqrt{B^2 - 4A(1+k)}}{2A} \right) \right)} \quad (4.16)$$

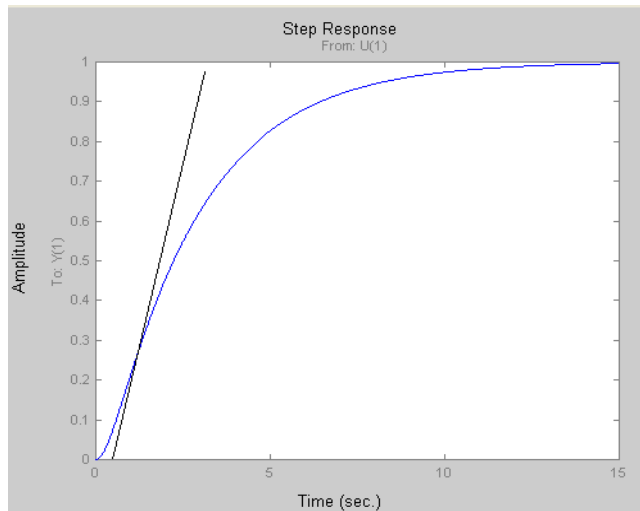
Dengan membandingkan bentuk persamaan 4.16 terhadap tabel transformasi laplace, maka dapat ditentukan fungsi alih sistem dengan pengontrol proporsional (P) dalam domain waktu ($h_2(t)$), yaitu :

$$h_2(t) = \frac{k}{\left(\left(\frac{-B + \sqrt{B^2 - 4A(1+k)}}{2A} \right) \right) - \left(\left(\frac{-B - \sqrt{B^2 - 4A(1+k)}}{2A} \right) \right)} e^{\left(\frac{-B + \sqrt{B^2 - 4A(1+k)}}{2A} \right) t} - e^{\left(\frac{-B - \sqrt{B^2 - 4A(1+k)}}{2A} \right) t} \quad (4.17)$$

Representasi dengan program delphi kontrol P dapat diperoleh dengan memasukkan persamaan 4.17 kedalam program. Sedangkan Penalaan parameter dilakukan dengan menggunakan metode kurva reaksi dalam metode Ziegler-Nichols, hal ini dimaksudkan agar mempermudah dalam penalaan. Pada penalaan dengan metode ini, mula-mula sistem disimulasikan dengan loop terbuka, untuk mengetahui hasil respon transient sistem. Simulasi loop terbuka sistem dua tangki yang saling berinteraksi menghasilkan respon transien berbentuk kurva S, seperti terlihat pada gambar 4.7



Gambar 4.7 Respon transient loop terbuka (simulasi dengan program matlab)



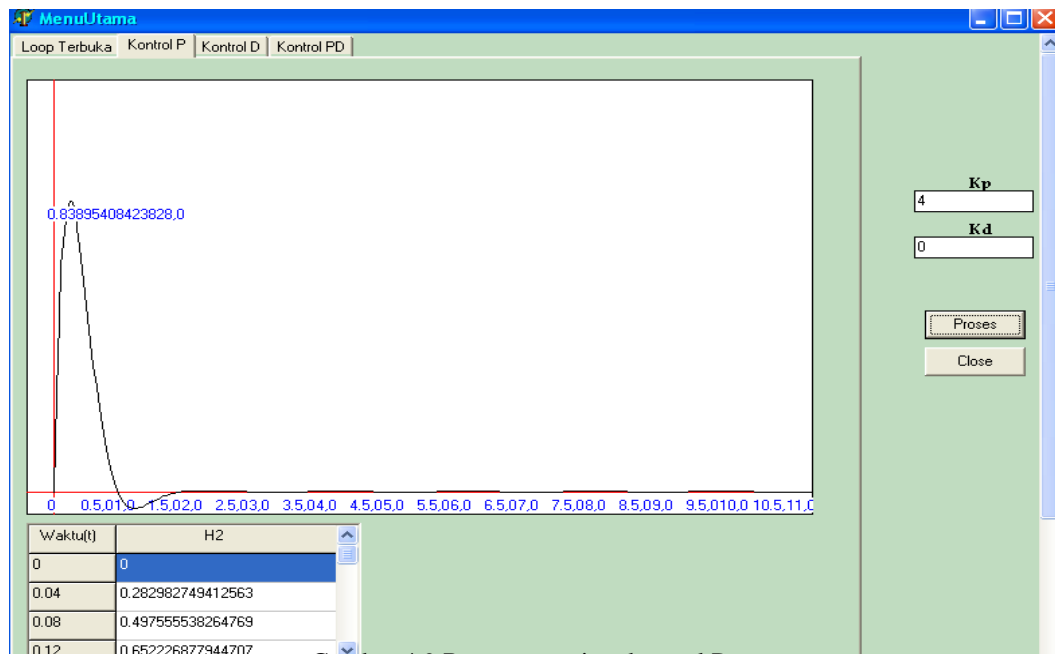
Gambar 4.8 Penentuan nilai konstanta waktu tunda (L) dan Konstanta Waktu (T)

Dengan menarik garis lurus pada titik perubahan kurva, maka di dapat nilai konstanta waktu tunda (L) sebesar 0,5 s dan konstanta waktu (T) sebesar 2,0s

Setelah mengetahui nilai konstanta waktu tunda dan konstanta waktu, maka penalaan nilai kontroler proporsional dengan menggunakan metode Ziegler-Nichols dapat ditentukan dengan menggunakan rumus pada tabel 2.1, sehingga diperoleh nilai kontroler proporsional sebagai berikut :

$$Kp = \frac{T}{L}, \quad Kp = \frac{2,0}{0,5}, \quad Kp = 4$$

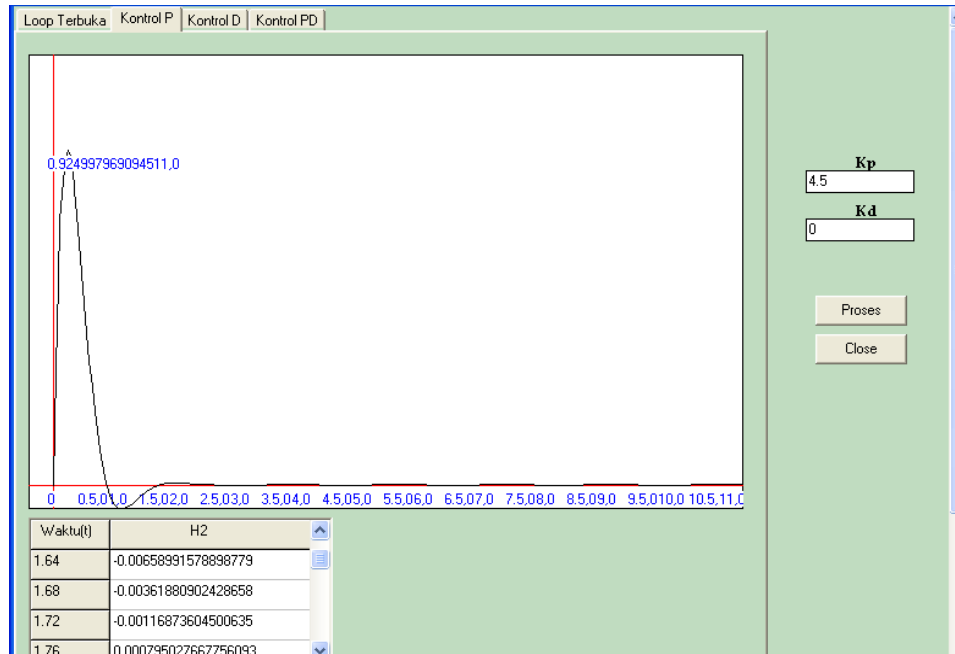
Dengan memasukkan nilai Kp yang diperoleh dengan menggunakan metode Ziegler-Nichols maka diperoleh respon transien sebagai berikut :



Gambar 4.9 Respon transien kontrol P

Berdasarkan gambar 4.9 diperoleh data yaitu *settling time* = 0,88s *overshoot* = 0,83 artinya bahwa ada perbaikan pada *settling time* (waktu penetapan), respon lebih cepat dari sebelumnya, akan tetapi respon transiennya menjadi lebih buruk dikarenakan overshootnya yang terlalu besar. Bila nilai Kp diperbesar (lebih dari 4) maka akan terjadi lonjakan overshoot yang lebih tinggi dan mengalami osilasi. Terjadinya osilasi akan mengakibatkan *settling time* yang lebih lama. sebagai pembandingan, untuk Kp = 4,5 diperoleh grafik seperti

pada gambar 4.10. Sebaliknya jika nilai K_p diperkecil (kurang dari 4) menyebabkan *overshoot* yang tidak terlalu besar dan tidak terjadi osilasi serta mengakibatkan *settling time* yang lebih lama. Kontrol proporsional bekerja dengan cara mengalikan antara konstanta proporsional dengan masukannya. Data hasil percobaan dengan menggunakan K_p 1 sampai 4,5 dapat dilihat pada halaman lampiran.



Gambar 4.10 hasil respon transien dengan menggunakan K_p 4,5

Loop Tertutup Dengan Kontrol Derivatif

Dengan memasukkan persamaan 2.10 (persamaan kontrol derivatif) pada persamaan 4.11, maka dapat diperoleh rumus baru loop tertutup dengan kontrol derivatif, yaitu:

$$H_2(s) = \frac{R_2 k d s}{R_1 C_1 R_2 C_2 S^2 + (R_1 C_1 + R_2 C_2 + R_2 C_1) s + 1 + R_2 k d s}$$

Dengan memisalkan $R_2 k d = L$, $R_1 C_1 R_2 C_2 = A$, dan $(R_1 C_1 + R_2 C_2 + R_2 C_1) = B$,

$$H_2(s) = \frac{L s}{A s^2 + (B + L) s + 1} \quad (4.18)$$

Dengan menggunakan rumus ABC, maka dapat diperoleh akar-akar dari persamaan 4.18, sebagai berikut :

$$X_1 = \frac{-(B + L) - \sqrt{(B + L)^2 - 4A}}{2A}, \text{ dan } X_2 = \frac{-(B + L) + \sqrt{(B + L)^2 - 4A}}{2A}$$

sehingga,

$$H_2(s) = \frac{a}{\left(s - \left(\frac{-(B + L) - \sqrt{(B + L)^2 - 4A}}{2A} \right) \right)} + \frac{b}{\left(s - \left(\frac{-(B + L) + \sqrt{(B + L)^2 - 4A}}{2A} \right) \right)}$$

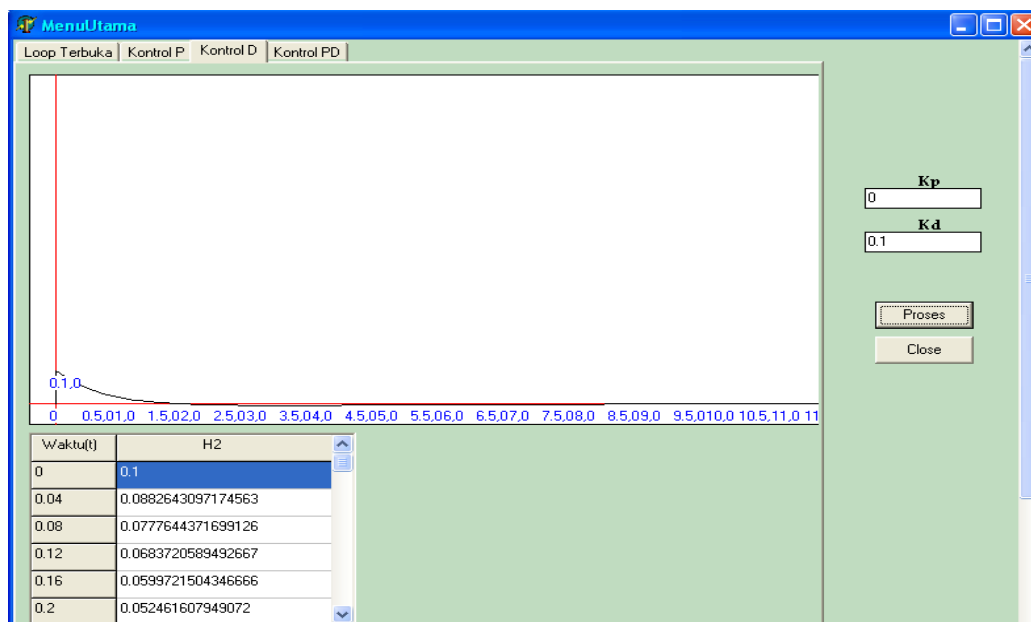
Dimana a dan b merupakan bilangan-bilangan konstan yang akan ditentukan dari perubahan bentuk

$$H_2(s) = \frac{Ls}{\left(s - \left(\frac{-(B+L) - \sqrt{(B+L)^2 - 4A}}{2A} \right) \right) \left(s - \left(\frac{-(B+L) + \sqrt{(B+L)^2 - 4A}}{2A} \right) \right)} \quad (4.19)$$

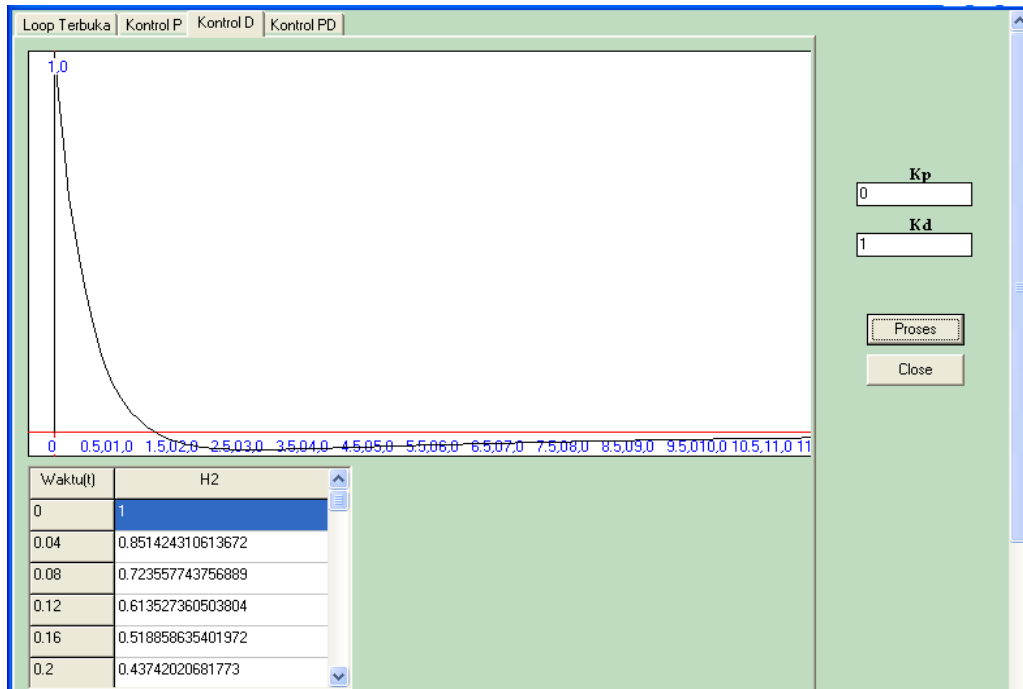
Dengan membandingkan bentuk persamaan 4.19 terhadap tabel transformasi laplace, maka dapat ditentukan fungsi alih sistem dengan pengontrol derivatif (D) dalam domain waktu ($h_2(t)$), yaitu :

$$h_2(t) = \frac{L}{\left(\left(\frac{-(B+L) + \sqrt{(B+L)^2 - 4A}}{2A} \right) \right) - \left(\left(\frac{-(B+L) - \sqrt{(B+L)^2 - 4A}}{2A} \right) \right)} \left(\left(\frac{-(B+L) + \sqrt{(B+L)^2 - 4A}}{2A} \right) e^{\left(\frac{-(B+L) + \sqrt{(B+L)^2 - 4A}}{2A} t \right)} - \left(\frac{-(B+L) - \sqrt{(B+L)^2 - 4A}}{2A} e^{\left(\frac{-(B+L) - \sqrt{(B+L)^2 - 4A}}{2A} t \right)} \right) \right) \quad (4.20)$$

Pada metode Ziegler-Nichols tidak menyediakan rumus penalaan jika hanya menggunakan kontroler derivatif oleh karena itu penalaan pada kontroler derivative ini menggunakan metode coba-coba. Metode penalaan ini dilakukan sampai 10 kali dengan nilai Kd 0,1 sampai 1,0 (pemberian nilai Kd dari 0,1 - 1,0 dikarenakan ada keterbatasan dari program delphi). Dari penalaan yang telah dilakukan nilai konstanta derivatif (Kd) yang menghasilkan respon transient paling tepat adalah 0,1. Hal ini dikarenakan dengan nilai Kd 0,1 menghasilkan respon transien yang menunjukkan *settling time* yang lebih cepat dari pada nilai Kd yang lain, serta *overshoot* yang lebih kecil dari pada nilai Kd yang lain. Sebagai pembanding, untuk nilai Kd 1,0 diperoleh kurva hasil respon transient seperti gambar 4.12. Data hasil penalaan kontroler derivatif (D) dapat dilihat pada halaman lampiran. Dengan memasukkan persamaan 4.20 kedalam program Delphi dan memberikan nilai Kd, maka Grafik respon transient dengan kontroler derivatif dapat dilihat pada gambar 4.11



Gambar 4.11 hasil respon transient dengan Kd=0,1



Gambar 4.12 hasil respon transient dengan Kd=1,0

Berdasarkan gambar diatas, maka dapat diperoleh data yaitu *settling time* (waktu penetapan) sebesar 0,24s dan *overshoot* sebesar 0.1 artinya bahwa ada perbaikan respon transient dari yang sebelumnya terbukti dengan adanya *settling time* yang lebih cepat dan *overshoot* yang tereduksi. Kontrol derivatif bekerja dengan cara mendefferensialkan nilai konstanta derivatif yang kemudian dikalikan dengan masukannya.

Loop Tertutup Dengan Kontrol Proporsional dan Derivatif

Kontrol PD merupakan perpaduan antara pengontrol proporsional dengan pengontrol derivatif. Dengan memasukkan persamaan 2.11 kedalam persamaan 4.11 maka akan diperoleh rumus baru yang merupakan fungsi alih sistem tangki air dengan menggunakan perpaduan pengontrol proporsional dan derivatif.

$$H_2(s) = \frac{R_2kp + R_2kpkds}{R_1C_1R_2C_2S^2 + (R_1C_1 + R_2C_2 + R_2C_1)s + 1 + R_2kp + R_2kpkds}$$

Dengan memisalkan $R_2kp = O1$ dan $R_2KpKd = O2$, $R_1C_1 R_2C_2 = A$, dan $(R_1C_1 + R_2C_2 + R_2C_1) = B$, Maka,

$$H_2(s) = \frac{O1 + O2s}{As^2 + (B + O2)s + (1 + O1)} \quad (4.21)$$

Dengan menggunakan rumus ABC, maka dapat diperoleh akar-akar dari persamaan 4.21, sebagai berikut :

$$X_1 = \frac{-(B + O2) - \sqrt{(B + O2)^2 - 4A(1 + O1)}}{2A}, \text{ dan}$$

$$X_2 = \frac{-(B + O2) + \sqrt{(B + O2)^2 - 4A(1 + O1)}}{2A}, \text{ sehingga}$$

$$H_2(s) = \frac{O1}{\left(s - \left(\frac{-(B+O2) - \sqrt{(B+O2)^2 - 4A(1+O1)}}{2A} \right) \right) \left(s - \left(\frac{-(B+O2) + \sqrt{(B+O2)^2 - 4A(1+O1)}}{2A} \right) \right)} + \quad (4.22)$$

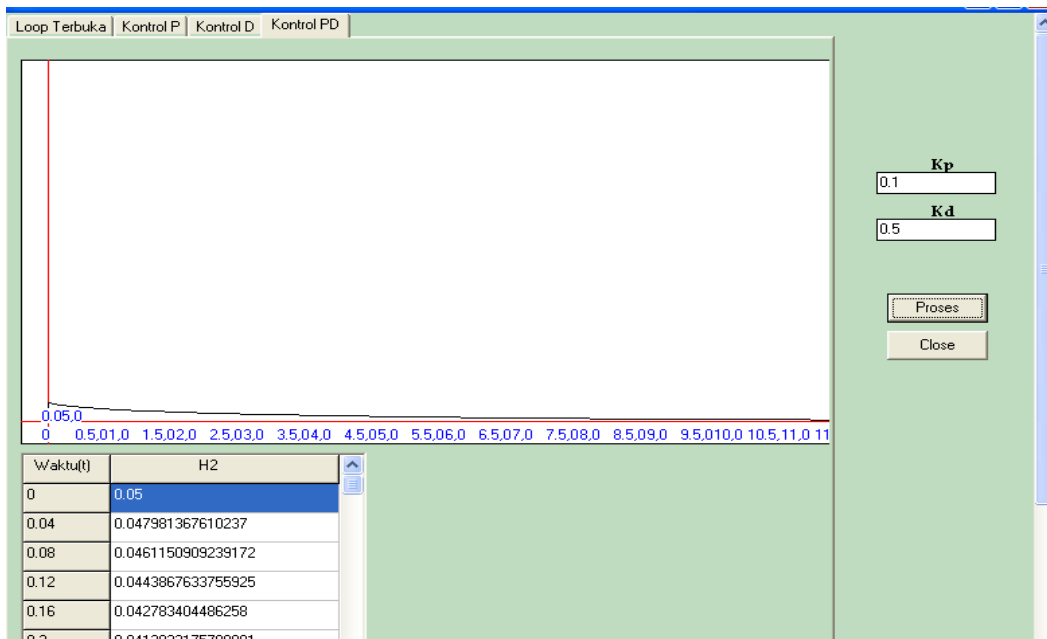
$$\frac{O2s}{\left(s - \left(\frac{-(B+O2) - \sqrt{(B+O2)^2 - 4A(1+O1)}}{2A} \right) \right) \left(s - \left(\frac{-(B+O2) + \sqrt{(B+O2)^2 - 4A(1+O1)}}{2A} \right) \right)}$$

Dengan membandingkan bentuk persamaan 4.22 terhadap tabel transformasi laplace, maka dapat ditentukan fungsi alih sistem perpaduan antara pengontrol proporsional (P) dan derivatif (D) dalam domain waktu ($h_2(t)$), yaitu :

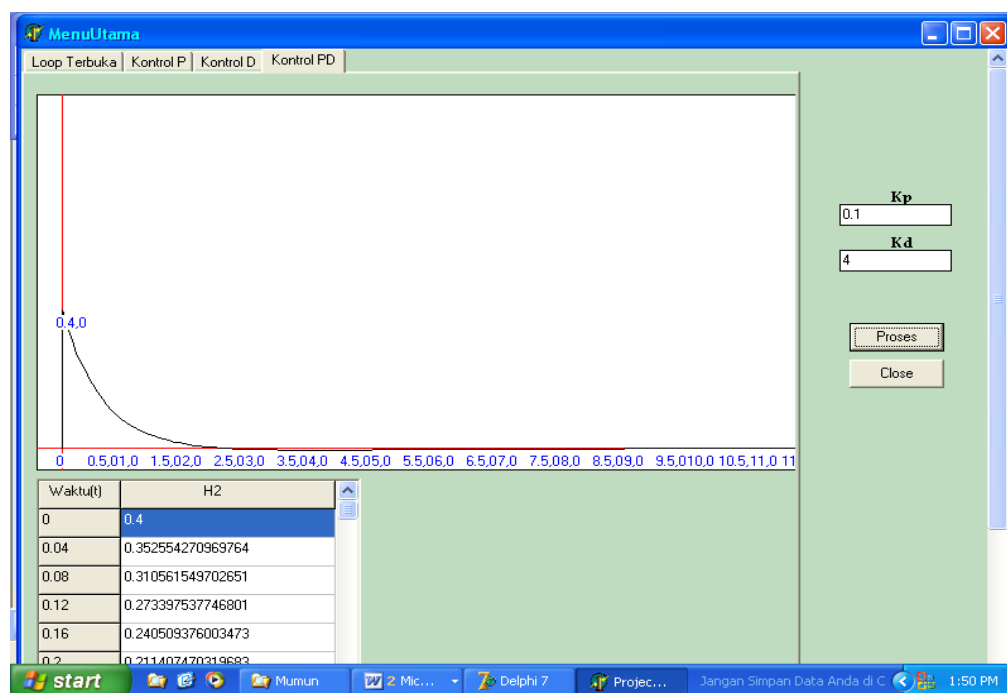
$$h_2(t) = \frac{O1}{\left(\frac{-(B+O2) + \sqrt{(B+O2)^2 - 4A(1+O1)}}{2A} \right) - \left(\frac{-(B+O2) - \sqrt{(B+O2)^2 - 4A(1+O1)}}{2A} \right)} + e^{\left(\frac{-(B+O2) + \sqrt{(B+O2)^2 - 4A(1+O1)}}{2A} \right)t} - e^{\left(\frac{-(B+O2) - \sqrt{(B+O2)^2 - 4A(1+O1)}}{2A} \right)t} + \frac{O2}{\left(\frac{-(B+O2) + \sqrt{(B+O2)^2 - 4A(1+O1)}}{2A} \right) - \left(\frac{-(B+O2) - \sqrt{(B+O2)^2 - 4A(1+O1)}}{2A} \right)} - \left(\frac{-(B+O2) + \sqrt{(B+O2)^2 - 4A(1+O1)}}{2A} \right) e^{\left(\frac{-(B+O2) + \sqrt{(B+O2)^2 - 4A(1+O1)}}{2A} \right)t} - \left(\frac{-(B+O2) - \sqrt{(B+O2)^2 - 4A(1+O1)}}{2A} \right) e^{\left(\frac{-(B+O2) - \sqrt{(B+O2)^2 - 4A(1+O1)}}{2A} \right)t} \quad (4.23)$$

Pengujian berikutnya adalah dengan menggabungkan antara pengontrol Proporsional (P) dan Derivative (D). penggabungan ini diharapkan dapat memberikan respon transient yang lebih baik dari yang sebelumnya. Penalaan pengontrol PD dilakukan dengan metode coba-coba dikarenakan pada metode Ziegler Nichol tidak tersedia rumus penalaan jika menggunakan pengontrol PD. Metode penalaan dilakukan dengan cara memberikan nilai $K_p = 0,1$ dan $K_d = 0,5$ sampai $K_d=4$. dari penalaan yang telah dilakukan sebanyak 10 kali, diperoleh nilai K_p dan K_d yang tepat untuk menghasilkan respon transient paling bagus adalah pada $K_p=0,1$ dan $K_d=0,5$ (Sebagai pembandingan pada penalaan $K_p = 0,1$ dan $K_d = 4$ diperoleh hasil respon transien seperti pada gambar 4.14). Hal ini dikarenakan respon transient yang dihasilkan menunjukkan overshoot yang tereduksi dan waktu penetapan (settling time) yang cepat untuk mencapai keadaan tunak. Data hasil penalaan kontroler Proporsional Derivative (PD) dapat dilihat pada halaman lampiran.

Dengan memasukkan persamaan 4.23 kedalam program Delphi dan memberikan nilai $K_p=0,1$ dan nilai K_d dari 0,5 maka diperoleh grafik respon transient dengan kontrol PD seperti terlihat pada gambar 4.13.



Gambar 4.13 Respon transient kontrol PD ($K_p=0,1$ dan $K_d=0,5$)



Gambar 4.14 Respon transient kontrol PD ($K_p=0,1$ dan $K_d=4$)

Berdasarkan gambar di atas diperoleh data yaitu *settling time* = 0,12s dan *overshoot* = 0,05 artinya bahwa penggabungan dari dua pengontrol jenis Proporsional dan Derivative menghasilkan respon transient lebih baik dari pada yang sebelumnya. Hal ini dibuktikan dengan adanya *settling time* yang lebih cepat dan *overshoot* yang kecil.

Pembahasan (Analisis Respon Transien)

Berdasarkan gambar 4.6 dapat diketahui bahwa, pada saat sistem tangki air tidak diberikan pengontrol (*open loop*) menghasilkan respon transient yang tidak bagus. Hal ini terbukti dengan adanya *settling time* yang luas (untuk mencapai keadaan tunak (*steady state*) dibutuhkan waktu yang sangat lama yaitu sekitar 14,5 s). Selain itu sistem tangki air tanpa pengontrol (*open loop*) ini memiliki *overshoot* yang besar pula. Jadi

sistem tangki air tanpa pengontrol (*open loop*) ini bisa dikatakan kurang praktis dikarenakan hasil respon transien yang kurang bagus.

Untuk memperbaiki respon transien sistem maka perlu adanya suatu pengontrol. Pada pengujian pertama diberikan pengontrol proporsional (P), yang mana pengontrol jenis ini memiliki beberapa kriteria diantaranya jika nilai konstanta proporsional (K_p) kecil, maka usaha koreksi yang dilakukan oleh pengontrol juga kecil sehingga tanggapannya menjadi lambat dan makin besar nilai K_p maka tanggapan yang dihasilkan semakin cepat. Akan tetapi jika nilai K_p yang diberikan terlalu besar, maka akan menghasilkan tanggapan yang berisitasi. Pemberian nilai konstanta K_p didasarkan pada metode Ziegler-Nichols. Dengan menggunakan metode ini didapat nilai K_p sebesar 4. Respon transien dengan nilai $K_p = 4$ dapat dilihat pada gambar 4.9. dari gambar 4.9 dapat diketahui bahwa sudah ada perbaikan respon transien dari yang sebelumnya, terbukti dengan adanya *settling time* yang lebih cepat dari pada sebelumnya. Hal ini dikarenakan kontrol proporsional bekerja dengan cara mengalikan antara konstanta proporsional dengan masukannya. Akan tetapi respon transien yang dihasilkan tidak terlalu bagus dikarenakan adanya lonjakan overshoot hingga 0,88. *Settling time* yang cepat diakibatkan adanya penambahan nilai K_p yang besar, karena semakin besar nilai K_p akan menghasilkan tanggapan yang cepat. Disisi lain, penambahan nilai K_p akan mengakibatkan adanya lonjakan overshoot dan juga osilasi. Oleh karena itu pemberian nilai K_p harus sesuai. Sistem ini masih kurang sempurna dan kurang memuaskan dikarenakan sistem ini masih membutuhkan *settling time* yang agak lama untuk mencapai keadaan tunak dan juga overshoot yang tinggi.

Pada pengujian berikutnya sistem diberikan pengontrol derivatif. Pengontrol jenis ini biasanya dimanfaatkan untuk mereduksi *overshoot* dan mempercepat tanggapan awal serta tidak memperkecil kesalahan pada keadaan tunak. Penalaan kontrol derivatif dilakukan dengan menggunakan metode coba-coba, setelah melakukan beberapa kali penalaan maka diperoleh nilai konstanta derivatif (K_d) sebesar 0,1. Hasil respon transien dengan pengontrol derivatif dapat dilihat pada gambar 4.11. Berdasarkan gambar tersebut dapat diketahui bahwa hasil respon transien antara pengontrol proporsional dan derivatif sangat berbeda. Hasil respon transien pada pengontrol derivatif menunjukkan bahwa waktu yang dibutuhkan sistem untuk mencapai keadaan tunak semakin cepat yaitu 0,24s, demikian juga *overshoot*, sudah mulai tereduksi hingga 0,1. Adanya *settling time* yang cepat disebabkan karena adanya penambahan kontrol derivatif, hal ini dikarenakan kontrol derivatif bekerja dengan cara mendiferensialkan konstanta derivatif yang kemudian dikalikan dengan masukannya. Selain itu responnya terhadap laju perubahan kesalahan menghasilkan koreksi yang berarti sebelum kesalahan tersebut bertambah besar, sehingga menghasilkan tindakan pengontrol yang cepat.

Pada pengujian berikutnya adalah dengan menggabungkan antara pengontrol proporsional dan derivatif. Dengan memberikan nilai K_p sebesar 0,1 dan K_d sebesar 0,5 maka didapat respon transien seperti tertera pada gambar 4.13. Dari gambar tersebut dapat diketahui bahwa respon transien yang dihasilkan bagus dengan *settling time* = 0,12 dan *overshoot* = 0,05. Artinya, waktu yang dibutuhkan untuk mencapai keadaan tunak lebih cepat dari kedua pengontrol sebelumnya, selain itu *overshoot* yang dimiliki lebih kecil dari yang sebelumnya (*overshoot* tereduksi). Pada kontroler PD, kontrol proporsional bekerja dengan cara mengalikan konstanta proporsional dengan masukannya, sedangkan kontrol derivatif bekerja dengan cara mendiferensialkan nilai konstanta derivatif yang kemudian dikalikan dengan masukannya, penggabungan kontroler P dan D merupakan penjumlahan dari keduanya (kontrol P dan kontrol D). Adanya pengontrol derivatif pada pengontrol PD memberikan efek menstabilkan sistem dengan cara memperbesar *phase lead* (fasa

mendahului) terhadap penguatan loop kontrol yaitu dengan mengurangi *phase lag* (keterlambatan fasa) penguatan tersebut serta dapat mereduksi overshoot yang terjadi. Dengan mengamati respon transien dari ketiga tipe pengontrol (P, D, PD) dapat disimpulkan bahwa dari ketiga pengontrol (P, D dan PD) yang menghasilkan respon transien paling baik adalah pengontrol PD dengan nilai $K_p=0,1$ dan $K_d=0,5$ karena memiliki respon transien yang bagus dengan *overshoot* paling kecil dan *settling time* paling cepat.

4. PENUTUP

Kesimpulan

- a. Langkah-langkah yang harus dilakukan dalam merancang simulasi sistem tangki air pada program Delphi dengan dinamika respon yang cepat dan overshoot sekecil mungkin antara lain : menentukan pengaturan fisik sistem tangki air, menentukan persamaan sistem tangki air, menentukan diagram blok sistem tangki air, menentukan fungsi alih sistem tangki air, dan menentukan laplace balik (*invers laplace*) sistem tangki air. Simulasi respon transien pada Delphi dibuat berdasarkan persamaan laplace balik (*invers laplace*) sistem tangki air.
- b. Dari beberapa pengujian (penalaan berdasarkan metode Ziegler-Nichols) didapatkan respon transien terbaik sistem diperoleh dengan pengontrol PD dengan nilai $K_p= 0,1$ dan $K_d=0,5$ yang menunjukkan tanggapan sistem mencapai kestabilan yaitu *settling time* sekitar 0,12 dan *overshoot* sebesar 0,05.

Saran

- a. Untuk memperbaiki respon transien sistem dapat dilakukan dengan menambahkan pengontrol integral sehingga menjadi PID
- b. Pemahaman suatu sistem kontrol dapat dikembangkan dengan menggunakan plant yang lain.
- c. Simulasi dapat dilakukan pada program yang lain (Java, Matlab dan lain-lain)

DAFTAR PUSTAKA

- Chairuzzani dan Rusli. 1998. *Pengenalan Metode Ziegler-Nichols Pada Perancangan Kontroler PID*. www.geocities.com/arest/corridor/3364/tutoeiz.
- Gunterus, Frans. 1994. *Falsafah Dasar Sistem Pengendalian Proses*. Jakarta : Elex Media komputindo
- Irnanan. 2005. *Memahami Pemrograman Delphi 7*. Jakarta : BSI Press
- Jayanto. 1999. *Belajar Sendiri Membuat Aplikasi Data Base Dengan Delphi*. Jakarta : Elex Media Komputindo
- Kasmoni. 2004. *Delphi 8.0 Untuk Orang Awam*. Palembang : Maxikom
- Kou, Benjamin.G. 1995. *Teknik Kontrol Automatik*. Alih bahasa : Mhd.Zulfan. Yogyakarta : PT. Aditya Media.
- Malik, Jaja Jamaluddin. 2006. *Kumpulan Latihan Pemrograman Delphi*. Yogyakarta : Andi
- Martina, Inge. 1999. *36 Jam Belajar Komputer Delphi 4.0*. Jakarta : PT. Elex Media Komputindo.
- Ogata, Katsuhiko. 1996. *Teknik Kontrol Automatik Jilid 1*. Jakarta : Erlangga
- Ogata, Katsuhiko. 1996. *Teknik Kontrol Automatik Jilid 2*. Jakarta : Erlangga
- Pakpahan,S. 1996. *Kontrol Otomatik Teori Dan Penerapan*. Jakarta : Erlangga
- Philips, Charles S dan Royce D. Harbor. 1998. *Sistem Kontrol*. Alih bahasa : Prof. R.J. Widodo. Jakarta : PT Prenhillindo.