

Perancangan dan Pembuatan *Plant Ball and Beam*

M. Muslim W, Mahasiswa TE Undip, Agung Warsito, Staf Pengajar TE Undip, Aris Triwiyatno, Staf Pengajar TE Undip

Abstrak – Sistem *ball and beam* adalah sebuah sistem dimana pada sistem tersebut terdapat bola yang dapat bergerak bebas pada sebuah batang dan posisi dari perpindahan bola tersebut dapat diatur secara otomatis sesuai dengan yang diinginkan. Sistem *ball and beam* merupakan sistem yang sangat penting dalam mempelajari sistem kontrol. Hal tersebut dikarenakan sistem *ball and beam* merupakan sistem yang tidak stabil dimana *output* dari sistem (posisi bola) selalu bertambah tanpa batas untuk setiap *input* (sudut batang) dengan nilai yang tetap. Oleh karena itu sistem *ball and beam* membutuhkan teori kontrol yang kompleks. Untuk dapat menstabilkan sistem *ball and beam* maka dibutuhkan suatu controller. Penggunaan controller tersebut dapat menarik *root locus* sistem *ball and beam* ke sebelah kiri sumbu imajiner ($j\omega$) pada bidang-s sehingga diperoleh sistem yang stabil.

Pada tugas akhir ini, dibuat *plant* sistem *ball and beam* yang kemudian *plant* tersebut akan digunakan sebagai sarana praktikum di Laboratorium Teknik Kontrol Otomatik Jurusan Teknik Elektro Universitas Diponegoro. *Plant ball and beam* tersebut dikendalikan secara *real time* dengan menggunakan bahasa pemrograman Delphi 6.

I. PENDAHULUAN

A. Latar Belakang.

Sesuai dengan perkembangan teknologi pada bidang sistem kontrol maka pada tema tugas akhir ini akan dilakukan perancangan dan pembuatan *plant ball and beam*. Sebagaimana yang telah diketahui bahwa untuk membeli suatu *plant ball and beam* dibutuhkan biaya yang sangat besar sehingga pada tugas akhir ini akan dirancang dan dibuat *plant ball and beam* yang kemudian *plant* tersebut akan dipergunakan sebagai sarana praktikum di Lab Teknik Kontrol Otomatik Jurusan Teknik Elektro Universitas Diponegoro.

Plant ball and beam adalah sebuah *plant* dimana pada *plant* tersebut terdapat bola yang dapat bergerak bebas dan posisi dari perpindahan bola tersebut dapat diatur sesuai dengan yang diinginkan.

Berdasarkan sifatnya, sebuah bola akan bergerak ke tempat yang lebih rendah apabila bola tersebut ditaruh pada tempat yang miring. Seperti yang telah diketahui, besar jarak perpindahan bola tersebut tidak dapat diprediksi seberapa jauh bola itu akan bergerak. Besar perpindahan letak bola tergantung dari besar kemiringan bidang tempat bola tersebut berada.

B. Pembatasan Masalah

Karena kompleksnya permasalahan yang terdapat dalam sistem ini, maka perlu adanya batasan-batasan untuk menyederhanakan permasalahan ini, yaitu :

1. Controller yang digunakan adalah controller PD.
2. Perhitungan *set point*, *error* posisi dan aksi controller PD yang berupa besar sudut batang yang

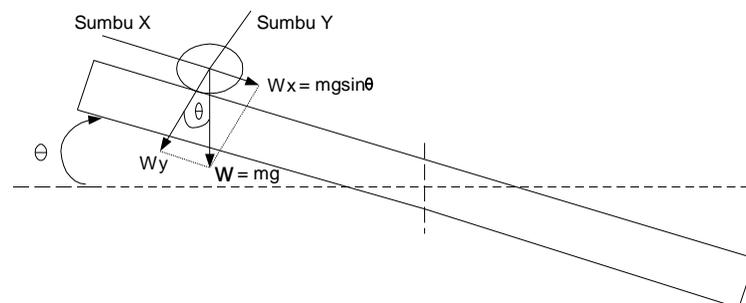
harus dicapai oleh *plant ball and beam* dilakukan dengan menggunakan komputer. Selain itu komputer juga berfungsi untuk mengambil dan menyimpan data perubahan posisi bola dan memberi perintah kepada motor untuk bergerak sesuai dengan besar sudut yang dihasilkan oleh controller PD.

3. Tidak melakukan identifikasi sistem.
4. Tidak melakukan analisa kestabilan atau optimasi dengan menggunakan indeks performansi tetapi hanya menggunakan analisis respon transien.
5. Sensor yang digunakan untuk menentukan seberapa jauh bola tersebut bergerak adalah kawat email yang dililitkan pada batang aluminium dengan panjang 40 cm dan diameter 0,5 cm.
6. Sensor yang digunakan untuk menentukan besar sudut batang adalah potensiometer linier 10 kohm.
7. Sebagai penghasil kemiringan batang digunakan motor servo.
8. Posisi yang diinginkan berjumlah 2 buah, yaitu posisi 1 (20 cm) dan posisi 2 (15 cm) dengan toleransi ± 1 cm.
9. Jika posisi yang diinginkan adalah posisi 1 maka pada saat pertama kali bola diletakkan pada posisi 2 dan jika posisi yang diinginkan adalah posisi 2 maka pada saat pertama kali bola diletakkan pada posisi 1.
10. Bahasa pemrograman yang digunakan adalah Delphi 6

II. DASAR TEORI

A. Sistem Ball and Beam

Sistem *ball and beam* adalah salah satu sistem yang sangat penting dalam mempelajari sistem kontrol. Pergerakan bola pada bidang miring yang merupakan model dari *ball and beam* [7] dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Model *Ball and Beam*

Pada sistem *ball and beam*, pergerakan bola dipengaruhi oleh besarnya gaya yang ditimbulkan oleh kemiringan batang tempat bola berada, dimana untuk memiringkan batang digunakan motor yang akan menggerakkan batang tersebut sesuai dengan posisi bola.

Dari Gambar 1 didapatkan persamaan dinamik dari pergeseran bola, yaitu Gaya = massa x percepatan [7].

$$mg \sin \theta = \left(m + \frac{j}{R^2} \right) r \dots\dots\dots (1)$$

dimana j adalah momen inersia dari bola yang persamaannya adalah:

$$j = \frac{2}{5} mR^2 \dots\dots\dots (2)$$

dengan mensubstitusi persamaan (1) dan (2) maka dapat diperoleh :

$$r = \frac{5}{7} g \sin \theta \dots\dots\dots (3)$$

jika θ sangat kecil maka $\sin \theta \cong \theta$ sehingga persamaan (3) berubah menjadi:

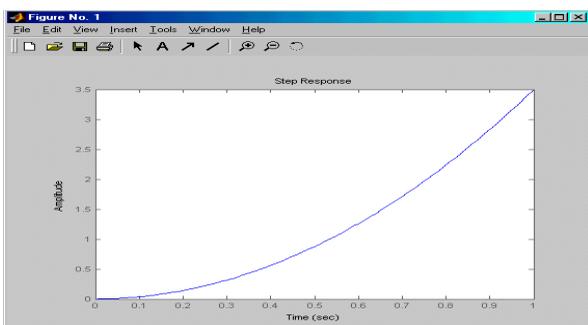
$$r = \frac{5}{7} g \theta \dots\dots\dots (4)$$

dengan menggunakan transformasi Laplace maka dari persamaan (4) didapat *transfer function* dari posisi bola R(s) terhadap sudut batang $\theta(s)$ [7] yaitu:

$$\frac{R(s)}{\theta(s)} = \frac{5g}{7} \cdot \frac{1}{s^2} = \frac{7}{s^2} \dots\dots\dots (5)$$

dimana $g = 9,8 \text{ m/s}^2$.

Dengan menggunakan *transfer function* pada persamaan (5) maka didapatkan respon *unit step* dari sistem *ball and beam open loop* seperti yang dapat dilihat pada Gambar 2.



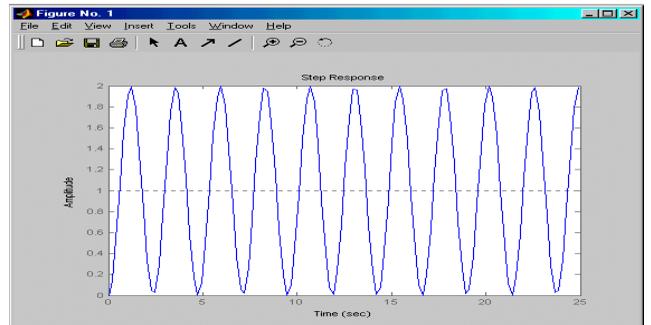
Gambar 2. Respon *Unit Step* Sistem *Ball and Beam Open Loop*.

Berdasarkan Gambar 2 maka dapat dilihat bahwa sistem *ball and beam open loop* menghasilkan keluaran yang selalu bertambah seiring dengan bertambahnya waktu dimana hal ini menunjukkan bahwa *ball and beam open loop* merupakan sistem yang tidak stabil.

Seperti halnya sistem *ball and beam open loop*, Sistem *ball and beam closed loop* juga merupakan sistem

yang tidak stabil. Hal tersebut dapat dilihat pada Gambar 3 dimana respon *unit step* dari sistem *ball and beam closed loop* selalu berosilasi (berubah-ubah) seiring bertambahnya waktu. *Transfer function* dari sistem *ball and beam closed loop* dapat dilihat pada persamaan (6).

$$\frac{E(s)}{R(s)} = \frac{7}{s^2 + 7} \dots\dots\dots (6)$$



Gambar 3. Respon *Unit Step* Sistem *Ball and Beam Closed Loop*.

B. *Kontroller Proporsional Plus Derivatif (PD)*

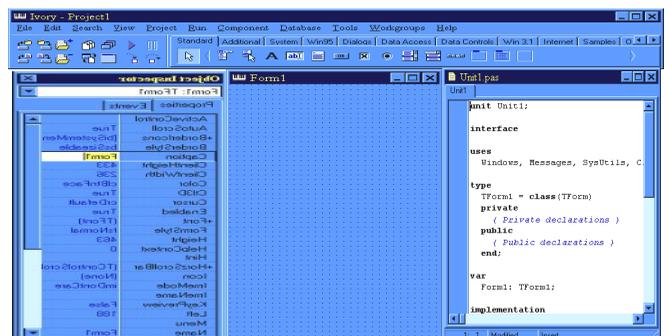
Fungsi alih dari Kontroller PD dapat dilihat pada persamaan (7)^[5].

$$G_c(s) = K_p + K_d s = K_d \left(s + \frac{K_p}{K_d} \right) \dots\dots\dots (7)$$

Dari persamaan (7) dapat dilihat bahwa kontroller PD menghasilkan zero tunggal pada $s = -K_p/K_d$, dimana K_p adalah konstanta proporsional dan K_d adalah konstanta differensial. Kontroller PD merupakan kontroller yang memperbaiki tanggapan transien sistem.

C. *Borland Delphi 6*

Bahasa pemrograman Delphi adalah perangkat lunak untuk menyusun program aplikasi yang berdasarkan pada bahasa pemrograman Pascal dan bekerja pada lingkungan sistem Windows. Dengan Delphi akan lebih mudah menyusun program aplikasi karena di dalamnya terdapat komponen-komponen yang akan menghemat penulisan program, sehingga tidak perlu repot-repot membuat *window*, kotak dialog atau perangkat kontrol lainnya. Tampilan Delphi seperti terlihat pada Gambar 4.



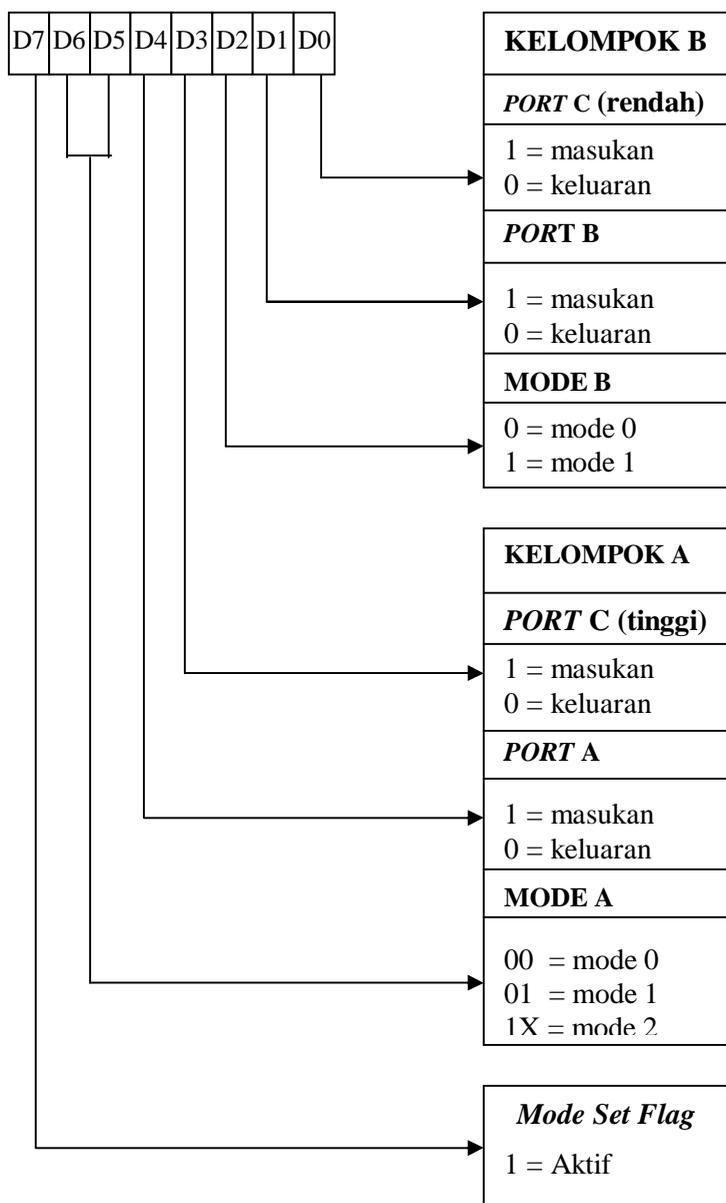
Gambar 4. Tampilan *Integrated Development Enviroment* Delphi

D. Programmable Peripheral Interface (PPI) 8255

PPI 8255 adalah IC yang dirancang untuk membuat port masukan dan keluaran paralel. PPI 8255 memiliki tiga buah port paralel yang masing-masing diberi nama port A, port B dan port C. Disamping itu PPI 8255 memiliki satu register kontrol.

PPI 8255 mempunyai 3 buah port yakni Port A (PA), Port B (PB) dan Port C (PC) masing-masing berkapasitas 8 bit. Port A dan port B dapat dioperasikan sebagai masukan dan keluaran (*bidirectional*). Masukan port A mempunyai penyangga data dan penahan data. Port C dibagi menjadi dua bagian yaitu port C rendah (C3 – PC0) dan port C tinggi (C4 – C7), masing-masing berkapasitas 4 bit. Port C rendah dan port C tinggi dapat dioperasikan secara terpisah sebagai masukan atau keluaran.

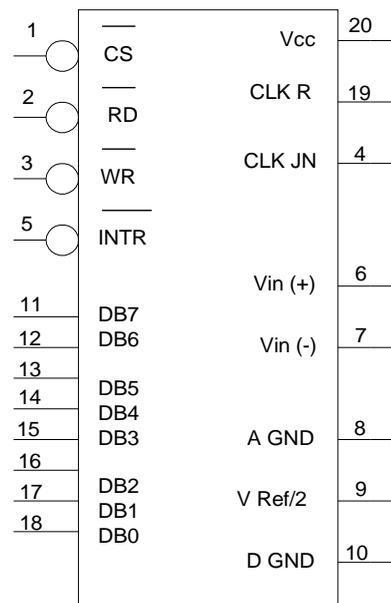
Pengoperasian PPI 8255 pada mode tertentu, terlebih dahulu harus dilakukan dengan inisialisasi melalui perangkat lunak. Inisialisasi dilakukan dengan memasukan keterangan perintah ke register kontrol. Data pada kata perintah ini akan menentukan konfigurasi dari operasi PPI 8255.



Gambar 5. Inisialisasi Operasi Port-Port pada PPI 8255.

E. Analog to Digital Converter (ADC).

ADC adalah sebuah komponen yang dapat merubah data analog menjadi digital. Konfigurasi dari pin-pin yang terdapat pada ADC dapat dilihat pada Gambar 6.



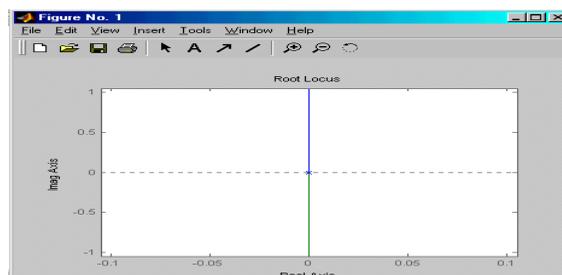
Gambar 6. Konfigurasi Pin ADC.

Pada ADC, agar input analog yang diberikan dapat dirubah menjadi digital hal yang harus dilakukan adalah memberikan CS logika low agar ADC aktif. Kemudian pada saat kondisi awal dimana interup masih bernilai 0 maka WR diberikan logika 0 (aktif), sedangkan RD diberikan logika 1. Pada saat ini yang terjadi adalah data analog yang diberikan sedang diubah menjadi data digital yang sesuai dengan data analog tersebut. Pada saat perubahan selesai yaitu pada saat interup bernilai 1 maka yang diaktifkan adalah RD dengan memberikan logika 0 sedangkan WR diberikan logika 1. Pada keadaan ini berarti data digital sudah dapat dibaca.

III. PERANCANGAN

A. Perancangan Kontroller

Pada perancangan kontroller digunakan teknik perancangan menggunakan *root locus* untuk mempermudah penentuan kontroller apa yang akan digunakan untuk menstabilkan sistem *ball and beam*. Berikut ini adalah gambar *root locus* sistem *ball and beam* yang dapat dilihat pada Gambar 7.

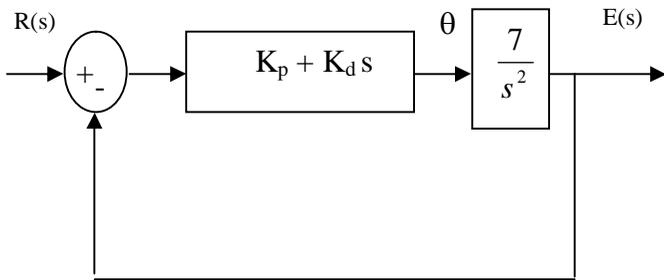


Gambar 7. Root locus Sistem Ball and Beam

Pada Gambar 7 dapat dilihat bahwa *root locus* sistem *ball and beam* terdapat pada sumbu imajiner, dimana hal tersebut menandakan sistem *ball and beam* tidak stabil. Untuk dapat menstabilkan sistem *ball and beam* hal yang harus dilakukan adalah menambahkan zero pada sumbu real negatif yang bertujuan agar *root locus* sistem *ball and beam* tertarik ke sebelah kiri bidang-s, yaitu menuju ke daerah yang lebih stabil. Penambahan zero dapat dilakukan dengan menambahkan kontroler proporsional plus derivatif (PD) pada sistem *ball and beam*. Transfer function kontroler PD dapat dilihat pada persamaan (8).

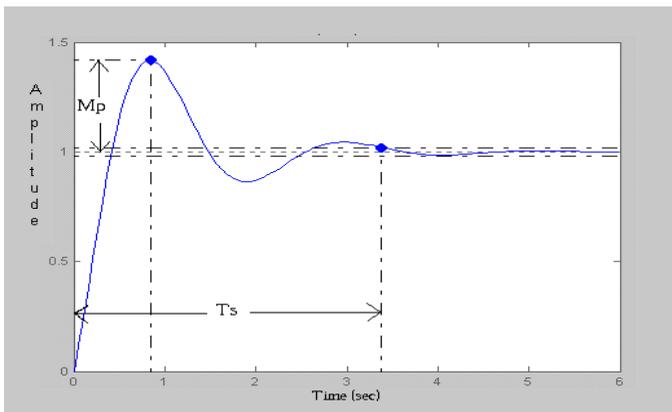
$$G_c(s) = K_p + K_d s \dots\dots\dots (8)$$

Berdasarkan persamaan (8) dapat diketahui bahwa kontroler PD akan menghasilkan zero tunggal pada $s = -K_p/K_d$. Diagram blok sistem *ball and beam* plus kontroler PD dapat dilihat pada Gambar 8.



Gambar 8. Diagram Blok *Ball and Beam* plus Kontroler PD

Setelah kontroler yang akan digunakan telah ditentukan, kemudian hal kedua yang harus dilakukan dalam perancangan adalah menentukan spesifikasi respon sistem sesuai yang diinginkan.



Gambar 9. Respon Sistem Orde 2 Secara Umum

Spesifikasi respon sistem yang diinginkan adalah lewat maksimum sistem (M_p) sebesar 0,3 dan *settling time* (T_s) sebesar 3,5 detik. Untuk mendapatkan nilai K_p dan K_d yang sesuai dengan spesifikasi yang diinginkan dilakukan perhitungan sebagai berikut:

Nilai rasio redaman (ζ) dapat diperoleh dengan menggunakan persamaan (9)^[3].

$$\zeta = \sqrt{\frac{\left(\frac{-\ln M_p}{\pi}\right)^2}{1 + \left(\frac{-\ln M_p}{\pi}\right)^2}} \dots\dots\dots (9)$$

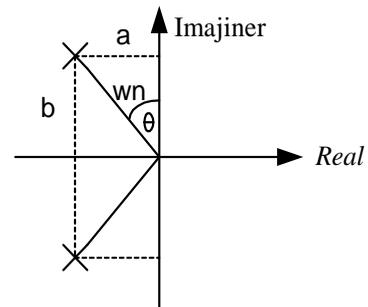
$$= \sqrt{\frac{\left(\frac{-\ln 0,3}{\pi}\right)^2}{1 + \left(\frac{-\ln 0,3}{\pi}\right)^2}} = 0,36$$

Nilai frekuensi alamiah tidak teredam dapat diperoleh dengan menggunakan persamaan (10)^[3].

$$\omega_n = \frac{4}{T_s \cdot \zeta} \dots\dots\dots (10)$$

$$= \frac{4}{3,5 \times 0,36} = 3,17$$

Setelah ζ dan ω_n diperoleh maka letak pole-pole *closed loop* yang baru sebagai dapat dilihat pada Gambar 10.



Gambar 10. Letak Pole-Pole *Closed Loop* yang Baru.

Nilai θ pada Gambar 10 dapat diperoleh dengan menggunakan persamaan (11)^[3].

$$\theta = \text{Sin}^{-1} \zeta \dots\dots\dots (11)$$

$$= \text{Sin}^{-1} 0,36 = 21,1^\circ$$

Setelah nilai θ diperoleh maka nilai a dapat diperoleh dengan menggunakan persamaan (12).

$$a = \omega_n \times \sin \theta \dots\dots\dots (12)$$

$$= 3,17 \times \sin 21,1 = 1,14$$

Sedangkan nilai b dapat diperoleh dengan menggunakan persamaan (13).

$$b = \omega_n \times \cos \theta \dots\dots\dots (13)$$

$$= 3,17 \times \cos 21,1 = 2,95$$

Setelah nilai a dan b didapatkan maka letak pole-pole *closed loop* yang diinginkan dapat diperoleh menggunakan persamaan (14)^[3].

$$S_{1,2} = -a \pm j b \dots\dots\dots (14)$$

$$= -1,14 \pm j 2,95$$

Dengan mensubstitusikan pole *closed loop* yang diinginkan ($s = -1,14 + j 2,95$) ke dalam persamaan (15) maka diperoleh sudut $G_p(s)$ pada pole *closed loop* tersebut.

$$\angle G_p(s) = \angle \frac{7}{s^2} \dots\dots\dots (15)$$

$$= \angle \frac{7}{(-1,14 + j2,95)(-1,14 + j2,95)}$$

Sudut $G_p(s)$ tersebut adalah:

$$\theta_1 = \arctan (2,95/-1,14) = -68,9^\circ = 111,1^\circ$$

$$\theta_2 = \arctan (2,95/-1,14) = -68,9^\circ = 111,1^\circ$$

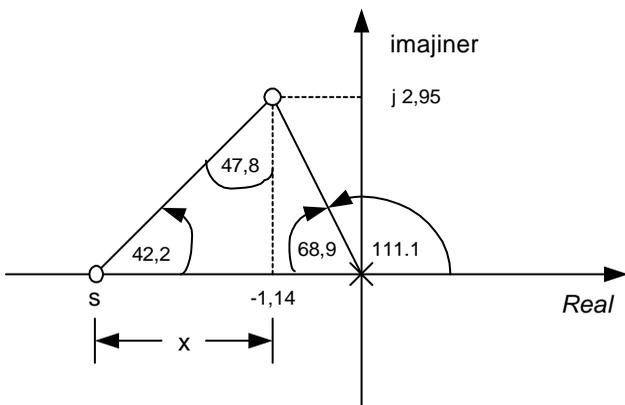
Dengan menggunakan syarat sudut yang terdapat pada persamaan (16)^[3] maka dapat diperoleh besar sudut yang harus dihasilkan oleh kontroler PD (θ_c).

$$\theta_c + \theta_z - \theta_p = -180^\circ \dots\dots\dots (16)$$

dimana $\theta_p = \theta_1 + \theta_2 = 222,2^\circ$ dan $\theta_z = 0$, maka besar sudut yang harus dihasilkan kontroler PD adalah:

$$\theta_c = -180^\circ + 222,2^\circ = 42,2^\circ$$

Sudut-sudut yang dihasilkan oleh $G_p(s)$ dan kontroler PD dapat dilihat pada Gambar 11.



Gambar 11 Sudut-Sudut yang Dihasilkan oleh $G_p(s)$ dan Kontroler PD.

Berdasarkan Gambar 11 maka besar x adalah:

$$x = 2,95 \cdot \tan 47,8 = 3,25$$

Jadi letak zero yang dihasilkan kontroler PD adalah $s = (-1,14 - 3,25) = -4,39$. Setelah zero didapatkan maka *transfer function* dari kontroler PD dapat ditulis sebagai berikut:

$$G_c(s) = K_d (s + 4,39) \dots\dots\dots (17)$$

Dengan menggunakan syarat *magnitude* seperti yang terdapat pada persamaan (18)^[3] maka diperoleh nilai K_p dan K_d sebagai berikut:

$$\left| \frac{7 K_d (s + 4,39)}{s^2} \right|_{s=-1,14+j2,95} = 1 \dots\dots\dots (18)$$

$$\left| \frac{K(-1,14 + j2,95 + 4,39)}{(-1,14 + j2,95)(-1,14 + j2,95)} \right| =$$

$$\frac{K \cdot 4,39}{3,16 \cdot 3,16} = 0,44 K = 1$$

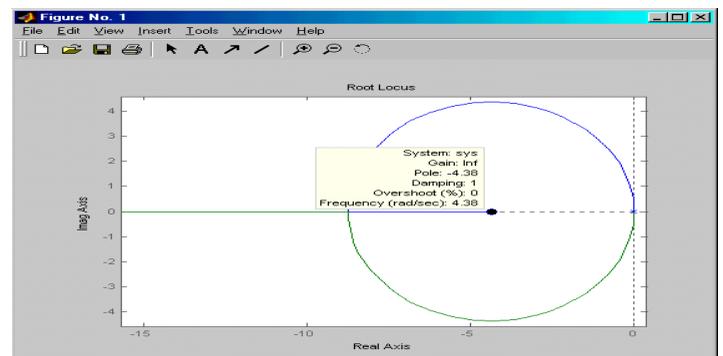
maka didapatkan $K = \frac{1}{0,44} = 2,27$

dimana $K = 7 K_d$ dan $\frac{K_p}{K_d} = 4,39$ maka diperoleh:

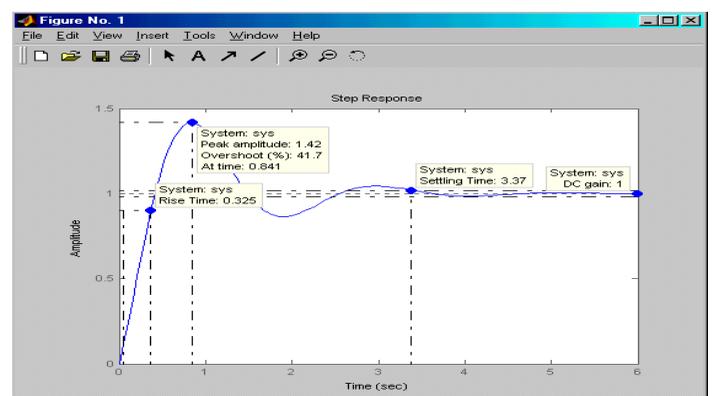
$$K_d = \frac{K}{7} = \frac{2,27}{7} = 0,32 \text{ rad/m/detik interval pembacaan}$$

$$K_p = K_d \times 4,39 = 0,32 \times 4,39 = 1,4 \text{ rad/m}$$

Dengan menggunakan Matlab maka dapat dibuktikan nilai K_p dan K_d yang telah diperoleh dapat menarik *root locus* ke sebelah kiri sumbu imajiner pada bidang-s dan membuat sistem *ball and beam* menjadi stabil.



Gambar 12. Root locus Sistem *Ball and Beam* dengan Kontroler PD

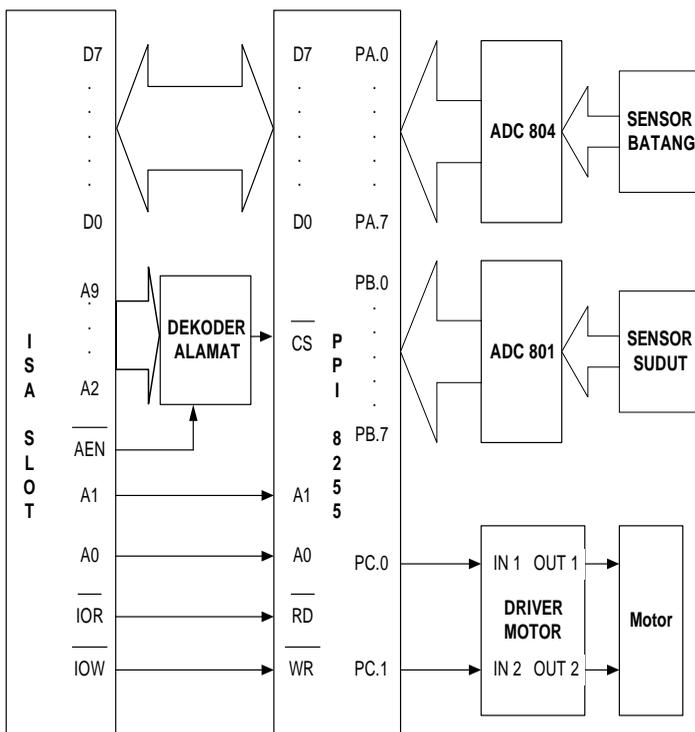


Gambar 13. Respon Sistem *Ball and Beam* dengan Kontroler PD terhadap Masukan *Unit Step*.

Pada Gambar 13 dapat diketahui bahwa dengan menggunakan nilai K_p dan K_d yang telah diperoleh dihasilkan lewatan maksimum (M_p) sebesar 0,42 dan *settling time* (T_s) sebesar 3,37 detik untuk setiap input unit step. Terdapatnya perbedaan yang tidak terlalu besar pada nilai M_p dan T_s yang ditunjukkan oleh Matlab dengan nilai M_p dan T_s pada spesifikasi yang diinginkan disebabkan karena adanya pembulatan nilai pada saat perhitungan. Jadi dengan menggunakan kontroller PD dengan nilai K_p dan K_d yang telah diperoleh maka sistem *ball and beam* yang merupakan sistem yang tidak stabil menjadi sebuah sistem yang stabil.

B. Perancangan Perangkat Keras (Hardware)

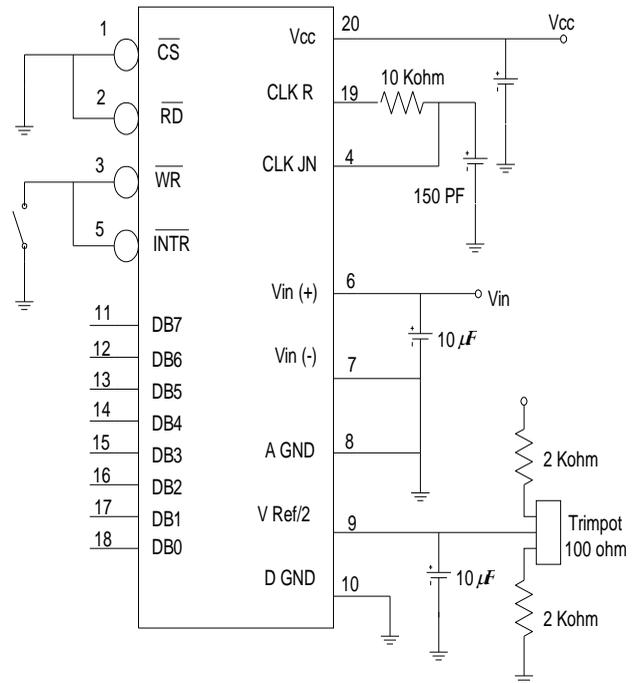
Pada pembuatan *hardware ball and beam* digunakan PPI 8225, ADC 804 yang digunakan untuk mengubah nilai analog dari sensor batang menjadi data digital 8 bit, ADC 801 yang digunakan untuk mengubah nilai analog dari sensor sudut menjadi data digital 8 bit, sensor sudut yang berupa gulungan kawat email sepanjang 40 cm, potensiometer yang digunakan sebagai sensor sudut, rangkaian driver motor, dan motor servo yang digunakan untuk menggerakkan batang ke kanan dan ke kiri. Diagram blok sistem *ball and beam* secara keseluruhan dapat dilihat pada Gambar 14.



Gambar 14. Diagram Blok *Plant Ball and Beam*.

B.1 Rangkaian Analog to Digital Converter (ADC)

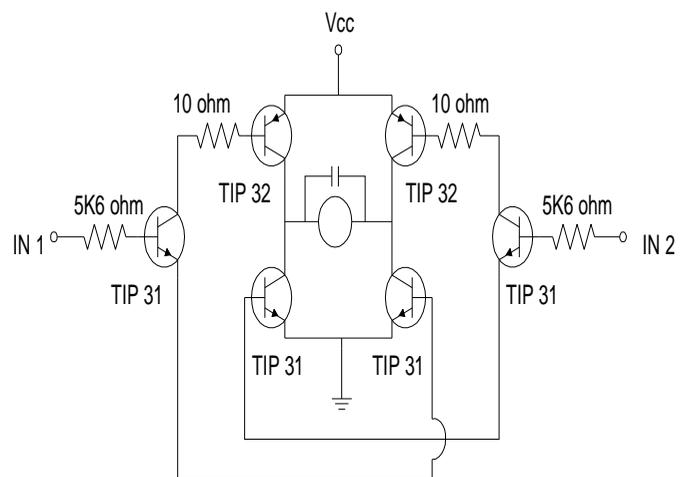
ADC digunakan untuk mengubah input analog menjadi digital 8 bit. Rangkaian *free running* dari ADC dapat dilihat pada Gambar 15.



Gambar 15. Rangkaian *Free Running* ADC.

B.2 Rangkaian Driver Motor Servo

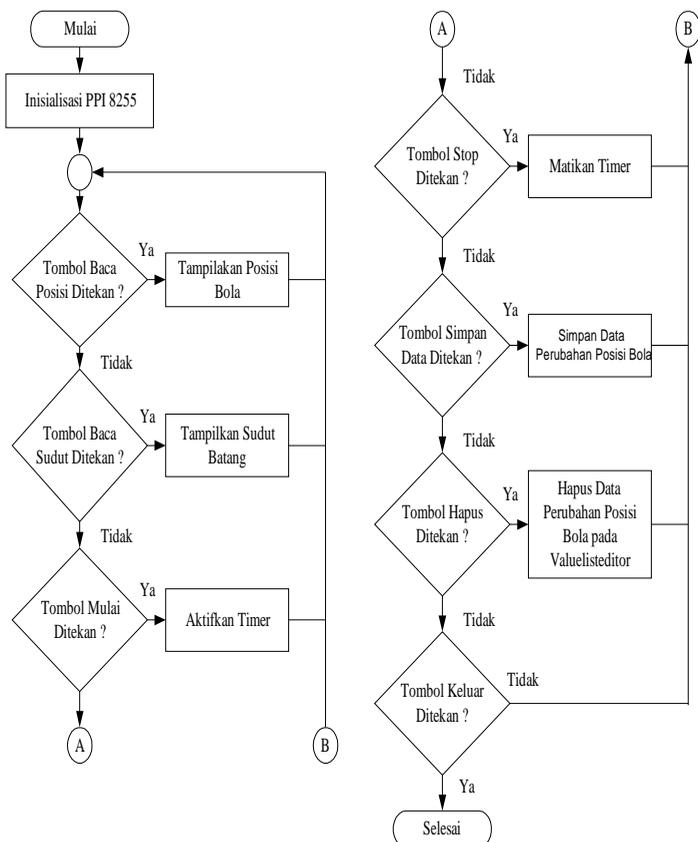
Rangkaian *driver* motor servo menggunakan prinsip transistor sebagai saklar^[1]. Pada saat basis mendapat tegangan maka terdapat arus yang melalui basis sehingga transistor akan hubung singkat dan tegangan keluaran akan sama dengan V_{cc} , dimana keluaran diletakkan pada kolektor. *Driver* motor servo dapat dilihat pada Gambar 16.



Gambar 16. Rangkaian *Driver* Motor Servo.

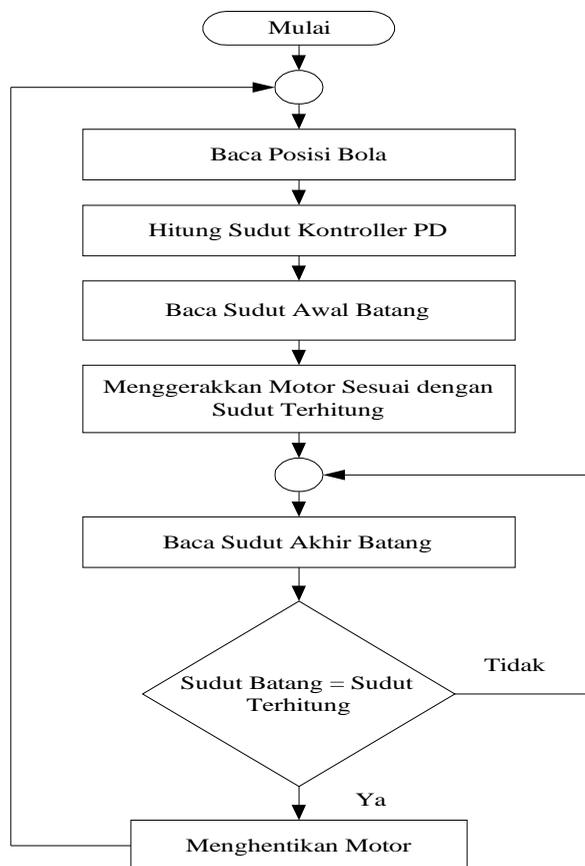
C. Perancangan Perangkat Lunak (Software).

Pada pembuatan perangkat lunak (*software*) bahasa pemrograman yang digunakan adalah bahasa pemrograman Delphi 6. *Flow chart* program utama *ball and beam* dapat dilihat pada Gambar 17.



Gambar 17. Flow Chart Program Utama Ball and Beam

Untuk menghitung sudut yang dihasilkan controller PD digunakan Timer yang flow chartnya dapat dilihat pada Gambar 18.



Gambar 18. Flow Chart Timer

Berdasarkan Gambar 18 dapat dilihat bahwa pada saat timer 1 diaktifkan maka pertama-tama hal dilakukan adalah membaca posisi bola sekarang kemudian dilanjutkan dengan menghitung sudut yang dihasilkan oleh controller. Sudut yang dihasilkan controller PD menggunakan persamaan (19) sebagai berikut:

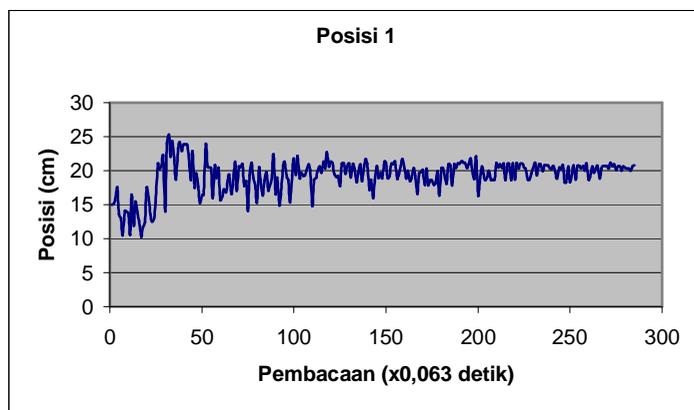
$$\alpha = K_p \cdot e + K_d \cdot \frac{de}{dt} \dots\dots\dots (19)$$

dimana :

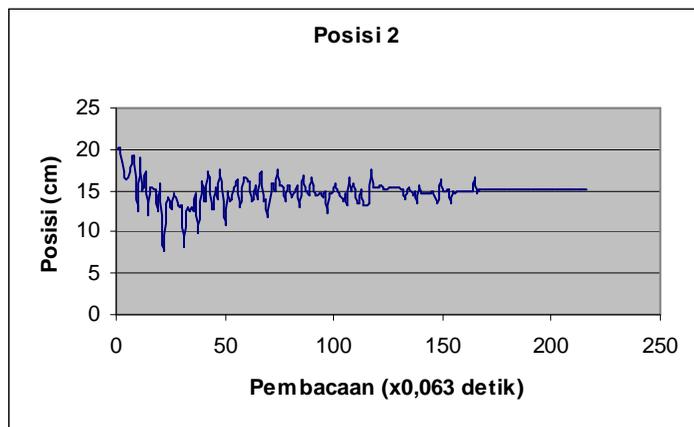
- α = Sudut yang dihasilkan controller PD (derajat)
- K_p = Konstanta proporsional = 1,4 rad/m
- K_d = Konstanta differensial = 0,32 rad/m/interval pembacaan
- e = Error = $X_d - X$
- $\frac{de}{dt} = \text{abs}\left(\frac{X - X_{-1}}{t - t_{-1}}\right)$
- X_d = Posisi yang diinginkan (cm)
- X = Posisi bola saat ini (cm)
- X_{-1} = Posisi bola sebelumnya (cm)
- t = Waktu pembacaan saat ini (detik)
- t_{-1} = Waktu pembacaan sebelumnya (detik)
- Interval pembacaan = $t - t_{-1}$ (detik)

IV. PENGUJIAN DAN ANALISA

Berikut ini adalah grafik perubahan bola menuju posisi yang diinginkan.



Gambar 19. Grafik Pergerakan Bola Menuju Posisi 1



Gambar 20. Grafik Grafik Pergerakan Bola Menuju Posisi 2

Berdasarkan grafik yang terdapat pada Gambar 19 dan Gambar 20 maka dapat dilihat bahwa untuk menuju ke posisi yang diinginkan bola akan mengalami osilasi secara terus menerus. Osilasi tersebut berfungsi untuk mengurangi gaya yang menggerakkan bola sehingga pergerakan bola pada batang tidak terlalu cepat. Dengan semakin bertambahnya waktu osilasi yang terjadi pada bola akan semakin mengecil. Pada Gambar 19 posisi stabil (bola berhenti pada posisi 1) dicapai pada saat osilasi yang terjadi sangat kecil sekali, dimana hal tersebut menunjukkan bahwa sebenarnya bola masih bergerak tetapi dengan pergerakan yang sangat kecil sekali. Sedangkan untuk Gambar 20 posisi stabil (bola berhenti pada posisi 2) dicapai pada saat osilasi sudah tidak ada sama sekali, dimana hal tersebut ditandai dengan terbentuknya garis lurus pada grafik. Perbedaan kondisi stabil antara Gambar 19 dan Gambar 20 disebabkan karena untuk posisi yang diinginkan adalah posisi 1, dari 10 kali pengujian yang dilakukan secara berturut-turut didapatkan satu kali keadaan tidak stabil (bola tidak berhenti pada posisi 1), sehingga grafik nilai rata-rata dari pergerakan bola menuju posisi 1 tidak diperoleh adanya garis lurus tetapi masih terjadinya osilasi yang sangat kecil sekali. Walaupun masih terdapatnya osilasi tetapi karena osilasi yang terjadi sangat kecil sekali maka dapat dikatakan sistem sudah stabil. Sedangkan untuk posisi yang diinginkan adalah posisi 2, dari 10 kali pengujian yang dilakukan secara berturut-turut tidak diperoleh keadaan yang tidak stabil (bola selalu berhenti pada posisi 2) sehingga pada grafik nilai rata-rata pergerakan bola menuju posisi 2 diperoleh adanya suatu garis lurus. Selain perbedaan kondisi stabil dapat pula dilihat pada Gambar 19 dan Gambar 20 waktu untuk mencapai posisi stabil antara posisi 1 dan posisi 2 berbeda-beda yaitu 16,8 detik untuk posisi 1 dan 10,5 detik untuk posisi 2. Hal ini disebabkan karena kadang-kadang terjadi kesalahan pembacaan posisi bola oleh sensor posisi. Kesalahan pembacaan tersebut terjadi karena tidak tersentuhnya sensor posisi dengan baik ketika bola bergerak terlalu cepat. Selain itu kesalahan pembacaan juga dapat terjadi karena kotornya sensor posisi.

Untuk mengetahui kebaikan performansi dari sistem *ball and beam* yang telah dibuat maka dilakukan perhitungan berapa kali alat dapat berjalan dengan baik dari 10 kali percobaan yang telah dilakukan untuk tiap-tiap posisi yang diinginkan. Untuk posisi yang diinginkan adalah posisi 1, dari 10 kali percobaan yang dilakukan secara berturut-turut didapatkan 1 kondisi yang tidak stabil sehingga kebaikan performansi untuk posisi 1 adalah:

$$\text{Kebaikan performansi posisi 1} = \frac{9}{10} \times 100\% = 90\%$$

Untuk posisi yang diinginkan adalah posisi 2, dari 10 kali percobaan yang dilakukan secara berturut-turut tidak diperoleh kondisi yang tidak stabil sehingga kebaikan performansi untuk posisi 2 adalah:

$$\text{Kebaikan performansi posisi 2} = \frac{10}{10} \times 100\% = 100\%$$

Jadi nilai rata-rata kebaikan performansi dari sistem *ball and beam* yang telah dibuat adalah:

Nilai rata-rata kebaikan performansi =

$$\frac{90\% + 100\%}{2} = 95\%$$

Dengan nilai rata-rata kebaikan performansi sebesar 95% maka sistem *ball and beam* yang telah dibuat dapat dikatakan baik.

V. PENUTUP

A. Kesimpulan

Dari hasil pengujian dan analisa terhadap *plant ball and beam* dapat ditarik beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Kontroler PD menambah sudut positif pada syarat sudut *root locus* dengan menghasilkan zero pada $s = -(K_p/K_d)$ sehingga penambahan kontroler PD tersebut dapat membuat *root locus* sistem *ball and beam* tertarik ke sebelah kiri sumbu imajiner pada bidang-s yaitu menuju daerah yang lebih stabil.

2. Kesalahan pembacaan pada sensor posisi yang disebabkan oleh tidak tersentuhnya sensor posisi dengan baik ketika bola bergerak terlalu cepat dan kotornya sensor posisi menyebabkan respon sistem tidak sesuai dengan perancangan dan menghasilkan waktu stabil yang berbeda-beda untuk setiap percobaan.
3. Untuk dapat mencapai posisi yang diinginkan bola tidak akan langsung dapat berhenti apabila posisi yang diinginkan telah tercapai tetapi bola akan berosilasi terlebih dahulu dan kemudian baru dapat berhenti. Osilasi tersebut terjadi karena masih besarnya gaya yang menggerakkan bola.

B. Saran

Saran yang dapat diberikan penulis dalam pengembangan sistem *ball and beam* adalah sebagai berikut:

1. Untuk menstabilkan *plant ball and beam* dapat digunakan kontroller lain seperti kontroller Fuzzy.
2. Menggunakan *graphite strip* sebagai sensor posisi agar diperoleh pembacaan posisi yang lebih baik.
3. Sebagai pengembangan dari tugas akhir ini dapat dilakukan penambahan jumlah posisi yang diinginkan yaitu lebih dari dua posisi.

M. Muslim W. lahir di Jakarta, 14 September 1979. Lulus dari SMU Negeri 13 Jakarta pada tahun 1998 dan melanjutkan kuliah di Jurusan Teknik Elektro Universitas Diponegoro dengan konsentrasi kontrol.
E-mail: Digaransi@yahoo.com

Mengetahui/Mengesahkan

Pembimbing I

Pembimbing II

Ir. Agung Warsito, DHET
NIP 131 668 485

Aris Triwiyatno, ST
NIP 132 230 559

DAFTAR PUSTAKA

1. Malvino, Albert Paul, *Prinsip – Prinsip Elektronika Jilid I*, Diterjemahkan oleh Sahat Pakpahan, Erlangga, Jakarta, 1996.
2. Agus, M., J. Alam, *Borland Delphi 5.0*, Elex Media Komputindo, Jakarta, 2000.
3. Ogata, Katsuhiko, *Teknik Kontrol Automatik (Sistem Pengaturan)*, Diterjemahkan oleh Edi Leksono, Jilid 1, Erlangga, Jakarta, 1990.
4. Ogata, Katsuhiko, *Teknik Kontrol Automatik (Sistem Pengaturan)*, Diterjemahkan oleh Edi Leksono, Jilid 2, Erlangga, Jakarta, 1991.
5. Phillips, Charles L., Royce D. Harbor, *Sistem Kontrol Dasar – Dasar (Feedback Control System 3e)*, Diterjemahkan oleh Prof. R. J. Widodo, Prentice Hall (Asia), 1998.
6. J.B. Rice, *Ball On Beam Balance (BOBB)*, Makalah Internet.
7. Wellstead, Peter, *Ball And Beam System*, Makalah Internet.
8., *CSC460/560 Project 1 : A Balance Apparatus for an Embedded System*, 2001.
9., *Mathematical Model*, Makalah Internet, 1999.