

## Perancangan Sistem Kontrol Ketinggian Baja Cair pada Proses *Continuous Casting* dengan Pengontrol PID Robas $H_{\infty}$

Muhammad Zibny, Endra Joelianto dan Sutanto Hadisupadmo

Program Studi Teknik Fisika – Institut Teknologi Bandung

### Abstrak

Baja merupakan salah satu logam yang memiliki kegunaan yang banyak, berbagai tempat baik kantor, sekolah, bahkan dapur selalu terdapat peralatan-peralatan yang terbuat dari baja. Industri pencetakan baja merupakan industri yang kompleks, dimana antara satu sistem dengan sistem lainnya saling berkaitan. Pada penelitian ini akan dibahas tentang salah satu sistem kontrol yang berada pada industri pencetakan baja yaitu sistem kontrol ketinggian baja cair yang berada pada proses *continuous casting*.

Pada penelitian ini ada beberapa tahapan yang akan dilakukan, pertama adalah melakukan pemodelan dengan menggunakan metode ADALINE (*Adaptive Linear Neuron*) yang kemudian diambil bobot-bobotnya untuk dimasukkan kedalam persamaan ARX (*Auto Regressive eXogenous*) dari situlah didapatkan model sistem kontrol ketinggian baja cair. Hasil pemodelan ini selanjutnya akan digunakan untuk merancang pengontrol sistem.

Simulasi dilakukan sebanyak empat kali atau dengan kata lain empat variasi nilai  $\gamma$ . Dari keempat variasi tersebut didapatkan nilai  $\gamma$  adalah 0,13 yang menghasilkan  $K_p= 18,3286$ ;  $K_i= 5,3617$ ; dan  $K_d= 1,712$ . Untuk nilai pengontrol tersebut dihasilkan respon dengan lonjakan maksimum 9,19% dan *settling time* sebesar 2,47 detik.

*Kata Kunci: ADALINE, ARX, Persamaan Ruang Keadaan, Kontrol Robas, Pengontrol PID, Moore-penrose*

### 1 Pendahuluan

Baja merupakan logam paduan yang memiliki banyak sekali kegunaan, diantaranya untuk pembangunan gedung, kendaraan, peralatan elektronik, mainan anak-anak, hingga peralatan rumah tangga sekalipun pasti ada yang mengandung baja. Industri pencetakan logam khususnya baja merupakan salah satu jenis industri yang memiliki sistem yang kompleks, dimana sistem yang satu berkaitan dengan sistem yang lain. Kontrol ketinggian baja cair merupakan satu dari sekian banyak sistem kontrol yang berada pada industri pencetakan baja. Sistem kontrol ini memiliki pengaruh yang besar terhadap kualitas logam yang dihasilkan dan juga pada efisiensi penggunaan bahan pembuat bajanya.

Ketinggian baja cair perlu diatur agar selalu berada di sekitar *set point*, ketinggian baja cair yang berlebih ataupun jauh dibawah *set point* akan membawa efek negatif bagi baja yang dihasilkan. Apabila level baja cair pada  *mold* jauh dibawah *set point* maka baja yang dihasilkan akan berongga. Sedangkan apabila ketinggian level baja cair pada  *mold* berlebihan akan membuat baja cair tumpah.

Penelitian ini bertujuan untuk melakukan identifikasi model sistem ketinggian baja cair dengan menggunakan jaringan syaraf tiruan tipe ADALINE, melakukan prancangan pengontrol ketinggian pada model yang telah didapatkan untuk mendapatkan hasil yang sesuai dengan kriteris sistem kontrol ketinggian baja cair.

Sistem yang diteliti adalah sistem kontrol ketinggian baja cair Pabrik Slab Baja 1 (SSP 1) milik PT.Krakatau Steel Cilegon. Sistem kontrol ketinggian baja cair merupakan sistem SISO (*Single Input Single Output*), dengan masukan tinggi baja cair dan keluaran tinggi

stopper dari *nozzle* dengan Data masukan – keluaran diambil pada tanggal 31 Maret 2013 pukul 09.00 hingga 12.00

## 2 Teori Dasar

### 2.1 Pabrik Slab Baja

Pabrik slab baja merupakan salah satu pabrik milik PT.Krakatau Steel yang menghasilkan baja berbentuk lempengan. Baja slab yang dihasilkan oleh SSP PT.Krakatau Steel memiliki dimensi tebal 200 mm, lebar 800 hingga 2.100 mm, dan panjang 4.500 hingga 12.000 mm. Di pabrik ini terdiri dari beberapa bagian berdasarkan prosesnya yaitu bagian *Electric Furnace Arc* (EAF), *Ladle Furnace* (LF) atau biasa disebut juga proses sekunder, dan bagian terakhir adalah *Continuous Casting Machine* (CCM), bagian terakhir inilah yang nantinya akan menjadi objek penelitian ini.

### 2.2 Jaringan Syaraf Tiruan

Jaringan syaraf tiruan (JST) adalah sistem pemroses informasi yang memiliki karakteristik mirip dengan jaringan syaraf biologi [1]. Kemiripan jaringan syaraf tiruan dengan jaringan syaraf biologi terletak pada skemanya, semua masukan dan keluaran JST yang dihubungkan oleh bobot sepiintas terlihat seperti kumpulan sejumlah neuron pada jaringan syaraf biologis yang saling mengirimkan informasi dari neuron satu ke neuron lainnya.

Pada penelitian ini digunakan salah satu metode JST yaitu adaline. Adaline merupakan jenis jaringan syaraf tiruan yang memiliki keluaran tunggal, sedangkan keluarannya bisa tunggal atau jamak, tergantung dari sistem yang dimodelkan. Karakteristik lain dari adaline terletak pada fungsi aktivasinya yang menggunakan fungsi identitas dimana keluaran dari fungsi ini berupa bilangan riil, seperti yang telah tertulis pada tabel 2.1. Selama pelatihan, bobot terus menerus dimodifikasi hingga error yang dicapai sekecil mungkin.

### 2.3 Struktur ARX (Auto Regressive eXogenous)

Pelatihan dan validasi yang telah dilakukan dengan menggunakan jaringan syaraf tiruan tipe adaline akan menghasilkan parameter yang merupakan karakteristik dari sistem yang diamati, dalam penelitian ini adalah sistem ketinggian baja cair pada proses *continuous casting*. Parameter tersebut kemudian akan dimasukkan ke dalam struktur ARX (*Auto Regressive eXogenous*), yang merupakan struktur matematis yang digunakan dalam penentuan model pada penelitian ini.

Berikut ini adalah struktur matematis dari ARX:

$$\frac{Y(z)}{U(z)} = H(z) = \frac{\alpha_m z^m + \alpha_{m-1} z^{m-1} + \dots + \alpha_1 z + \alpha_0}{z^n + \beta_n z^n + \dots + \beta_1 z + \beta_0} \quad (1)$$

Apabila struktur diatas dikali dengan  $z^{-n}/ z^{-n}$  lalu di transformasi ke domain k, maka hasilnya adalah:

$$Y(z) + Y(z) \beta_{n-1} z^{-1} + \dots + Y(z) \beta_1 z^{-1} + \beta_0 z^{-n} = U(z) \alpha_m z^{m-n} + U(z) \alpha_{m-1} z^{m-1-n} + \dots + U(z) \alpha_1 z + U(z) \alpha_0 z^{-n} \quad (2)$$

Untuk domain k:

$$y(k) + \beta_{n-1}y(k-1) + \dots + \beta_1y(k-n+1) + \beta_0y(k-n) = \alpha_m u(k-n-m) + \alpha_{m-1} u(k-n+m-1) + \dots + \alpha_1 u(k-n+1) + \alpha_0 u(k-n) \quad (3)$$

## 2.4 Kontrol Robas $H_\infty$

Kontrol optimal  $H_\infty$  adalah sebuah teori kontrol yang memiliki prinsip yaitu atasi suatu kasus dengan mengasumsikan hasil yang terjadi adalah kemungkinan terburuk, contohnya adalah jika seorang akan melakukan pengontrolan dan dihadapkan pada suatu sistem dimana dia tidak tahu persis apa yang dihadapi maka rencanakan untuk kemungkinan terburuknya dan optimisasikan.

## 2.5 PID Ruang Keadaan

Kontrol PID memiliki tiga jenis komponen yang nantinya digunakan sebagai parameter utama dari pengontrolan sistem yaitu komponen proporsional, integral, dan derivatif. Persamaan PID yang biasa digunakan adalah:

$$u(t) = K \left[ e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt + T_d \frac{d}{dt} e(t) \right] \quad (4)$$

Misalkan suatu sistem dengan satu masukan dan satu keluaran (SISO), linear dan invarian terhadap waktu direpresentasikan dengan persamaan berikut :

$$\dot{x} = Ax(t) + B_2u(t) \quad (5)$$

$$y = C_2x(t) \quad (6)$$

Dalam persamaan PID ruang keadaan penting untuk menentukan nilai  $\tilde{K}$ , berikut adalah persamaannya

$$\tilde{K} = [\tilde{K}_1 \tilde{K}_2 \tilde{K}_3] = (1 - K_3 C_2 B_2)^{-1} [K_1 K_2 K_3] \quad (7)$$

Komponen lain yang harus diketahui adalah nilai dari  $K_a$  yang merupakan nilai  $K$  dari sistem dengan persamaan ruang keadaan yang telah teraugmentasi. Dan untuk mencari nilai  $K_a$ , bisa dengan menggunakan nilai dari  $\tilde{K}$  yang telah ditentukan sebelumnya. Hubungan antara  $\tilde{K}$  dengan  $K_a$  adalah sebagai berikut :

$$K_a = \begin{bmatrix} C & 0 \\ CA & CB \\ CA^2 & CAB \end{bmatrix} \tilde{K} \quad (8)$$

## 3 Data dan Identifikasi Sistem

### 3.1 Data Sistem

Pada penelitian ini objek yang diamati adalah sistek kontrol ketinggian baja cair pada proses *continuous casting*, dan berikut adalah skemanya. Wadah pada ccm dinamakan

tundish yang berisi baja cair, baja cair tersebut mengalir menuju *mold* dengan diatur alirannya oleh *stopper*, *stopper* sendiri pergerakannya dikontrol oleh kontroller yang berada di ruang *control room* dari sebuah pabrik slab baja. Perintah kontroller yang diberikan untuk *stopper* berdasarkan ketinggian baja cair yang berada pada *mold*, pada prinsipnya jika baja cair di *mold* kurang dari set point maka kontroller akan memerintahkan *stopper* agar menaikkan posisinya, begitupun sebaliknya.

### 3.2 Dinamika Sistem

Pada penelitian ini saat proses pelatihan dengan menggunakan metode adaline, mula-mula harus ditentukan terlebih dahulu nilai orde sistemnya. Tidak ada cara atau persamaan khusus yang bisa digunakan untuk menebak nilai orde sistem, namun pada penelitian ini dicari referensi untuk menebak orde sistem dari yang telah melakukan penelitian sebelumnya. Didapatkan hasil dengan fungsi transfer sebagai berikut:

$$G(s) = \frac{N(s)}{P*(s)} = \frac{G_n e^{-\tau_n s}}{Ss(1+\tau_{n1}s)(1+\tau_{n2}s)} \tag{9}$$

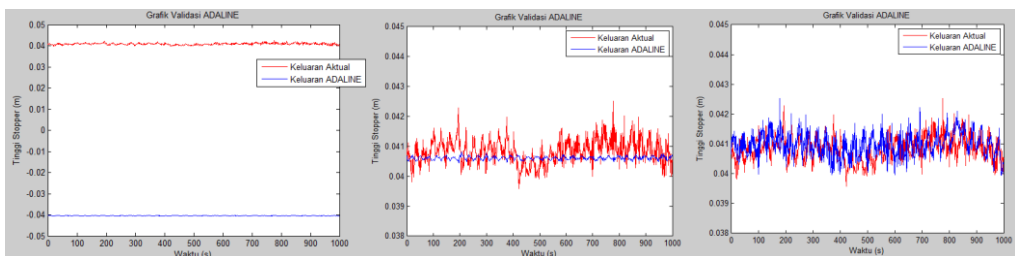
Bisa dilihat bahwa fungsi transfer tersebut menyatakan bahwa sistem berada pada orde tiga, oleh karena itu proses pelatihan akan dilakukan dengan orde tiga terlebih dahulu.

### 3.3 Identifikasi Sistem

Pada penelitian ini, jumlah data yang diolah adalah 2000 data. 1000 data digunakan untuk pelatihan dengan metode adaline yang berfungsi untuk mencari model sistem. Dan 1000 data lainnya untuk validasi yang bertujuan untuk menguji apakah model yang didapat dari hasil pelatihan telah merepresentasikan sistem di lapangan. Parameter keberhasilan dari suatu pelatihan adalah dengan melihat nilai RMSE (*Root Mean Square Error*) hasil validasi data dengan rumus sebagai berikut :

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{n}} \tag{10}$$

Dimana  $y_i$  adalah keluaran aktual,  $\hat{y}_i$  adalah keluaran dari model, dan  $n$  adalah jumlah data yang digunakan untuk validasi. Pada makalah ini akan ditampilkan tiga hasil pelatihan dengan orde dan laju pelatihan yang berbeda-beda sebagai perbandingan. Berikut adalah hasilnya:



Gambar 1 Hasil Pelatihan Nomor 1 (Kiri), Nomor 2 (Tengah), dan Nomor Tiga (Kanan)

Nomor Pelatihan	Laju	Orde	RMSE
1	0,00001	2	0,081303
2	0,00001	3	0,007742
3	0,0000001	3	0,000492

Maka pelatihan nomer tigalah yang akan digunakan. Berikut adalah bobot yang didapatkan pada pelatihan nomer tiga:

$$w_1 = 0,1083 \quad w_2 = -0,05802 \quad w_3 = 0,2798$$

$$w_4 = 0,5995 \quad w_5 = 0,8389 \quad w_6 = 0,7432$$

Bobot-bobot tersebut bila dimasukkan ke dalam persamaan ARX akan didapatkan fungsi transfer sebagai berikut:

$$G(s) = \frac{0,5995 s^2 + 0,8389 s + 0,7432}{s^3 + 0,1083 s^2 - 0,05802 s + 0,2798} \tag{11}$$

Dan persamaan ruang keadaan dari fungsi transfer diatas adalah:

$$A = \begin{bmatrix} 0,5615 & -0,9956 & -0,5344 \\ -0,4934 & -0,5622 & 0,9972 \\ 0,4057 & -0,5335 & -0,1076 \end{bmatrix}; B = \begin{bmatrix} 0,522 \\ 0,2801 \\ -0,9972 \end{bmatrix} \tag{12}$$

$$C = [0,7344 \quad -0,03003 \quad -0,3011]; D = [0] \tag{13}$$

## 4 Perancangan Sistem Kontrol PID Robas $H_\infty$

### 4.1 Formulasi Parameter PID Ruang Keadaan

Langkah pertama sebelum merancang pengontrol adalah mengaugmentasi matriks ruang keadaan sistem. Hasilnya adalah sebagai berikut:

$$Aa = \begin{bmatrix} A & B \\ 0 & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,5615 & -0,9956 & -0,5344 & 0,522 \\ -0,4934 & -0,5622 & 0,9972 & 0,2801 \\ 0,4057 & 0,5335 & -0,1076 & -0,9972 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}; Ba1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \tag{14}$$

$$Ba2 = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}; Ba = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{15}$$

$$Ca = \begin{bmatrix} C^T C & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,5393 & -0,2205 & -0,2211 & 0 \\ -0,2205 & 0,0902 & 0,0904 & 0 \\ -0,2211 & 0,0904 & 0,0907 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad Da = D = [0] \quad (16)$$

Setelah mendapatkan matriks ruang keadaan yang baru selanjutnya adalah mencari nilai gamma ( $\gamma$ ) dan matriks X dari persamaan riccati  $H^\infty$ , berikut ini adalah rumus riccati  $H^\infty$  serta persamaan riccati  $H^\infty$  untuk sistem ini:

$$Aa^T X + X Aa + X(\gamma^2 Ba1 Ba1^T - Ba2 Ba2^T)X + Ca^T Ca = 0 \quad (17)$$

Matriks R adalah matriks dengan bentuk sebagai berikut :

$$R = \begin{bmatrix} -\gamma^2 & 0 \\ 0 & I \end{bmatrix}^{-1} \quad (18)$$

Dari persamaan riccati diatas ada dua variabel yang belum diketahui yaitu konstanta  $\gamma$  dan matriks X, solusi untuk mencarinya adalah dengan memasukkan beberapa nilai  $\gamma$  kedalam persamaan tersebut, nilai  $\gamma$  yang dimasukkan adalah nilai  $\gamma$  yang masih menghasilkan nilai X definit positif. Pencarian nilai  $\gamma$  dengan X dilakukan dengan perangkat lunak matlab®. Pada penelitian ini ada empat nilai  $\gamma$  yang dimasukkan untuk pengujian yaitu 0,04; 0,13; 0,22; dan 0,13.

Nilai dari  $\gamma$  dan matriks X tersebut selanjutnya akan digunakan untuk mencari nilai Ka. Untuk mencari nilai Ka sendiri akan digunakan persamaan LQR sebagai berikut:

$$Ka = B2^* X \quad (19)$$

$$Ka = [0 \ 0 \ 0 \ 1] X \quad (20)$$

Karena matriks X adalah matriks yang memiliki dimensi 4x4 maka nilai Ka yang dihasilkan adalah matriks dengan dimensi 1x4 seperti berikut:

$$Ka = [ Ka1 \quad Ka2 \quad Ka3 \quad Ka4 ] \quad (21)$$

Setelah mendapatkan nilai Ka, langkah selanjutnya adalah mencari parameter-parameter PID yaitu Kp, Ki dan Kd. Untuk mendapatkan nilai dari parameter-parameter tersebut ada beberapa langkah yang harus dilakukan. Mula-mula tentukan nilai  $\tilde{K}$  dengan menggunakan persamaan berikut:

$$\tilde{K} = Ka \text{ inv} \begin{bmatrix} C & 0 \\ CA & CB \\ CA^2 & CAB \end{bmatrix} \quad (22)$$

Matriks yang akan diinvers diaatas bukan matriks persegi, sehingga harus ada cara khusus untuk melakukan inversnya, cara yang digunakan untuk penelitian ini adalah metode *moore-penrose*. Berikut adalah rumusnya:

$$\text{Jika } m < n \text{ maka; } t^+ = t^T (t t^T)^{-1} \quad (23)$$

$$\text{Jika } n > m \text{ maka; } t^+ = (t^T t)^{-1} t^T \quad (24)$$

Dengan  $t$  adalah matriks yang akan diinvers, dan  $t^+$  adalah hasil inversnya, karena pada kasus ini matriks yang diinvers adalah matriks  $3 \times 4$  maka yang digunakan adalah persamaan *moore-penrose* yang bawah. Sehingga hasil perhitungan menjadi seperti berikut:

$$\hat{K} = Ka (t^+ t)^{-1} t^+ \quad (26)$$

$$\hat{K} = [\hat{K}(1) \hat{K}(2) \hat{K}(3)] \quad (27)$$

Selanjutnya adalah mencari nilai  $K_1$ ,  $K_2$ , dan  $K_3$ , nilai-nilai tersebutlah yang nantinya akan digunakan untuk mencari nilai  $K_p$ ,  $K_i$ , dan  $K_d$ . Berikut ini adalah rumus dan perhitungan untuk mencari nilai  $K_1$ ,  $K_2$ , dan  $K_3$ :

$$K_3 = K_d = \frac{1}{1+CB\hat{K}(3)} \hat{K}(3) \quad (28)$$

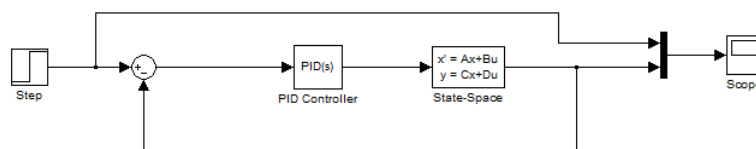
$$K_2 = K_p = (1 - K_3CB) \hat{K}(2) \quad (29)$$

$$K_1 = K_i = (1 - K_3CB) \hat{K}(1) \quad (30)$$

Ketiga nilai diataslah yang nantinya akan dijadikan parameter PID dengan  $K_p=K_2$ ,  $K_i=K_1$ , dan  $K_d=K_3$ .

## 4.2 Hasil Simulasi dan Analisis

Perancangan pengontrol dilakukan dengan *simulink* yang berada pada perangkat lunak matlab®, berikut adalah diagram bloknya:

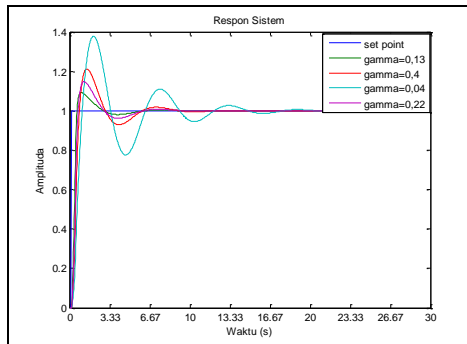


**Gambar 2 Diagram Blok Simulasi**

Pada diagram blok diatas persamaan ruang keadaan (*state space*) merupakan representasi dari sistem ketinggian baja cair yang akan dikontrol, sehingga persamaan ruang keadaan yang digunakan pada diagram blok diatas adalah persamaan ruang keadaan awal dengan  $A$ ,  $B$ ,  $C$ , dan  $D$  sebagai matriks yang mewakilinya. Seperti yang telah dijelaskan pada subbab sebelumnya pada penelitian ini akan dilakukan empat variasi nilai  $y$  atau dengan kata lain empat variasi pengontrol untuk mendapatkan hasil respon yang terbaik. Percobaan-percobaan tersebut dilakukan dengan menggunakan *simulink* yang ada di perangkat lunak matlab®. Dan berikut ini adalah hasilnya:

Tabel 1 Perbandingan nilai  $\gamma$  dan respon sistem yang dihasilkan

Nilai $\gamma$	Kp	Ki	Kd	Max.Overshoot	Settling Time
0,04	7,651	0,8446	2,5039	37,84 %	2,94 s
0,13	18,3286	5,3617	1,712	9,19 %	2,47 s
0,22	10,4421	2,2956	1,758	14,8 %	3,264 s
0,4	9,4415	2,0197	1,7675	21,27 %	6,6 s



Gambar 3 Hasil respon sistem untuk setiap nilai  $\gamma$

Dari tabel 1 dan gambar 3 bisa dilihat bahwa respon sistem untuk seluruh nilai gamma yang diuji memiliki *settling time* yang bagus, hanya saja untuk overshoot hanya gamma bernilai 0,13 sajalah yang memiliki maksimum overshoot dibawah 10%. Oleh karena itu berdasarkan respon sistem maka nilai gamma yang dipilih adalah nilai gamma 0,13 dengan parameter PID 18,3286 untuk Kp, 5,3617 untuk Ki, dan 1,712 untuk Kd.

## 5 Kesimpulan

Pada penelitian yang dilakukan pada kali ini dapat ditarik beberapa kesimpulan, yaitu:

1. Hasil pemodelan dari sistem kontrol ketinggian baja cair yang direpresentasikan dalam persamaan ruang keadaan adalah sebagai berikut:

$$A = \begin{bmatrix} 0,5615 & -0,9956 & -0,5344 \\ -0,4934 & -0,5622 & 0,9972 \\ 0,4057 & -0,5335 & -0,1076 \end{bmatrix} ; \quad B = \begin{bmatrix} 0,522 \\ 0,2801 \\ -0,9972 \end{bmatrix}$$

$$C = [0,7344 \quad -0,03003 \quad -0,3011] ; \quad D = [0]$$

2. Pengontrol PID robas  $H_\infty$  merupakan pengontrol yang menggunakan variabel  $\gamma$  untuk menentukan parameter Kp, Ki, dan Kd. Untuk sistem kontrol ketinggian baja cair dipilih nilai  $\gamma$  sama dengan 0,13 yang menghasilkan parameter PID berupa Kp= 10,4421; Ki= 2,2956; dan Kd= 1,758, dan respon yang terjadi adalah maksimum overshoot 9,19% dan *settling time* 2,47 detik.



## 6 Daftar Pustaka

- [1] Jong Jek Siang, Jaringan Syaraf Tiruan & Pemrograman menggunakan MATLAB®. Yogyakarta, Indonesia: Andi, 2009.
- [2] Michael Green and David J Limebeer, Linear Robust Kontrol. Englewood Cliffs, New Jersey: Prandice Hall, 1998.
- [3] Karim Jabri, Emmanuel Godoy, Didier Dumur, Alain Mouchette, and Bertrand Bele, "Cancellation of Bulging Effect on Mould Level in Continuous Casting: Experimental Validation," *Journal of Process Control*, vol.21, pp. 271 – 278, 2011.
- [4] Endra Joelianto, "Robust  $H_\infty$  PID Controller Design Via LMI Solution of Dissipative Integral Backstepping with State Feedback Synthesis," *Robust Kontrol, Theory and Application*, 2011.
- [5] Torsten Soderstrom and Peter Stoica, System Identification. Maryland Avenue: Prandice-Hall International, 1989.
- [6] Nuari, Riza, "Perancangan Sistem Kontrol Robas  $H_\infty$  Pada Proses Pencetakan Lempeng Baja", Tugas Akhir, Program Studi Teknik Fisika ITB, Bandung, 2012.