

Perancangan Sistem Kontrol Busur Listrik pada Tungku Peleburan Besi dan Baja Dengan Pengontrol Robas H_{∞}

Faisal Hendri, Endra Joelianto, Agus Samsi

Program Studi Teknik Fisika – Institut Teknologi Bandung

Abstrak

Kebutuhan akan material yang terbuat dari baja sudah sangat banyak. Teknologi di industri tersebut juga telah berkembang pesat pada proses yang ada di dalam pembuatan baja. Salah satunya dalam proses peleburan besi dan metal. Dulu penggunaan Tungku Busur Listrik masih konvensional dan belum memakai sistem kontrol cerdas. Padahal efisiensi energi alat ini belum mencapai hasil yang sangat baik. Oleh karena itu diperlukan sistem kontrol yang dapat memperbaiki efisiensinya. Dalam penelitian ini dibahas mengenai sistem kontrol untuk peleburan besi di dalam tungku busur listrik dan menghasilkan perancangan pengontrol yang tepat.

Langkah pertama yang dilakukan adalah mengidentifikasi sistem dengan menggunakan jaringan saraf tiruan metode ADALINE (Adaptive Linear Neuron). Metode ini memiliki algoritma perubahan bobot dan fungsi pengaktifan yang khusus. Kemudian persamaan ruang keadaan kontinyu yang dihasilkan dari pemodelan ini akan digunakan untuk pengontrol robas H_{∞} . Persamaan ini akan diolah kembali sehingga hasil akhirnya didapatkan parameter-parameter yang dapat digunakan di lapangan. Pengontrol robas H_{∞} dipilih karena memiliki kestabilan yang kuat walau mendapatkan banyak gangguan. Dalam perancangan yang telah dilakukan, menghasilkan lonjakan maksimum (M_p) = 1.13 % dan waktu tunak (T_s) = 30.27 detik (standar yang ditentukan: lonjakan maksimum (M_p) = <10 % dan waktu tunak (T_s) = 100 detik).

Kata Kunci: ADALINE, Robas H_{∞} , Persamaan Ruang Keadaan, Fungsi Alih, Tungku busur listrik, Lower LFT, Gamma.

1 Pendahuluan

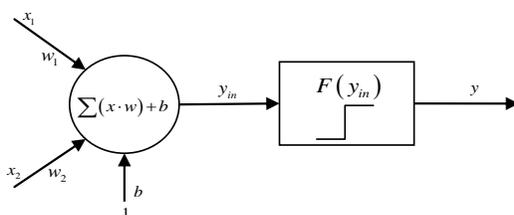
Kompleksitas pengolahan bahan mentah menjadi bahan baku yang diproses secara fisikawi maupun kimiawi telah memacu manusia untuk selalu meningkatkan dan memperbaiki kinerja sistem yang mendukung proses tersebut agar semakin produktif, efisien dan efektif. Oleh karena itu, penggunaan sistem pengendalian proses industri sangat dibutuhkan. Dalam era industri modern, sistem kontrol proses industri akan merujuk pada otomatisasi sistem kontrol yang digunakan. Sistem kontrol industri dengan peran manusia masih amat dominan misalnya dalam merespon besaran-besaran proses yang diukur oleh sistem tersebut dengan serangkaian langkah berupa pengaturan panel dan saklar-saklar yang sesuai, telah bergeser dan digantikan oleh sistem kontrol otomatis.

Penelitian ini dilakukan pada PT. Krakatau Steel Cilegon pada industri peleburan baja. Perusahaan ini memiliki beberapa pabrik, yaitu pabrik besi *sponge*, pabrik baja lembaran panas, pabrik baja lembaran dingin dan pabrik *slab* baja. Secara khusus penelitian difokuskan pada pabrik *slab* baja. Klasifikasi utama pada pabrik ini terdapat tiga proses yaitu

1. Proses peleburan (Melting Process: Electric Arc Furnace)
2. Proses sekunder (Ladle Furnace)
3. Proses pengecoran kontinyu (Continuous Casting)

2 Teori Dasar

Jaringan syaraf tiruan (JST) merupakan implementasi dari teknologi artificial intelligence [1], merupakan salah satu representasi buatan dari otak manusia yang selalu berusaha untuk mensimulasikan proses pembelajaran pada otak manusia. Elemen pemroses sederhana JST dinamakan neuron, unit sel atau node. Setiap neuron terhubung dengan neuron yang lain masing-masing dengan bobot terhubung. Ciri-ciri utama JST adalah kemampuannya untuk belajar. Dalam menyusun JST ini ada beberapa yang harus diperhatikan yaitu: (1) pola hubungan antar neuron (disebut arsitektir jaringan); (2) metode penentuan bobot penghubungan (disebut pembelajaran); (3) fungsi pengaktifan (fungsi untuk menentukan keluaran suatu neuron) [2]. Umumnya jaringan syaraf tiruan dimana tiap masukan (x_1 dan x_2) memiliki bobot masing-masing seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 1.



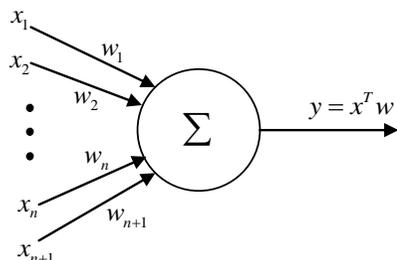
Gambar 1 Struktur jaringan syaraf tiruan (JST)

ADALINE (*Adaptive Linear Neuron*) [2] adalah salah satu dari sekian banyak metode JST yang hanya memiliki satu keluaran. Sedangkan masukan dari ADALINE dapat berupa masukan tunggal ataupun jamak sesuai dengan model yang diinginkan. Secara struktur ADALINE mirip dengan JST sederhana namun terdapat perbedaan pada fungsi pengaktifan dimana metode pembelajaran bobot yang digunakan pada ADALINE terjadi akibat galat antara keluaran ADALINE dan keluaran yang sebenarnya sehingga mendapatkan galat terkecil. Perhitungan perubahan bobot dapat dilihat pada persamaan (1)

$$\Delta w_i = \alpha (t - y) x_i \quad (1)$$

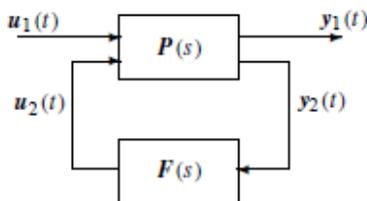
Δw_i adalah perubahan bobot untuk masukan ke $-i$; t adalah keluaran yang sebenarnya; y adalah keluaran ADALINE; x_i adalah masukan ke $-i$; dan α adalah laju pembelajaran [3].

Laju pembelajaran yang secara manual dapat dipilih atau dicoba-coba adalah diantara 0 sampai 1. Berikut ini struktur ADALINE yang ditunjukkan oleh Gambar 2 yang dapat dilihat bahwa tidak ada bias seperti di struktur JST yang biasa.



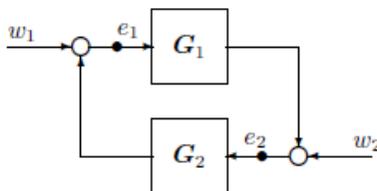
Gambar 2 Struktur ADALINE

Penggunaan kontrol robas memiliki keuntungan yaitu tahan terhadap gangguan dan membuat sistem tetap stabil. Inti dari kontrol robas dengan metode H^∞ adalah mengubah diagram blok sistem menjadi bentuk transformasi fraksi linear bawah dan kemudian mencari γ dari teorema penguatan kecil. Struktur kontrol robas yang ditinjau dari Gambar 3 terlihat bahwa $P(s)$ merupakan model sistem yang teraugmentasi dan $F(s)$ adalah model pengontrol yang diinginkan. $T_{y_1 u_1}(s)$ adalah fungsi transfer yang didapat dengan masukan $u_1(t)$ dan keluaran $y_1(t)$. $u_1(t)$ memiliki cakupan sebagai sinyal referensi ataupun sinyal gangguan yang terjadi pada sistem tersebut. Sedangkan $P(s)$ mencakupi model sistem dan model perubahan gangguan serta mencakupi ketidakpastian yang terjadi



Gambar 3 Kontrol umpan balik LFT standar

Dengan mempertimbangkan sistem yang diperlihatkan pada Gambar 3, perancangan kontrol Robas pada dasarnya adalah untuk membuat norm dari $T_{y_1 u_1}(s)$ sehingga menjadi sekecil mungkin [4].



Gambar 4 Lup umpan balik untuk teori penguatan kecil.

Dengan mengganti G_1 dan G_2 menjadi $M(s)$ dan $\Delta(s)$. Dimisalkan $M(s)$ adalah stabil dan $0 < \gamma < 1$. Interkoneksi sistem yang ditunjukkan pada Gambar 5 adalah stabil untuk semua $\Delta(s)$. Maka syarat

$$\|M(s)\|_{\infty} \|\Delta(s)\|_{\infty} < 1 \quad (2)$$

harus dipenuhi sehingga bila diketahui lagi bahwa $\|\Delta(s)\|_{\infty} < \gamma$ maka agar syarat

$\|M(s)\|_{\infty} < \frac{1}{\gamma}$ terpenuhi dengan cara merancang $F(s)$ sedemikian rupa hingga sesuai dengan teori penguatan kecil yang menjadikan sistem tersebut stabil.

3 Data dan Identifikasi Sistem

Penelitian yang dilakukan untuk penelitian ini adalah proses peleburan besi dengan tungku busur listrik di pabrik slab PT Krakatau Steel di Cilegon. Data masukan yang didapat adalah bukaan dari valve untuk sistem hidrolik. Sedangkan keluarannya adalah impedansi busur listrik (mOhm) sebagai parameter jarak. Jaringan saraf tiruan metode ADALINE dijadikan dasar pembuatan program di ruang kerja MATLAB untuk menentukan model dengan struktur ARX tersebut dengan mengolah data-data yang diperoleh ketika melakukan studi lapangan. Dari 5000 yang digunakan, penelitian mengambil 4000 data untuk proses identifikasi sedangkan 1000 data lainnya untuk proses validasi.

Dalam merancang suatu sistem pengendalian sangatlah penting terlebih dahulu memodelkan *plant* untuk mengetahui karakteristiknya. Oleh karena itu digunakan struktur ARX untuk mendekati model sistem fisis yang ingin ditinjau. Adapun persamaan struktur ARX tersebut adalah

$$A(z)y(t) = B(z)u(t-n) + e(t) \quad (3)$$

Dimana $u(t)$ adalah masukan sistem, $y(t)$ adalah keluaran sistem, n adalah waktu tunda, $e(t)$ adalah gangguan sistem, sedangkan z adalah operator yang didefinisikan sebagai

$$\begin{aligned} A(z) &= 1 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2} + \dots + a_{k_a} z^{-k_a} \\ B(z) &= b_0 + b_1 z^{-1} + b_2 z^{-2} + \dots + b_{k_b-1} z^{-(k_b-1)} \end{aligned} \quad (4)$$

dimana k_a adalah orde dari A sedangkan k_b adalah orde dari B .

$$\begin{aligned}
 z^{-1}y(t) &= y(t-1) \\
 z^{-2}y(t) &= y(t-2) \\
 &\vdots \\
 z^{-n}y(t) &= y(t-m)
 \end{aligned}
 \tag{5}$$

$y(t-1)$ adalah keluaran ketika waktu $t-1$, $y(t-2)$ adalah keluaran ketika waktu $t-2$, dan seterusnya. Persamaan 5 merupakan pasangan perkalian antara z dengan variabel masukan dan keluaran sistem yang didapat dengan menggabungkan persamaan A dan B dengan persamaan struktur ARX tersebut.

Sistem yang ditinjau ini memiliki masukan tunggal dan keluaran yang tunggal pula, kemudian setelah A dan B diaugmentasikan ke dalam persamaan model ARX yang akan digunakan, persamaannya dapat dituliskan

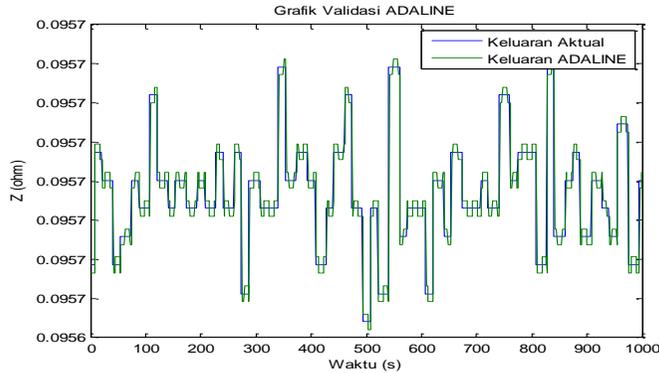
$$\begin{aligned}
 y(t) + a_1y(t-1) + \dots + a_{k_a}y(t-k_a) &= b_a u(t-n) + b_1 u(t-n-1) + \dots + \\
 b_{k_b-1} u(t-n-k_b+1) + e(t)
 \end{aligned}
 \tag{6}$$

k_a adalah orde A , k_b adalah orde B , n adalah waktu tunda sistem, dan $e(t)$ adalah gangguan sistem.

Kevalidan dari model yang kita dapatkan dengan identifikasi sistem menggunakan struktur ARX harus diuji. Pengujian yang dilakukan adalah dengan menggunakan dua cara yaitu metode perbandingan grafik hasil pembelajaran ADALINE dengan grafik hasil data keluaran aktual dan metode penghitungan *Root Mean Square Error* (RMSE) [3]. Nilai RMSE dihitung dengan menggunakan persamaan

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i)^2}{n}}
 \tag{7}$$

dimana \hat{y}_i adalah keluaran aktual, y_i adalah keluaran model, sedangkan n adalah jumlah data validasi. Semakin kecil nilai RMSE dapat meyakinkan kita bahwa data yang dimodelkan dapat dianggap merepresentasikan data sebenarnya di lapangan walaupun masih terdapat *error* [3].



Gambar 5 Grafik validasi dengan laju pembelajaran 0.001 dan RMSE 0.000745

Sesuai dengan Gambar 5, maka dengan menggunakan laju pembelajaran sebesar 0.001 nilai RMSE yang dihasilkan adalah 0.000745. Matriks ruang keadaan diskrit yang diperoleh dari pemodelan tersebut ditunjukkan sebagai berikut

$$A = \begin{bmatrix} -0.0162 & 1.00001 \\ -0.0171 & -0.0010 \end{bmatrix}$$

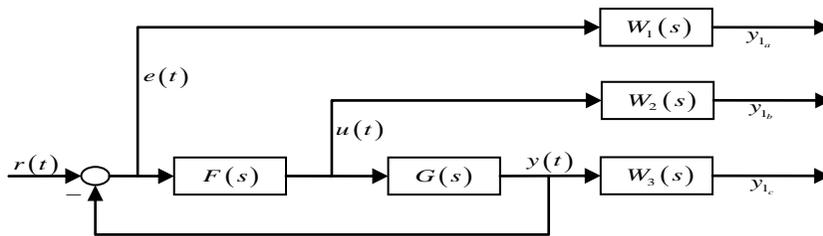
$$B = \begin{bmatrix} 0.0162 \\ -0.9835 \end{bmatrix}$$

$$C = [-0.0939 \quad -0.0971]$$

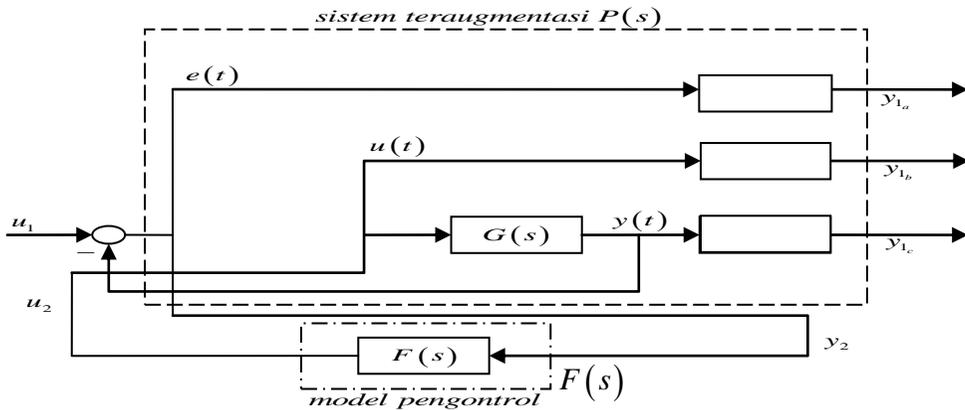
$$D = [0]$$

4 Sintesis Kontrol H_∞ , Hasil Simulasi dan Analisis

H_∞ adalah metode yang digunakan dalam teori kontrol untuk mempersatukan pengontrol yang mencapai ketegaran dalam performanya atau stabil. Kelebihan dari metode ini adalah lebih siap untuk diaplikasikan pada masalah yang mencakup banyak sistem variabel dengan menggabungkan dan menyilangkan variabelnya. Kekurangannya adalah butuh pemahaman matematika yang memadai dan membutuhkan model sistem yang bagus dan masuk akal untuk dikontrol. Bila ditinjau dari Gambar 10, maka kita dapatkan parameter $W_1(s)$, $W_2(s)$, dan $W_3(s)$ yang merupakan fungsi dari pembobotan yang digunakan sebagai filter, dimana fungsi pembobotan $W_1(s)$ adalah sinyal kesalahan, $W_2(s)$ adalah sinyal masukan dan $W_3(s)$ adalah sinyal keluaran [4][3]. Diagram blok seperti pada Gambar 11 merupakan bentuk standar dari LFT yang telah diaugmentasikan.



Gambar 6 Diagram blok umum fungsi pembobotan



Gambar 7 Diagram dua sisi fungsi pembobotan

Dengan memisahkan $F(s)$ sehingga menjadi seperti struktur LFT (Gambar 7) dan didapatkan pula $P(s)$ yang merupakan sistem teraugmentasi, maka dapat ditentukan vektor keluaran $y_1 = [y_{1a}, y_{1b}, y_{1c}]^T$ tidak digunakan secara langsung untuk menghasilkan vektor sinyal kontrol u_2 . Oleh karena itu, maka dimasukkan filter sinyal masukan $u(t)$ ke dalam sinyal keluaran y_1 dengan maksud mengetahui apakah rancangan pengontrol sudah tepat atau belum dengan melakukan pengukuran energi kontrol.

Matriks ruang keadaan yang diperoleh masih dalam waktu domain diskrit, karena keluaran dari komputer adalah waktu cacah yang diskrit. Penelitian harus mengubahnya ke bentuk matriks ruang keadaan dalam waktu kontinyu sebagai syarat pembuatan persamaan ruang keadaan kontinyu. Maka didapatkanlah matriks ruang keadaan dalam waktu kontinyu yaitu:

$$A = \begin{bmatrix} -3.977 & -6.641 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} ; B = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} ; C = [-0.7358 \quad 1.258] ; D = [0] \tag{9}$$

Dari matriks ruang keadaan tersebut dibuatlah persamaan ruang keadaan kontinyu yaitu

$$\dot{x} = \begin{bmatrix} -3.977 & -6.641 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} x + \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} u$$

$$y = [-0.7358 \quad 1.258] x \quad (10)$$

Nilai pembobotan dipilih dengan cara *trial and error* hingga mencapai grafik yang bagus dan selanjutnya diaugmentasikan dengan persamaan ruang keadaan yang telah didapatkan. Berikut ini adalah bobot $W_1(s)$, $W_2(s)$ dan $W_3(s)$ yang dipilih:

$$W_1 = 10000 \frac{(35s+2.5)^2}{(95s+3)^2}; W_2 = 0.01; W_3 = \frac{s^2}{30^2} \quad (11)$$

Dari fungsi ruang keadaan ini, kita bisa menentukan keterkontrolan (*controllability*) dan keteramatan (*observability*). Keterkontrolan digunakan untuk menentukan apakah sistem yang telah dimodelkan ini dapat dikontrol atau tidak. Uji keterkontrolan dicari dengan menghitung *rank* dan panjang dari matriks keterkontrolan. Dari persamaan 9 dengan mengambil matriks A dan B, maka dapat kita tentukan bahwa sistem ini dapat dikontrol karena *rank* dari matriks keterkontrolan dengan panjang dari matriks keterkontrolan adalah sama yaitu 2.

Keteramatan (*observability*) digunakan untuk menentukan apakah sistem yang telah dimodelkan ini dapat diamati. Keteramatan ini dicari dengan menghitung *rank* dan panjang dari matriks keteramatan. Dari persamaan 9 dengan mengambil matriks A dan C, maka matriks A memiliki 2 kolom dan 2 baris, sedangkan matriks C memiliki 1 baris dan 2 kolom. Maka jika kedua matriks ini dikalikan, akan menghasilkan matriks keteramatan dengan *rank* dan panjang yang bernilai 2.

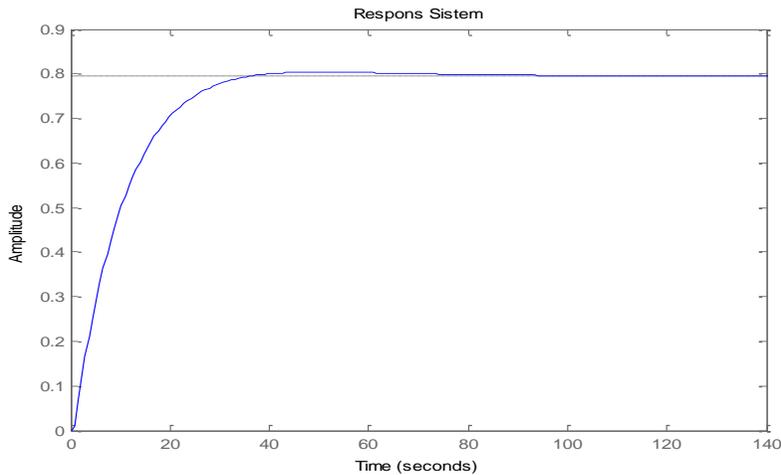
Dua syarat yang diperlukan dalam proses peleburan baja dengan busur listrik adalah sebagai:

1. Waktu tunak tidak boleh melebihi 100 detik
2. Lonjakan maksimal yang terjadi tidak boleh lebih dari 10%

Dengan adanya kriteria tersebut, menjadi batasan bagi pepenelitian untuk membuat algoritma yang tepat sehingga didapatkan rancangan pengontrol yang tepat. Fungsi alih pengontrol yang diperoleh adalah

$$F(s) = \frac{504952.4804(s+0.0512)(s^2+3.977s+6.641)}{(s+2.99 \times 10^5)(s+28.17)(s+0.0316)(s+0.0316)} \quad (12)$$

Tujuan pengontrol robas adalah agar sistem yang sudah dikontrol dapat tahan terhadap gangguan yang berasal dari luar maupun dari dalam.



Gambar 8 Respon sistem ketika diberi pengontrolan

Parameter ketidakpastian δ ditentukan berada diantara 10% hingga 90%, kemudian dilakukan simulasi untuk mengetahui kinerja sistem dalam keadaan tersebut. Maka dari respon pada Gambar 12, dapat dilihat bahwa sistem mencapai kondisi tunak pada $t = 30.27$ detik dengan lonjakan maksimum (M_p) sebesar 1.13 %. Hal ini tentu saja cukup menjanjikan karena berada dibawah kriteria yang ditetapkan. Selain itu nilai γ optimal dari hasil penghitungan didapatkan sebesar 7.0190×10^{-4} .

5 Kesimpulan dan Saran

Pemodelan menggunakan struktur ARX dan jaringan syaraf tiruan (JST) ADALINE memberikan hasil yang valid dengan parameter RMSE yaitu sebesar 0.000745 dan perbandingan grafik keluaran pemodelan dengan keluaran sebenarnya cukup mendekati model sistem yang sebenarnya. Analisis keterkontrolan dan keteramatan yang dilakukan menghasilkan *rank* dan panjang matriksnya bernilai sama yaitu 2. Model matematis yang berupa persamaan ruang keadaan kontinu adalah sebagai berikut

$$\dot{x} = \begin{bmatrix} -3.977 & -6.641 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} x + \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} u$$

$$y = [-0.7358 \quad 1.258]$$

Fungsi alih pengontrol Robas H_∞ yang diperoleh dari penghitungan adalah

$$F(s) = \frac{504952.4804(s + 0.0512)(s^2 + 3.977s + 6.641)}{(s + 2.99 \times 10^5)(s + 28.17)(s + 0.0316)(s + 0.0316)}$$

dengan nilai gamma 7.0190×10^{-4} . Dari perancangan ini didapatkan hasil respon $T_s = 30.27$ detik dan lonjakan maksimum (M_p) = 1.13 % (standar : $T_s = <100$ detik, dan $M_p = <10\%$).

6 Daftar Pustaka

- [1] Suyanto. 2011. *Artificial Intelligent*. Bandung: Informatika.
- [2] Jong Jek Siang. 2009. "Jaringan Syaraf Tiruan & Pemrograman Menggunakan MATLAB". Yogyakarta, Indonesia: ANDI.
- [3] Riza Hakam. 2012. "Perancangan Sistem Kontrol Tekanan Masukan Pada Turbin Menggunakan Pengontrol PID Ruang Keadaan Dengan Metode Peletakan Pole". Bandung: Teknik Fisika, ITB.
- [4] Riza Nuari. 2012. "Perancangan Sistem Kontrol Robas H_∞ Pada Proses Pencetakan Lempeng Baja". Bandung: Teknik Fisika, ITB.
- [5] Michael Green and David J Limebeer. 1995. "Linear robust control". USA: Prentice-Hall, Inc.
- [6] Endra Joelianto. 2011. "Robust H_∞ PID Controller Design Via LMI Solution of Dissipative Integral Backstepping with State Feedback Synthesis," *Robust Control, Theory and Applications*.