

Simulasi Kendali Gerak Longitudinal Pesawat Terbang Menggunakan *Instantaneous Linearization* Berbasis *Neural Network*

Yulia Kartika¹⁾, Muhammad Mujirudin²⁾ & Arjoni Amir³⁾

^{1,2,3)}Program Studi Teknik Elektro Fakultas Teknik

Universitas Muhammadiyah Prof. DR. HAMKA

Jl. Tanah Merdeka No. 6 Kampung Rambutan Ciracas Jakarta Timur DKI Jakarta 13830

Telp.(021) 87782739, Fax. (021) 87782739

E-mail: kartikacleofatra@gmail.com

Abstrak

Pergerakan pesawat pada umumnya dibagi menjadi tiga bagian berdasarkan sumbu pergerakan, yaitu gerak pitching, yawing, dan roll. Pitching merupakan gerak pesawat berdasarkan sumbu horizontal yang tegak lurus terhadap sumbu roll yang menyebabkan hidung pesawat akan turun atau naik. Dalam penelitian ini, penulis meneliti gerak longitudinal atau gerak pitching pesawat terbang saat berada di udara dengan elevator sebagai sinyal kendali gerak pesawat terbang tersebut. Pengendalian gerak longitudinal pesawat terbang dilakukan untuk mendapatkan rise time, delay time, dan settling time yang cepat serta steady state dan overshoot yang kecil dengan cara membuat pemodelan persamaan matematika dari gerak longitudinal pesawat terbang dengan menggunakan Instantaneous Linearization berbasis Neural Network. Algoritma yang digunakan yaitu algoritma BFGS dan Lavenberg Marquadt dengan simulasi menggunakan program MATLAB Ver: 7.8.0.347. Nilai yang diinginkan dalam penelitian ini yaitu waktu naik (rise time), waktu tunda (delay time), dan waktu tunak (steady state) yang tidak lebih dari 2 detik serta overshoot yang tidak lebih dari 5%. Hasil yang diperoleh dari pengendalian sistem gerak longitudinal pesawat terbang diperoleh delay time sebesar 0,12 detik, rise time sebesar 0.84 detik, peak time sebesar 1.24 detik, settling time sebesar 1.48 detik, steady state sebesar 1,6 detik, dan overshoot sebesar 0.38%. Ini menunjukkan bahwa nilai rise time, settling time, dan delay time yang relative cepat, serta steady state dan overshoot yang relative kecil sehingga sistem gerak longitudinal pesawat terbang ini sudah cukup sesuai dengan perancangan pengendalian yang diinginkan.

Kata kunci: kontrol, gerak longitudinal pesawat terbang, Neural Network, Instantaneous Linearization.

Abstract

The movement of aircraft in general is divided into three parts based on the axis of movement, which is pitching motion, yawing, and roll. Pitching is the motion of the aircraft based on the horizontal axis perpendicular to the axis of roll that causes a plane going down or up the nose. In this research, the author would study the motion of longitudinal or an airplane when pitching motion was in the air with an elevator as a signal motion control rapidly the fly. Control of the motion of longitudinal flying plane done to get rise time, a delay time, and settling time fast and steady state and small overshoot with modeling how to make a mathematical equation of using aircraft with longitudinal motion instantaneous linearization based neural network. Algorithms used namely algorithms lavenberg marquadt BFGS and using the program with the simulation matlab ver. 7.8.0.347. Desired value in this research, rise time, delay time and steady state that no more than 2 seconds and overshoot that no more than 5%. The results obtained from the longitudinal plane flying control system of the motion obtained delay 0.12 second time, rise of 0.84 second time, peak time of 1.24 seconds, settling of 1.48 second time, steady state of 1.6 seconds, and overshoot of 0.38%. Showing that the rise time, settling time, and the delay time fast relatively, and steady state and overshoot the relative small longitudinal plane mechanical systems so that flying is enough in accordance with the design of desired control.

Keywords: Control, motion of longitudinal plane, Neural Network, Instantaneous Linearization.

1 PENDAHULUAN

Pergerakan pesawat dibagi menjadi tiga bagian berdasarkan sumbu pergerakan, yaitu gerak

pitching, *yawing*, dan *roll*. *Pitching* merupakan gerak pesawat berdasarkan sumbu horizontal yang tegak lurus terhadap sumbu roll yang menyebabkan hidung pesawat akan turun atau naik. Dalam penelitian ini, penulis akan meneliti gerak longitudinal atau gerak *pitching* pesawat terbang saat berada di udara dengan *elevator* sebagai sinyal kendali gerak pesawat terbang tersebut.

Pengendalian gerak pesawat terbang sangatlah penting terkait tingkat keamanan, ketepatan dan kecepatan pesawat terbang saat melakukan gerakan di udara. Untuk itu, adanya sistem pengaturan kendali yang baik, aman, dan tepat dengan *rise time*, *delay time*, dan *settling time* yang cepat serta *steady state* dan *overshoot* yang kecil, diperlukan dalam pergerakan pesawat terbang.

Perancangan kendali gerak longitudinal pesawat terbang ini dilakukan dengan membuat model matematika dan konstanta persamaan keadaan dari gerak longitudinal pesawat terbang berjenis Boeing 747 menggunakan sumbu kartesian berdasarkan referensi penelitian tesis yang telah ditulis oleh M. Mujirudin [Mujr'03]. Sedangkan *Neural Network*, merupakan salah satu representasi buatan otak manusia yang mensimulasikan proses pembelajaran dari otak manusia, digunakan sebagai pengendalian dalam penelitian ini dengan arsitektur *Instantaneous Linearization* yang diperkenalkan oleh Noorgard dan kemudian disimulasikan dengan menggunakan software Matlab versi 7.8.0.347. Algoritma pembelajaran yang digunakan dalam perancangan ini adalah algoritma Levenberg Marquadt dan BFGS.

2 LANDASAN TEORI

2.1 Model Gerak Longitudinal Pesawat Terbang

Persamaan fungsi alih dari gerak longitudinal pesawat terbang didapatkan dengan cara

mensubstitusi persamaan dengan menggunakan bantuan program MATLAB [Mujr'03]:

$$[A_{long}] = \begin{bmatrix} -1.2984 & -1.6822 & -0.0150 & -0.0002 & 0.0000 \\ 1.0000 & 0 & 0 & 0 & 0.0000 \\ 0 & 1.0000 & 0 & 0 & 0.0000 \\ 0 & 0 & 1.0000 & 0 & 0.0000 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0.0000 \end{bmatrix}$$

$$[B_{long}] = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$[C_{long}] = [0 \quad -2.0800 \quad -1.2613 \quad -0.0130 \quad 0]$$

Sehingga didapatkan persamaan fungsi alih gerak longitudinal pesawat terbang:

$$G_L = \frac{-2.08s^2 - 1.2613s - 0.013}{s^4 + 1.2984s^3 + 1.6822s^2 + 0.01s + 0.0002}$$

2.2 Algoritma Pelatihan

Algoritma pelatihan digunakan untuk melatih *Neural Network* dengan cara mengajarkan contoh-contoh kasus atau pola kepada *Neural Network* sampai berhasil mengenali kasus atau pola tersebut.

2.2.1 Algoritma Lavenberg Marquadt

Berikut ini adalah algoritma Lavenberg-Marquadt yang digunakan Norgaard [Norg'00] [Mujr'03] untuk memodifikasi bobot *Neural Network*:

1. Beri nilai awal bobot w adalah μ .
2. Hitung perubahan bobot yang dihasilkan dengan

menggunakan persamaan

$$\Delta w = -[J^T(w)J(w) + \mu I]^{-1}J^T(w)\epsilon(w).$$

3. Hitung rasio r dengan persamaan berikut:

$$r = \frac{V(w)_{lama} - V(w)_{baru}}{V(w)_{lama} - L}$$

Dimana L didefinisikan sebagai berikut:

$$L = V(w)_{lama} + \Delta w^T G \frac{1}{2} \Delta w^T R \Delta w$$

Jika $r < 0.75r < 0.75$ maka μ dibagi dengan dua.

Jika $r \leq 0.25r \leq 0.25$ maka μ dikalikan dengan dua.

4. Jika $V(w)_{baru}$ lebih kecil dari $V(w)_{lama}$ maka modifikasi bobot dan gunakan nilai μ hasil langkah ke-4.
5. Uji kondisi (iterasi \geq maksimum iterasi atau $V(w)_{baru} <$ galat toleransi) tidak terpenuhi maka kembali ke langkah kedua.
6. Modifikasi Lavenberg-Marquadt dengan Metode Gauss Newton, selesai.

2.2.2 Algoritma Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno (BFGS)

Berikut ini algoritma BFGS untuk update pendekatan inverse Hessian yaitu sebagai berikut [Norg'99] [Mujr'03]:

1. Inisialisasi criteria *General Predictive Control* $J(t, U^{(0)})$ dan gradient $G(U^{(0)})$, inisialisasi pendekatan inverse Hessian $B^{(0)} = I, i = 0$;
2. Menentukan *search direction*:
 $f^{(i)} = -B^{(i)}G[U^{(i)}]$;
3. Menentukan *step size* $\mu^{(i)}$, (dengan algoritma *step size*);
4. Ke langkah (8) jika $|U^{(i)} - U^{(i-1)}| < \delta$;
5. $i = i + 1$;
6. Update pendekatan inverse Hessian, lihat persamaan

$$B^{(i)} = \left[I - \frac{\Delta U^{(i)}(\Delta G^{(i)})^T}{(\Delta G^{(i)})^T \Delta U^{(i)}} \right] B^{(i-1)} \left[I - \frac{\Delta U^{(i)}(\Delta G^{(i)})^T}{(\Delta G^{(i)})^T \Delta U^{(i)}} \right]^T$$

7. Ke langkah 1
8. *Sequance control input* yang akan datang terpenuhi, selesai.
Pada algoritma penentuan *step size* harus diperhatikan dua aturan main dalam melakukan perhitungan, yaitu [Norg'99] [Mujr'03]:

$$f^{(i)T}G[U^{(i)} + \mu f^{(i)}] \geq \beta f^{(i)T}G[U^{(i)}]$$

Berikut ini langkah-langkah algoritma *step size* yang digunakan untuk menentukan *step size* [Norg'99] [Mujr'03]:

$$f^{(i)T}G[U^{(i)} + \mu f^{(i)}] \geq \beta f^{(i)T}G[U^{(i)}]$$

Berikut ini langkah-langkah algoritma *step size* yang digunakan untuk menentukan *step size* [Norg'99] [Mujr'03]:

1. Inisialisasi $\mu = i; I = [b_1, b_2] = [0.1]; J_{b_1} = J(U^{(i)}); G_{b_1} = G[U^{(i)}]$;
2. Evaluasi $J_{b_2} = J(U^{(i)} + \mu f^{(i)})$ dan menghitung gradient $G_{b_2} = G[U^{(i)} + \mu f^{(i)}]$;
3. Jika persamaan $J(U^{(i)} + \mu f^{(i)}) \leq J(U^{(i)}) + \delta \mu f^{(i)T}G[U^{(i)}]$ dan $f^{(i)T}G[U^{(i)} + \mu f^{(i)}] \geq \beta f^{(i)T}G[U^{(i)}]$ keduanya terpenuhi, ke langkah (10);
4. Jika persamaan $J(U^{(i)} + \mu f^{(i)}) \leq J(U^{(i)}) + \delta \mu f^{(i)T}G[U^{(i)}]$ tidak terpenuhi, ke langkah (5);
5. Menghitung β sebagai nilai ekstrim dari persamaan polynomial orde dua yaitu sebagai berikut:

$$P(x) = p_2x^2 + px + p_0$$

Dan,

$$\begin{aligned} P(b_1) &= J_{b_1} & \dots \\ P(b_1) &= f^{(i)T}G_{b_1} & \dots \\ P(b_2) &= J_{b_2} & \dots \end{aligned}$$

Dan masing-masing ekuivalen dengan:

$$\begin{aligned} p_0 &= J_{b_1} - p_2b_1^2 - p_1b_1 \\ p_1 &= f^{(i)T}G_{b_1} - 2p_2b_1 \end{aligned}$$

$$p_2 = \frac{J_{b_2} - J_{b_1} + f^{(i)T}G_{b_1}(b_1 - b_2)}{(b_1 - b_2)^2}$$

Dan,

$$\beta = -\frac{p_1}{2p_2}$$

6. Jika $\{\min(\beta - b_1, b_2 - \beta) \geq 0.1(b_2 - b_1), \mu = \beta; \text{otherwise, } \mu = (b_1 + b_2)/2\}$;
7. Evaluasi criteria $J(U^{(i)} + \mu f^{(i)})$ dan menghitung gradient $G[U^{(i)} + \mu f^{(i)}]$;
8. Jika persamaan $f^{(i)T}G[U^{(i)} + \mu f^{(i)}] \geq \beta f^{(i)T}G[U^{(i)}]$ dan $P(x) = p_2x^2 + px + p_0$ keduanya terpenuhi, ke langkah (10);
9. Jika persamaan $f^{(i)T}G[U^{(i)} + \mu f^{(i)}] \geq \beta f^{(i)T}G[U^{(i)}]$ terpenuhi:
Set $I = [\mu, b_2]; J_{b_1} = J(U^{(i)} + f^{(i)}); G_{b_1} = G(U^{(i)} + f^{(i)})$, ke langkah (5);

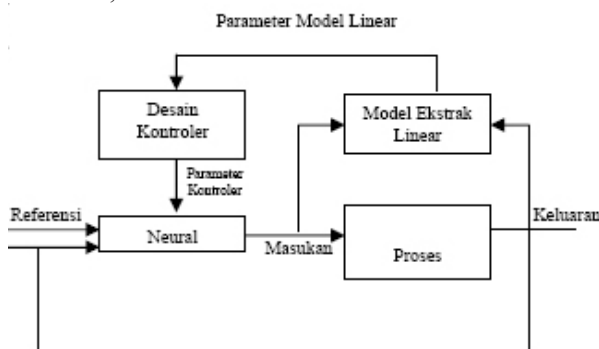
Set yang lain
 $I = [b_2, \mu]; Jb_2 = J(U^{(i)} + f^{(i)}); G_{b_2} = G(U^{(i)} + f^{(i)})$

ke langkah (5);

10. Step size terpenuhi, ke langkah (4) atau (5) algoritma BFGS.

2.3 Sistem Instantaneous Linearization

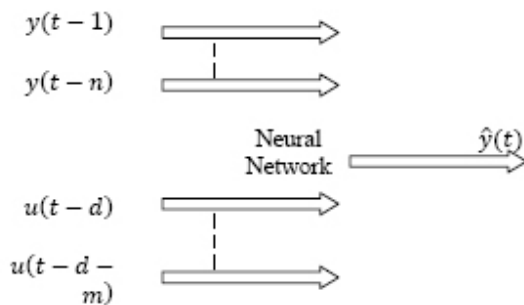
Untuk menerapkan *Neural Network* pada sistem kendali *Instantaneous Linearization* perlu ditentukan konfigurasi yang akan digunakan selain jumlah lapis, jumlah neuron pada tiap lapis, dan fungsi aktivasi yang digunakan pada tiap neuron. Setelah dilakukan pelatihan, pengendalian dapat dilakukan terhadap plant, dan diawali dengan melakukan perhitungan untuk memprediksi keluaran,



Gambar 1 Diagram Instantaneous Linearization

dengan menggunakan bobot-bobot *Neural Network* hasil pelatihan, dan keluaran sistem selama proses berlangsung.

2.4 Pelatihan Neural Network



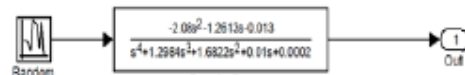
Gambar 2 Diagram Blok Struktur NNARX

Pada gambar 2. ditunjukkan digram struktur NNARX dengan y adalah data keluaran sistem yang akan dilatih, u adalah data masukan sistem yang akan dilatih, \hat{y} adalah keluaran *Neural Network*. Dalam pelatihan ini akan dihasilkan model *Neural Network* yang akan digunakan dalam perhitungan memprediksi keluaran dan sinyal kendali.

2.5 Perancangan Sistem Kendali Gerak Longitudinal Pesawat Terbang

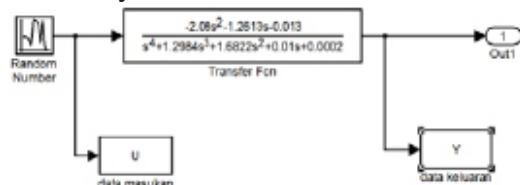
Perancangan sistem kendali gerak longitudinal pesawat terbang dilakukan dengan langkah-langkah sebagai berikut:

- Membuat proses simulasi persamaan gerak longitudinal pesawat terbang dengan menggunakan Simulink.



Gambar 3 Diagram blok pembangkit data

- Membangkitkan data masukan dan keluaran dari simulasi persamaan gerak longitudinal pesawat terbang dengan memberikan sinyal random pada masukan proses. Kemudian data tersebut direkam untuk masukan dan keluarannya.



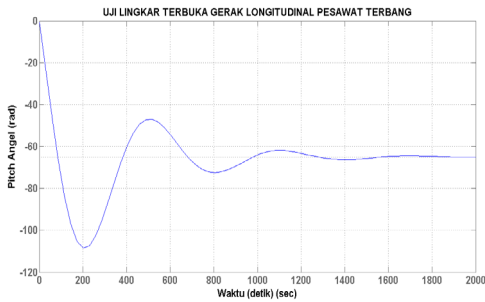
Gambar 4 Diagram blok pembangkit data masukan dan keluaran

- Melakukan pelatihan *Neural Network* dengan metode Lavenberg Marquadt dari toolbox *Neural Network* Noorgard, dimana di dalamnya terdapat fungsi NNARX. Kemudian didapat hasil berupa bobot-bobot *Neural Network* yang akan digunakan dalam proses perhitungan selanjutnya.
- Melakukan simulasi sistem pengendalian gerak longitudinal pesawat terbang dengan menghitung sinyal kendali menggunakan

algoritma BFGS dengan menggunakan algoritma *Instantaneous Linearization*.

3 HASIL DAN PEMBAHASAN

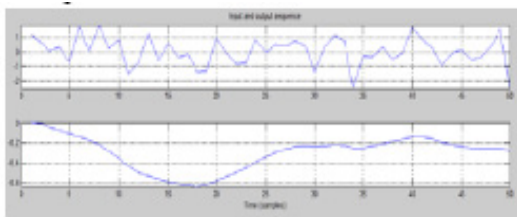
3.1 Uji Loop Terbuka Gerak Longitudinal Pesawat Terbang



Gambar 5 Grafik Tanggapan Uji Loop Terbuka Gerak Longitudinal Pesawat Terbang

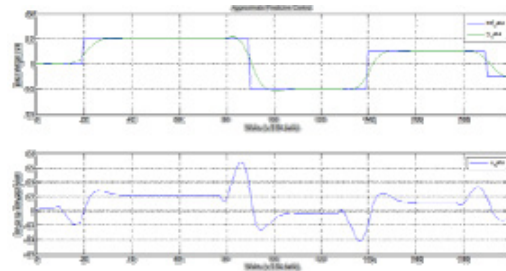
Gambar 5 menunjukkan hasil keluaran sinyal terhadap uji step respon. Sinyal step yang diberikan sebagai masukan membuat sinyal keluaran turun mula-mula dari nol rad menuju -108.4 rad. Kemudian sinyal kembali naik kembali sampai pada -47 rad. Sinyal kemudian berada pada keadaan tunak pada saat -65.22 rad.

3.2 Uji Gerak Longitudinal Pesawat Terbang dengan *Instantaneous Linearization*



Gambar 6 Grafik Hasil Rekam Data Masukan dan Keluaran Gerak Longitudinal Pesawat Terbang

Setelah data direkam, dilakukan pelatihan model *Neural Network* dari toolbox *Neural Network* Noorgard. Parameter-parameter yang diberikan berupa periode sampling sebesar 0.1 detik dengan jumlah sampel sebanyak 200, fungsi aktivasi neuron lapis berupa tanh.

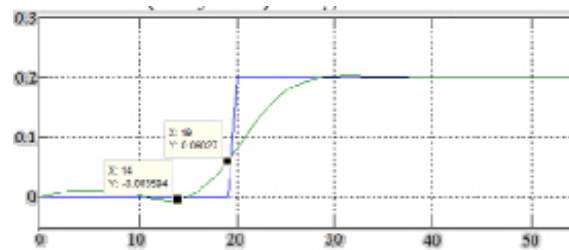


Gambar 7 Grafik Uji Gerak Longitudinal Pesawat Terbang dengan *Instantaneous Linearization*

Setelah didapatkan hasil model sistem berupa bobot-bobot *Neural Network* dari pelatihan sebelumnya, dilakukan perhitungan menggunakan metode perhitungan algoritma BFGS dan algoritma step size. Gambar 7 merupakan grafik tampilan gerak longitudinal pesawat terbang menggunakan *Instantaneous Linearization*.

Dari grafik gambar 4.8, di atas menunjukkan set point mula-mula pada 0 rad menjadi 0.2 rad. Kemudian sinyal tanggapan keluaran mengikuti perubahan set point dengan cepat.

Dari grafik gambar 4.8. jika diperbesar, dapat dicari waktu tunda (*delay time*) sebagai berikut:



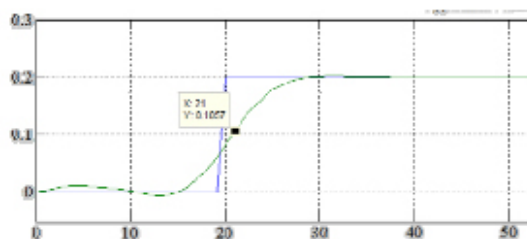
Gambar 8 Waktu Tunda (*delay time*)

Waktu tunda (*delay time*) merupakan waktu yang dibutuhkan tanggapan untuk mencapai setengah dari nilai akhir dari tanggapan untuk pertama kali. Dari Gambar 8. menunjukkan waktu tunda berada pada detik 14 sampai detik 19, maka waktu tunda bernilai:

$$t_d = 19 - 14(0.04) = 0.12 \text{ detik}$$

Jadi, waktu tunda (*delay time*) dari sistem kendali gerak longitudinal pesawat terbang menggunakan *Instantaneous Linearization* sebesar 0.12 detik.

Waktu naik (*rise time*) ditunjukkan oleh gambar berikut:

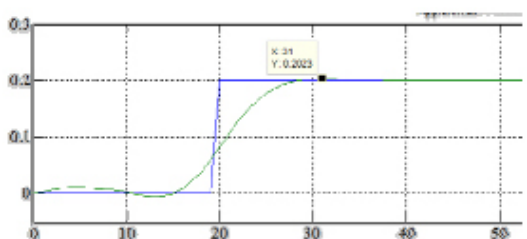


Gambar 9 Waktu Naik (*rise time*)

Waktu naik (*rise time*) merupakan waktu yang dibutuhkan untuk naik dari 10% - 90%, 5% - 95%, atau 0% - 100% dari nilai akhir tanggapan. Sehingga dari gambar 4.10. diperoleh nilai *rise time* sebesar:

$$t_r = 21 \times (0.04) = 0.84 \text{ detik}$$

Jadi, waktu naik (*rise time*) dari sistem kendali gerak longitudinal pesawat terbang menggunakan *Instantaneous Linearization* sebesar 0.84 detik.

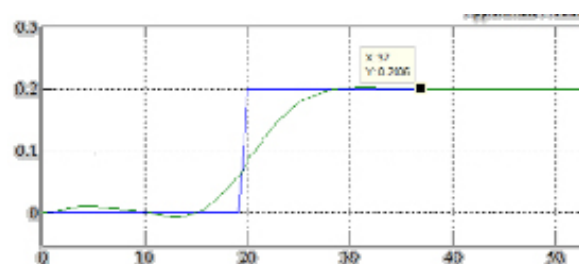


Gambar 10 Waktu Puncak (*peak time*)

Untuk waktu puncak (*peak time*) ditunjukkan oleh gambar 10. Waktu puncak (*peak time*) merupakan waktu yang dibutuhkan tanggapan untuk mencapai nilai puncak dari *overshoot* pertama kali. Dari gambar 4.11. diperoleh waktu puncak sebesar:

$$t_p = 31 \times (0.04) = 1.24 \text{ detik}$$

Jadi, waktu puncak (*peak time*) dari sistem kendali gerak longitudinal pesawat terbang menggunakan *Instantaneous Linearization* sebesar 1.24 detik. Waktu *settling* (*settling time*) ditunjukkan oleh gambar berikut:



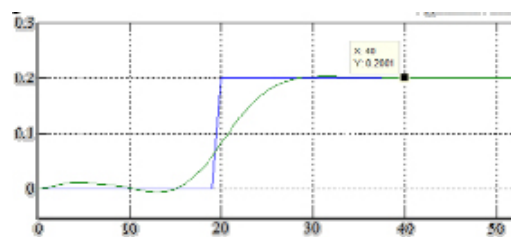
Gambar 11 Waktu *settling* (*settling time*)

Waktu *settling* (*settling time*) merupakan waktu yang dibutuhkan untuk mencapai nilai akhir dari tanggapan dan tetap berada pada nilai tersebut dalam range persentase tertentu dari nilai akhir (biasanya 5% atau 2%). Dari gambar 11 dapat diperoleh *settling time* sebesar:

$$t_s = 37 \times (0.04) = 1.48 \text{ detik}$$

Jadi, waktu *settling* (*settling time*) dari sistem kendali gerak longitudinal pesawat terbang menggunakan *Instantaneous Linearization* sebesar 1.48 detik.

Waktu tunak (*steady state*) ditunjukkan oleh gambar berikut ini:

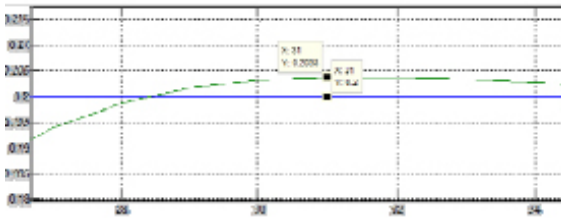


Gambar 12 Waktu Tunak (*steady state*)

Waktu tunak (*steady state*) merupakan waktu saat sistem tidak berubah dengan berjalannya waktu atau konstan. Dari grafik dapat diperoleh nilai waktu tunak (*steady state*) sebesar:

$$t_{ss} = 40 \times (0.04) = 1.6 \text{ detik}$$

Jadi, waktu tunak (*steady state*) dari sistem kendali gerak longitudinal pesawat terbang menggunakan *Instantaneous Linearization* sebesar 1.6 detik. Untuk *overshoot* dapat ditunjukkan dari gambar di bawah ini:



Gambar 13 *Overshoot Maksimum*

Overshoot maksimum (*maximum overshoot*) merupakan nilai puncak maksimum dari tanggapan diukur dari nilai akhir dari tanggapan. Biasanya dirumuskan dalam persentase. Dari grafik di atas dapat diperoleh nilai *overshoot* maksimum sebesar:

$$M_p = (0.2038 - 0.2) \times 100\% = 0.38\%$$

Jadi, *overshoot* maksimum dari sistem kendali gerak longitudinal pesawat terbang sebesar 0.38%.

Dari keseluruhan grafik di atas, terlihat bahwa nilai *rise time*, *settling time*, dan *delay time* yang relative cepat, serta *steady state* dan *overshoot* yang relative kecil. Hal ini berarti, sistem gerak longitudinal pesawat terbang ini sudah cukup sesuai dengan perancangan pengendalian yang diinginkan.

4 SIMPULAN

1. Sistem gerak longitudinal pesawat terbang berupa sistem dengan orde empat dengan masukan deflaksi elevator dan keluaran pitch angel.
2. Simulasi kendali dari sistem gerak longitudinal pesawat terbang dengan menggunakan *Instantaneous Linearization* berbasis *Neural Network* telah berhasil dilakukan dengan delay time sebesar 0,12 detik, rise time sebesar 0.84 detik, peak time sebesar 1.24 detik, settling time sebesar 1.48 detik, steady state sebesar 1,6 detik, dan overshoot sebesar 22% .
3. Dari hasil yang diperoleh dari pengendalian

sistem gerak longitudinal pesawat terbang menunjukkan bahwa nilai *rise time*, *settling time*, *delay time*, dan *steady state* yang kurang dari 2 detik, serta *overshoot* yang kurang dari 5% sehingga sistem gerak longitudinal pesawat terbang ini sesuai dengan perancangan pengendalian yang diinginkan.

4. Hasil dari sistem kendali gerak longitudinal pesawat terbang ini dirasakan masih perlu dilakukan pengkajian kembali untuk mendapatkan hasil yang lebih maksimal dengan memberikan variasi dari sistem gerak lateral pesawat terbang, struktur model, serta arsitektur *neural network* seperti *feedback linearization* atau *optimal control*.

KEPUSTAKAAN

- [1] Amir, Arjoni. 2003. Rancang Bangun Kendali Start-Up dan Daya Tetap Reaktor Riset Kartini dengan Algoritma Jaringan Syaraf Tiruan. ITB: Bandung.
- [2] Bishop, Robert. *Modern Control System Analysis and Design Using MATLAB*. Addison-Wesley; Austin.
- [3] Golten, Jack. Verwer, A. 1991. *Control System Design and Simulation*. Mc-Graw Hill: UK.
- [4] Goodwin, Graham. 2000. *Control System Design*. John Wiley; USA.
- [5] Hermawan, Arief. 2006. *Jaringan Saraf Tiruan Teori dan Aplikasi*. Andi Offset: Yogyakarta.
- [6] Jek Siang, Jong. 2005. *Jaringan Syaraf Tiruan & Pemrogramannya Menggunakan Matlab*. Andi Offset: Yogyakarta.
- [7] Mujirudin, Muhammad. 2003. *Simulasi Pengendalian Gerak Pesawat Terbang dengan Nonlinear Predictive Control Berbasis Neural Network*. UI: Jakarta.
- [8] Nise, Norman. 2011. *Control System Engineering Sixth Edition*. John Wiley; USA.

- [9] Norgaard, M. 2000. *Neural Network Based Control System Design Toolkit and Neural Network Based Identification Toolbox Ver. 2*. Department of Automation, Department of Mathematical Modelling, Technical University of Denmark.
- [10] Philips, Charles. 1998. *Dasar-Dasar Sistem Kontrol Edisi Bahasa Indonesia*. Prentice Hall: New Jersey.
- [11] Puspitaningrum, Diyah. 2006. *Pengantar Jaringan Saraf Tiruan*. Andi Offset: Yogyakarta.