

Desain Kontrol Vibrasi Semi Aktif Reaksi *Fixed Point* Menggunakan Pengontrol H_∞

Sutrisno, Widowati
Jurusan Matematika FMIPA UNDIP

ABSTRAK

Desain kontrol vibrasi struktur tipe semi aktif reaksi *fixed point* terdiri dari Massa, Pegas, Dashpot, Sensor dan Pengontrol. Pengontrol pada sistem ini didesain dengan menggunakan Metode H_∞ . Studi kasus pada sistem proteksi *Hard Disk* dilakukan untuk mengetahui performansi sistem dengan pengontrol (lup tertutup) dan membandingkannya dengan performansi sistem tanpa pengontrol (lup terbuka). Performansi sistem lup tertutup lebih baik dibandingkan dengan performansi sistem lup terbuka dilihat dari hasil simulasi menggunakan MATLAB dengan input fungsi tangga dan fungsi impulsu.

Kata kunci : Desain Kontrol Vibrasi, Metode H_∞ , Pengontrol H_∞

ABSTRACT

The semi active fixed point reaction type of Structure Vibration Control Design contain of mass, spring, dashpot, sensor and controller. The controller in this system designed using H_∞ method. Case study of Hard Disk Protection System make to analysis the performance of close loop system and appeal with the performance of open loop system viewed from output of simulation using MATLAB with step function and impulse function as input.

Keywords : Vibration control design, H_∞ method, H_∞ controller

1. Pendahuluan

Suatu struktur mengandung massa dan elastisitas yang mempunyai kemampuan untuk bergerak secara relatif. Apabila gerakan ini berulang sendiri dalam interval waktu tertentu, gerakan ini dinamakan getaran / vibrasi (*vibration*) [8]. Getaran dapat berasal dari energi sisa yang dikeluarkan oleh sistem seperti getaran pada mesin atau berasal dari luar sistem seperti gempa bumi. Pada umumnya, getaran tidak diinginkan

karena dapat menimbulkan bunyi, merusak bagian sistem, dan memindahkan gaya yang tidak diinginkan serta menggerakkan benda disekitar sistem. Oleh karena itu, dibutuhkan suatu sistem yang kokoh (*robust*) yaitu ketahanan sistem akan suatu getaran yang dialami. Untuk itu, dikembangkan berbagai macam desain kontrol vibrasi seperti pada Gambar 1.1 [7].

	Tipe Pasif	Tipe Semiaktif	Tipe Aktif	Tipe Hibrid
Reaksi Fixed Point				
Massa Tambahan				
Struktur Tambahan				

Gambar 1.1 Klasifikasi desain kontrol vibrasi

2. Persamaan Ruang Keadaan

Persamaan ruang keadaan (*State Space Equation*) dari suatu Sistem Dinamik Linear yang tidak berubah terhadap waktu atau sistem LTI (*Linear Time Invariant*) dapat diekspresikan oleh sistem persamaan diferensial berikut [6]

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t), \quad x(t_0) = x_0, \dots \dots \dots (2.1)$$

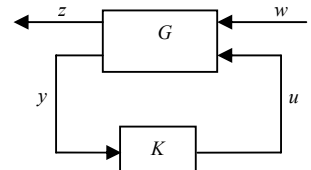
$$y(t) = Cx(t) + Du(t), \dots \dots \dots (2.2)$$

dengan $x(t) \in \mathbb{R}^n$ adalah keadaan sistem, $x(t_0)$ adalah syarat awal sistem, $u(t) \in \mathbb{R}^m$ adalah input sistem, dan $y(t) \in \mathbb{R}^p$ adalah output sistem. Sedangkan A , B , C , dan D adalah matriks real konstan.

Fungsi alih dari input $u(t)$ ke output $y(t)$ dinyatakan oleh [6]

$$G(s) = C(sI - A)^{-1}B + D, \dots \dots \dots (2.3)$$

Sistem lup tertutup yaitu sistem yang terdiri dari Plant diperimum G dan pengontrol K , dan dapat digambarkan dengan diagram blok pada gambar 2.2.



Gambar 2.2. Diagram blok sistem lup tertutup

Plant diperimum G terdiri dari objek yang dikontrol ditambahkan dengan semua fungsi bobot untuk objek tersebut. Input w merupakan semua input dari luar yang mempengaruhi sistem termasuk gangguan, z merupakan keluaran yang di kendalikan (dikontrol), y merupakan keluaran Plant yang diperimum dan dijadikan input ke pengontrol, dan u adalah masukan gaya kontrol ke G .

Bentuk umum model dinamik dari Plant diperimum G diberikan oleh [13]

$$\left. \begin{aligned} \dot{x}(t) &= Ax(t) + B_1w(t) + B_2u(t) \\ z(t) &= C_1x(t) + D_{11}w(t) + D_{12}u(t) \\ y(t) &= C_2x(t) + D_{21}w(t) + D_{22}u(t) \end{aligned} \right\}, \dots (2.4)$$

Diasumsikan Plant G dan pengontrol K adalah real rasional dan proper, sehingga model ruang keadaan dari G dan K dapat ditentukan (*available*) dan realisasi dari kedua model tersebut adalah terstabilkan (*stabilizable*) dan terdeteksi (*detectable*) [12]. Realisasi matriks alih plant diperimum G dari sistem persamaan (2.4) berbentuk

$$G(s) = \left[\begin{array}{c|cc} A & B_1 & B_2 \\ \hline C_1 & D_{11} & D_{12} \\ C_2 & D_{21} & D_{22} \end{array} \right], \dots\dots\dots (2.5)$$

dengan asumsi-asumsi

1. (A, B_1) terkontrol dan (C_1, A) terobservasi
2. (A, B_2) terstabilkan dan (C_2, A) terdeteksi
3. $D_{12}^T [C_1 \ D_{12}] = [0 \ I]$
4. $\begin{bmatrix} B_1 \\ D_{21} \end{bmatrix} D_{21}^T = \begin{bmatrix} 0 \\ I \end{bmatrix}$

Asumsi-asumsi tersebut menjamin bahwa dua buah persamaan aljabar *riccati* yang bersesuaian dengan (2.5) mempunyai solusi terstabilkan definit positif dan untuk asumsi (2) merupakan syarat perlu dan cukup supaya G terstabilkan secara internal. Ada dua buah asumsi tambahan yang disertakan secara implisit yaitu $D_{11} = 0$ dan $D_{22} = 0$. Kedua asumsi tambahan ini digunakan untuk menyederhanakan model. Dari model yang sudah disederhanakan ini, akan digunakan teori kontrol H_∞ yang disederhanakan untuk mendesain pengontrolnya.

3. Teori Kontrol H_∞

Misalkan pengontrol K mempunyai bentuk umum berikut :

$$\left. \begin{array}{l} \dot{v}(t) = \hat{A}v(t) + \hat{B}y(t) \\ u(t) = \hat{C}v(t) + \hat{D}y(t) \end{array} \right\}, \dots\dots\dots (3.1)$$

Masalah kontrol optimal H_∞ adalah mencari pengontrol optimal $K(s)$ yang diperkenankan sedemikian sehingga $\|T_{zw}\|_\infty$ minimum. Tetapi untuk mencari pengontrol $K(s)$ yang optimal sangat sulit dicari baik menggunakan cara analitik maupun menggunakan cara numerik, sehingga cukup dicari pengontrol suboptimal H_∞ yaitu pengontrol yang

mempunyai norm yang cukup dekat dengan norm pengontrol optimal H_∞ . Untuk selanjutnya, pengontrol suboptimal H_∞ cukup kita tulis dengan pengontrol H_∞ . Masalah kontrol suboptimal H_∞ adalah menentukan semua pengontrol yang diperkenankan K sedemikian sehingga norm dari sistem lup tertutup $\|T_{zw}\|_\infty < \gamma$ untuk suatu $\gamma > 0$. Teorema 2.1 berikut memberikan metode untuk merancang pengontrol H_∞ .

Teorema 2.1 [12]

Terdapat pengontrol yang diperkenankan sedemikian sehingga $\|T_{zw}\|_\infty < \gamma$ jika dan hanya jika ketiga kondisi berikut terpenuhi

1. Matriks Hamiltonian $\tilde{H}_\infty \in \text{dom}(\text{Ric})$ dan $X_\infty := \text{Ric}(\tilde{H}_\infty) > 0$
2. Matriks hamiltonian $\tilde{J}_\infty \in \text{dom}(\text{Ric})$ dan $Y_\infty := \text{Ric}(\tilde{J}_\infty) > 0$
3. $\rho(X_\infty Y_\infty) < \gamma^2$

dengan

$$\tilde{H}_\infty = \begin{bmatrix} A & \gamma^{-2} B_1 B_1^T - B_2 B_2^T \\ -C_1^T C_1 & -A^T \end{bmatrix}$$

$$\tilde{J}_\infty = \begin{bmatrix} A^T & \gamma^{-2} C_1^T C_1 - C_2^T C_2 \\ -B_1 B_1^T & -A \end{bmatrix}$$

Jika ketiga kondisi diatas dipenuhi, maka salah satu pengontrol K yang diperkenankan mempunyai realisasi

$$K_{sub}(s) = \left[\begin{array}{c|c} \hat{A}_\infty & -Z_\infty L_\infty \\ \hline F_\infty & 0 \end{array} \right], \dots\dots\dots (3.2)$$

dengan

$$\hat{A}_\infty = A + \gamma^{-2} B_1 B_1^T X + B_2 F_\infty + Z_\infty L_\infty C_2$$

$$F_\infty = -B_2^T X_\infty$$

$$L_\infty = -Y_\infty C_2^T$$

$$Z_\infty = (I - \gamma^{-2} X_\infty Y_\infty)^{-1}$$

Teorema 2.1 menunjukkan eksistensi pengontrol H_∞ serta langkah-langkah untuk mencari pengontrol H_∞ yang diperkenankan.

Berikut diberikan langkah-langkah untuk merancang pengontrol H_∞ .

Langkah 1. Menentukan nilai γ dengan menggunakan Algoritma Bisection [12].

Langkah 2. Menentukan matriks Hamiltonian \tilde{H}_∞ dan \tilde{J}_∞ yang bersesuaian dengan γ .

Langkah 3. Menentukan matriks X_∞ dan Y_∞ yang merupakan solusi dari persamaan $X_\infty A + A^T X_\infty + X_\infty (B_1 B_1^T / \gamma^2 - B_2 B_2^T) X_\infty + C_1^T C_1^T = 0$ dan

$A Y_\infty + Y_\infty A^T + Y_\infty (C_1^T C_1 / \gamma^2 - C_2^T C_2) Y_\infty + B_1 B_1^T = 0$ berturut-turut merupakan persamaan aljabar *riccati* yang bersesuaian dengan matriks Hamiltonian \tilde{H}_∞ dan \tilde{J}_∞ .

Langkah 4. Menentukan realisasi pengontrol H_∞ pada persamaan (3.2). Keseluruhan dari langkah-langkah untuk merancang pengontrol H_∞ diatas dinamakan metode H_∞ .

Jika realisasi pengontrol sudah diperoleh, selanjutnya kita cari fungsi alih sistem lup tertutup yang dilambangkan oleh T_{zw} yang didefinisikan oleh [12]

$$T_{zw}(s) = C_c (sI - A_c)^{-1} B_c + D_c, \dots (2.8)$$

dengan

$$A_c = \begin{bmatrix} A + B_2 \hat{D} C_2 & B_2 \hat{C} \\ \hat{B} C_2 & \hat{A} \end{bmatrix},$$

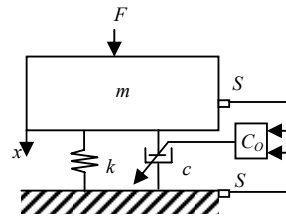
$$B_c = \begin{bmatrix} B_1 + B_2 \hat{D} D_{21} \\ \hat{B} D_{21} \end{bmatrix},$$

$$C_c = [C_1 + D_{12} \hat{D} C_2 \quad D_{12} \hat{C}],$$

$$D_c = D_{12} \hat{D} D_{21}$$

4. Desain Kontrol Vibrasi Semi Aktif Reaksi *Fixed Point*

Desain kontrol vibrasi semi aktif reaksi *fixed point* mempunyai bentuk seperti pada Gambar 4.1 [5].



Gambar 4.1. Desain kontrol vibrasi semi aktif reaksi *fixed point*

dengan m adalah massa Plant, k_p adalah konstanta pegas, c adalah koefisien dashpot, S adalah sensor gerak, x adalah posisi m atau jarak antara m dan tumpuan, F adalah gaya yang bekerja pada m , dan Co adalah pengontrol. Persamaan ruang keadaan dari sistem pada Gambar 4.1 yaitu

$$\dot{x} = Ax + Bu, \dots (4.1)$$

$$y = Cx + Du, \dots (4.2)$$

dengan

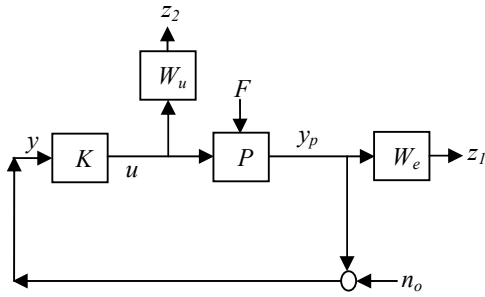
$$\dot{x} = \begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix}, x = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix}, u = F,$$

$$A = \begin{bmatrix} 0 & I \\ -\frac{k_p}{m} & -\frac{c}{m} \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{m} \end{bmatrix}$$

$$C = [1 \quad 0], D = 0$$

Misalkan P adalah plant, K adalah pengontrol, n_o adalah noise, W_u adalah fungsi bobot kontrol, dan W_e adalah fungsi bobot kinerja, maka desain kontrol vibrasi semi aktif reaksi *fixed point* dapat

digambarkan sabagai diagram blok pada Gambar 4.2 [12].



Gambar 4.2. Diagram blok dari Plant beserta bobot kontrol, bobot kinerja dan pengontrol

Untuk mengubah masalah kontrol diagram blok pada Gambar 4.2 menjadi masalah kontrol H_∞ , maka diagram blok tersebut diubah menjadi diagram blok pada Gambar 2.2 [12].

Misalkan plant P , fungsi bobot W_e , dan fungsi bobot W_u mempunyai realisasi ruang keadaan sebagai berikut

$$P = \begin{bmatrix} A_p & B_p \\ C_p & D_p \end{bmatrix}, \quad W_u = \begin{bmatrix} A_{W_u} & B_{W_u} \\ C_{W_u} & D_{W_u} \end{bmatrix}, \text{ dan}$$

$$W_e = \begin{bmatrix} A_{W_e} & B_{W_e} \\ C_{W_e} & D_{W_e} \end{bmatrix}$$

maka plant diperumum G dapat direpresentasikan sebagai sistem persamaan berikut :

$$\left. \begin{aligned} \dot{x} &= Ax + B_1 w + B_2 u \\ z &= C_1 x + D_{11} w + D_{12} u \\ y &= C_2 x + D_{21} w + D_{22} u \end{aligned} \right\}, \dots\dots\dots (4.3)$$

dengan

$$x = \begin{bmatrix} x_p \\ x_{W_e} \\ x_{W_u} \end{bmatrix}, \quad w = \begin{bmatrix} F \\ n_o \end{bmatrix}, \quad z = \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \end{bmatrix}$$

$$A = \begin{bmatrix} A_p & 0 & 0 \\ B_{W_e} C_p & A_{W_e} & 0 \\ 0 & 0 & A_{W_u} \end{bmatrix}, \quad B_1 = \begin{bmatrix} B_p & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix},$$

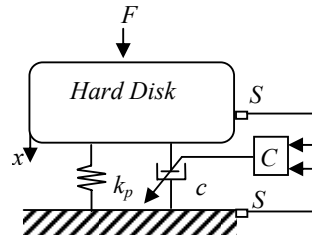
$$B_2 = \begin{bmatrix} B_p \\ 0 \\ B_{W_u} \end{bmatrix}, \quad C_1 = \begin{bmatrix} D_{W_e} C_p & C_{W_e} & 0 \\ 0 & 0 & C_{W_u} \end{bmatrix},$$

$$C_2 = \begin{bmatrix} -C_p & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad D_{11} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$D_{12} = \begin{bmatrix} 0 \\ D_{W_u} \end{bmatrix}, \quad D_{21} = \begin{bmatrix} 0 & -I \end{bmatrix}, \quad D_{22} = 0$$

Untuk mendesain pengontrol H_∞ , dibutuhkan nilai-nilai untuk besaran m , k_p , dan c . Untuk menentukan besaran-besaran tersebut, akan dilakukan studi kasus pada sistem proteksi *Hard Disk* yang dipasang dibeberapa alat transportasi seperti pesawat atau kapal untuk menyimpan data.

Skema dari sistem proteksi *Hard Disk* beserta pengontrolnya dapat dilihat pada Gambar 4.3.



Gambar 4.3 Skema sistem proteksi Hard Disk dan pengontrolnya

Spesifikasi dari sistem pada Gambar 3.4 yaitu massa *Hard Disk* (m) adalah 4,59 kg, konstanta pegas (k_p) adalah 3500

N/m dan koefisien dashpot (c) adalah 11 Ns/m [8]. Input pada sistem ini adalah Gaya F dan outputnya adalah posisi *Hard Disk* atau jarak antara *Hard Disk* dengan tumpuan (x).

Sistem pada Gambar 3.4 identik dengan sistem pada Gambar 4.1, sehingga berdasarkan persamaan (4.1) dan (4.2), persamaan ruang keadaan plant sistem ini adalah

$$\dot{x} = Ax + Bu, \dots\dots\dots (4.4)$$

$$y = Cx + Du, \dots\dots\dots (4.5)$$

dengan

$$x = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix}, \quad \dot{x} = \begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix}, \quad u = F$$

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\frac{3500}{4,59} & -\frac{11}{4,59} \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{4,59} \end{bmatrix},$$

$$C = [1 \ 0], \quad D = 0$$

Misalkan fungsi bobot kontrol W_u yang dipilih yaitu [12]

$$W_u = \frac{2}{s+2}, \dots\dots\dots (4.6)$$

persamaan ruang keadaan dari fungsi bobot W_u yaitu

$$\dot{x}_{W_u} = -2x_{W_u} + u, \dots\dots\dots (4.7)$$

$$z_2 = 2x_{W_u} + 0u, \dots\dots\dots (4.8)$$

Misalkan fungsi bobot kinerja W_e yang dipilih yaitu [12]

$$W_e = \frac{s+1}{s+10}, \dots\dots\dots (4.9)$$

Persamaan ruang keadaan dari fungsi bobot W_e yaitu

$$\dot{x}_{W_e} = -10x_{W_e} + 4y_p, \dots\dots\dots (4.10)$$

$$z_1 = -2,25x_{W_e} + y_p, \dots\dots\dots (4.11)$$

Berdasarkan persamaan (4.3) diperoleh persamaan ruang keadaan plant diperumum dari sistem proteksi *hard disk* yaitu

$$\left. \begin{aligned} \dot{x} &= Ax + B_1w + B_2u \\ z &= C_1x + D_{11}w + D_{12}u \\ y &= C_2x + D_{21}w + D_{22}u \end{aligned} \right\}, \dots\dots\dots (4.12)$$

dengan

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\frac{3500}{4,59} & -\frac{11}{4,59} & 0 & 0 \\ 4 & 0 & -2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -10 \end{bmatrix},$$

$$B_1 = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ \frac{1}{4,59} & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad B_2 = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{4,59} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$C_1 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -2,25 \end{bmatrix},$$

$$C_2 = [-1 \ 0 \ 0 \ 0]$$

$$D_{11} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad D_{12} = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix},$$

$$D_{21} = [0 \ -1], \quad D_{22} = 0$$

Setelah persamaan ruang keadaan plant diperumum didapat, selanjutnya adalah merancang pengontrol yang diperkenankan dalam hal ini pengontrol H_∞ dengan menggunakan metode H_∞ [12], dengan langkah-langkah yang digunakan seperti pada bagian 3.

Dengan menggunakan program MATLAB, diperoleh

$$X_\infty = \begin{bmatrix} 0,0011 & 0 & 0,0057 & 0 \\ 0 & 0 & 0,0013 & 0 \\ 0,0057 & 0,0013 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0,2531 \end{bmatrix},$$

$$Y_\infty = \begin{bmatrix} -0,0099 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0,0099 & 0 & 0 \\ -0,0001 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

dan realisasi pengontrol H_∞ pada persamaan (3.2) yaitu sebagai berikut

$$K_{sub}(s) = \left[\begin{array}{c|c} \hat{A} & \hat{B} \\ \hline \hat{C} & \hat{D} \end{array} \right]$$

dengan

$$\hat{A} = \hat{A}_\infty = \begin{bmatrix} 0,0099 & 1 & 0 & 0 \\ -762,5273 & -0,23965 & -0,0001 & 0 \\ 1,0001 & 0 & -2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -10 \end{bmatrix}$$

$$\hat{B} = -Z_\infty L_\infty = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -0,0099 \\ 0 \\ -0,0001 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0,0099 \\ 0 \\ -0,0001 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$\hat{C} = F_\infty = \begin{bmatrix} -0,0016 \cdot 10^3 & -0,0007 \cdot 10^3 & -0,2825 \cdot 10^3 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\hat{D} = 0$$

Setelah realisasi dari pengontrol sudah diperoleh, maka dapat kita cari fungsi alih sistem lup tertutup. Berdasarkan persamaan (2.8), fungsi alih sistem lup tertutup dari sistem ini adalah :

$$T_{zw}(s) = \mathbf{G}(s) = \begin{bmatrix} G_{11}(s) & G_{12}(s) \\ G_{21}(s) & G_{22}(s) \end{bmatrix}$$

dengan

$$G_{11}(s) = \frac{0,4357s^3 + 1,911s^2 + 334,3s + 664,5}{s^6 + 8,783s^5 + 1554s^4 + 9788s^3 + 90210s^2 + 2,3410^6s + 2,32610^6}$$

$$G_{12}(s) = \frac{6,991 \cdot 10^{-9}s^2 - 4,859 \cdot 10^{-7}s + 1,888 \cdot 10^{-6}}{s^5 + 6,783s^4 + 1540s^3 + 6709s^2 + 5,887s + 1,163 \cdot 10^6}$$

$$G_{21}(s) = \frac{1,38 \cdot 10^8 s^2 - 9,717 \cdot 10^7 s + 3,76 \cdot 10^6}{s^6 + 8,783s^5 + 1554s^4 + 9788s^3 + 90210s^2 + 2,3410^6s + 2,32610^6}$$

$$G_{22}(s) = \frac{3,209 \cdot 10^8 s^4 - 2,153 \cdot 10^6 s^3 + 2,779 \cdot 10^5 s^2 - 0,00168s + 0,000008}{s^5 + 6,783s^4 + 1540s^3 + 6709s^2 + 5,887 \cdot 10^6s + 1,163 \cdot 10^6}$$

dan persamaan ruang keadaan dari sistem lup tertutup adalah

$$\dot{x}_c(t) = A_c x_c(t) + B_c w(t) \dot{x}$$

$$z(t) = C_c \begin{bmatrix} x(t) \\ v(t) \end{bmatrix} + D_c w(t)$$

atau dapat dituliskan sebagai

$$T_{zw} = \left[\begin{array}{c|c} A_c & B_c \\ \hline C_c & D_c \end{array} \right]$$

dengan

$$A_c = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -762,5272 & -2,3965 & 0 & 0 & 0 & 0 & -0,0001 & 0 \\ 1 & 0 & -2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -10 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -0,0099 & 0 & 0 & 0 & 0,0099 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -762,5273 & -2,3965 & -0,0001 & 0 \\ -0,0001 & 0 & 0 & 0 & 1,0001 & 0 & -2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -10 \end{bmatrix}$$

$$B_c = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0,2179 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & -0,0099 \\ 0 & 0 \\ 0 & -0,0001 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

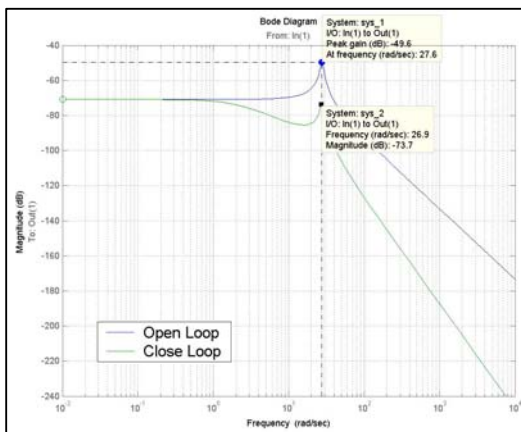
$$C_c = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -2,25 & 0 & 0 & -0,0003 & 0 \end{bmatrix}$$

$$D_c = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Sistem lup tertutup ini stabil karena $R(\lambda_i(A_c)) < 0$ dengan nilai eigen dari matriks A_c yaitu

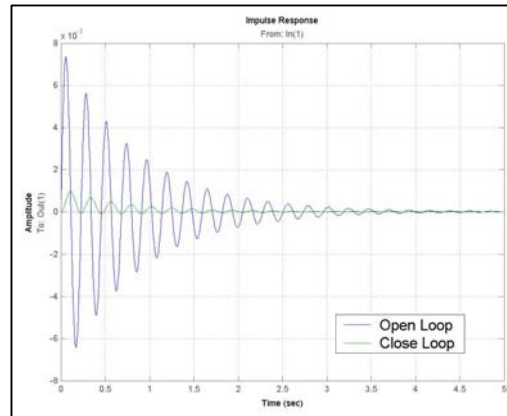
$$\begin{aligned} \lambda_1 &= -2 \\ \lambda_2 &= -1,1983 + 27,5879i \\ \lambda_3 &= -1,1983 - 27,5879i \\ \lambda_4 &= -1,1933 + 27,5877i \\ \lambda_5 &= -1,1933 - 27,5877i \\ \lambda_6 &= -2 \\ \lambda_7 &= -10 \\ \lambda_8 &= -10 \end{aligned}$$

Selanjutnya, kinerja (performansi) dari sistem lup terbuka dan sistem lup tertutup diberikan pada Gambar 4.4 sampai dengan Gambar 4.6



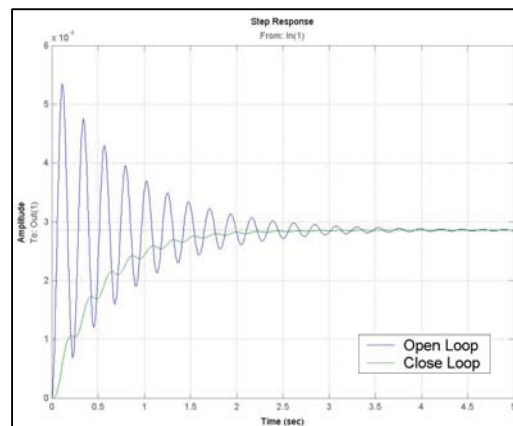
Gambar 4.4 Grafik Respon Frekuensi

Grafik respon frekuensi dapat digunakan untuk mengetahui performansi sistem dilihat dari nilai Magnitudo. Semakin kecil nilai magnitudo, maka performansi akan semakin baik. Dari grafik pada Gambar 4.4, dapat dilihat bahwa nilai Magnitudo sistem lup tertutup adalah -3,7 dB pada frekuensi 26,9 rad/s, lebih kecil dibanding lup terbuka yaitu -49,6 dB pada frekuensi 27,6 rad/s. Ini menunjukkan performansi sistem lup tertutup lebih baik dibanding lup terbuka dilihat dari nilai Magnitudo pada grafik respon frekuensi. Pada Gambar 4.5 berikut disajikan grafik *Impulse Response*.



Gambar 4.5 Grafik Impulse Response

Dari Gambar 4.5 dapat dilihat perbandingan performansi sistem lup terbuka dengan lup tertutup. Performansi sistem lup tertutup lebih baik dibandingkan lup terbuka, dapat dilihat dari grafiknya, dimana osilasi dari sistem lup tertutup mempunyai amplitudo yang lebih kecil dari pada amplitudo sistem lup terbuka. Waktu yang dibutuhkan untuk mencapai kestabilan sistem lup tertutup lebih cepat dibanding sistem lup terbuka, dapat dilihat dari grafik diatas dimana pada waktu sekitar 2,5 detik, sistem lup tertutup sudah berhenti berosilasi, sedangkan sistem lup terbuka masih berosilasi.



Gambar 4.6 Grafik Step Response

Dari grafik step response pada Gambar 4.6 dapat dilihat bahwa performansi sistem lup tertutup lebih baik dari pada sistem lup terbuka dimana

osilasi dari sistem lup tertutup lebih kecil dibandingkan dengan sistem lup terbuka.

Perbandingan performansi antara sistem lup terbuka (sebelum dikontrol) dengan sistem lup tertutup (setelah dikontrol) dapat dilihat pada Tabel 4.1 dan Tabel 4.2.

Tabel 4.1. Perbandingan performansi *impulse response*

NO	PERFORMANSI	LUP TERBUKA	LUP TERTUTUP
1	Peak Amplitudo	0,00736 cm (0,058 dtk)	0,000959 cm (0,109 dtk)
2	Settling Time	3,26 dtk	2,86 dtk
3	Steady State	5,96 dtk	3,36 dtk

Tabel 4.2. Perbandingan performansi *step response*

NO	PERFORMANSI	LUP TERBUKA	LUP TERTUTUP
1	Peak Amplitudo	0,000535 cm (0,116 dtk)	0,000286 cm (4,04 dtk)
2	% Overshoot	87,1 %	0,0261 %
3	Settling Time	3,2 dtk	2,1 dtk
4	Rise Time	0,0384dtk	0,985 dtk
5	Steady State	5,96 dtk	3,36 dtk

Dari Tabel 4.1 dan 4.2 dapat dibandingkan bahwa performansi sistem lup tertutup lebih baik dari pada sistem lup terbuka.

5. Penutup

Metode H_∞ merupakan metode yang efektif untuk mendesain sebuah pengontrol yang digunakan untuk mereduksi vibrasi suatu struktur. Pengontrol H_∞ dikenakan pada Sistem Kontrol Vibrasi Semi Aktif Reaksi *Fixed Point*, dan dilakukan studi kasus pada sistem proteksi *Hard Disk*. Simulasi dilakukan menggunakan program MATLAB dengan input fungsi tangga dan fungsi impuls. Dari hasil simulasi diperoleh bahwa Pengontrol H_∞ yang didesain mampu mereduksi vibrasi pada sistem dengan selisih amplitudo getaran lebih dari separuh dari amplitudo getaran sistem tanpa pengontrol. Pengontrol H_∞

ini mampu menstabilkan sistem lup tertutup dalam waktu 3,36 detik, lebih baik jika dibandingkan dengan sistem lup terbuka yang mencapai kestabilan dalam waktu 5,96 detik.

Pengontrol H_∞ dapat diaplikasikan pada berbagai tipe desain kontrol vibrasi yang lain seperti tipe aktif dan tipe hibrid. Studi kasus juga dapat dilakukan pada struktur yang lain, seperti sistem suspensi kendaraan, sistem peredam gedung atau pada sistem kereta.

6. Daftar Pustaka

- [1] Anton, Howard, 1997, *Aljabar Linier Elementer*, Alih bahasa oleh

- Pantur Silaban, I Nyoman Susila, Penerbit Erlangga, Jakarta.
- [2] Barabanov, Andrey E., Ghulchak, Andrey, 2002, *Delayed Time Varying H_∞ Control Design*, Saint Petersburg State University, Russia. (<http://www.ifac.com>, diakses terakhir pada tanggal 19 Oktober 2008).
- [3] Colaneri, Patrizio, Geromel, Jose C., Locatelli, Arturo, 1997, *Control Theory And Design : An RH_2 And RH_∞ View Point*, Academic Press, Inc, California.
- [4] Hadley, G., 1983, *Aljabar Linier*, Alih bahasa oleh Drs. Naipospos, Dra. Noeniek Soemartoyo, Penerbit Erlangga, Jakarta.
- [5] Kielb, R.E., Gavin, H.P., Dillenbeck, C.J., 2005, *Tuned Vibration Absorbers : Analysis, Visualization, Eksperimentation, and Design*, Pratt School Engineering Duke University, Durham.
- [6] Ogata, Katsuhiko, 1995, *Modern Control Engineering, Second Edition*, Prentice-Hall International, Inc., Singapore.
- [7] Setio, Herlien D., Setio, Sangriyadi, 2005. *Kontrol Vibrasi Struktur Bangunan dengan Menggunakan Peredam Massa Aktif*. Jurnal Infrastruktur Dan Lingkungan Binaan Vol. 2.
- [8] Seto, Wiliam W., 1997, *Getaran Mekanis, Teori Dan Soal-soal*, Alih bahasa oleh Ir. Darwin Sebayang, Penerbit Erlangga, Jakarta.
- [9] Sofrony, Jorge, Turner, Matthew C., Postlethwaite, Ian, *Anti-Windup Synthesis Using Riccati Equations*, <http://www.ifac.com>, (diakses terakhir pada tanggal 21 September 2008).
- [10] The Wikibook of automatic, *Control Systems And Control Systems Engineering With Classical and Modern Techniques And Advanced Concepts*, <http://en.wikibooks.org/>, (diakses terakhir pada tanggal 19 Oktober 2008).
- [11] Wikibooks Team, 2006, *Control Systems And Control Systems Engineering With Classical And Modern Techniques And Advanced Concepts*, Wikimedia Foundation Inc.
- [12] Zhou, Kemin, Doyle, John C., 1998, *Essentials Of Robust Control*, Prentice-Hall, Inc, New Jersey.
- [13] Zhou, Kemin, Doyle, John C., Glover, Keith, 1996, *Robust and Optimal Control*, Prentice-Hall, Inc, New Jersey.