



PERANCANGAN KENDALI SUSPENSI AKTIF

Rudy S. Wahjudi

Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknologi Industri Universitas Trisakti

Jalan Kiai Tapa 1 Jakarta Barat 11440

E-mail: rswahjudi@trisakti.ac.id, rudyswahjudi@gmail.com

ABSTRACT

The fundamental purpose of ground vehicle suspension system is to maintain continuous contact between the wheels and road surface and to isolate passengers or cargo from the vibration caused by uneven road surfaces. To achieve these two objectives, the conventional static spring and damper system can not be used. In order to improve road handling and comfort performance systems, active suspensions need to be developed. This paper discusses the design of a control system for active suspension. The type of controller used is PID controller with Zeigler and Nichols methods. The results of the design then simulated using MATLAB software. The result of simulation showed that the controller is functioning properly.

Keywords: *active suspension system, PID controller, Zeigler and Nichols*

ABSTRAK

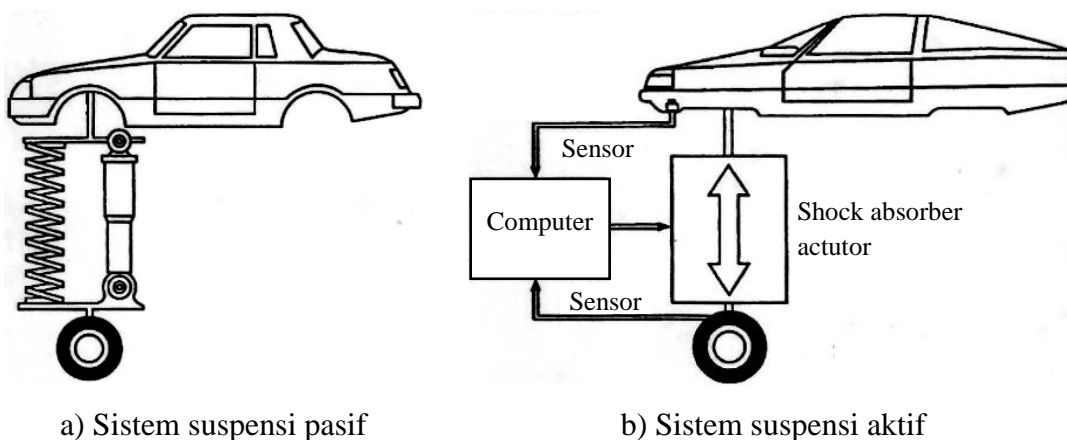
Tujuan mendasar dari sistem suspensi atau peredam kendaraan di atas permukaan tanah adalah untuk mempertahankan kontak terus menerus antara roda dan permukaan jalan, dan untuk mengisolasi penumpang atau kargo dari getaran yang disebabkan oleh permukaan jalan yang tidak rata. Untuk mencapai kedua tujuan tersebut, sistem peredam konvensional tidak dapat digunakan sehingga diperlukan sistem suspensi aktif. Dalam rangka meningkatkan kinerja pada saat kendaraan berjalan dan kenyamanannya, suspensi aktif perlu dikembangkan. Makalah ini membahas perancangan sistem kendali untuk suspensi aktif. Jenis pengendali yang digunakan adalah pengendali PID dengan metode Zeigler dan Nichols. Hasil rancangan kemudian disimulasikan dengan menggunakan perangkat lunak MATLAB. Hasil simulasi menunjukkan bahwa pengendali berfungsi dengan baik.

Kata kunci: *sistem suspensi aktif, pengendali PID, Zeigler dan Nichols*

1. PENDAHULUAN

Setiap pengemudi kendaraan pasti akrab dengan gerakan-gerakan *roll* (gerak rotasi kendaraan di sekitar sumbu x) ketika sedang membelok di tikungan, *pitch* (gerak rotasi kendaraan di sekitar sumbu y) ketika sedang mengerem atau mempercepat dan *bounce* (gerak translasi di sekitar sumbu z) ketika kendaraan bergetar arah vertikal akibat mengikuti permukaan jalan yang bergelombang. Fenomena ini tidak hanya menimbulkan ketidaknyamanan bagi penumpang tetapi berpotensi mengurangi kemampuan daya cengkeram ban pada jalan (*road holding*). Hal ini semua mempengaruhi keselamatan para penumpang kendaraan. Singkat kata diperlukan sistem yang dapat mempertahankan kontak terus menerus antara roda kendaraan dengan permukaan jalan dan untuk mengisolasi penumpang atau kargo dari getaran yang disebabkan oleh jalan yang bergelombang. Sistem seperti disebut sistem suspensi. Pada makalah ini penulis membatasi masalah hanya pada vibrasi arah vertikal untuk satu roda saja.

Suspensi merupakan suatu sistem yang terdiri atas pegas, *dampner* (*shock absorber*), dan lengan-lengan penghubung sistem roda dan badan kendaraan [1]. Sistem suspensi yang umum digunakan pada kendaraan dapat dikelompokkan menjadi dua yaitu sistem suspensi pasif dan sistem suspensi aktif, meskipun ada beberapa buku yang membagi menjadi tiga yakni dengan menambah suspensi semi aktif. Secara skematik kedua sistem suspensi tersebut dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Sistem suspensi [2]



Perbedaan suspensi pasif dan aktif adalah pada karakteristik kekakuan pegas dan konstanta redamannya. Pada sistem suspensi pasif kekakuan pegas dan konstanta redamannya adalah konstan sedangkan suspensi aktif ada tambahan kendali. Kendali ini untuk mengkompensasi kekakuan pegas dan konstanta redamannya agar bisa menyesuaikan dengan keadaan jalan sehingga tujuan suspensi tercapai pada berbagai keadaan.

Tujuan utama adalah menyajikan perancangan kendali PID pada sistem suspensi aktif untuk model mobil $\frac{1}{4}$ kendaraan satu roda. Parameter-parameter kendali PID diperoleh dengan menggunakan metode *Ziegler–Nichols* [3]. Proses penetapan atau perhitungan (penalaan) parameter pengendali pada metode ini adalah yang paling sederhana sehingga hasilnya segera bisa digunakan, yang pada gilirannya tanggapan sistem dapat lebih cepat diperoleh dibandingkan dengan metode-metode lainnya. Hal ini dikarenakan sekali parameter pengendali PID ditemukan, sistem tidak melakukan penalaan lagi atas parameter pengendali PID.

2. KAJIAN PUSTAKA

Pokok persoalan sistem kendali menggunakan pengendali PID adalah bagaimana menala konstanta-konstanta pengendali PID agar tanggapan sistem sesuai dengan yang diinginkan. Banyak metode sudah ditawarkan baik dalam buku referensi maupun tulisan-tulisan dalam jurnal. Secara garis besar cara menala konstanta-konstanta ini ada dua, yaitu penalaan manual dan penalaan otomatis. Penalaan manual tidak punya kemampuan beradaptasi tetapi proses penalaan cukup sekali dilakukan dan sederhana sehingga bisa segera digunakan, tidak diperlukan waktu tenggang untuk menala ulang. Beberapa artikel yang membahas kendali PID jenis ini diantaranya M. S. Kumar [4], S. F. Choudhury dan M. A. R. Sarkar [5]. Penalaan otomatis berkemampuan menala secara terus menerus, konsekuensinya diperlukan algoritma pengendalian yang lebih rumit, sensor lebih banyak dan perlu waktu tenggang untuk selalu memperbarui konstanta-konstanta PID. Pembaruan konstanta-konstanta PID diperlukan guna mendukung kemampuan beradaptasi.

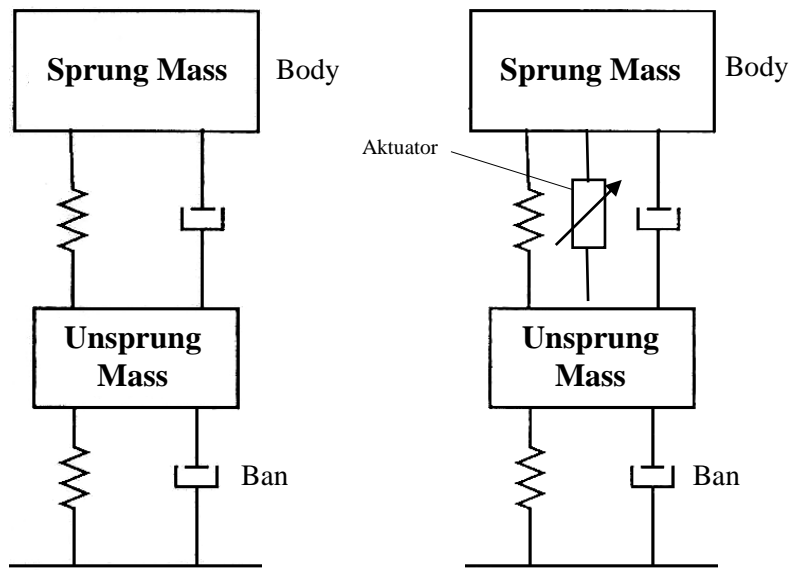
Ada beberapa artikel/makalah tentang kendali suspensi aktif yang sudah dibahas terlebih dahulu, diantaranya oleh W. H. Al-Mutar dan T. Y. Abdalla [6], A. S. Emam [1], S. D. Moghadam, S. Balochian dan O. S. Rad [7] serta A. Tandel, A. R. Deshpande, S. P. Deshmukh dan K. R. Jagtap [8].

Parameter kendali PID selalu diperbarui berdasarkan perhitungan yang menggunakan teori *Fuzzy*. Unjuk kerja yang diberikan baik, namun perhitungan-perhitungan oleh teori *Fuzzy* cukup banyak sehingga diperlukan prosesor yang cepat untuk menanganinya.

3. METODOLOGI PENELITIAN/PERANCANGAN

Tugas utama sistem suspensi adalah mempertahankan kontak antara ban kendaraan dengan jalan, menangani stabilitas kendaraan, dan mengisolasi kerangka kendaraan dari getaran dan guncangan akibat jalan yang tidak rata. Dengan perkembangan teknologi mekanik dan elektronik, kenyamanan berkendara dan performa berkendara telah menjadi tujuan utama perancangan kendaraan modern untuk memenuhi harapan pengguna. Oleh karena itu, desain sistem suspensi yang tepat mempunyai peranan yang penting.

Ada banyak parameter kinerja yang perlu dikendalikan dalam sistem suspensi kendaraan. Empat parameter utama yang perlu diperhatikan yaitu kenyamanan berkendara (terkait langsung dengan percepatan yang dirasakan oleh penumpang), gerak tubuh (*bouncing*, *pitch* dan getaran massa yang muncul pada tikungan pada saat akselerasi atau deselerasi), *road holding* (yang terkait dengan kekuatan kontak ban dan permukaan jalan) dan getaran suspensi [9]. Sistem suspensi harus dapat meminimalkan parameter-parameter ini secara bersamaan. Mendapatkan kekakuan pegas dan konstanta redaman yang tepat merupakan indikator utama keberhasilan perancangan sistem suspensi kendaraan. Dalam makalah ini untuk penyederhanaan sistem, maka gerakan/getaran yang diamati/dibahas adalah gerak arah vertikal pada seperempat kendaraan satu roda. Pada Gambar 2 diperlihatkan rangkaian pengganti (analogi) sistem suspensi pasif dan sistem suspensi aktif.



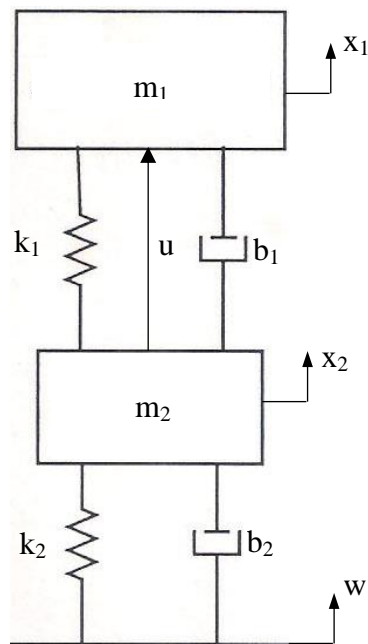
a) Sistem Suspensi pasif

b) Sistem Suspensi aktif

Gambar 2. Rangkaian pengganti (analogi) sistem suspensi pasif dan aktif

3.1. Perancangan Sistem Suspensi Pasif

Pada Gambar 3 ditunjukkan *body diagram* sistem suspensi pasif.



Gambar 3. *Body diagram* sistem suspensi aktif [10]

Berdasarkan Hukum Newton, dari Gambar 3 dapat diturunkan persamaan matematika sistem suspensi pasif (tanpa kendali). Dengan memperhatikan gaya-gaya yang bekerja pada *sprung mass* dapat diturunkan persamaan sebagai berikut:

$$m_1\ddot{x}_1(t) + b_1\dot{x}_1(t) + k_1x_1(t) = b_1\dot{x}_2(t) + k_1x_2(t) + u(t)$$

Kemudian ditransformasikan dengan semua kondisi awal sama dengan nol sehingga diperoleh Persamaan (1).

$$\begin{aligned} m_1s^2X_1(s) + b_1sX_1(s) + k_1X_1(s) &= b_1sX_2(s) + k_1X_2(s) + U(s) \\ \{m_1s^2 + b_1s + k_1\}X_1(s) &= \{b_1s + k_1\}X_2(s) + U(s) \\ \{m_1s^2 + b_1s + k_1\}X_1(s) - \{b_1s + k_1\}X_2(s) &= U(s) \end{aligned} \quad (1)$$

Demikian juga dengan memperhatikan gaya-gaya yang bekerja pada *unsprung mass* dapat diturunkan persamaan sebagai berikut:

$$\begin{aligned} m_2\ddot{x}_2(t) + b_2\dot{x}_2(t) + k_2x_2(t) + b_1\dot{x}_2(t) + k_1x_2(t) \\ = b_1\dot{x}_1(t) + k_1x_1(t) + b_2\dot{w}(t) + k_2w(t) - u(t) \end{aligned}$$

Kemudian ditransformasikan dengan semua kondisi awal adalah sama dengan nol sehingga diperoleh:

$$\begin{aligned} m_2s^2X_2(s) + b_2sX_2(s) + k_2X_2(s) + b_1sX_2(s) + k_1X_2(s) \\ = b_1sX_1(s) + k_1X_1(s) + b_2sW(s) + k_2W(s) - U(s) \end{aligned}$$

dan selanjutnya diperoleh Persamaan (2).

$$-\{b_1s + k_1\}X_1(s) + \{m_2s^2 + (b_1 + b_2)s + (k_1 + k_2)\}X_2(s) = (b_2s + k_2)W(s) - U(s) \quad (2)$$

Persamaan (1) dan (2) dapat ditulis kembali dalam bentuk matriks sebagai berikut:



$$\begin{bmatrix} m_1s^2 + b_1s + k_1 & -(b_1s + k_1) \\ -(b_1s + k_1) & m_2s^2 + (b_1 + b_2)s + (k_1 + k_2) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U \\ (b_2s + k_2)W(s) - U(s) \end{bmatrix}$$

Atau

$$\begin{bmatrix} m_1s^2 + b_1s + k_1 & -(b_1s + k_1) \\ -(b_1s + k_1) & m_2s^2 + (b_1 + b_2)s + (k_1 + k_2) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} \\ = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1 & (b_2s + k_2) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U \\ W(s) \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_1s^2 + b_1s + k_1 & -(b_1s + k_1) \\ -(b_1s + k_1) & m_2s^2 + (b_1 + b_2)s + (k_1 + k_2) \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} U \\ (b_2s + k_2)W(s) - U \end{bmatrix}$$

Kemudian jika

$$A = \begin{bmatrix} m_1s^2 + b_1s + k_1 & -(b_1s + k_1) \\ -(b_1s + k_1) & m_2s^2 + (b_1 + b_2)s + (k_1 + k_2) \end{bmatrix}$$

$$A^{-1} = \frac{1}{|A|} \text{adj}(A)$$

$$\text{adj}(A) = \text{adj} \left(\begin{bmatrix} m_1s^2 + b_1s + k_1 & -(b_1s + k_1) \\ -(b_1s + k_1) & m_2s^2 + (b_1 + b_2)s + (k_1 + k_2) \end{bmatrix} \right) \\ = \begin{bmatrix} m_2s^2 + (b_1 + b_2)s + (k_1 + k_2) & (b_1s + k_1) \\ (b_1s + k_1) & m_1s^2 + b_1s + k_1 \end{bmatrix}$$

$$|A| = \{m_2s^2 + (b_1 + b_2)s + (k_1 + k_2)\}(m_1s^2 + b_1s + k_1) \\ - (b_1s + k_1)(b_1s + k_1) \\ = m_1m_2s^4 + \{m_1(b_1 + b_2) + m_2b_1\}s^3 \\ + \{m_2k_1 + b_1(b_1 + b_2) + m_1(k_1 + k_2)\}s^2 \\ + \{b_1(k_1 + k_2) + k_1(b_1 + b_2)\}s + k_1(k_1 + k_2) - b_1^2s^2 \\ - 2b_1s - k_1^2$$

$$\begin{aligned}
 &= m_1 m_2 s^4 + \{m_1(b_1 + b_2) + m_2 b_1\} s^3 \\
 &\quad + \{m_2 k_1 + b_1(b_1 + b_2) + m_1(k_1 + k_2)\} s^2 \\
 &\quad + \{b_1(k_1 + k_2) + k_1(b_1 + b_2)\} s + k_1 k_2 - b_1^2 s^2 - 2b_1 s
 \end{aligned}$$

Sehingga dapat diperoleh:

$$\begin{aligned}
 \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \end{bmatrix} &= \frac{1}{|A|} \begin{bmatrix} m_2 s^2 + (b_1 + b_2)s + (k_1 + k_2) & (b_1 s + k_1) \\ (b_1 s + k_1) & m_1 s^2 + b_1 s + k_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U \\ (b_2 s + k_2)W(s) - U \end{bmatrix} \\
 &= \frac{1}{|A|} \left[\frac{(m_2 s^2 + b_2 s + k_2)U + (b_1 s + k_1)(b_2 s + k_2)W(s)}{-m_1 s^2 U + \{(m_1 b_2 s^3 + (m_1 k_2 + b_1 b_2)s^2 + (b_1 k_2 + b_2 k_1)s + k_1 k_2)\}W(s)} \right] \\
 &= \frac{1}{|A|} \begin{bmatrix} (m_2 s^2 + b_2 s + k_2) & (b_1 s + k_1)(b_2 s + k_2) \\ -m_1 s^2 & \{(m_1 b_2 s^3 + (m_1 k_2 + b_1 b_2)s^2 + (b_1 k_2 + b_2 k_1)s + k_1 k_2)\} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U \\ W \end{bmatrix}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 X_1 &= \frac{1}{|A|} ((m_2 s^2 + b_2 s + k_2)U(s) + (b_1 s + k_1)(b_2 s + k_2)W(s)) \\
 &= \frac{(m_2 s^2 + b_2 s + k_2)}{|A|} U(s) + \frac{(b_1 s + k_1)(b_2 s + k_2)}{|A|} W(s)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 X_2 &= \frac{1}{|A|} (-m_1 s^2 U(s) \\
 &\quad + \{b_2 s^3 + (m_1 k_2 + b_1 b_2)s^2 + (b_1 k_2 + b_2 k_1)s + k_1 k_2\}W(s)) \\
 &= \frac{-m_1 s^2}{|A|} U(s) + \frac{b_2 s^3 + (m_1 k_2 + b_1 b_2)s^2 + (b_1 k_2 + b_2 k_1)s + k_1 k_2}{|A|} W(s)
 \end{aligned}$$

Fungsi alih terhadap $U(s)$, maka $W(s) \approx 0$, sehingga diperoleh:

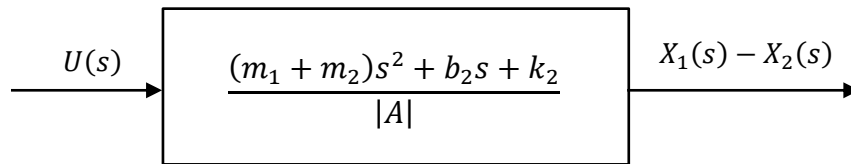
$$X_1(s) = \frac{(m_2 s^2 + b_2 s + k_2)}{|A|} U(s)$$

$$X_2 = \frac{-m_1 s^2}{|A|} U(s)$$

selanjutnya

$$\begin{aligned} \{X_1(s) - X_2(s)\} &= \frac{(m_2s^2 + b_2s + k_2) + m_1s^2}{|A|} U(s) \\ &= \frac{(m_1+m_2)s^2 + b_2s + k_2}{|A|} U(s) \end{aligned} \quad (3)$$

Diagram blok sistem suspensi diperlihatkan pada Gambar 4 dan Gambar 5 di bawah ini:



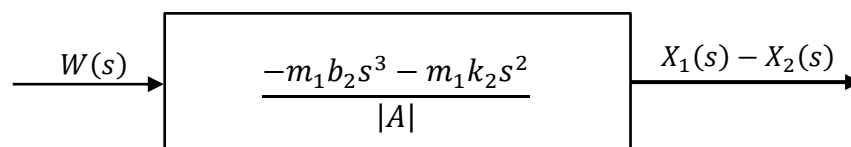
Gambar 4. Diagram blok sistem suspensi pasif (tanpa kendali) untuk masukan dari aktuator $U(s)$.

Fungsi alih terhadap $W(s)$, maka $U(s) \approx 0$, sehingga diperoleh:

$$\begin{aligned} X_1 &= \frac{(b_1s+k_1)(b_2s+k_2)}{|A|} W(s) \\ X_2 &= \frac{m_1b_2s^3 + (m_1k_2 + b_1b_2)s^2 + (b_1k_2 + b_2k_1)s + k_1k_2}{|A|} W(s) \end{aligned}$$

Selanjutnya

$$X_1(s) - X_2(s) = \frac{-m_1b_2s^3 - m_1k_2s^2}{|A|} W(s) \quad (4)$$



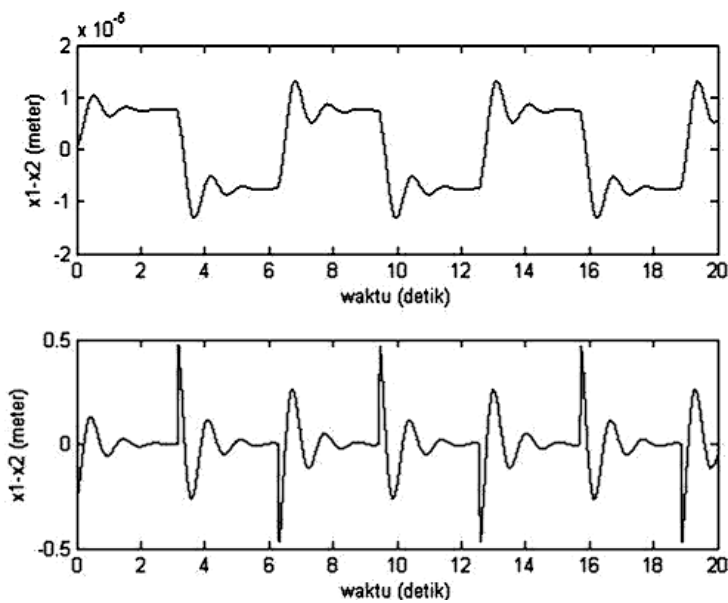
Gambar 5. Diagram blok sistem suspensi pasif untuk masukan gangguan pada permukaan jalan $W(s)$.

Agar tanggapan sistem suspensi pasif terhadap $U(s)$ dan $W(s)$ dapat diamati dan dibandingkan dengan jelas maka sistem suspensi pasif perlu disimulasikan. Agar sistem dapat disimulasikan maka semua parameter harus diberikan. Parameter-parameter untuk simulasi diberikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Parameter komponen suspensi aktif [10]

NOTASI	KETERANGAN	NILAI	SUMBER
m_1	<i>Sprung mass</i>	860 kg	Dari CEM
m_2	<i>Unsprung mass</i>	97,3 kg	Dari CEM
k_1	Konstanta kekakuan pada ban	39514 N/m	Dari CEM
k_2	Konstanta kekakuan pada suspensi	246960 N/m	Dari CEM
b_1	Konstanta <i>damping</i> pada ban	3497 Ns/m	Dari CEM
b_2	Konstanta <i>damping</i> pada suspensi	8000 Ns/m	Dari CEM
x_1	Posisi <i>prung mass</i>		
x_2	Posisi <i>unsprung mass</i>		
u	Sinyal kendali (gaya actuator)		
w	Gangguan pada ban akibat permukaan jalan yang tidak rata		

Kemudian parameter-parameter pada Tabel 1 diberikan pada persamaan fungsi alih yakni Persamaan (3) dan (4), sehingga menjadi Persamaan (5) dan (6) dengan memberi sinyal masukan berupa *step* dengan amplitude 0,3 satuan. Hasil simulasinya dapat dilihat pada Gambar 6.



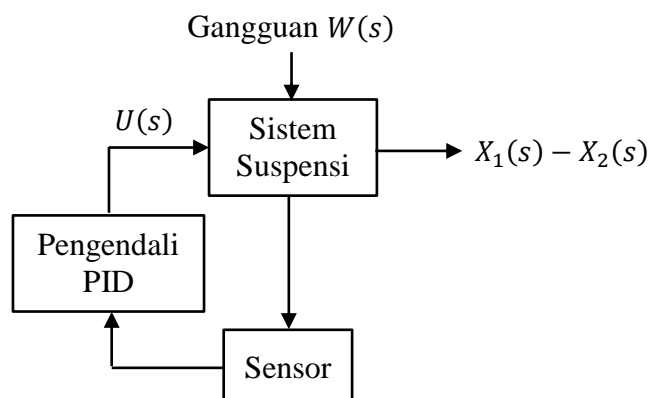
Gambar 6. Hasil simulasi sistem tanpa kendali dengan masukan gelombang persegi amplitude 0,3 satuan untuk $U(s)$ (atas) dan $W(s)$ (bawah).

$$\{X_1(s) - X_2(s)\} = \frac{(957s^2 + 8000s + 246960)}{|A|} U(s) \quad (5)$$

$$\{X_1(s) - X_2(s)\} = \frac{-30007420s^3 - 212385600s^2}{|A|} W(s) \quad (6)$$

3.2. Perancangan Sistem Suspensi Terkendali

Diagram blok sistem kendali suspensi aktif diperlihatkan pada Gambar 7:



Gambar 7. Sistem suspensi terkendali

Dalam makalah ini struktur pengendaliannya menggunakan PID, model pengendali PID adalah sebagai berikut:

$$G_c(s) = k_p \left(\frac{t_i t_d s^2 + t_i s + 1}{t_i s} \right) \quad (7)$$

Dengan k_p adalah konstanta proposional, t_i adalah konstanta integrator dan t_d adalah konstanta diferensiator, ditala secara coba-coba, yakni sebagai berikut :

- k_p : diperoleh dengan cara memberi masukan fungsi step tanpa integrator dan diferensiator dicari *time response* tercepat.
- t_i : diperoleh dengan cara memberi masukan fungsi step tanpa diferensiator dicari *off set* terkecil.

- c. t_d : diperoleh dengan cara memberi masukan fungsi step dicari *peak magnitude* terkecil.

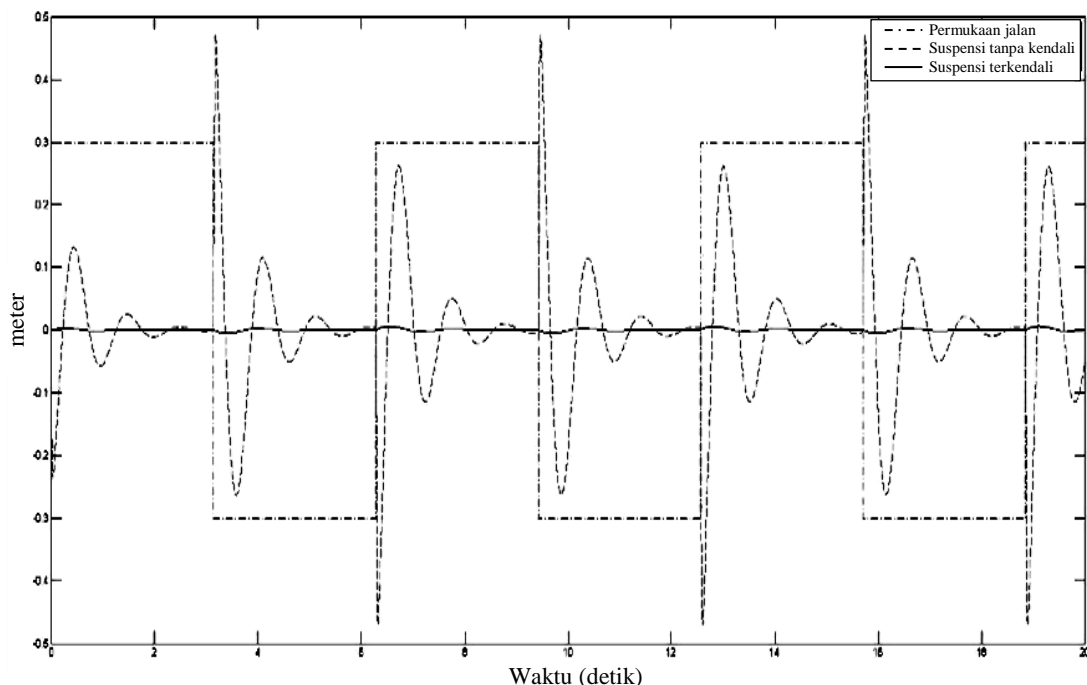
Ditetapkan $k_p = 40$, $t_i = 0,1$ dan $t_d = 0,35124$. Konstanta-konstanta PID ini digunakan sebagai pengendali suspensi pasif untuk menghasilkan sistem suspensi aktif. Suspensi aktif disimulasikan dengan menggunakan perangkat lunak MATLAB.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil simulasi sistem kendali suspensi aktif diperlihatkan pada Gambar 8.

Gambar grafik pada Gambar 8 terdiri dari 3 kontur yaitu:

1. Kontur profil permukaan tanah berupa berupa fungsi persegi periodik.
2. Kontur tanggapan sistem suspensi pasif (tanpa kendali) terhadap permukaan tanah.
3. Kontur tanggapan sistem suspensi aktif (terkendali) terhadap permukaan tanah.



Gambar 8. Tanggapan sistem suspensi tanpa kendali dan suspensi terkendali terhadap gangguan permukaan tanah berupa fungsi *step*.



Dari Gambar 8 tampak sangat jelas bahwa tanggapan sistem suspensi aktif sangat baik karena menunjukkan penyimpangan dari sumbu 0 sangat kecil hampir tidak tergambar. Dalam Gambar 8 ditunjukkan oleh kontur garis tebal.

5. KESIMPULAN

Beberapa kesimpulan penting yang dihasilkan adalah:

1. Pengendali PID yang dirancang cukup baik
2. Yang utama dalam merancang sistem kendali PID adalah penalaan konstanta-konstanta PID.
3. Secara garis besar proses penalaan konstanta-konstanta PID ini dapat di bagi dua yakni penalaan manual dan otomatis.
4. Proses penalaan manual sangat disarankan untuk kendalian yang mempunyai parameter-parameter relatif tidak berubah (berubahnya kecil).
5. Proses penalaan otomatis sangat disarankan untuk kendalian yang mempunyai parameter-parameter relatif mudah atau sering berubah.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] A S. Emam. "Fuzzy Self Tuning of PID Controller for Active Suspension System". *Advances in Powertrains and Automotives*, Vol. 1, No. 1, 34-41, 2015.
- [2] Frank D Petruzella. *Automotive Electronic Fundamentals*. California. Glencoe Macmillan/McGraw-Hill, 1991.
- [3] Katsuhiko Ogata. *Modern Control Engineering*, NewDelhi: Prentice-Hall, 2010, hlm. 568-572.
- [4] Mouleeswaran Senthil Kumar. "Design and Development of PID Controller-Based Active Suspension System for Automobiles", Department of Mechanical Engineering, PSG College of Technology, Coimbatore, India.
- [5] Soud Farhan Choudhury dan M. A. Rashid Sarkar. "An Approach On Performance Comparison Between Automotive Passive Suspension And Active Suspension System (PID Controller) Using Matlab/Simulink". *Journal*

- of Theoretical and Applied Information Technology, Vol. 43 No. 2, 30 September 2012.
- [6] Wissam H. Al-Mutar dan Turki Y. Abdalla. (2015). "Quarter Car Active Suspension System Control Using PID Controller tuned by PSO". Iraq J. Electrical and Electronic Engineering, Vol 11, No. 2.
- [7] Soheila Davoodi Moghadam, Saeed Balochian dan Omid Salehyan Rad (2014). "PSO Base Tuning of the PID Control of Active Suspension System" IJAIM, Vol. 3, Issue 1, Juli 2014.
- [8] Anand Tandel, A. R. Deshpande, S. P. Deshmukh dan K. R. Jagtap. (2014). "Modeling, Analysis and PID Controller Implementation on Double Wishbone Suspension Using SimMechanics and Simulink". Prosiding 12th Global Congress on Manufacturing and Management GCMM – 2014, hlm. 1274 - 1281.
- [9] D. Hrovat. "Survey Of Advanced Suspension Developments And Related Optimal Control Applications", Automatica, Vol. 33, No. 10, hlm. 1781–1817, 1997.
- [10] Vladimir Popovic. "System Approach to Vehicle Suspension System Control in CAE Environment". Journal of Mechanical Engineering, Vol. 57, No. 2, hlm. 102, 2011.