

SISTEM SUSPENSI AKTIF DENGAN PEGAS DAMPER SERI

I Wayan Degeng

Fakultas Teknologi Informasi - Universitas Budi Luhur Jakarta

ABSTRACT

Sistem suspensi dipakai pada berbagai jenis kendaraan bergerak seperti sepeda motor, mobil penumpang, mobil barang dan kereta api. Untuk mobil penumpang yang bergerak di jalan raya dengan kontur yang berubah-ubah, adalah perlu sekali untuk menjaga kenyamanan penumpang dengan meminimalkan gerak vertikal yang diteruskan ke penumpang, tetapi pada saat yang sama menjaga agar kendaraan dapat terkontrol dengan baik yang berarti memaksimalkan kontak ban dengan jalan. Kenyamanan penumpang dicapai dengan suspensi yang lembut sedangkan pengontrolan kendaraan lebih mudah pada suspensi yang lebih kaku. Pada sistem suspensi pasif, hal ini dicapai dengan trade-off antara keduanya dan diperoleh sistem suspensi dengan pegas dan absorber dengan konstanta yang tetap. Pada sistem suspensi aktif, diusahakan agar kedua keadaan di atas dapat dicapai dengan jalan mengubah parameter-parameter pegas maupun absorber agar beradaptasi dengan kondisi jalan. Pada makalah ini sistem suspensi aktif diajukan dengan menambahkan absorber dan pegas tambahan yang dirangkai seri. Hasilnya dengan simulasi diperoleh perbaikan gerak vertikal yang mudah dipilih antara suspensi yang lembut dan suspensi yang kaku.

Keywords: suspension active, single wheel

I. Pendahuluan

Sistem suspensi kendaraan ditujukan untuk membuat nyaman penumpang dan untuk menjaga agar kendaraan dapat dengan mudah dan aman dikendalikan. Kenyamanan penumpang didukung dengan mencegah gerak kontur jalan diteruskan ke bodi kendaraan, lebih spesifik lagi yaitu dengan meminimalkan gerak vertikal bodi.

Kemudahan dan keamanan pengendalian diperoleh dengan memaksimalkan cengkraman ban terhadap jalan atau meminimalisasi lompatan roda.

Kedua tujuan di atas diperoleh dengan sistem suspensi yang saling bertolak belakang. Agar penumpang merasa nyaman, perlu suspensi yang lembut sehingga getaran ban akibat bebatuan di jalan tidak diteruskan ke penumpang, tetapi agar mudah dan aman dikendalikan, maka perlu sistem suspensi yang lebih kaku.

Pada sistem suspensi pasif sesuai namanya, parameter sistem tidak dapat diubah, parameter sistem suspensi dipilih agar terjadi *trade-off* diantara keduanya, nyaman, mudah dan aman dikendalikan.

Pada sistem suspensi aktif, parameter-parameter sistem secara aktif diubah atau ditambahkan variabel lain untuk secara optimal memenuhi kedua tujuan di atas.

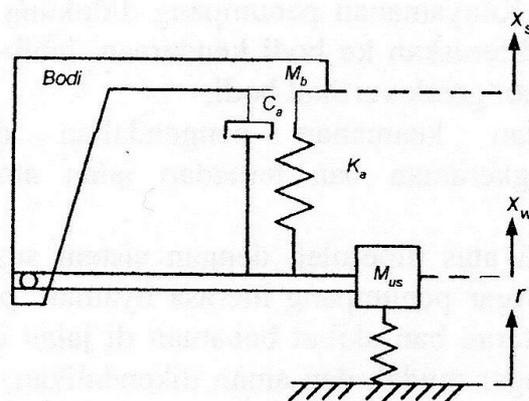
Ada berbagai cara dilakukan untuk membuat sistem suspensi aktif. Referensi [1] mengusulkan pemberian gaya dalam mekanisme hidraulik antara bodi dan roda untuk meminimalkan percepatan bodi kendaraan. Lebih spesifik lagi bahwa selisih rata-rata antara gerak bodi dan gerak ban dijadikan masukan untuk tujuan kontrol itu.

Makalah ini mengusulkan cara lain yaitu sistem suspensi aktif sederhana dengan menambahkan pegas yang disambung seri dengan absorber dan ditempatkan di antara bodi dan roda. Absorber dengan faktor redaman yang dapat diatur dari nol sampai tak berhingga dengan mengatur katup *bypass*. Dengan katup *bypass* yang terbuka penuh maka absorber mempunyai koefisien nol jadi absorber dan pegas tambahan ini tidak bekerja dan sistem sama dengan sistem suspensi pasif. Dengan katup *bypass* tertutup penuh, maka absorber mempunyai koefisien tak berhingga dan mengunci bagian atas pegas tambahan dan sistem suspensi bekerja seperti memiliki pegas tambahan yang memberikan kekakuan lebih untuk pengendalian yang lebih sempurna. Lebar terbukanya katup *bypass* dapat diatur sehingga pengaruh pegas tambahan dapat diatur pula dari nol sampai besaran maksimum.

II. Model Sistem Suspensi Pasif

Untuk menganalisa gerak roda dan bodi hanya di sekitar sistem suspensi tanpa melakukan analisa mendetail terhadap gerak-sudut bodi kendaraan, pada makalah ini akan melakukan analisa model seperempat kendaraan atau model sistem suspensi roda tunggal.

Gambar 1 menunjukkan model seperempat kendaraan yang terdiri dari sebuah pegas, sebuah absorber, roda dan bodi kendaraan. Roda dianggap bersifat pegas tanpa sifat redaman.



Gambar 1

Persamaan gerak sistem diperoleh dengan menerapkan Hukum Percepatan Newton terhadap massa bodi. Gaya-gaya yang bekerja secara

dimanis pada massa bodi adalah gaya pegas dan gaya absorber. Perpindahan bodi dan perpindahan ban bernilai positif ke arah atas.

$$M_b \ddot{x}_s + C_a (\dot{x}_s - \dot{x}_w) + K_a (x_s - x_w) = 0 \quad (1)$$

Persamaan gerak maasa ban juga diperoleh dengan cara yang sama dengan memperhatikan ada sebuah absorber di atas ban dan dua sifat pegas masing-masing pegas di atas ban dan pegas dari sifat ban.

$$M_{us} \ddot{x}_s + C_a (\dot{x}_w - \dot{x}_s) + K_a (x_w - x_s) + K_t (x_w - r) = 0 \quad (2)$$

Di mana:

M_b = massa bodi mobil

M_{us} = massa roda

x_s = perpindahan bodi

x_w = perpindahan roda

r = perpindahan tapak ban (kontur jalan)

C_a = koefisien redam absorber

K_a = koefisien pegas

K_t = koefisien pegas dari ban

Dengan memakai *state-variables* dengan mengambil:

$$x_1 = x_s \quad x_2 = \dot{x}_s \quad x_3 = x_w$$

$$x_4 = \dot{x}_w$$

maka:

$$\dot{x}_1 = x_2$$

(3)

$$\dot{x}_2 = -\frac{1}{M_b} [C_a (\dot{x}_s - \dot{x}_w) + K_a (x_s - x_w)]$$

$$\dot{x}_3 = x_4$$

$$\dot{x}_4 = -\frac{1}{M_{us}} [C_a (\dot{x}_w - \dot{x}_s) + K_a (x_w - x_s) + K_t (x_w - r)]$$

Dalam bentuk *state-space* $\dot{x} = Ax + Bu$

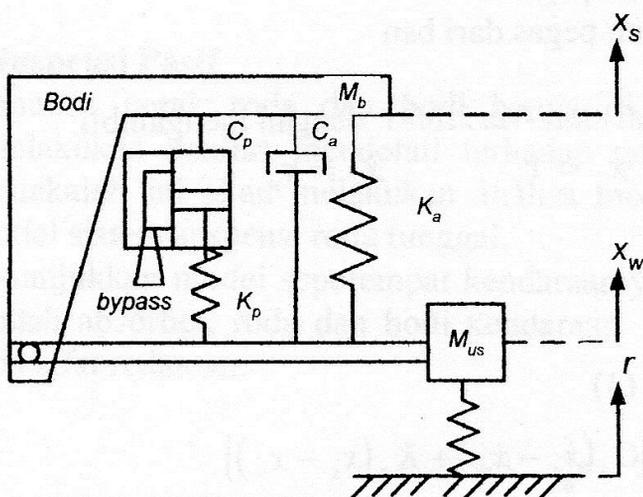
Matriks:

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ \frac{K_a}{M_b} & \frac{C_a}{M_b} & \frac{K_a}{M_b} & \frac{C_a}{M_b} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ \frac{K_a}{M_{us}} & \frac{C_a}{M_{us}} & \frac{K_a + K_t}{M_{us}} & \frac{C_a}{M_{us}} \end{bmatrix} \quad B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ \frac{K_t}{M_{us}} \end{bmatrix}$$

(4)

III. Model Sistem Suspensi Aktif

Gambar 2 menunjukkan model seperempat kendaraan dengan suspensi aktif yang diusulkan. Sistem terdiri dari sebuah pegas, sebuah absorber, roda dan bodi kendaraan seperti halnya sistem suspensi pasif tetapi ditambah dengan sebuah pegas yang disambung seri dengan sebuah absorber yang dapat diubah koefisiennya secara aktif dari nol sampai tak terhingga. Perubahan koefisien ini dilakukan dengan mengubah luas saluran *bypass* antara bagian atas dengan bagian bawah piston absorber. Jika luas saluran *bypass* besar, maka koefisien sama dengan nol dan absorber maupun pegas tambahan tidak berfungsi. Jika luas saluran *bypass* nol maka koefisien sama dengan tak terhingga yaitu piston absorber terkunci dan hanya pegas yang berfungsi.



Gambar 2

Persamaan gerak massa bodi akan berubah menjadi:

$$M_b \ddot{x}_s + C_a (\dot{x}_s - \dot{x}_w) + K_a (x_s - x_w) + C_p (\dot{x}_s - \dot{x}_p) = 0$$

(5)

Dan persamaan gerak ban akan berubah menjadi:

$$M_{us} \ddot{x}_s + C_a (\dot{x}_w - \dot{x}_s) + K_a (x_w - x_s) + K_t (x_w - r) + K_p (x_w - x_p) = 0$$

(6)

$$M_p \ddot{x}_p + C_p (\dot{x}_s - \dot{x}_p) + K_p (r - x_p) = 0$$

(7)

M_p = massa persambungan absorber dan pegas tambahan
 x_p = perpindahan persambungan absorber dan pegas tambahan
 C_p = koefisien redam absorber tambahan
 K_p = koefisien pegas tambahan

Jika $C_p = 0$ maka $x_p = x_w$ dan sistem menjadi sistem suspensi pasif sama dengan persamaan (1) dan (2).

Jika $C_p = \infty$ maka $x_p = x_s$ dan sistem menjadi sistem suspensi dengan dua pegas paralel masing-masing dengan koefisien K_a dan K_p sehingga persamaan gerak sistem menjadi:

$$M_b \ddot{x}_s + C_a (\dot{x}_s - \dot{x}_w) + (K_a + K_p)(x_s - x_w) = 0$$

(8)

$$M_{us} \ddot{x}_s + C_a (\dot{x}_w - \dot{x}_s) + (K_a + K_p)(x_w - x_s) + K_t(x_w - r) = 0$$

(9)

Dengan memakai *state-variables* dengan mengambil:

$$x_1 = x_s \quad x_2 = \dot{x}_s \quad x_3 = x_w$$

$$x_4 = \dot{x}_w$$

maka:

$$\dot{x}_1 = x_2$$

$$(10)$$

$$\dot{x}_2 = -\frac{1}{M_b} [C_a (\dot{x}_s - \dot{x}_w) + (K_a + K_p)(x_s - x_w)]$$

$$\dot{x}_3 = x_4$$

$$\dot{x}_4 = -\frac{1}{M_{us}} [C_a (\dot{x}_w - \dot{x}_s) + (K_a + K_p)(x_w - x_s) + K_t(x_w - r)]$$

Dalam bentuk *state-space* $\dot{x} = Ax + Bu$

Matriks:

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ \frac{K_a + K_p}{M_b} & -\frac{C_a}{M_b} & \frac{K_a + K_p}{M_b} & \frac{C_a}{M_b} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ \frac{K_a + K_p}{M_{us}} & \frac{C_a}{M_{us}} & -\frac{K_a + K_p + K_t}{M_{us}} & -\frac{C_a}{M_{us}} \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ \frac{K_t}{M_{us}} \end{bmatrix} \quad (11)$$

Jika C_p bernilai diantara nol dan tak-berhingga, dari (5), (6), (7) dengan mengambil *state-variables*:

$$\begin{aligned} x_1 &= x_s & x_2 &= \dot{x}_s & x_3 &= x_w \\ x_4 &= \dot{x}_w & x_5 &= x_p & x_6 &= \dot{x}_p \end{aligned}$$

diperoleh:

$$\dot{x}_1 = x_2$$

(12)

$$\dot{x}_2 = -\frac{1}{M_b} [C_a(\dot{x}_s - \dot{x}_w) + K_a(x_s - x_w) + C_p(\dot{x}_s - \dot{x}_p)]$$

$$\dot{x}_3 = x_4$$

$$\dot{x}_4 = -\frac{1}{M_{us}} [C_a(\dot{x}_w - \dot{x}_s) + K_a(x_w - x_s) + K_t(x_w - r) + K_p(x_w - x_p)]$$

$$\dot{x}_5 = \dot{x}_p$$

$$\dot{x}_6 = -\frac{1}{M_p} [C_p(\dot{x}_s - \dot{x}_p) + K_p(r - x_p)]$$

Dalam bentuk *state-space* $\dot{x} = Ax + Bu$

Matriks:

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{K_a}{M_b} & \frac{C_a + C_p}{M_b} & \frac{K_a}{M_b} & \frac{C_a}{M_b} & 0 & \frac{C_p}{M_b} \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ \frac{K_a}{M_{us}} & \frac{C_a}{M_{us}} & \frac{K_a + K_p + K_t}{M_{us}} & \frac{C_a}{M_{us}} & \frac{K_p}{M_{us}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & \frac{C_p}{M_p} & 0 & 0 & \frac{K_p}{M_p} & \frac{C_p}{M_p} \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ \frac{K_t}{M_{us}} \\ 0 \\ \frac{K_p}{M_p} \end{bmatrix} \quad (13)$$

IV. Pengujian

Dilakukan pengujian dengan membandingkan diagram Bodanya. Sistem pertama adalah sistem suspensi pasif, sistem kedua adalah sistem suspensi aktif dan sistem ketiga sistem suspensi aktif dengan C_p tertentu.

Data-data yang dipakai adalah:

$$M_b = 290 \text{ kg}$$

$$M_{us} = 59 \text{ kg}$$

$$M_p = 1 \text{ kg}$$

$$K_a = 16812 \text{ N/m}$$

$$C_a = 1000 \text{ N/(m/sec)}$$

$$K_t = 190000 \text{ N/m}$$

$$K_p = 90000 \text{ N/m}$$

$$C_p = 1000 \text{ N/(m/sec)}$$

m-file sistem suspensi pasif:

```
1 - mb = 290;
2 - mus = 59;
3 - ka = 16812;
4 - kt = 190000;
5 - ca = 1000;
6 - A=[0 1 0 0;
7     -ka/mb -ca/mb ka/mb ca/mb;
8     0 0 0 1;
9     ka/mus ca/mus -(ka+kt)/mus -ca/mus];
10 - B=[0; 0; 0; kt/mus];
11 - C=[1 0 0 0; 0 0 1 0];
12 - D=[0; 0];
13 - [n,d]=ss2tf(A,B,C,D);
14 - w=logspace(0,3);
15 - bode(n,d,w);
```

Gambar 3

m-file sistem suspensi aktif:

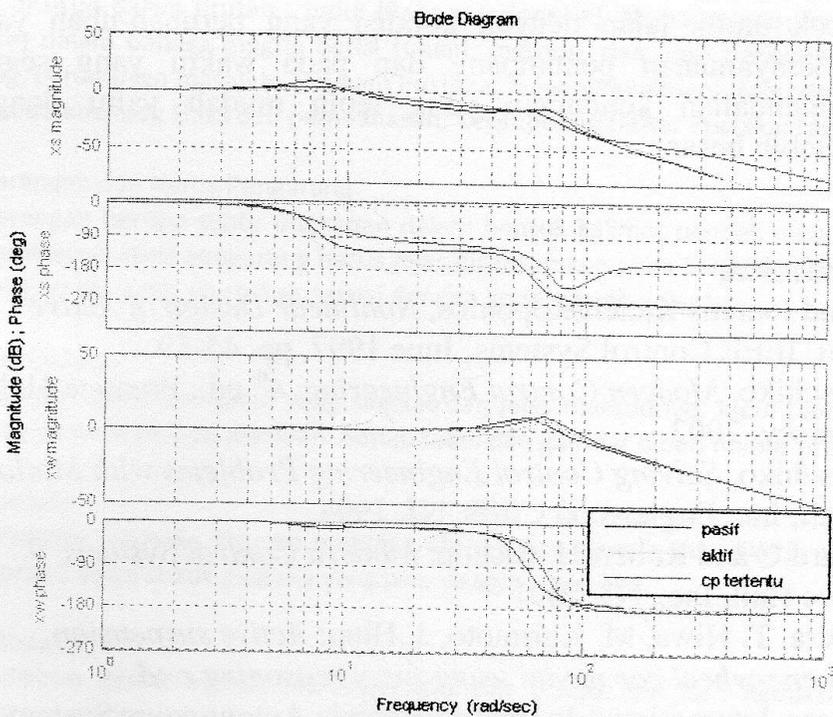
```
1 - mb = 290;
2 - mus = 59;
3 - ka = 16812;
4 - kt = 190000;
5 - kp = 90000;
6 - ca = 1000;
7 - A=[0 1 0 0;
8     -(ka+kp)/mb -ca/mb (ka+kp)/mb ca/mb;
9     0 0 0 1;
10    (ka+kp)/mus ca/mus -(ka+kp+kt)/mus -ca/mus];
11 - B=[0; 0; 0; kt/mus];
12 - C=[1 0 0 0; 0 0 1 0];
13 - D=[0; 0];
14 - [n,d]=ss2tf(A,B,C,D);
15 - w=logspace(0,3);
16 - bode(n,d,w);
```

Gambar 4

m-file sistem suspensi c_p tertentu:

```
1 - mb = 290;  
2 - mus = 59;  
3 - ka = 16812;  
4 - kt = 190000;  
5 - kp = 90000;  
6 - ca = 1000;  
7 - cp = 1000;  
8 - mp = 1;  
9 - A=[0 1 0 0 0 0;  
10     -(ka)/mb -(ca+cp)/mb ka/mb ca/mb 0 cp/mb;  
11     0 0 0 1 0 0;  
12     ka/mus ca/mus -(ka+kp+kt)/mus -ca/mus kp/mus 0;  
13     0 0 0 0 0 1;  
14     0 -cp/mp 0 0 kp/mp cp/mp];  
15 - B=[0; 0; 0; kt/mus; 0; -kp/mp];  
16 - C=[1 0 0 0 0 0 ;0 0 1 0 0 0];  
17 - D=[0; 0];  
18 - [n,d]=ss2tf(A,B,C,D);  
19 - w=logspace(0,3);  
20 - bode(n,d,w);
```

Gambar 5



Gambar 6

m-file ketiga sistem ditunjukkan pada Gambar 3, Gambar 4 dan Gambar 5.

Diagram Bode ketiga sistem digabungkan dan ditunjukkan pada Gambar 6, grafik pertama menunjukkan *magnitude* dari pergerakan bodi x_s , grafik kedua menunjukkan *phase* dari pergerakan bodi, grafik ketiga dan keempat menunjukkan hal yang sama untuk x_w .

Pada sistem suspensi pasif terlihat *magnitude* x_s mempunyai titik kritis pada frekwensi 7 rad/sec dan *magnitude* sekitar 12 dB. Pada sistem suspensi aktif titik kritis pada frekwensi sekitar 15 rad/sec dan *magnitude* sekitar 22 dB. Dengan C_p tertentu titik kritis masih sekitar 7 rad/sec tetapi dari *phase* terlihat titik kritis yang sedikit bergeser ke kanandengan *magnitude* yang lebih kecil dari keduanya. Jadi titik kritis dengan C_p tertentu terletak diantara kedua yang lain dan *magnitude* yang kecil karena pengaruh C_p .

V. Kesimpulan

Dengan membandingkan Diagram Bode ketiga sistem di atas dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut:

1. Pada sistem suspensi aktif, diperoleh sistem dengan kekakuan yang maksimum yaitu dengan titik kritis tertinggi.
2. Pada sistem suspensi aktif dengan C_p tertentu diperoleh sistem dengan kekakuan diantara sistem pasif dan sistem aktif dengan *magnitude* yang lebih kecil dari keduanya.

Sistem ini cocok untuk jalan dengan kondisi yang berubah-ubah yang membutuhkan kenyamanan penumpang dan pada waktu yang segera diinginkan pengendalian kendaraan yang lebih mudah yaitu dengan kekakuan yang lebih besar.

DAFTAR PUSTAKA

1. Lin, J.S., and Ioannis Kanellakopoulos, *Nonlinear Design of Active Suspensions*, IEEE Control Systems, June 1997, pp. 45-59.
2. Ogata, Katsuhiko, *Modern Control Engineering*, 4th ed., Prentice-Hall, Inc. New Jersey, 2002.
3. Ogata, Katsuhiko, *Solving Control Engineering Problems with Matlab*, Prentice-Hall, Inc. Englewood Cliffs, NJ, 1994.
4. Dorf, Richard C and Robert H. Bishop, *Modern Control Systems*, 9th ed., Prentice Hall, Inc., NJ, 2001.
5. T. Yoshimura, T. Hiwa, M. Kurimoto, J. Hino: *Active suspension system of a one-wheel car model using fuzzy reasoning and compensators*, International Journal of Vehicle Autonomous Systems 2003 - Vol. 1, No.2 pp. 196 - 205
6. Burton, A.W.; Truscott, A.J.; Wellstead, P.E., *Analysis, modelling-and control of an advanced automotiveself-levelling suspension system*, Control Theory and Applications, IEE Proceedings Volume 142, Issue 2, Mar 1995 Page(s):129 - 139