

# **SEMI ACTIVE VARIABLE DAMPING UNTUK MENGURANGI PENGARUH GETARAN AKIBAT GEMPA**

Yoyong Arfiadi<sup>1</sup>

## **1. Pendahuluan**

Teknik pengendalian getaran saat ini telah berkembang dengan cukup maju di mana beberapa bangunan telah menggunakan teknik ini untuk mengurangi pengaruh getaran akibat angin dan gempa (Gambar 1). Teknik yang paling banyak dipakai saat ini adalah teknik kendali pasif yang cukup sederhana dalam pemakaiannya. Di antara aplikasi yang banyak dipakai adalah peredam massa selaras (*tuned mass damper*), dinding geser (*shear wall*), isolasi dasar (*base isolaton*), peredam hidrolis (*hydraulic damper*) dan lain sebagainya. Dalam teknik kendali pasif tidak diperlukan energi dari luar karena pemencaran energi dapat dilakukan oleh struktur itu sendiri. Walaupun teknik ini telah banyak digunakan, ada keinginan untuk meningkatkan kemampuan tingkat pengurangan getaran jika struktur dilanda oleh beban yang meningkat.

Beberapa peneliti mengajukan teknik, yang sebelumnya berkembang dalam dunia penerbangan yang dikenal dengan teknik kendali aktif. Uraian tentang teknik kendali aktif di antaranya dapat dilihat pada Housner dkk. (1997). Dalam teknik ini respons struktur dikendalikan dengan cara mengintroduksi suatu gaya kontrol yang dihasilkan dari suatu aktuator. Beberapa alat yang bisa digunakan misalnya adalah *active mass damper (AMD)*, *ATC (active tendon control)* dan *ABS (active bracing system)*. Besarnya gaya kontrol diatur dengan suatu algoritma tertentu sehingga nilai gaya dan respons yang optimal dapat ditentukan. Untuk memberikan gaya kontrol yang optimal diperlukan informasi respons struktur yang dapat diukur dengan sensor. Informasi ini diteruskan pada komputer untuk menetapkan besarnya gaya kontrol yang diberikan. Terdapat beberapa algoritma, baik algoritma linier dan non linier (Soong, 1990, Wu dan Soong, 1996, Arfiadi dan Hadi, 2006).

Walaupun teknik kendali aktif menunjukkan potensi yang besar untuk pengendalian getaran, terdapat beberapa kekurangan pada metoda ini (Soong, 1990). Kekurangan yang dianggap paling mengganggu adalah tentang keandalan sistem kendali aktif, yang harus menunggu dengan jangka waktu yang tidak tentu untuk diaktifkan. Keberatan lain yang diajukan adalah dalam hal konsumsi energi yang dibutuhkan, yang tidak selalu tersedia selama gempa terjadi. Untuk mengatasi hal itu saat ini banyak dikembangkan teknik kendali semiaktif di mana input energi dari luar (yang cukup besar) tidak diperlukan. Dalam hal ini kapasitas maksimum alat adalah sebesar kapasitas maksimum kendali pasif tetapi dibuat variabel sehingga menghasilkan pengendalian yang lebih baik dibandingkan dengan kendali pasif yang sifatnya tetap. Beberapa teknik yang telah dikembangkan di antaranya adalah (Symans dan Constantinou, 1999) *magnethorheological damper*, *electrorheological damper*, dan *fluid viscous damper*. Dalam tulisan ini akan ditinjau pengendalian getaran dengan *variable damper*.

---

<sup>1</sup> Anggota staf pengajar Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Atma Jaya Yogyakarta

## 2. Teknik Kendali Nonlinier

Persamaan gerak suatu struktur dengan *variable damper* (Gambar 2) dapat ditulis sebagai

$$[\mathbf{M}]\{\ddot{\mathbf{U}}\} + [\mathbf{C}]\{\dot{\mathbf{U}}\} + [\mathbf{K}]\{\mathbf{U}\} = [\mathbf{b}_s]\{\mathbf{f}_c\} + \{\mathbf{e}_s\}\ddot{u}_g \quad (1)$$

dengan  $[\mathbf{M}] = n \times n$  matriks massa,  $[\mathbf{C}] = n \times n$  matriks redaman,  $[\mathbf{K}] = n \times n$  matriks kekakuan,  $\{\mathbf{U}\} = n \times 1$  vektor perpindahan,  $\{\mathbf{f}_c\} = r \times 1$  gaya kontrol,  $[\mathbf{b}_s] = n \times r$  matriks lokasi gaya kontrol, dan  $\mathbf{e}_s = -[\mathbf{M}_s]\{\mathbf{1}\} =$  pengaruh percepatan tanah pada struktur,  $\{\mathbf{1}\} =$  vektor yang berisi angka 1 yaitu  $\{\mathbf{1}\} = [1 \ 1 \ \dots \ 1]^T$  dan  $\ddot{u}_g =$  percepatan tanah. Titik di atas huruf ( ) menunjukkan turunan terhadap waktu,  $n =$  derajat kebebasan total, dan  $r =$  jumlah alat kontrol. Pada persamaan (1)  $\{\mathbf{f}_c\}$  adalah vektor gaya kontrol dalam bentuk

$$\{\mathbf{f}_c\} = [f_{c1} \ f_{c2} \ \dots \ f_{cn}]^T \quad (2)$$

dengan

$$|f_{ci}| \leq f_{c,\text{maks}} \quad (3)$$

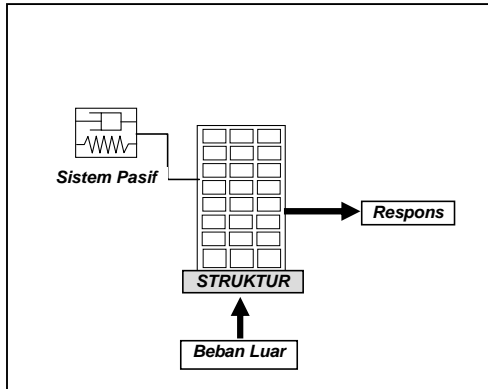
untuk  $i = 1, 2, \dots, n$ ,  $f_{c,\text{maks}} =$  kapasitas peredam yang ada.

Persamaan gerak (1) selanjutnya dinyatakan dalam persamaan *state space* dengan mendefinisikan

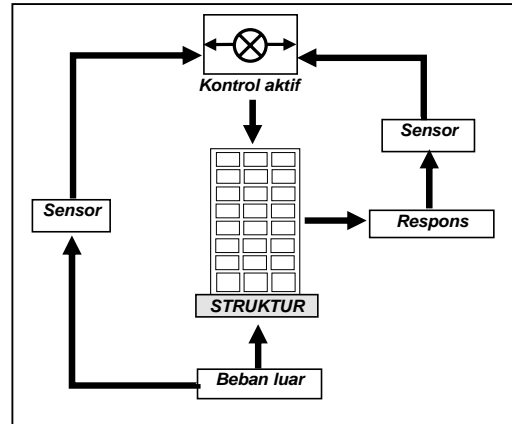
$$\{\mathbf{z}\} = \begin{Bmatrix} \{\mathbf{U}\} \\ \{\dot{\mathbf{U}}\} \end{Bmatrix} \quad (4)$$

Dari persamaan (1) dapat diperoleh percepatan struktur sebagai

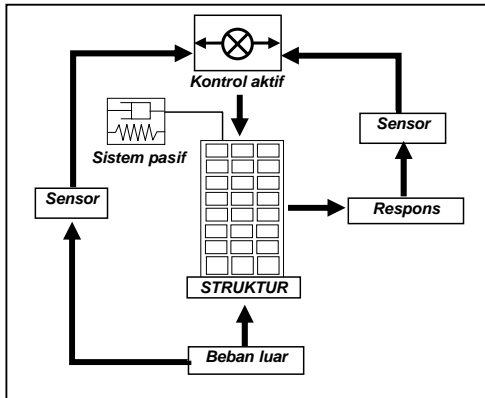
$$\begin{aligned} \{\ddot{\mathbf{U}}\} &= -[\mathbf{M}]^{-1}[\mathbf{C}]\{\dot{\mathbf{U}}\} - [\mathbf{M}]^{-1}[\mathbf{K}]\{\mathbf{U}\} + [\mathbf{M}]^{-1}[\mathbf{b}_s]\{\mathbf{f}_c\} + [\mathbf{M}]^{-1}\{\mathbf{e}_s\}\ddot{u}_g \\ \{\ddot{\mathbf{U}}\} &= -[\mathbf{M}]^{-1}[\mathbf{C}]\{\dot{\mathbf{U}}\} - [\mathbf{M}]^{-1}[\mathbf{K}]\{\mathbf{U}\} + [\mathbf{M}]^{-1}[\mathbf{b}_s]\{\mathbf{f}_c\} - \{\mathbf{1}\}\ddot{u}_g \end{aligned} \quad (5)$$



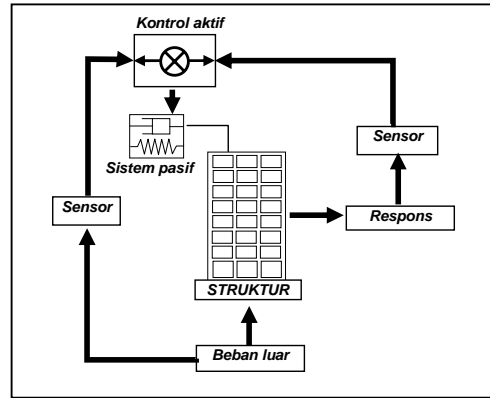
(a). Sistem kontrol secara pasif



(b). Sistem kontrol secara aktif



(c). Sistem kontrol hibrida (pasif + aktif)

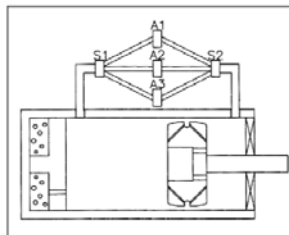


(d). Sistem kontrol secara semi aktif

**Gambar 1 Diagram sistem kendali**

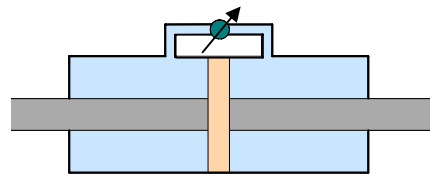
**Semi-Active Hydraulic Damping –**

A semi-active hydraulic damper actively varies the size of its passive hydraulic orifices



- a. S1 and S2 are selector valves, to select different orifice functions A1, A2, A3

**variable orifice damper**



**Gambar 2 Peredam semiaktif**

Dengan menggunakan persamaan (4) dan (5) selanjutnya persamaan (1) dapat ditulis menjadi

$$\{\dot{\mathbf{Z}}\} = [\mathbf{A}]\{\mathbf{Z}\} + [\mathbf{B}]\{\mathbf{f}_c\} + \{\mathbf{E}\}w \quad (6)$$

dengan

$$[\mathbf{A}] = \begin{bmatrix} [\mathbf{0}]_{n \times n} & [\mathbf{I}]_{n \times n} \\ -[\mathbf{M}]^{-1}[\mathbf{K}] & -[\mathbf{M}]^{-1}[\mathbf{C}] \end{bmatrix} \quad (7a)$$

$$[\mathbf{B}] = \begin{bmatrix} [\mathbf{0}]_{n \times n_a} \\ [\mathbf{M}]^{-1}[\mathbf{b}_s] \end{bmatrix} \quad (7b)$$

$$[\mathbf{E}] = \begin{Bmatrix} \{\mathbf{0}\}_{n \times 1} \\ [\mathbf{M}]^{-1}\{\mathbf{e}_s\} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \{\mathbf{0}\}_{n \times 1} \\ -\{\mathbf{1}\}_{n \times 1} \end{Bmatrix} \quad (7c)$$

$$w = \ddot{u}_g \quad (7d)$$

Ditinjau fungsi obyektif untuk mendapatkan *bang-bang control* (Wu dan Soong, 1996) sebagai

$$J = \int (\{\mathbf{Z}\}^T [\mathbf{Q}_o] \{\mathbf{Z}\}) dt \quad (8)$$

dengan kendala (*constraint*)

$$f_{ci}(t) \leq f_{ci,max} \quad (9)$$

dengan  $[\mathbf{Q}_o] =$  *positive definite weighting matrix* dan  $f_{ci,max}$  = kapasitas maksimum aktuator untuk alat ke-i.

Gaya optimal diperoleh dengan menggunakan prinsip minimum sebagai

$$\{\mathbf{f}_c\} = -\{\mathbf{f}_{max}\} \text{sgn}([\mathbf{B}]^T \{\mathbf{S}\}) \quad (10)$$

dengan  $\mathbf{f}_{max} = [f_{c1,max} \quad f_{c2,max} \quad \dots \quad f_{cr,max}]^T$  dan  $\{\mathbf{S}\}$  adalah *costate vector* diperoleh dari persamaan diferensial

$$\{\dot{\mathbf{S}}\} = [\mathbf{A}]^T \{\mathbf{S}\} + [\mathbf{Q}_o] \{\mathbf{Z}\} \quad (11)$$

$\text{Sgn}(\cdot)$  pada persamaan (10) adalah fungsi signum yang bernilai sama dengan 1 jika  $[\mathbf{B}]^T \{\mathbf{S}\} > 0$ , dan sama dengan  $-1$  jika  $[\mathbf{B}]^T \{\mathbf{S}\} < 0$ . Perlu dicatat di sini bahwa gaya kontrol selalu mencapai kapasitas maksimum dari alat kontrol, yang bergerak dari puncak maksimum yang satu ke puncak maksimum yang lain. Selain itu, *co-state*  $\{\mathbf{S}\}$  harus diperoleh secara *online* (Wu & Soong, 1996). Hal ini dapat menyebabkan waktu tunda tertentu.

Untuk menghindari hitungan vektor  $\{\mathbf{S}\}$  secara *online*, ditinjau algoritma *suboptimal bang-bang control* yang diperoleh dengan meminimumkan fungsi Lyapunov

$$V = \{\mathbf{Z}\}^T [\mathbf{P}_c] \{\mathbf{Z}\} \quad (12)$$

dengan  $[P_c] = \text{positive definite}$  matriks. Selanjutnya matriks  $[P_c]$  diperoleh dari penyelesaian persamaan Lyapunov sebagai berikut ini. Turunan dari fungsi Lyapunov adalah:

$$\dot{V} = \{\dot{Z}\}^T [P_c] \{Z\} + \{Z\}^T [P_c] \{\dot{Z}\} \quad (13)$$

yang dengan mengingat persamaan (6) akan diperoleh

$$\dot{V} = \{Z\}^T ([A]^T [P_c] + [P_c] [A]) \{Z\} + 2 \{B\} \{f_c\} + \{E\} w^T [P_c] \{Z\} \quad (14)$$

Agar sistem stabil, maka menurut Lyapunov turunan dari fungsi Lyapunov harus negatif. Untuk mencapai tersebut, maka

$$[A]^T [P_c] + [P_c] [A] = -[Q_c] \quad (15)$$

dengan  $[Q_c]$  adalah *positive semi-definite matrix*. Selain itu agar turunan fungsi Lyapunov menjadi negatif, maka

$$\{f_c\} = -\{f_{c,max}\} \text{sgn}([B]^T [P_c] \{Z\}) \quad (16)$$

Persamaan (16) menghasilkan kontrol *bang-bang* suboptimal yang tidak memerlukan hitungan *online* dari *co-state S* (Wu & Soong, 1996). Namun perlu dicatat bahwa gaya kontrol selalu mencapai kapasitas maksimum dari aktuator karena adanya fungsi signum, sama seperti pada kasus *bang-bang control law*. Hal ini tentu saja tidak menguntungkan terutama untuk aktuator yang umum digunakan pada bangunan teknik sipil.

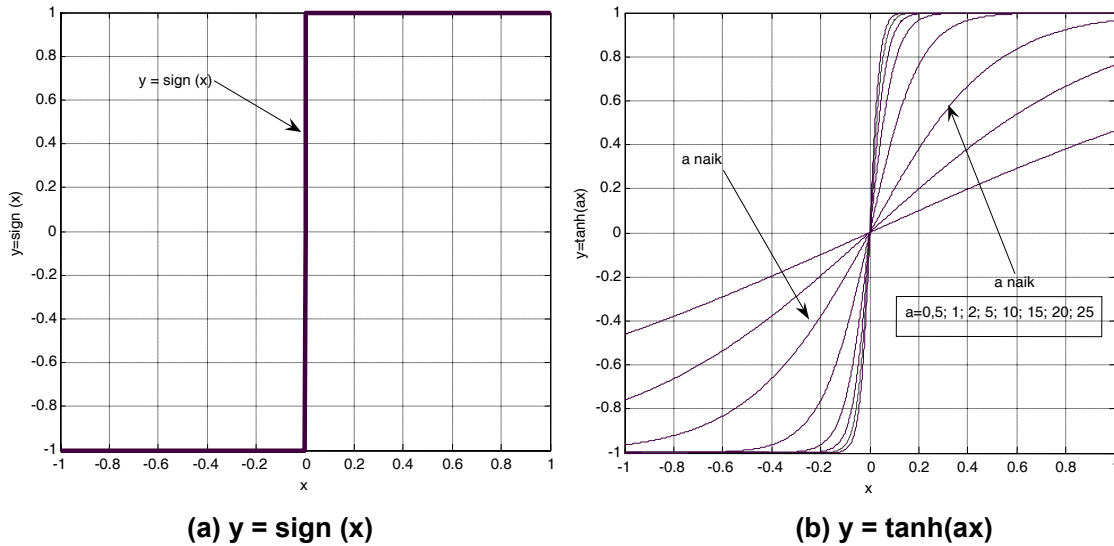
Untuk mengatasi hal ini dalam Arfiadi & Hadi (2006) diajukan cara sederhana dengan mengganti fungsi *signum* dengan fungsi yang kontinyu. Fungsi kontinyu yang dipilih adalah fungsi tangen hiperbolik (*tanh*) mengingat sifat-sifatnya yang dapat menyerupai fungsi signum seperti terlihat pada Gambar 3, yaitu

$$y = \text{sgn}(x) \approx f(a, x) = \tanh(a x) \quad (18)$$

Dengan memperhatikan pendekatan ini, maka aturan pengendalian yang memenuhi kendala pada kapasitas aktuator menjadi (Arfiadi dan Hadi, 2006)

$$\{f_c\} = -\{f_{c,max}\} \tanh(\alpha [B]^T [P_c] \{Z\}) \quad (19)$$

dengan  $\alpha =$  konstanta untuk mengatur tingkat gaya kontrol yang harus diberikan. Dengan mengatur nilai konstanta  $\alpha$ , maka *high speed switching effect* dapat dihindari. Cara memilih konstanta  $\alpha$  yang cocok dibahas dalam Arfiadi dan Hadi (2006).



Gambar 3 Pendekatan fungsi  $y = \text{sgn}(x) \approx f(a, x) = \tanh(a, x)$

### 3. Simulasi Numerik

Untuk melihat efektivitas peredam semiaktif ditinjau suatu gedung 3 dimensi seperti yang dibahas pada Arfiadi (2006) dan ditunjukkan pada Gambar 4. Tinggi antar lantai tipikal = 3,6 m, kecuali lantai paling bawah = 4 m. Ukuran kolom sebagai berikut: tingkat 1-3: 0,65 m x 0,65 m; tingkat 4-6: 0,5 m x 0,5 m; tingkat 7-9: 0,4 m x 0,4 m. Semua balok berukuran sama = 0,3 m x 0,5 m. Modulus elastik beton  $E = 2,5 \times 10^7$  kN/m<sup>2</sup> dan angka Poisson  $\nu = 0.3$ .

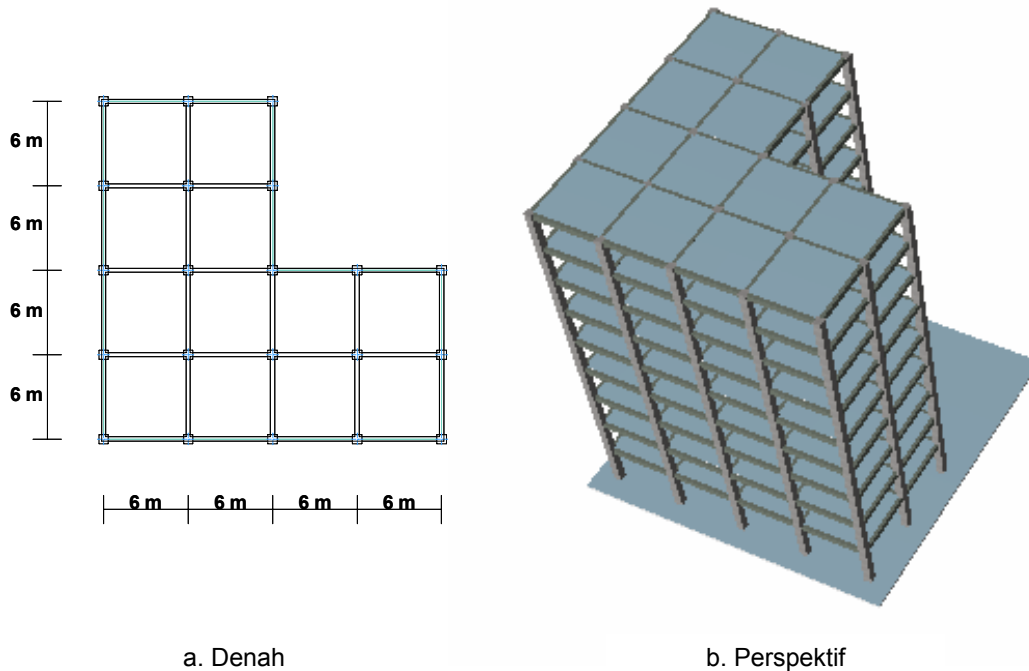
Analisis struktur tiga dimensi dilakukan seperti yang dibahas dalam Arfiadi dan Hadi (2000). Pusat massa dianggap terletak pada pusat geometrik lantai gedung. Massa gedung dianggap terpusat pada lantai dengan  $m_{ix} = 126,9$  t,  $m_{iy} = 126,9$  t,  $m_{i\theta} = 11160,7$  kN-det<sup>2</sup>/m untuk  $i = 1, 2, \dots, 8$ ; dan  $m_{\theta x} = 105,7$  t,  $m_{\theta y} = 105,7$  t dan  $m_{\theta\theta} = 9300,5$  kN-det<sup>2</sup>/m di mana indeks  $x, y$ , dan  $\theta$  menunjukkan translasi arah  $x, y$  dan rotasi. Lantai dianggap sebagai diafragma yang sangat kaku dalam arah horizontal sehingga setiap lantai mempunyai 3 (tiga) derajat kebebasan. Model struktur telah diverifikasi dengan program ETABS v. 8.4.5 dengan hasil yang memuaskan. Matriks redaman dalam hal ini dianggap sebanding dengan matriks kekakuan menurut persamaan

$$[C] = a_k [K]$$

dengan rasio redaman  $\xi = 2 \%$ , di mana

$$a_k = \frac{2\xi}{\omega_1}$$

dan  $\omega_1 =$  frekuensi lingkaran alami ragam pertama = 6,4008 rad/det.



**Gambar 4 Gedung 9 lantai untuk simulasi numerik**

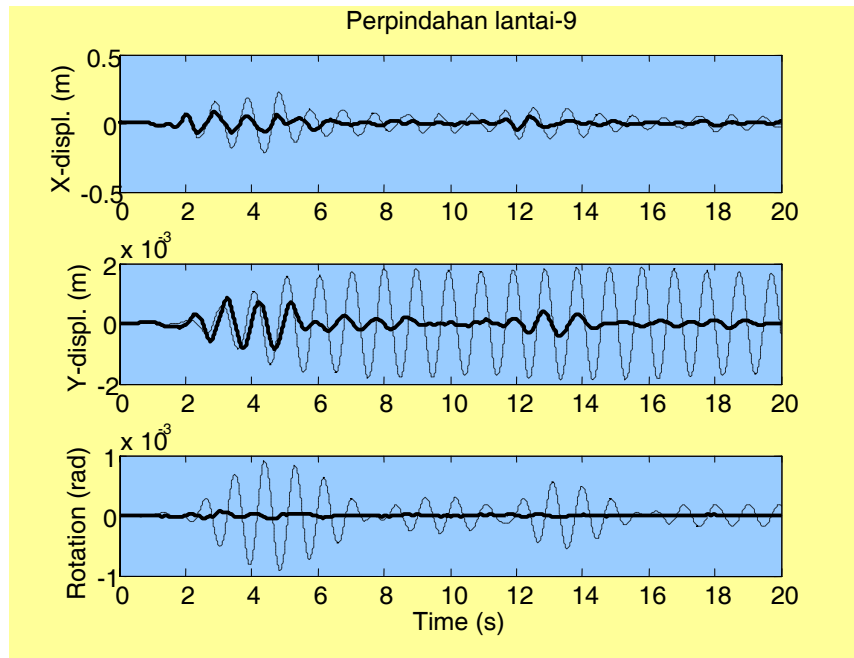
Untuk mengendalikan getaran dipasang peredam dengan kapasitas gaya maksimum =  $f_c$   
 $\max = 400$  kN. Gaya redaman dapat diatur menurut algoritma yang dibahas pada bagian  
 sebelumnya.

Gaya kontrol direncanakan dengan mengambil elemen matriks  $[Q_c]$  pada persamaan  
 (15) sebagai berikut ini:  $Q_c(i,i) = 0$ , untuk  $i = 1, 2, \dots, 54$ , kecuali  $Q_c(25,25) = 3.5 \times 10^4$ ,  
 $Q_c(26,26) = 2.8 \times 10^4$ ,  $Q_c(27,27) = 2.8 \times 10^7$ , dan  $Q_c(i,j) = 0$ , untuk  $i \neq j$ .

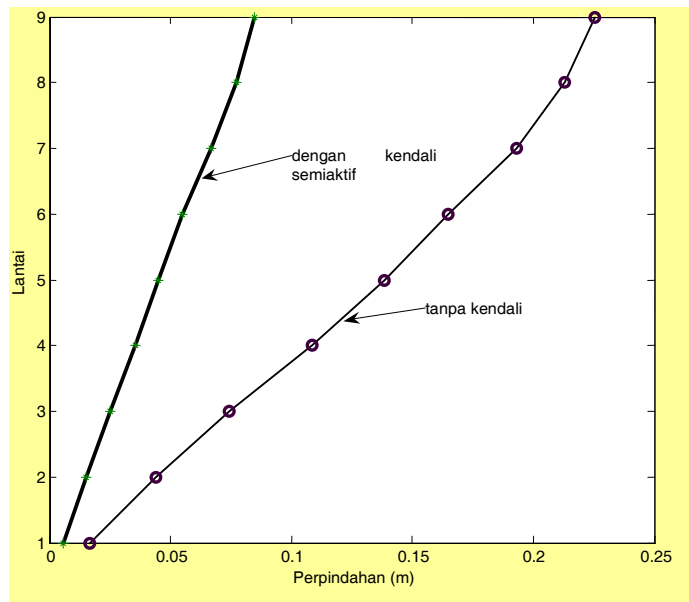
Dari persamaan (15) matriks  $[P_c]$  dapat dihitung yang selanjutnya digunakan untuk  
 menetapkan besarnya gaya kontrol pada persamaan (19). Beberapa nilai  $\alpha$  dicoba  
 dalam simulasi dengan hasil sebagai berikut ini.

Untuk nilai  $\alpha = 0,1$ ; hasil simulasi oleh gempa El Centro 1940 NS dapat dilihat pada  
 Gambar 5. Tampak bahwa perpindahan lantai 9 gedung dapat direduksi dengan gaya  
 kontrol semiaktif. Sedangkan Gambar 6 menunjukkan respons maksimum tiap lantai  
 oleh gempa yang sama. Gaya kontrol yang diperlukan untuk kondisi ini digambarkan  
 pula pada Gambar 7.

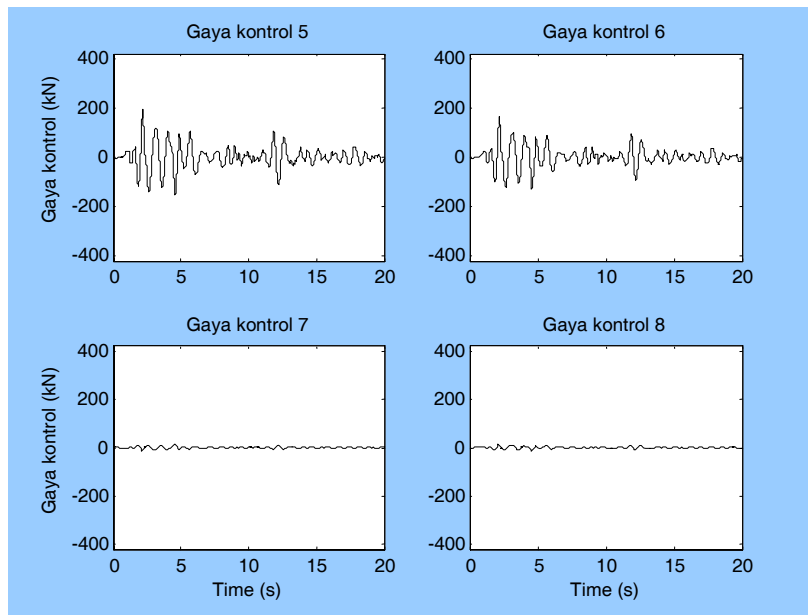
Untuk  $\alpha = 1,9$  respons lantai 9 oleh gempa El Centro 1940 NS dapat dilihat pada gambar  
 8-10. Tampak bahwa dengan mengambil nilai  $\alpha$  yang besar energi yang dibutuhkan juga  
 semakin mendekati kapasitas maksimumnya, sesuai dengan fungsi tanh pada Gambar  
 3. Walaupun demikian, agar kapasitas gaya kontrol tidak selalu mencapai maksimum  
 sepanjang waktu, nilai ini harus dibatasi. Cara penentuan nilai  $\alpha$  yang sesuai dibahas  
 dalam Arfiadi dan Hadi (2006).



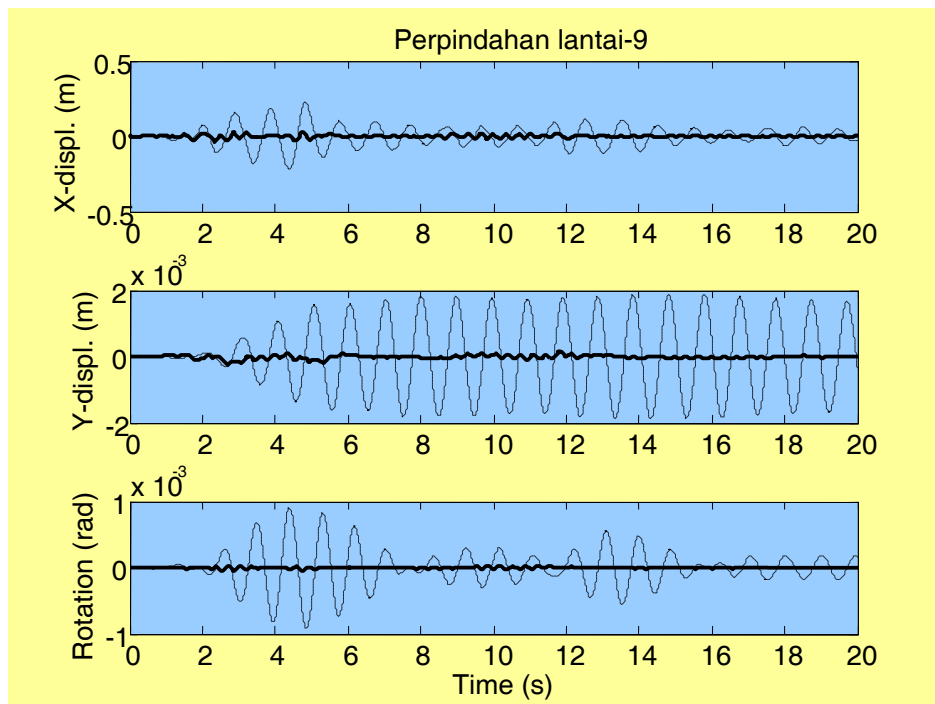
Gambar 5 Respons oleh gempa El Centro  $\alpha = 0,1$ , garis putus=tanpa kendali, garis penuh=dengan kendali semiaktif



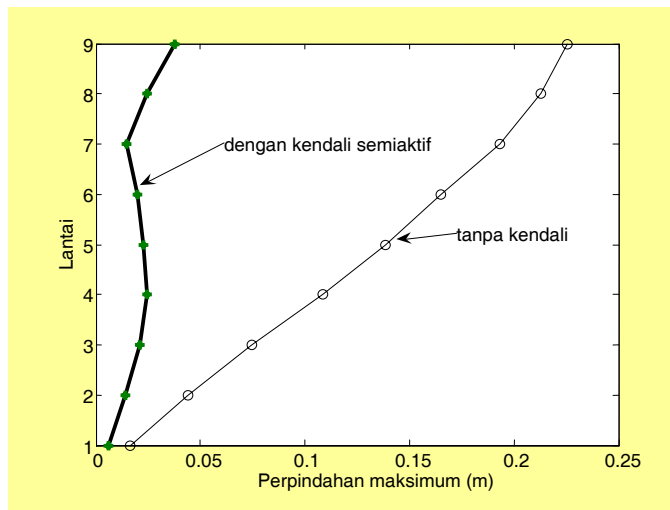
Gambar 6 Respons maksimum arah x oleh gempa El Centro  $\alpha = 0,1$



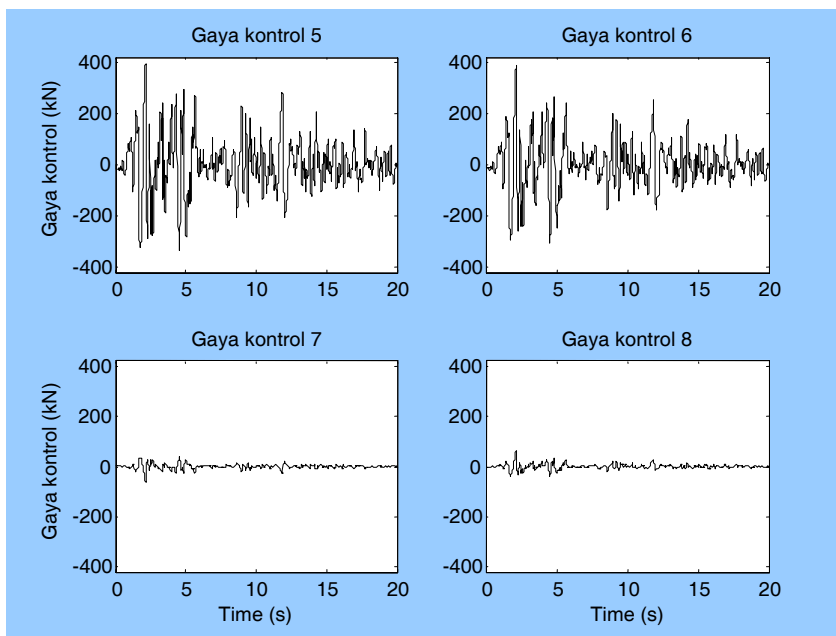
**Gambar 7 Besarnya gaya kontrol pada atap  $\alpha = 0,1$**



**Gambar 8 Respons oleh gempa El Centro  $\alpha = 1,9$ , garis putus=tanpa kendali, garis penuh=dengan kendali semiaktif**



**Gambar 9** Respons maksimum arah x oleh gempa El Centro  $\alpha = 1,9$



**Gambar 10** Besarnya gaya kontrol pada atap  $\alpha = 1,9$

Pada Gambar 7 dan 10, gaya kontrol 5 dan 6 adalah gaya pada peredam yang dipasang dalam arah x, sedangkan gaya kontrol 7 dan 8 adalah peredam dalam arah y. Dari Gambar 7 dan 10, tampak bahwa jika gempa bekerja dalam arah x maka gaya kontrol yang pengaruhnya paling besar adalah peredam yang dipasang dalam arah x, demikian juga sebaliknya.

#### 4. Respons Terhadap Berbagai Sudut Datang Gempa

Untuk mengetahui pengaruh sudut datang gempa, struktur disimulasi dengan sudut gempa  $15^\circ$ ,  $30^\circ$  dan  $45^\circ$  terhadap sumbu x. Nilai  $\alpha$  diambil sebesar  $\alpha = 1,9$ . Respons struktur dapat dilihat pada Gambar 11 sampai dengan 13. dan Tabel 1 dan 2.

Tabel 1 Respons oleh gempa El Centro dengan sudut datang yang berbeda

Respons	$\alpha = 0^\circ$		$\alpha = 15^\circ$		$\alpha = 30^\circ$		$\alpha = 45^\circ$	
	TK	SA	TK	SA	TK	SA	TK	SA
$x_9(m)$	0,2254	0,0378	0,2178	0,0361	0,1953	0,0315	0,1595	0,0250
$y_9(m)$	0,0019	0,0002	0,0585	0,0090	0,1128	0,0176	0,1595	0,0254
$\theta_9(rad)$	$9,13 \times 10^{-4}$	$5,82 \times 10^{-5}$	$6,45 \times 10^{-4}$	$4,09 \times 10^{-5}$	$3,33 \times 10^{-4}$	$2,00 \times 10^{-5}$	$4,57 \times 10^{-16}$	$5,39 \times 10^{-6}$

TK = tanpa kendali, SA = semiaktif

Tabel 2 Besarnya gaya kontrol oleh gempa El Centro dengan sudut datang yang berbeda

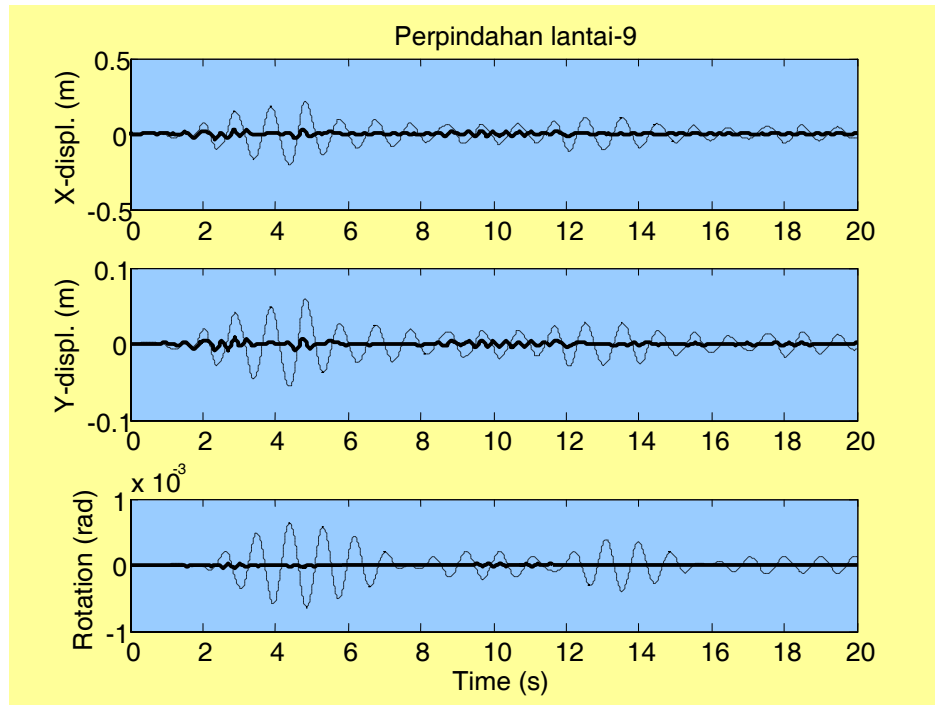
Gaya kontrol (kN)	$\alpha = 0^\circ$	$\alpha = 15^\circ$	$\alpha = 30^\circ$	$\alpha = 45^\circ$
F5	392,67	388,97	373,17	324,38
F6	386,48	382,79	364,87	323,26
F7	62,24	83,62	216,76	315,74
F8	61,40	164,55	252,64	316,96

Pada Tabel 1 tampak bahwa respons struktur sesuai dengan arah sudut datang gempa, baik untuk struktur tanpa kendali maupun struktur dengan kendali semiaktif. Respons arah x berkurang seiring dengan besarnya sudut datang gempa. Pada sudut  $45^\circ$ , perpindahan arah x dan y struktur tanpa kendali sama yaitu sebesar 0,1595 m. Hal ini sesuai dengan geometrik struktur, yang mempunyai sumbu simetrik terhadap suatu garis dengan sudut  $45^\circ$  dari sumbu x. Pada kondisi ini respons struktur dengan kendali semiaktif dalam arah x dan y, berturut-turut adalah 0,0250 m dan 0,0254 m. Nilai repons yang berbeda ini disebabkan oleh elemen  $Q_c(25,25)$  dan  $Q_c(26,26)$  yang berbeda yaitu  $Q_c(25,25) = 3,5 \times 10^4$ ,  $Q_c(26,26) = 2,8 \times 10^4$ .  $Q_c(25,25)$  dan  $Q_c(26,26)$  berpengaruh pada besarnya pengurangan respons yang diinginkan untuk lantai 9 dalam arah x dan y. Jika nilai elemen  $Q_c$  besar maka kita mengharapkan pengurangan yang besar pula. Hal lain yang dapat dicatat adalah untuk sudut datang gempa  $45^\circ$ , karena perpindahan arah x dan y ingin dikurangi, maka rotasi menjadi sedikit lebih besar dibandingkan dengan tanpa kendali. Namun demikian nilai nominalnya masih relatif kecil. Hal yang sama juga terjadi pada besarnya energi yang diperlukan seperti ditunjukkan pada Tabel 2. Karena  $Q_c(25,25) \neq Q_c(26,26)$ , maka besarnya gaya kontrol yang diperlukan juga menjadi tidak sama. Walaupun demikian, tampak bahwa algoritma yang digunakan cukup adaptif, di mana untuk  $\alpha$  kecil gaya F5 dan F6 (peredam dalam arah x) digunakan secara optimum. Sedangkan peredam arah y (F7 dan F8) hanya digunakan seperlunya.

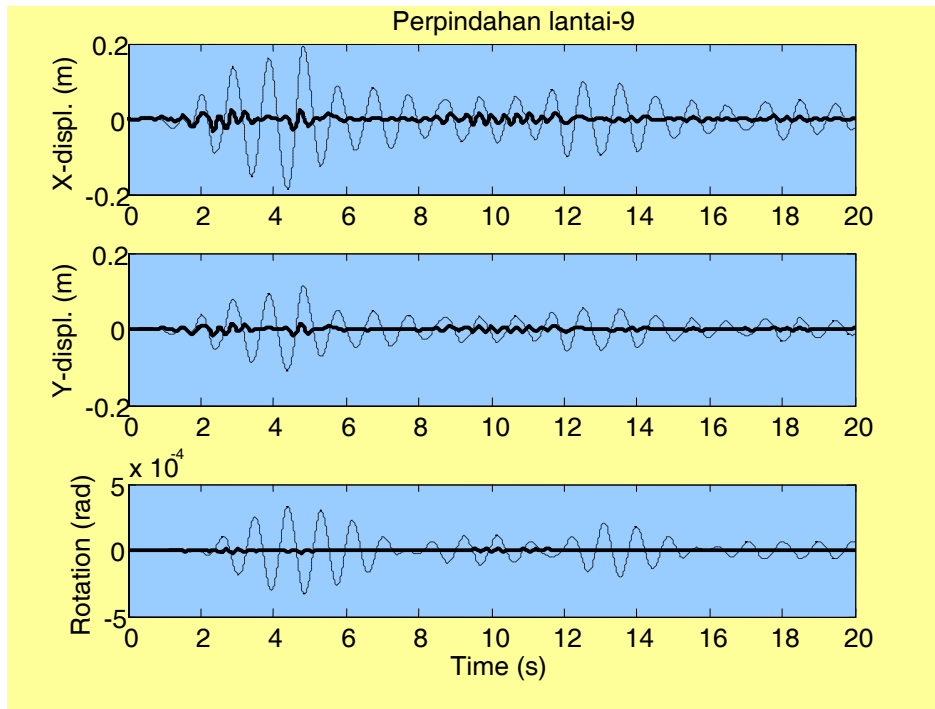
Jika diinginkan pengurangan yang sebanding untuk arah x dan y, maka nilai  $Q_c(25,25)$  dan  $Q_c(26,26)$  dapat dibuat sama. Jika  $Q_c(25,25) = Q_c(26,26) = 3,5 \times 10^4$ , respons struktur dan besarnya gaya kontrol menjadi proporsional baik untuk arah x dan y, seperti terlihat pada Tabel 3.

**Tabel 3 Respons oleh gempa El Centro sudut datang 45°, koefisien pemberat x dan y sama**

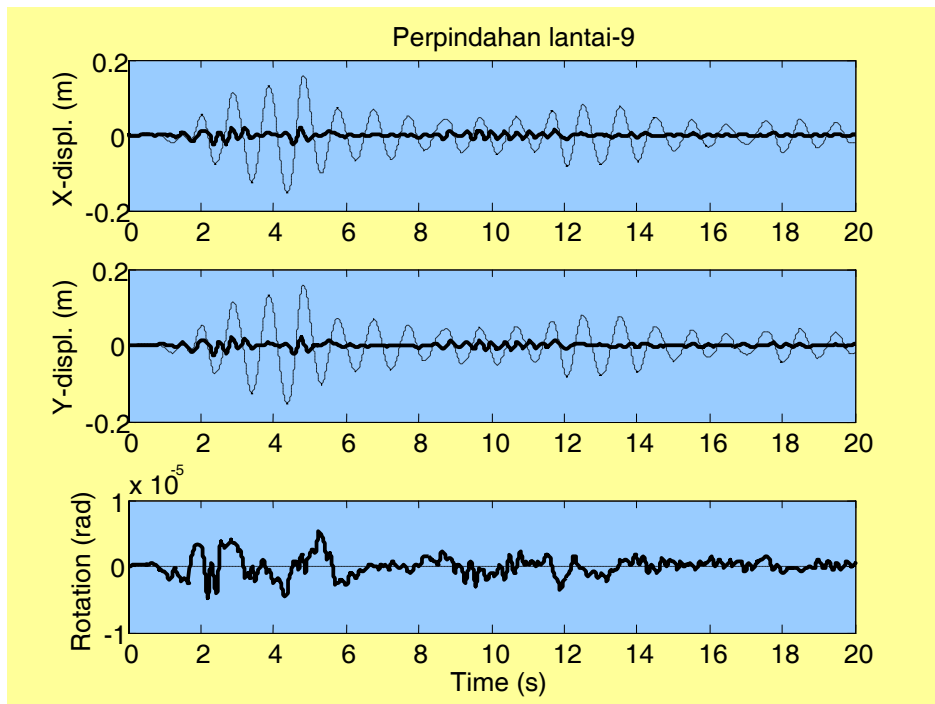
$F_5$ (kN)	$F_6$ (kN)	$F_7$ (kN)	$F_8$ (kN)	$x_9$ (m)	$y_9$ (m)	$\Theta_9$ (m)
323,76	323,76	323,76	323,76	0,025	0,025	$6,79 \times 10^{-16}$



**Gambar 11 Respons oleh gempa El Centro 1940 NS sudut gempa = 15°**



**Gambar 12 Respons oleh gempa El Centro 1940 NS sudut gempa = 30°**



**Gambar 13 Respons oleh gempa El Centro 1940 NS sudut gempa = 45°**

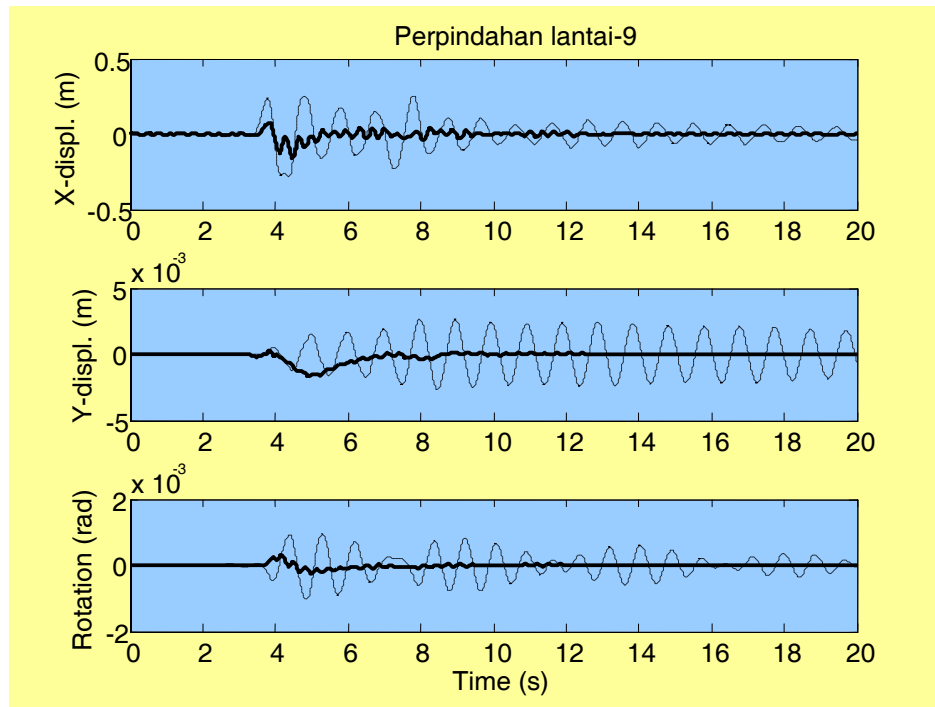
## 5. Pengaruh Berbagai Gempa

Untuk mengetahui respons struktur, tanpa dan dengan kendali semiaktif, untuk berbagai gempa telah dilakukan simulasi dengan mengerjakan gempa-gempa Northridge 1994 NS, Kobe 1995 NS dan Hachinohe 1968 NS dengan sudut datang gempa =  $0^0$  dengan matriks  $Q_c$  yang sama dengan simulasi awal. Perpindahan lantai 9 dalam arah x tanpa dan dengan kendali semiaktif dapat dilihat pada Gambar 14 dan 15 untuk gempa Northridge dan Hachinohe. Perpindahan maksimum lantai 9 dalam arah x digambarkan pula pada Gambar 16. Dari hasil ini dapat terlihat efektivitas algoritma semiaktif yang digunakan di mana respons struktur yang dipasang peredam semiaktif menjadi lebih kecil.

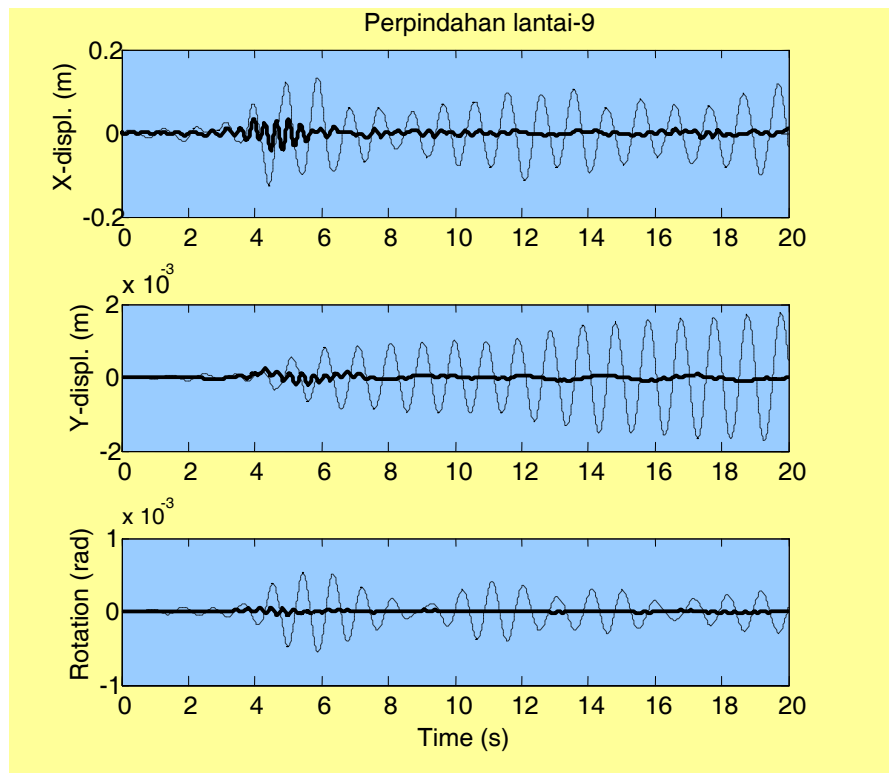
## 6. Kesimpulan

Dalam tulisan ini telah dibahas aplikasi kendali *semiactive variable damper*. Algoritma kontrol yang digunakan adalah algoritma nonlinier dengan fungsi kontinyu, yang dapat membatasi besarnya gaya kontrol yang diinginkan. Algoritma yang digunakan disimulasikan pada struktur 9 lantai tak simetrik. Analisis struktur tiga dimensi dikerjakan dengan menganggap lantai sebagai diafragma yang kaku. Respons struktur tanpa dan dengan kendali semiaktif ditinjau dengan faktor pemberat pada matriks  $[Q_c]$  yang berbeda-beda. Pengaruh sudut datang gempa selanjutnya diamati. Pengaruh kendali semiaktif juga dilihat untuk berbagai gempa yang berbeda. Dari analisis tersebut beberapa kesimpulan dapat diperoleh sebagai berikut ini.

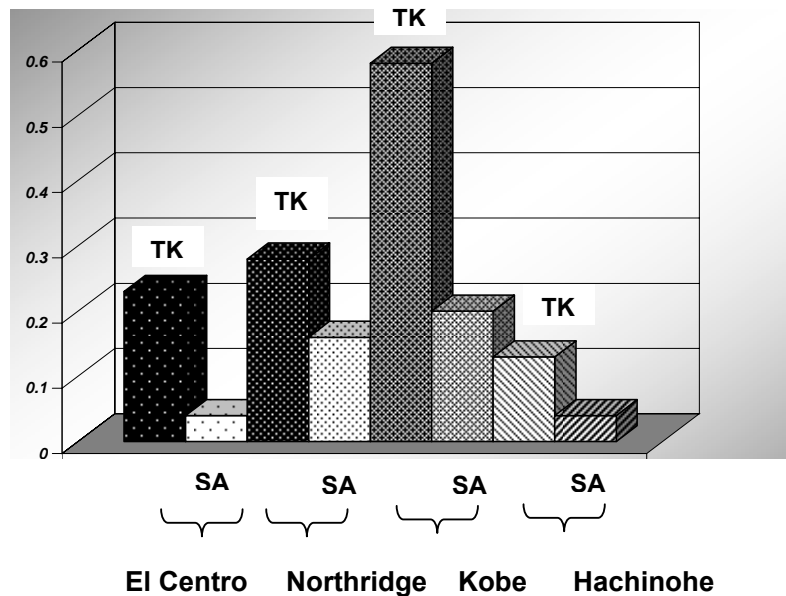
- a. Algoritma kontrol nonlinier dan kontinyu yang dipakai dapat membatasi besarnya gaya kontrol yang diperlukan
- b. Respons struktur dapat dikurangi dengan adanya sistem kendali semiaktif.
- c. Koefisien  $\alpha$  menentukan level penggunaan energi yang diperlukan, Semakin besar  $\alpha$ , maka gaya kontrol mendekati kapasitas maksimumnya.
- d. Respons struktur dengan kendali semiaktif dapat diatur dengan mengatur elemen matriks  $[Q_c]$  pada fungsi obyektif.
- e. Algoritma kontrol yang digunakan menunjukkan sifat yang adaptif, di mana level energi yang diperlukan dalam arah tertentu tergantung pada sudut datang gempa yang terjadi.



**Gambar 14 Respons oleh gempa Northridge 1994 sudut gempa = 0°**



**Gambar 15 Respons oleh gempa Hachinohe 1968 sudut gempa = 0°**



## 7. Daftar Pustaka

1. Arfiadi, Y., 2006. Umpan balik keluaran untuk kontrol nonlinier dengan gaya control terbatas. *Jurnal Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Atma Jaya Yogyakarta*, 6(2), 144-159
2. Arfiadi, Y., and Hadi, M.N.S., 2000. Passive and Active Control of Three Dimensional Structures, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 29, 377-396.
3. Arfiadi, Y. and Hadi, MNS., 2006. Continuous Bounded Controller for Active Control of Structures". *The International Journal of Computers and Structures*, 84, 798-807.
4. Housner GW, Bergman LA, Caughey TK, Chassiakos AG, Claus RO, Masri SF, Skelton RR, Soong T T, Spencer BF, Yao JT.P. 1997. Structural control: past, present, and future", *Journal of Engineering Mechanics* 123(9): 897-971
5. Soong, T. T., 1990, *Active structural control: theory and practice*, Longman Scientific & Technical, Essex, U.K.
6. Symans, M.D. dan Constantinou, M.C., 1999. Semi-active control systems for seismic protection of structure: a state-of-the-art review. *Engineering Structures*, 21, 468-487
7. Wu, Z. and Soong, T. T., 1996. Modified Bang-Bang Control Law for Structural Control Implementation. *Journal of Engineering Mechanics*, Vol. 122(8), 771-777.