

# KONTROL VIBRASI AKTIF PADA STRUKTUR YANG MENGALAMI BEBAN DINAMIK DENGAN MENGGUNAKAN JARINGAN SARAF TIRUAN DAN ALGORITMA GENETIK

## *Control Of Structure Active Vibration Excited By Dynamic Loadings Using Artificial Neural Network and Genetic Algorithm Approach*

Herlien D. Setio<sup>1)</sup>, Rahmat Widarbo<sup>2)</sup>, Pasca Rante Patta<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup> Staf Pengajar, Program Studi Teknik Sipil, ITB, Bandung, email: herlien@si.itb.ac.id

<sup>2)</sup> Asisten Peneliti, Program Studi Teknik Sipil, ITB, Bandung

---

### ABSTRACT

*This paper presents an active control technique applied to building structures which are excited by external dynamic loadings such as earthquake, wind, and blasting. By using the active control system, the structural vibration responses can be decreased by giving control forces generated by actuator which is based on the responses of the structure. The control forces given to the structure are calculated by using genetic algorithm theory. The actual external loadings and the responses of the structure are measured by using dynamic sensors and placed at certain location on the structure. "Smart Structure" concept which is proposed in this paper is an efficient way in conceiving and designing an earthquake resistant building. This concept imitates the human neural system, where inside the human body there are sensors and energy against external excitation or disturbances. The application of this system for building structures, requires a fast and accurate calculation of control forces, so that time delay in giving control forces to the structure will be minimized. This requirement can be achieved by using combination of an Artificial Neural Network method and Genetic Algorithm approach.*

*Keywords: Smart Structure, control force, earthquake loading, genetic algorithm, artificial neural network, non-linear structure.*

### PENDAHULUAN

Dengan sejalannya perkembangan teknologi komputer, tercapai pula perkembangan yang pesat dalam sistem data akuisisi dan juga dalam metode numerik yang dapat membantu perencana struktur untuk merancang sistem struktur bangunan yang bersifat adaptif terhadap beban dinamik, khususnya beban gempa yang bekerja. Maka dengan menggunakan pendekatan desain struktur yang sifatnya aktif, dapat membuat desain dari struktur tersebut semakin efisien, dengan dimensi yang lebih optimal, dan massa yang semakin ringan sehingga lebih tahan terhadap beban gempa.

Ada pula berbagai masalah-masalah khusus yang harus diperhatikan dalam merancang struktur-struktur di masa sekarang, dan adanya permasalahan ini menimbulkan kebutuhan struktur yang bersifat adaptif. Masalah utama yang sering ditemui adalah keadaan dimana struktur yang dibangun sifatnya semakin fleksibel dan tinggi. Karena permintaan dari struktur di masa sekarang seringkali membutuhkan struktur yang semakin tinggi, seperti bangunan pencakar langit, maka struktur ini akan menjadi semakin fleksibel. Dengan fleksibilitas yang makin besar, level vibrasi yang tidak diinginkan mungkin saja akan terjadi jika struktur tersebut dikenai beban lingkungan yang besar.

Untuk dapat merancang struktur yang adaptif, diperkenalkan konsep kontrol aktif pada struktur. Konsep kontrol aktif ini sudah dipakai secara luas untuk struktur pesawat terbang, kapal selam dan berbagai struktur industri lainnya. Namun demikian, aplikasi konsep ini pada struktur bangunan sipil baru dikembangkan sekitar dua dekade terakhir. Kontrol struktur pada dasarnya adalah mengatur karakteristik dinamik struktur tersebut untuk menjamin bahwa struktur merespon dengan baik gaya-gaya luar yang terjadi. Mekanisme ini pada umumnya memerlukan suatu sistem yang dapat memberikan gaya luar tambahan yang disebut dengan gaya kontrol.

Perhitungan gaya kontrol pada mulanya dilakukan dengan cara konvensional di mana diperlukan informasi yang akurat tentang properti struktur seperti kekakuan dan massanya. Cara ini mengakibatkan perhitungan gaya kontrol harus melalui tahapan yang rumit, khususnya untuk struktur-struktur non linier, yang dapat mengakibatkan keterlambatan dalam pemberian gaya kontrol. Dua dekade terakhir, beberapa riset telah pula dilakukan pada pengembangan dan implementasi sistem kontrol aktif, seperti Yang et. al. (1992); Soong (1990); Chang et. Al. (1995) dan Jiang (2005). Studi tersebut, di mana pada umumnya menggunakan teori kontrol klasik linier,

menghasilkan efektifitas dan akurasi yang cukup baik untuk struktur yang relatif kecil.

Studi eksperimental skala laboratorium dengan menggunakan Jaringan Syaraf tiruan telah dilakukan oleh Setio H.D. et. al.(1999 dan 2003) dan memberikan hasil yang memuaskan. Tulisan ini mengusulkan metoda Jaringan Syaraf Tiruan yang dikombinasikan dengan Algoritma Genetik untuk menghitung gaya kontrol yang diperlukan oleh struktur saat dikenai gaya dinamik. Non-linieritas struktur juga diperhitungkan karena pada umumnya struktur dengan eksitasi gempa kuat akan berperilaku nonlinier sehingga anggapan bahwa struktur tersebut tetap linier sudah tidak dapat dipertahankan lagi.

### ANALISIS DINAMIK

Asumsi-asumsi dasar yang digunakan untuk memodelkan suatu struktur sebagai bangunan geser antara lain adalah massa dari struktur yang terpusat di setiap lantainya, kekakuan balok dianggap tak terhingga, dan deformasi aksial kolom diabaikan. Asumsi-asumsi ini menyederhanakan struktur tersebut dari banyak derajat kebebasan menjadi hanya satu derajat kebebasan di setiap lantainya.

Persamaan dinamik struktur yang terkena beban gempa adalah:

$$M\ddot{x} + C\dot{x} + Kx = -M \cdot 1 \cdot \ddot{x}_g \quad (1)$$

Matrik M, C, dan K masing-masing adalah matrik massa, redaman, dan kekakuan struktur. Sedangkan vektor  $\ddot{x}$ ,  $\dot{x}$ , dan  $x$  masing-masing adalah percepatan absolut, kecepatan relatif dan perpindahan relatif struktur.

Matrik redaman struktur C diasumsikan mengikuti aturan Rayleigh yaitu:

$$C = a_0 M + a_1 K \quad (2)$$

dengan matrik M dan K sama seperti yang telah disebutkan diatas. Konstanta  $a_0$  dan  $a_1$  dihitung menggunakan rumus:

$$a = 2\Omega^{-1}\xi \quad (3)$$

dengan  $\Omega$  adalah matrik yang berisi frekuensi natural struktur yang dipangkatkan dan  $\xi$  adalah vektor koefisien redaman struktur.

### STRUKTUR NONLINIER

Dalam bidang rekayasa sipil, hampir semua struktur memiliki sifat nonlinier, dengan tingkat nonlinieritas yang berbeda-beda. Selama ini pembuatan model matematik suatu struktur

umumnya dilakukan melalui pendekatan linier, namun seringkali pendekatan ini tidak cukup untuk mempelajari sifat-sifat struktur yang memiliki karakteristik nonlinier, terutama untuk struktur yang memiliki sifat nonlinieritas yang besar. Struktur-struktur nonlinier ini sering menunjukkan perilaku yang kompleks dan mengejutkan, oleh karena itu perlu dilakukan suatu pendekatan nonlinier untuk memperoleh solusi yang lebih mendekati perilaku struktur tersebut.

Ada beberapa jenis pemodelan matematis yang mewakili sifat nonlinier, yang akan digunakan dalam studi ini adalah jenis pemodelan Duffing, yang memiliki sifat nonlinier geometri.

Model matematis Duffing memiliki bentuk:

$$f(\dot{x}, x) = \alpha x^3 \quad (4)$$

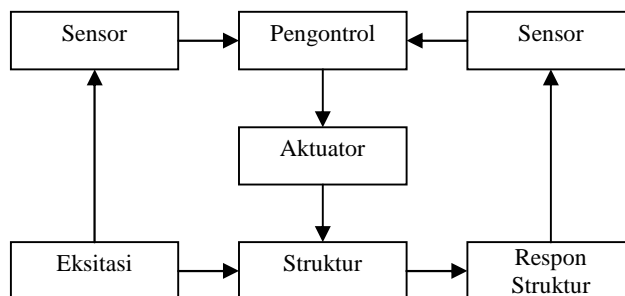
$f$  adalah komponen gaya nonlinier yang merupakan fungsi dari perpindahan dan kecepatan, adalah konstanta nonlinieritas.

Persamaan diferensial orde dua yang mewakili persamaan gerak dari sistem ini adalah:

$$M\ddot{X}(t) + C\dot{X}(t) + KX(t) + f(\dot{X}, X) = -M\ddot{x}_g(t) \quad (5)$$

### KONTROL AKTIF STRUKTUR

Sistem kontrol pada struktur dapat dibagi menjadi 3 bagian besar, yaitu sistem kontrol pasif, kontrol aktif, dan kontrol hibrid. Kontrol pasif tidak memerlukan energi dari luar, sedangkan kontrol aktif memerlukan penambahan energi luar. Kontrol hibrid merupakan gabungan dari kedua sistem kontrol tersebut diatas. Pembahasan dalam tulisan ini akan difokuskan kepada mekanisme kontrol aktif dengan menggunakan tendon aktif. Suatu sistem kontrol aktif mempunyai konfigurasi dasar seperti pada Gambar 1 dibawah ini (Soong, 1989):



Gambar 1. Konfigurasi dasar sistem kontrol aktif pada struktur

Beberapa macam tipe kontrol struktur aktif adalah sebagai berikut:

- Kontrol *Closed Loop*. Kontrol ini bekerja dengan cara memonitor respon struktur secara terus menerus dan informasi ini digunakan untuk mengoreksi gaya kontrol yang diberikan secara terus menerus.
- Kontrol *Open Loop* atau disebut juga kontrol umpan maju adalah bila gaya kontrol ditentukan hanya berdasar gaya luar yang diukur. Untuk struktur yang dibebani dengan eksitasi gempa dilakukan dengan mengukur percepatan gempa pada dasar struktur.
- Kontrol *Closed-Open Loop*. Kontrol semacam ini pada kasus dimana informasi respon struktur dan gaya luar digunakan bersama-sama untuk mendesain gaya kontrol.

Dalam aplikasinya untuk kontrol struktur, kontrol *open loop* dan *closed-open loop* tidak dapat digunakan, karena riwayat waktu percepatan gempa  $\ddot{x}_g$  harus diketahui sebelumnya, dan hal ini tidak mungkin dilakukan. Maka, sistem kontrol yang dapat diaplikasikan untuk kontrol struktur adalah kontrol *closed loop*.

Persamaan gerak sistem struktur n-DOF nonlinier yang dibebani gempa  $\ddot{x}_g(t)$  dan dikontrol dengan gaya  $U(t)$  adalah sebagai berikut:

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{X}}(t) + \mathbf{C}\dot{\mathbf{X}}(t) + \mathbf{K}\mathbf{X}(t) + \alpha(\mathbf{X}(t))^3 = -\mathbf{M} \cdot 1 \cdot \ddot{x}_g(t) + \mathbf{H}U(t) \quad (6)$$

Untuk kasus kontrol *closed loop*, maka gaya kontrol dapat dihitung menggunakan rumus:

$$U(t) = -\frac{1}{2}R^{-1}B^T\mathbf{P}(t)Z(t) = \mathbf{G}(t)Z(t) \quad (7)$$

dengan  $\mathbf{G}(t) = \mathbf{G} = -\frac{1}{2}R^{-1}B^T\mathbf{P}$

Matrik  $\mathbf{P}$  adalah matrik Riccati yang dihitung dari persamaan:

$$\mathbf{P}\mathbf{A} - \frac{1}{2}\mathbf{P}\mathbf{B}R^{-1}B^T\mathbf{P} + \mathbf{A}^T\mathbf{P} + 2\mathbf{Q} = 0 \quad (8)$$

dengan  $\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & I \\ -\mathbf{M}^{-1}\mathbf{K} & -\mathbf{M}^{-1}\mathbf{C} \end{bmatrix} \quad (9)$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} 0 \\ \mathbf{M}^{-1}\mathbf{H} \end{bmatrix} \quad (10)$$

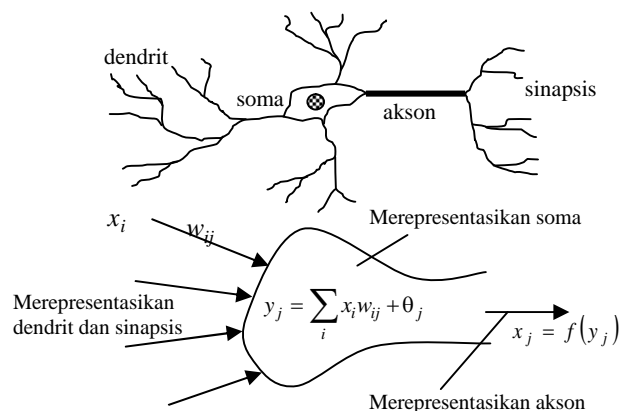
$$\mathbf{Z}(t) = \begin{bmatrix} \mathbf{X}(t) \\ \dot{\mathbf{X}}(t) \end{bmatrix} \quad (11)$$

Di dalam persamaan struktur yang terkena beban dinamik dan gaya kontrol, pemilihan elemen-

elemen matrik  $\mathbf{Q}$  dan  $\mathbf{R}$  menentukan pemberat relatif dari masing-masing *variable state* dan masing-masing input gaya kontrol dalam prosedur minimisasi. Pemilihan nilai  $\mathbf{Q}$  yang besar menunjukkan bahwa prioritas dari sistem kontrol adalah untuk mereduksi respon sebesar-besarnya, timbal baliknya adalah akan dihasilkan gaya kontrol yang besar. Jika nilai  $\mathbf{R}$  dipilih untuk memiliki nilai yang besar dibandingkan dengan  $\mathbf{Q}$ , berarti prioritas dari sistem kontrol adalah menghasilkan gaya kontrol yang besarnya tertentu (terbatas), untuk mereduksi respon secara optimal. Jadi pemilihan harga-harga relatif  $\mathbf{Q}$  dan  $\mathbf{R}$  berarti menentukan hubungan timbal balik (*trade off*) yang optimal antara tingkat reduksi respon dengan besar energi untuk gaya kontrol yang diperlukan.

## JARINGAN SARAF TIRUAN

Jaringan saraf tiruan (JST) merupakan suatu alat perhitungan, yang mengambil bentuk strukturnya seperti jaringan saraf pada makhluk hidup. Perkembangan JST dimotori oleh keinginan untuk mengerti cara kerja otak biologis makhluk hidup dan berusaha untuk menyerupai atau menyamai beberapa kelebihanannya.



Gambar 2. Model idealisasi neuron dari otak biologis

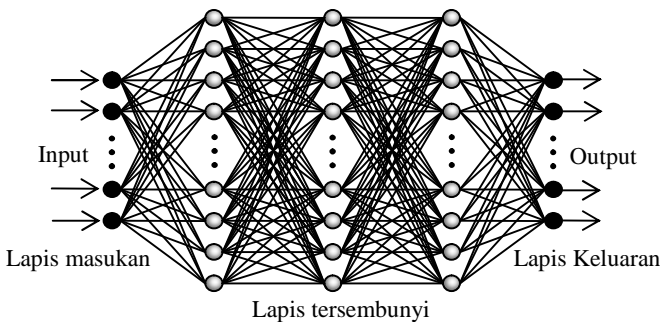
Dari Gambar 2 (Fausset, L.) di atas dapat disimpulkan hal-hal berikut ini:

1. Setiap neuron memiliki suatu aktivasi  $y_j$  yang merupakan jumlah input yang datang lewat koneksi dengan bobotnya.
2. Input suatu jalur tertentu adalah sinyal yang datang  $x_i$  dikalikan dengan bobot  $w_{ij}$  pada koneksinya.
3.  $w_{ij}$  merepresentasikan sinapsis dan mentransmisikan sinyal ke soma  $j$ .

4. Sinyal yang keluar dari neuron  $j$  dihitung sebagai  $x_j = f(y_j)$ , dimana  $f(y_j)$  adalah fungsi aktivasi  $y_j$  pada neuron tersebut.
5. Model neuron tersebut juga mempunyai bias  $\theta_j$ .

Suatu jaringan JST multi-lapis terdiri dari satu lapisan input, satu lapisan output, dan mungkin beberapa lapisan tersembunyi. Lapisan tersembunyi (*hidden layer*) ini memungkinkan JST untuk merepresentasikan dan menghitung gabungan yang kompleks antara pola input dan pola output.

Jaringan multi-lapis umpan maju secara tipikal diperlihatkan pada Gambar 3.



Gambar 3. Tipikal JST multi-lapis umpan maju

Prosedur dasar untuk latihan JST adalah sebagai berikut:

1. Mempropagasikan input hingga ke lapis output untuk mendapatkan nilai outputnya.
2. Membandingkan output aktual dengan nilai output yang diharapkan, dan menentukan kesalahannya.
3. Menentukan arah (+ atau -) untuk mengubah setiap bobot untuk mereduksi kesalahan.
4. Menentukan besarnya perubahan untuk setiap node.
5. Mengoreksi bobot.

### ALGORITMA GENETIKA UNTUK PERHITUNGAN GAYA KONTROL

Pada setiap step waktu, algoritma kontrol dijalankan untuk mencari gaya kontrol yang optimal menggunakan prosedur iterasi. Prosedur iterasi ini harus dilakukan untuk mencari gaya kontrol optimal dengan kendala:

$$|x_{cont}(t)| \leq |x_{uncont}(t)| \quad (12)$$

$$-u_{k,max} \leq u_{k,j} \leq u_{k,max} \quad (13)$$

Dimana  $x_{cont}(t)$  dan  $x_{uncont}(t)$  masing-masing adalah defleksi pada lantai paling atas untuk struktur yang terkontrol dan yang tidak terkontrol.

Jumlah prediksi dari neuroemulator beberapa step ke depan,  $p$ , juga sangat berpengaruh terhadap keakurasian gaya kontrol yang diperhitungkan. Apabila  $p$  terlalu kecil, maka algoritma kontrol tidak akan mampu untuk menghitung hasil yang akurat. Apabila  $p$  terlalu besar, maka jumlah neuron yang dibutuhkan pada neuroemulator akan sangat banyak, yang akan menyebabkan lamanya prosedur latihan neuroemulator tersebut. Prosedur trial and error dilakukan untuk menentukan besarnya  $p$  tersebut.

Tujuan dari algoritma kontrol, seperti yang sudah dijelaskan sebelumnya adalah untuk mencari besar gaya kontrol yang optimal pada setiap step waktu perhitungan untuk meminimalkan defleksi pada lantai yang paling atas, dengan Persamaan 12 sebagai persamaan kendala. Fungsi objektif yang harus diminimalkan tersebut dapat dituliskan sebagai:

$$f(u_k) = \bar{d}_{UC} - \bar{d}_C \quad (14)$$

Di mana

$$\bar{d}_{UC} = \frac{\sum_{i=0}^p |x_{i,uncont}(t)|}{p+1} \quad (15)$$

$$\bar{d}_C = \frac{\sum_{i=0}^p |x_{i,cont}(t)|}{p+1} \quad (16)$$

Dengan  $\bar{d}_{UC}$  dan  $\bar{d}_C$  masing-masing adalah rata-rata dari harga mutlak defleksi struktur pada lantai teratas beberapa step ke depan.

Persamaan kendala dibutuhkan agar algoritma genetika mencari solusi yang berada pada ruang solusi saja. Hal ini dimaksudkan agar jumlah iterasi yang dibutuhkan untuk mencapai titik solusi optimum dapat dicapai dengan cepat. Algoritma kontrol optimal dipakai untuk memperkirakan gaya kontrol yang dibutuhkan.

Seperti yang telah dibahas pada bagian sebelumnya, gaya kontrol yang dihitung menggunakan algoritma kontrol optimal tergantung pada bobot matrik Q dan R. Apabila bobot matrik Q dipilih jauh lebih besar daripada bobot matrik R, maka tujuan kontrol dipilih untuk mereduksi respon struktur sebanyak mungkin, yang akan menimbulkan gaya kontrol yang sangat besar. Begitu juga sebaliknya, apabila bobot matrik Q dipilih jauh lebih kecil daripada bobot matrik R, maka tujuan kontrol dipilih untuk menghemat gaya kontrol sebanyak

mungkin, yang menyebabkan respon struktur tidak berkurang secara signifikan. Hal ini dapat digunakan untuk memasukkan persamaan kendala pada algoritma genetika dengan tujuan agar iterasi untuk mencari gaya kontrol langsung berada pada daerah solusi. Hal ini dituliskan dengan rumus berikut: \

$$u_{k,j} \begin{cases} 0 \geq u_{k,j} \geq \max(u_{k,j,\max} - u_{k,\max}) & \text{Jika } -G(t)z(t) \leq 0 \\ \min(u_{k,\max}, u_{k,j,\max}) \geq u_{k,j} \geq 0 & \text{Jika } -G(t)z(t) > 0 \end{cases} \quad (17)$$

Dengan:  $u_{k,j,\max} = -G(t)z(t) \quad (18)$

Dimana matrik Q dan R diambil dengan bobot matrik Q jauh lebih besar daripada matrik R.

Algoritma genetika digunakan untuk menghasilkan solusi yang paling optimal dalam penghitungan gaya kontrol. Algoritma ini tidak memerlukan perhitungan matrik-matrik yang berukuran besar, seperti halnya pada algoritma kontrol optimal. Masalah optimasi dalam algoritma genetika sangat dipengaruhi oleh beberapa hal berikut ini:

Skema pengkodean menggunakan *floating point* digunakan dalam permasalahan gaya kontrol ini, karena tidak membutuhkan jumlah gen yang banyak, sehingga waktu penghitungan dapat lebih cepat. Skema pengkodean ini bernilai angka real yang berkisar antara batas bawah dan batas atas dari gaya kontrol seperti pada Persamaan 17. Populasi inisial dalam optimisasi gaya kontrol ini dipilih dengan nilai yang terdistribusi merata diantara batas atas dan batas bawah gaya kontrol. Hal ini dilakukan agar algoritma genetika dapat cepat konvergen.

Persamaan 14 adalah fungsi fitness yang hendak dimaksimumkan dengan menggunakan algoritma genetika. Fungsi fitness ini adalah fungsi yang dipengaruhi oleh rata-rata defleksi pada lantai paling atas struktur.

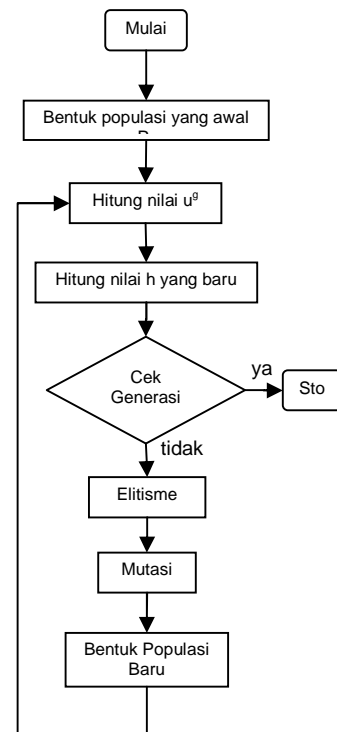
Nilai fitness yang sudah dihitung, harus dirangking sedemikian rupa, dan dirubah nilai-nilainya sesuai dengan rangking masing-masing individu. Hal ini harus dilakukan agar solusi tidak cepat konvergen pada titik optimum lokal.

Pemilihan kromosom yang akan di-copy-kan ke generasi yang baru, dilakukan secara proporsional sesuai dengan nilai fitnessnya. Suatu metode seleksi yang umum digunakan adalah *roulette-wheel* dimana masing-masing kromosom menempati potongan lingkaran pada roda *roulette* sesuai dengan nilai fitnessnya. Nilai fitness yang digunakan adalah fitness yang sudah dirangking secara linier, seperti yang dijelaskan sebelumnya. Individu-individu yang terpilih, lalu dimutasikan dengan harapan untuk

memperoleh individu yang bernilai fitness lebih tinggi. Fungsi mutasi yang digunakan dalam optimasi gaya kontrol ini adalah sebagai berikut:

$$\begin{aligned} u_{j,k'} &= u_{j,k} + (u_{j,k,\max} - u_{j,k}) \times h(g) & \text{jika } r_1 > 2/3 \\ u_{j,k'} &= u_{j,k} - (u_{j,k} - u_{j,k,\min}) \times h(g) & \text{jika } r_1 < 1/3 \\ & & \text{jika } 1/3 \leq r_1 \leq 2/3 \\ h(g) &= r_2 (1 - g/g_{\max})^b \end{aligned} \quad (19)$$

Dimana  $u_{j,k'}$  adalah nilai variabel pada kromosom yang sama pada generasi berikutnya,  $r_1$  dan  $r_2$  nilai yang dibangkitkan secara random pada interval 0 dan 1,  $g$  dan  $g_{\max}$  masing-masing adalah generasi aktual dan generasi maksimum yang telah ditentukan sebelumnya.



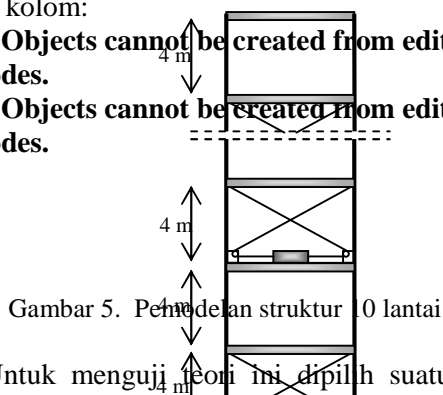
Gambar 4 Flowchart perhitungan gaya kontrol

## STUDI KASUS GEDUNG 10 LANTAI

Ukuran kolom:

**Error! Objects cannot be created from editing field codes.**

**Error! Objects cannot be created from editing field codes.**



Gambar 5. Penandaan struktur 10 lantai

Untuk menguji teori ini dipilih suatu model bangunan geser 10 lantai seperti yang terlihat pada Gambar 5. Struktur tersebut adalah struktur beton dan mempunyai massa yang sama untuk seluruh lantai.

**Error! Objects cannot be created from editing field codes.**

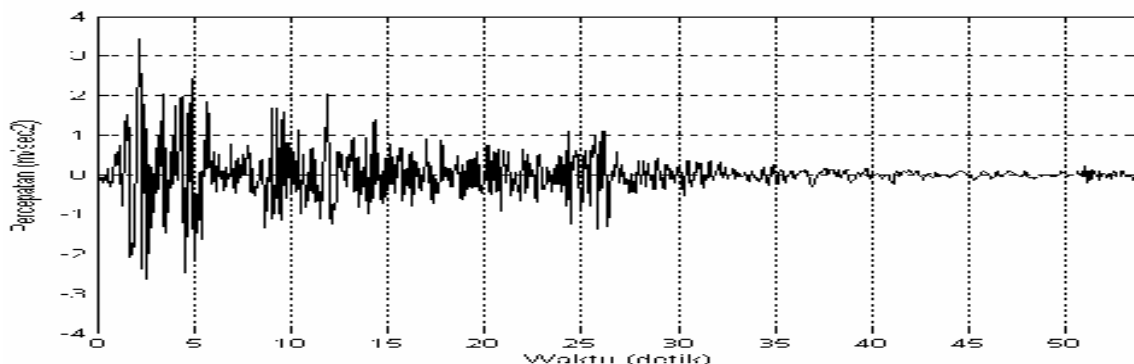
Non-linieritas terjadi pada lantai 1, 4, 8 dengan koefisien non-linier  $\alpha = -10^7 N/m^4$ .

Koefisien redaman  $a_0 = 0.189$  dan  $a_1 = 0.0122$ .

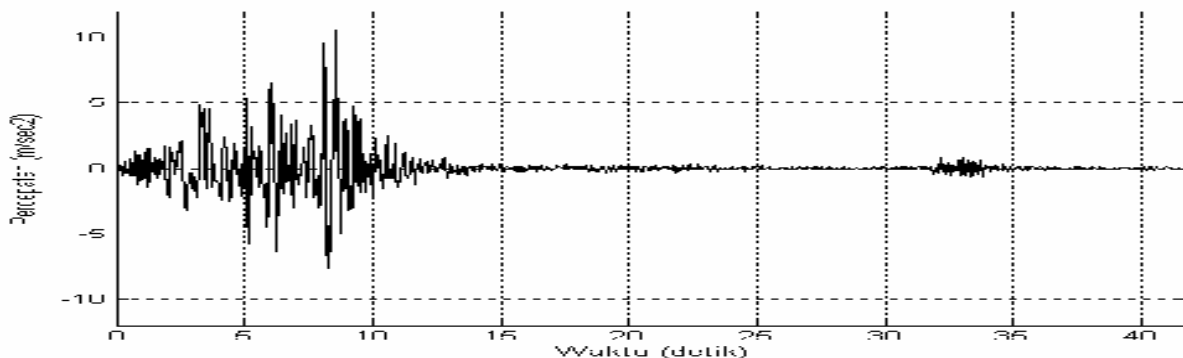
Frekuensi natural dan periode natural struktur, yaitu untuk mode 1 dan mode 2 adalah

$$\begin{cases} \omega_1 \\ \omega_2 \end{cases} = \begin{cases} 2.959 \\ 5.227 \end{cases} \text{ rad/sec} \quad \begin{cases} T_1 \\ T_2 \end{cases} = \begin{cases} 2.122 \\ 1.2014 \end{cases} \text{ detik}$$

Untuk perhitungan gaya kontrol ini, digunakan dua buah neuroemulator yang identik, untuk memprediksi rata-rata respon struktur yang terkontrol maupun yang tidak terkontrol. Neuroemulator ini terdiri dari 26 input neuron yaitu untuk data perpindahan struktur pada lantai teratas 3 riwayat waktu sebelumnya, data percepatan gempa 3 riwayat waktu sebelumnya, dan gaya kontrol saat ini dan 3 riwayat waktu sebelumnya untuk masing-masing aktuator. Yang membedakan antara neuroemulator untuk struktur terkontrol atau struktur yang tidak terkontrol adalah input gaya kontrol saat ini untuk masing-masing aktuator adalah 0 (nol) untuk struktur yang tidak terkontrol, sedangkan untuk struktur yang terkontrol, input inilah yang akan dioptimalkan dengan menggunakan algoritma genetika. Semua perhitungan dilakukan secara numerik dengan mengambil berbagai macam beban gempa sebagai gangguan luar pada struktur.



Gambar 6. Akselerogram El Centro



Gambar 7. Akselerogram Pacoima

Aktuator dipasang pada lantai 1, 3, 5, 7 dan 9 dengan kapasitasnya masing-masing adalah 6 kN, 25

kN, 65 kN, 125 kN, dan 200 kN. Respon perpindahan dan percepatan pada lantai teratas pada

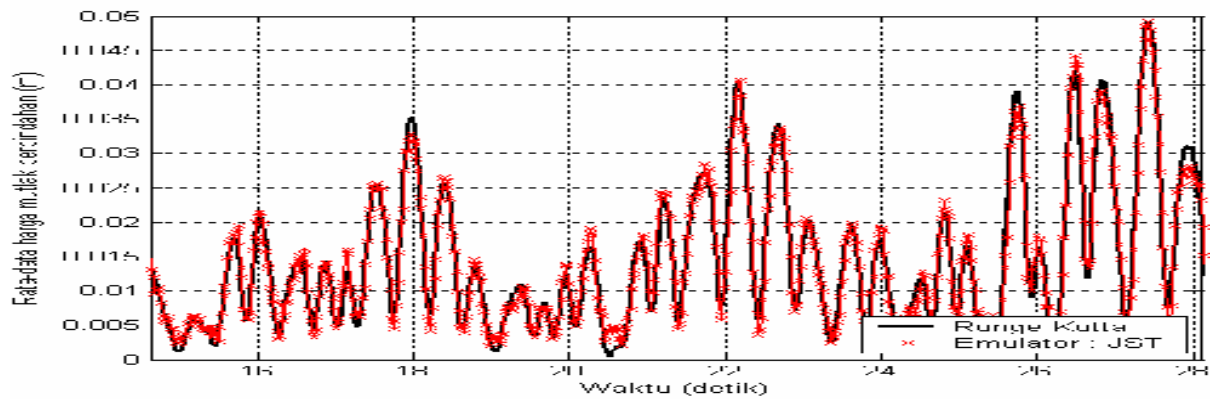
struktur yang terkontrol akan dibandingkan dengan respon yang sama pada struktur tidak terkontrol.

Besaran-besaran algoritma genetika yang digunakan antara lain adalah jumlah populasi 100 individu, generasi maksimum adalah 15 generasi. Jumlah prediksi step ke depan untuk neuroemulator adalah sebanyak 5 step.

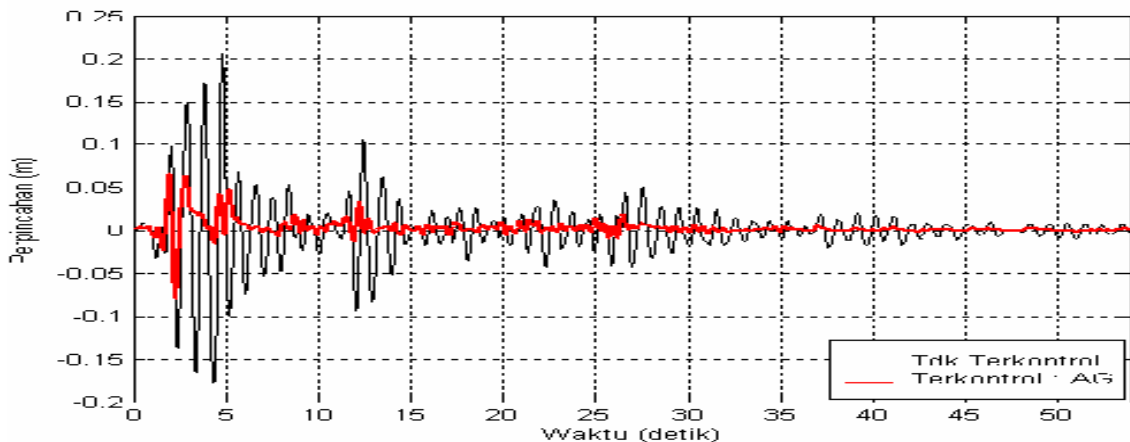
Pada Studi kasus ini dipilih data gempa El Centro dan Pacoima seperti terlihat pada Gambar 6

dan Gambar 7 untuk data latihan. El Centro dipakai untuk mewakili gempa-gempa yang bersifat broadband, sedangkan gempa Pacoima dipakai karena mempunyai percepatan maksimum yang besar.

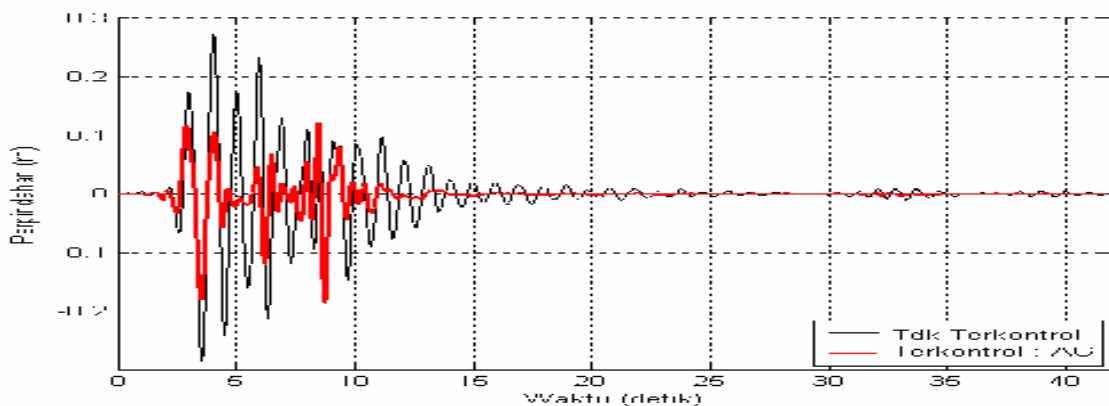
Hasil latihan emulator JST menggunakan data gempa El Centro dan Pacoima dapat dilihat pada Gambar 8 sampai Gambar 12.



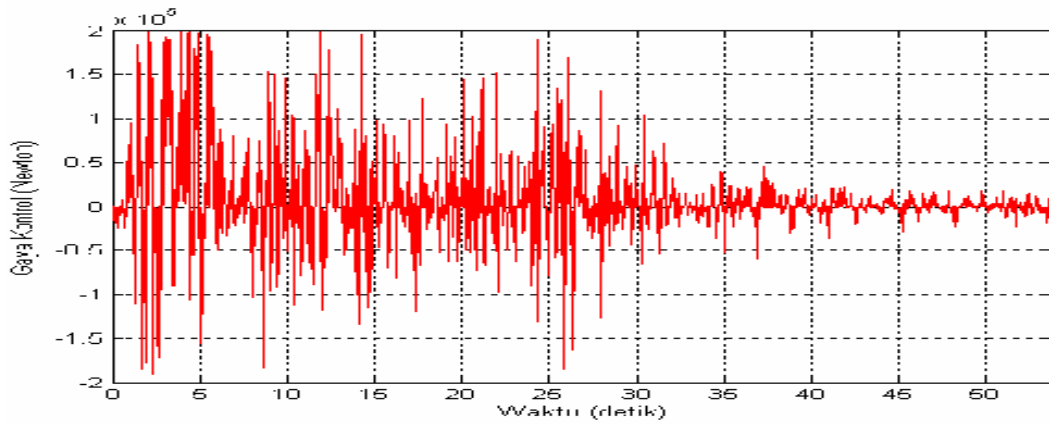
Gambar 8. Hasil latihan emulator dengan data gempa El Centro diamati pada selang waktu detik ke 15 - 28



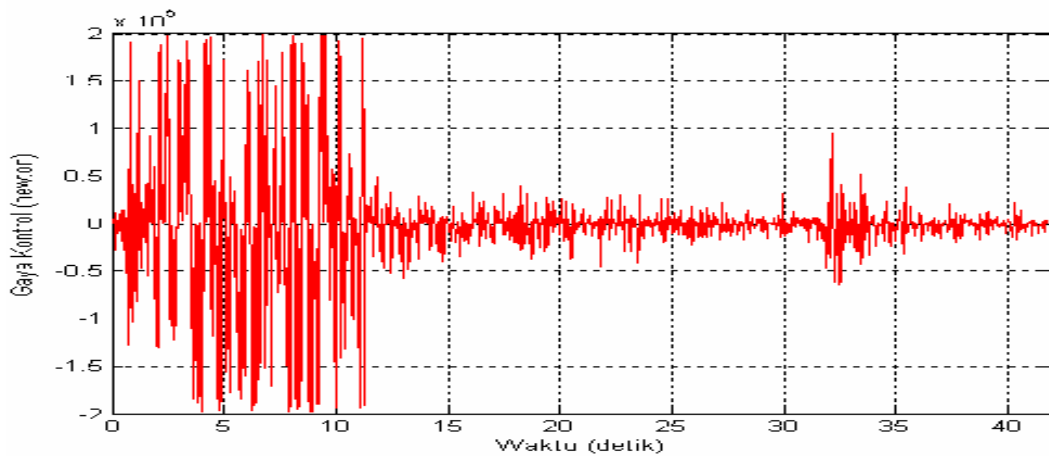
Gambar 9. Perpindahan lantai teratas pada akibat gempa El Centro



Gambar 10. Perpindahan lantai teratas pada akibat gempa Pacoima



Gambar 11. Gaya kontrol lantai 9 akibat gempa El-Centro



Gambar 12. Gaya kontrol lantai 9 akibat gempa Pacoima

Perhitungan gaya kontrol dilakukan dengan komputer AMD 1,8 GHz dengan menggunakan program MATLAB 6.5. Waktu perhitungan rata-rata yang diperlukan untuk mendapatkan gaya kontrol optimal pada setiap step waktu (0.02 detik) adalah sekitar 6.7 detik. Dengan waktu perhitungan yang relatif lama ini, maka metoda kontrol optimal hanya akan dipakai untuk mendapatkan data latihan pada pembentukan sistem Jaringan Syaraf Tiruan (JST)

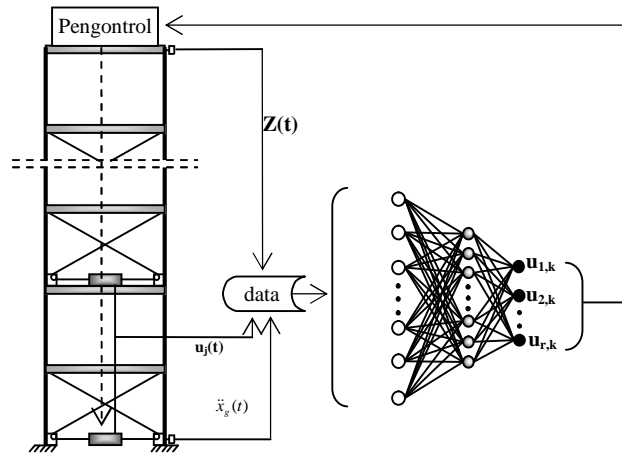
### JST SEBAGAI NEUROKONTROL

Neurokontrol yang sudah terlatih, akan digunakan untuk mengontrol struktur yang terkena eksitasi gempa yang berlainan dengan data gempa latihan. Data gempa yang digunakan adalah gempa Kern County, gempa Northridge, gempa Lomapieta, dan 300% gempa Meksiko. Neurokontrol akan

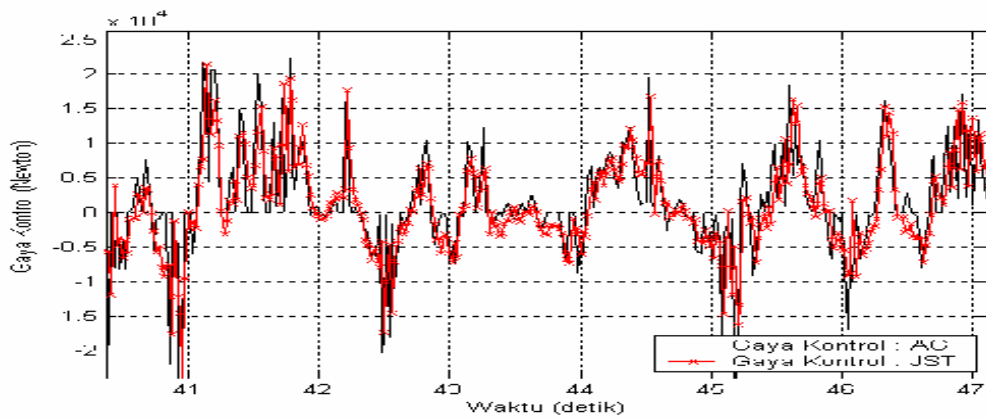
diaplikasikan untuk mengontrol struktur 10 (sepuluh) lantai yang identik dengan studi kasus pertama pada bab sebelumnya. Neurokontrol dilatih dengan menggunakan data-data struktur yang terkena gempa El Centro dan gempa Pacoima yang dihitung dengan menggunakan algoritma genetika.

Input neurokontrol adalah percepatan struktur di lantai teratas 3 (tiga) riwayat waktu sebelumnya, eksitasi gempa pada dasar bangunan 3 (tiga) riwayat waktu sebelumnya, dan gaya kontrol pada masing-masing aktuator 3 (tiga) riwayat waktu sebelumnya. Input neuron sebanyak 21 buah. Lapisan tersembunyi menggunakan 20 (dua puluh) neuron yang dibagi menjadi dua lapisan, dan satu lapisan output dengan 5 (lima) buah neuron yang merepresentasikan gaya kontrol pada masing-masing aktuator. Skema neurokontrol untuk struktur 10 lantai tersebut digambarkan pada Gambar 13.

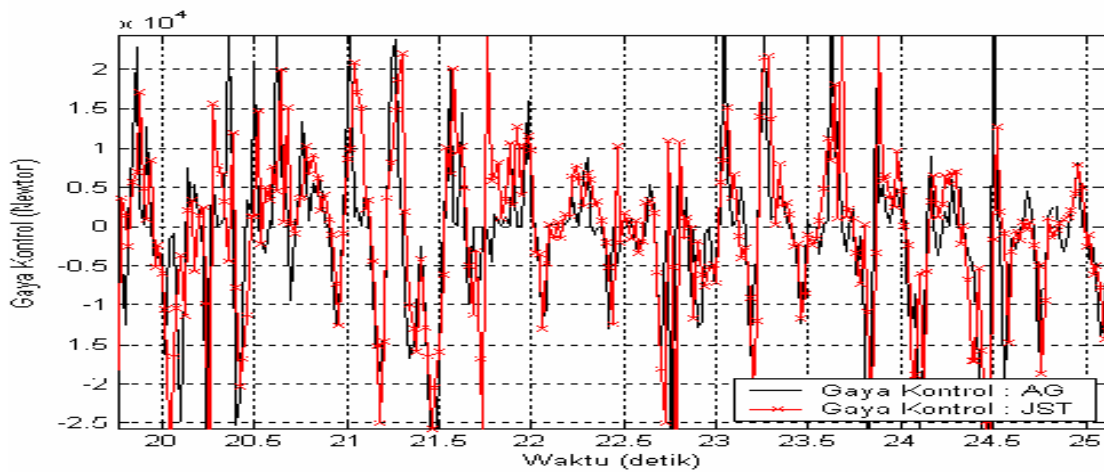




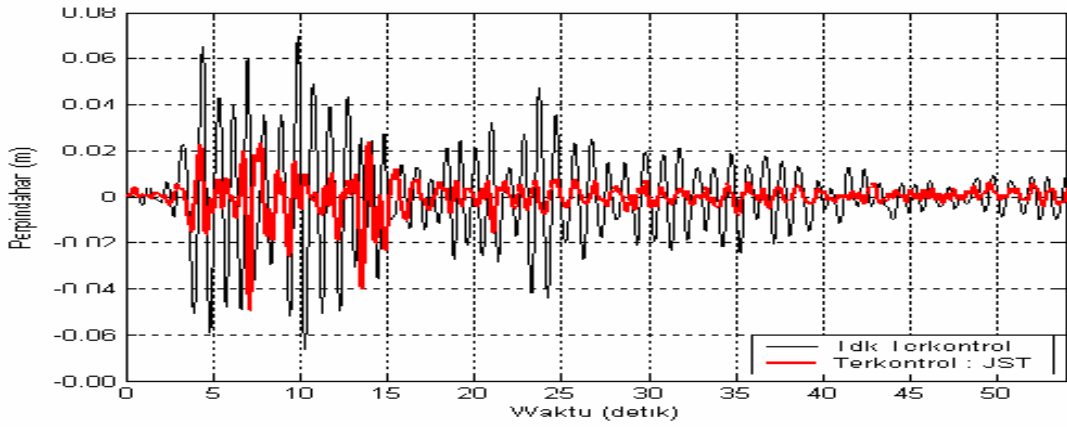
Gambar 13 Skema neurokontrol untuk struktur



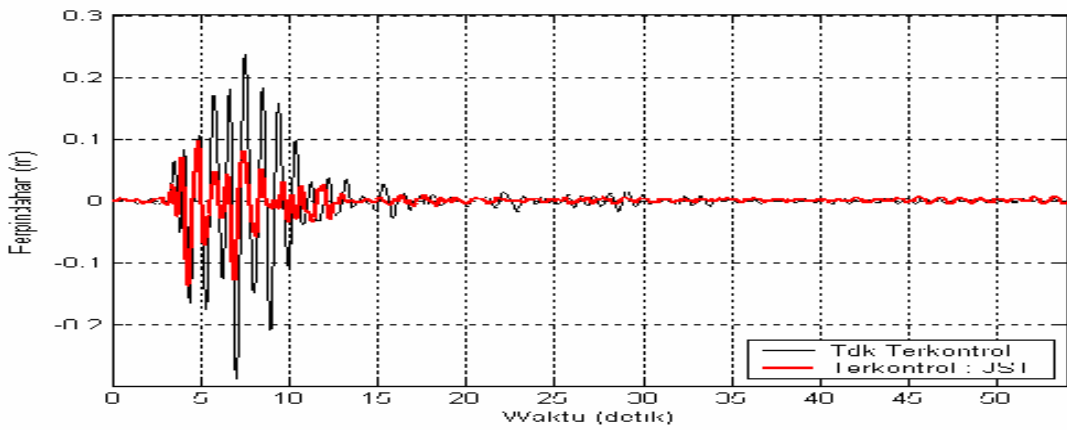
Gambar 14. Hasil latihan neurokontrol menggunakan gempa El Centro Centro diamati pada selang waktu detik ke 41 – 47



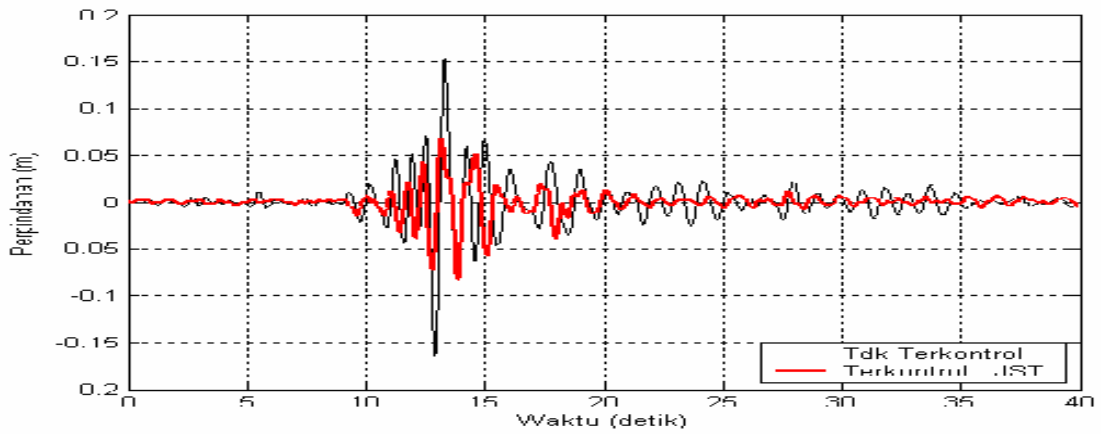
Gambar 15. Hasil latihan neurokontrol menggunakan gempa Pacoima Centro diamati pada selang waktu detik ke 20 - 25



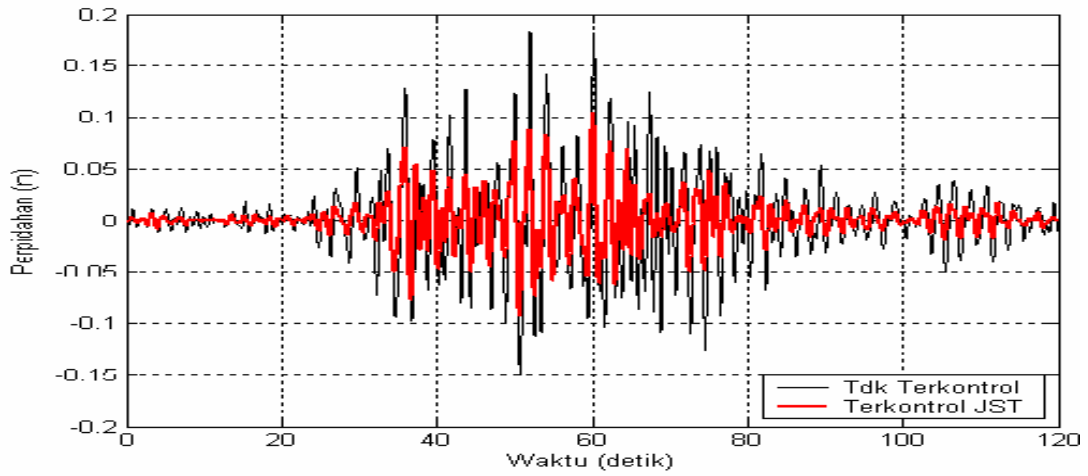
Gambar 16. Riwayat waktu perpindahan lantai teratas akibat gempa Kern County



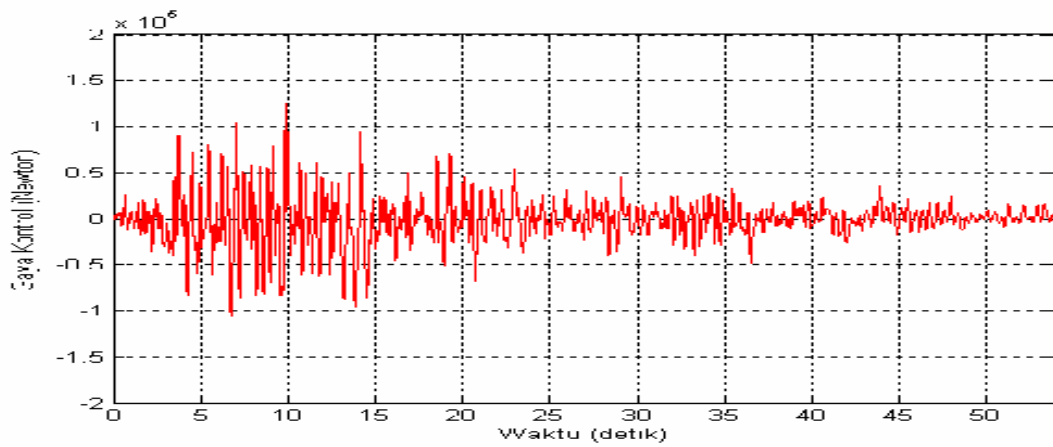
Gambar 17 Riwayat waktu perpindahan lantai teratas akibat gempa Northridge



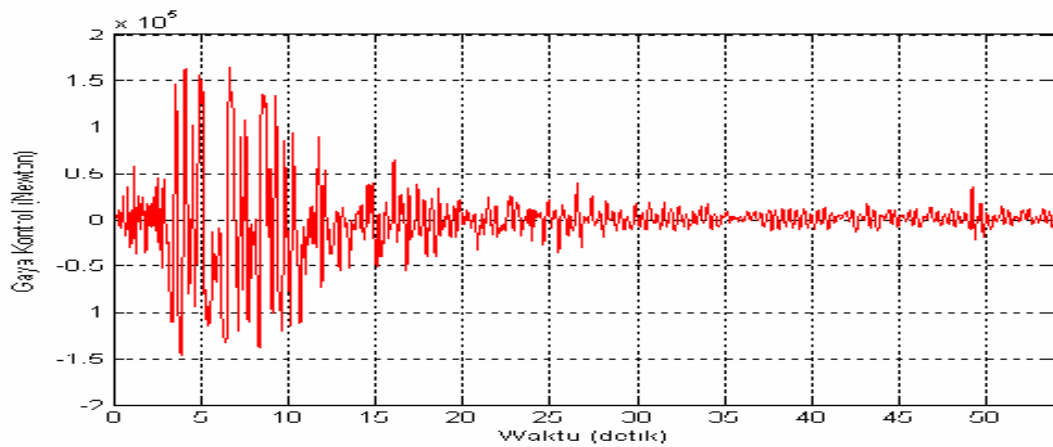
Gambar 18. Riwayat waktu perpindahan lantai teratas akibat gempa Lomapietra



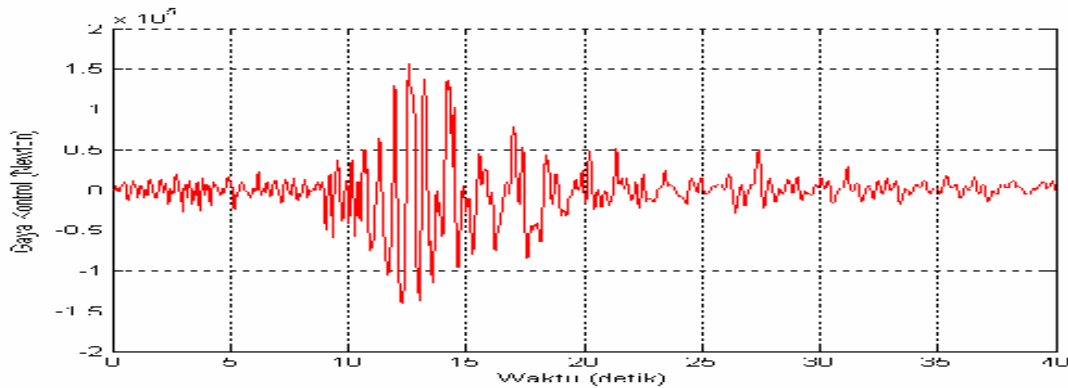
Gambar 19. Riwayat waktu perpindahan lantai teratas akibat gempa 300% Meksiko



Gambar 20. Riwayat waktu gaya kontrol lantai 9 akibat gempa Kern County



Gambar 21. Riwayat waktu gaya kontrol lantai 9 akibat gempa Northridge



Gambar 22. Riwayat waktu gaya kontrol lantai 9 akibat gempa Lomaprieta

Dari Gambar 14 – Gambar 22, dapat dilihat bahwa dengan menggunakan neurokontrol, struktur bangunan 10 lantai yang terkena gempa dapat tereduksi responnya secara signifikan. Dari hasil latihan menggunakan data gempa El Centro dan Pacoima, terlihat bahwa neurokontrol belum dapat memprediksi gaya kontrol dengan cukup akurat, hal ini dikarenakan jumlah neuron yang digunakan pada lapisan tersembunyi masih terlalu sedikit. Meskipun begitu, neurokontrol ini sudah mempunyai kemampuan memetakan input dan output yang cukup baik, hal ini ditunjukkan dengan kemampuannya mereduksi respon struktur yang terkena gempa-gempa yang bukan data gempa latihan. Reduksi perpindahan struktur di lantai yang teratas berkisar antara 28 – 62%.

## KESIMPULAN

Dari pembahasan pada bab-bab sebelumnya, dapat disimpulkan hal-hal sebagai berikut:

1. Respon dinamik struktur dapat direduksi secara signifikan dengan menggunakan kontrol aktif yang dihitung memakai metoda algoritma genetika dan jaringan saraf tiruan.
2. Proses perhitungan gaya kontrol yang memerlukan waktu lama dengan menggunakan algoritma genetika dapat dipersingkat dengan penerapan JST sebagai neurokontrol.
3. Faktor penting dari keberhasilan aplikasi algoritma genetika adalah dalam pencarian operator-operator dan juga besaran-besaran yang harus sesuai. Metoda algoritma genetika sangat bagus dalam permasalahan optimisasi, namun dalam aplikasinya dibutuhkan waktu yang sangat panjang, baik untuk waktu perhitungannya, pencarian operator genetika yang sesuai, maupun untuk pencarian besaran-besaran yang sesuai. Hal ini dikarenakan adanya bermacam-macam tipe operator dimana masing-masing operator

biasanya hanya bagus untuk masalah-masalah tertentu saja.

4. Sistem jaringan saraf tiruan dapat memahami karakteristik struktur baik yang linier maupun nonlinier dengan cukup baik JST yang didesain dengan tepat akan mempunyai kemampuan yang baik dalam memetakan input-output suatu sistem.

## DAFTAR PUSTAKA

- Chang, C.C., Yang, H.T.W., (1995), Control of Building Using Active Tuned Mass Dampers, *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE, 121(3), pp. 355-366.
- Fausett, L. (1994), *Fundamentals of Neural Network: Architectures, Algorithms, and Application*, Prentice Hall, New Jersey.
- Jiang, Xiaomo (2005), *Dynamic Fuzzy Wavelet Neural Network for System Identification, Damage Detection and Active Control of Highrise Buildings*, The Ohio State University.
- Setio, H.D., Halim, Budi, S., Gunawan, Tommy, Setio, S. (1999), Studi Eksperimental Kontrol Aktif Struktur dengan Menggunakan Jaringan Saraf Tiruan, *Prosiding Konferensi Nasional Rekayasa Kegempaan*, ITB, hal. VII-1. 4-5 November.
- Setio, H.D., Setio, S. (2003), Experimental Simulation of Active Mass Damper of Two Storey Building Structure Using Artificial Neural Network, *Pan-Pacific Symposium for Earthquake Engineering*, NIED, Japan.
- Soong T.T. (1989), *Active Structural Control: Theory and Practice*, Longman Scientific & Technical, New York.
- Yang, J.N., long, F.X., Wong, D. (1999), Optimal Control of Nonlinear Structures, *Journal of Applied Mechanics*, 55(4), pp. 931-938.