

KONTROL AKTIF KEKAKUAN DAN MASSA STRUKTUR DENGAN MENGGUNAKAN JARINGAN SARAF TIRUAN

Sangriyadi Setio⁽¹⁾, Herlien D. Setio⁽²⁾, dan Wiranto Arismunandar⁽¹⁾

⁽¹⁾ Departemen Teknik Mesin, Institut Teknologi Bandung

⁽²⁾ Departemen Teknik Sipil, Institut Teknologi Bandung

Ringkasan

Tulisan ini membahas studi teori dan eksperimental kontrol aktif pada struktur yang mengalami eksitasi beban gempa dengan menggunakan jaringan saraf tiruan. Konsep jaringan saraf tiruan digunakan untuk menghitung besar gaya kontrol yang diperlukan struktur berdasarkan input respon percepatan yang diukur dengan menggunakan akselerometer. Mekanisme kontrol diimplementasikan dengan menggunakan kekakuan dan massa yang secara aktif memberikan gaya kontrol pada struktur berdasarkan respon struktur yang diukur secara kontinyu. Keandalan sistem kontrol aktif jaringan saraf tiruan diuji secara eksperimental dengan menggunakan model reduksi portal baja dua tingkat yang diberi eksitasi percepatan dasar dengan menggunakan meja getar. Hasil pengujian teori dan eksperimental untuk berbagai beban percepatan dasar, seperti percepatan acak dan simulasi percepatan gempa El Centro N-S menunjukkan metode kontrol jaringan saraf tiruan memberikan hasil yang memuaskan. Kontrol jaringan saraf mempunyai formulasi perhitungan yang sederhana sehingga dapat menghemat waktu perhitungan.

Abstract

This paper presents a theoretical and experimental study on active control structure excited by seismic loads using artificial neural network. Artificial neural network is used to calculate the control force based on acceleration of the structure which is obtained by accelerometer measurement. The control mechanism is implemented on the structure using active stiffness and mass based on continuous vibration measurement. The reability of the active control system with artificial neural network has been tested experimentally using a reduced model of two-storey steel frame excited by base acceleration through a small shaking table. The experimental study shows that the artificial neural network control method gives satisfactory results for many types of base excitation such as random and El-Centro N-S earthquake accelerations. The neuro control algorithm is simple and reduces considerably computational time.

Keywords: *Structural Control, Active Control, Active Stiffness Control, Active Mass Control, Artificial Neural Network, Experimental Simulation*

1 PENDAHULUAN

Struktur bangunan harus dirancang tahan terhadap perubahan beban-beban dinamik terutama yang diakibatkan oleh perubahan alam seperti angin, gelombang laut atau gempa sepanjang umur pelayanan yang direncanakan. Indonesia merupakan daerah rawan gempa yang dilalui oleh tiga jalur gempa dunia, dimana setiap tahunnya rata-rata terjadi empat ratus gempa dengan nilai *magnitude* lebih besar dari lima skala Richter. Dengan demikian, setiap bangunan di Indonesia harus direncanakan sedemikian rupa, sehingga tahan

terhadap beban gempa dan beban-beban luar dinamik lainnya.

Selama ini bangunan sipil, jembatan, dan bangunan infrastruktur lainnya dibangun dan dirancang sebagai struktur pasif yang hanya mengandalkan massa dan kekakuannya untuk menahan beban luar dinamik dan beban statik yang diakibatkan oleh keandalan struktur dihubungkan langsung dengan kekakuan dan kemasifan struktur bangunan tersebut. Rancangan konvensional yang konservatif akan menghasilkan struktur yang kaku, yang mengakibatkan harga struktur bangunan menjadi mahal.

Dengan perkembangan teknologi, penemuan-penemuan material baru yang semakin lama semakin ringan dan kebutuhan manusia dewasa ini, terhadap bangunan yang makin lama makin tinggi dan makin panjang, mengakibatkan struktur bangunan semakin lama semakin tidak kaku lagi, sehingga metode konvensional semakin sukar untuk dipertahankan lagi, baik dari segi teknologi maupun ekonomi.

Ketidakkakuan struktur telah menimbulkan banyak masalah vibrasi pada struktur yang sebelumnya tidak terlalu menjadi perhatian. Sedangkan peraturan dan standar-standar bangunan menuntut persyaratan keamanan dan kenyamanan yang semakin lama semakin tinggi, sehingga perlu dikembangkan suatu konsep perancangan konstruksi bangunan yang mampu beradaptasi secara aktif terhadap beban-beban dinamik. Dalam hal ini, respon struktur yang berupa perpindahan, kecepatan, dan percepatan yang terjadi akibat beban luar dinamik dapat dikendalikan dengan menggunakan suatu sistem kontrol yang bekerja secara aktif dan mampu beradaptasi terhadap gangguan luar yang bekerja pada struktur tersebut, sehingga karakteristik dan perilaku dinamik dari konstruksi bangunan dapat diperbaiki dan ditingkatkan.

Sistem kontrol aktif mampu mengurangi respon struktur yang berlebihan yang diakibatkan oleh beban-beban luar dinamik seperti angin, gelombang laut atau gempa dan struktur selalu berusaha berada pada keadaan seimbang sehingga dapat mencapai tingkat keamanan, kenyamanan, dan keandalan dari struktur sesuai dengan yang disyaratkan oleh peraturan-peraturan yang berlaku.

2 KONTROL AKTIF DAN STRATEGI KONTROL

Secara umum, mekanisme kontrol pada struktur dapat digolongkan menjadi kontrol dengan sistem putaran tertutup dan kontrol putaran terbuka. Dalam kontrol putaran-terbuka, gaya kontrol ditentukan oleh kondisi awal sistem yang telah diketahui sebelumnya seperti karakteristik sistem, kondisi awal, dan jenis gangguan yang bekerja pada struktur. Keluaran tidak diukur atau dibandingkan dengan masukan, sehingga keluaran tidak mempengaruhi besar gaya kontrol. Kontrol putaran tertutup mengumpanbalikkan keluaran yang terjadi untuk mereduksi kesalahan, sehingga menghasilkan besaran keluaran yang sesuai dengan yang diinginkan. Diagram skema sistem kontrol aktif struktur dengan putaran tertutup dapat dilihat pada Gambar (1).



Gambar 1 Diagram skema kontrol aktif struktur

Struktur mengalami gangguan beban luar dinamik. Respon struktur diukur dengan menggunakan sensor akselerometer pada beberapa titik yang diinginkan kemudian sinyal respon dikirim ke komputer untuk menghitung besarnya gaya kontrol yang diperlukan berdasarkan algoritma kontrol yang telah ditentukan. Sinyal gaya kontrol kemudian dikirim ke aktuator untuk menghasilkan gaya kontrol yang diperlukan oleh struktur sehingga menghasilkan respon struktur yang sesuai dengan yang diinginkan.

Kualitas dari sistem kontrol sangat ditentukan oleh jenis aktuator yang digunakan dan waktu yang dibutuhkan dari mulai pengukuran respon sampai bekerjanya gaya kontrol pada struktur. Diperlukan strategi kontrol dalam menentukan aktuator dan algoritma perhitungan gaya kontrol yang akan digunakan agar sistem mampu memberikan kualitas kontrol yang baik.

2.1 Persamaan Keadaan

Persamaan gerak suatu sistem dinamik n derajat kebebasan dengan m gaya kontrol adalah:

$$M\ddot{X}(t) + C\dot{X}(t) + KX(t) = HU(t) + EF(t) \quad (1)$$

Matrik $n \times n$ M , C , dan K berturut-turut adalah matrik massa, redaman, dan kekakuan struktur. $X(t)$, $\dot{X}(t)$, $\ddot{X}(t)$ adalah vektor n perpindahan, kecepatan dan percepatan struktur. H adalah matrik $n \times m$ lokasi gaya kontrol, E adalah matrik $n \times r$ lokasi gaya eksitasi luar. $U(t)$ adalah vektor m gaya kontrol dan $F(t)$ adalah vektor r gaya eksitasi luar.

Bentuk ruang keadaan untuk persamaan (1) adalah:

$$\dot{Z}(t) = AZ(t) + BU(t) + WF(t), \quad Z(t_0) = Z_0 \quad (2)$$

dengan:

$$Z(t) = \begin{bmatrix} X(t) \\ \dot{X}(t) \end{bmatrix}, \quad A = \begin{bmatrix} O & I \\ -M^{-1}K & -M^{-1}C \end{bmatrix},$$

$$B = \begin{bmatrix} O \\ M^{-1}H \end{bmatrix}, \quad W = \begin{bmatrix} O \\ -M^{-1}E \end{bmatrix}$$

$Z(t)$ adalah vektor keadaan $2n$ dari vektor perpindahan dan vektor kecepatan, A adalah matrik parameter struktur $2n \times 2n$, B adalah matrik lokasi gaya kontrol $2n \times m$, W adalah matrik lokasi gaya eksitasi luar $2n \times r$.

2.2 Kontrol Optimal

Algoritma kontrol yang akan dibahas di sini adalah algoritma metode kontrol optimal. Vektor gaya kontrol $U(t)$ dipilih sedemikian sehingga indeks prestasi memenuhi persamaan:

$$J = J_1[Z(t_0), Z(t_f), t_0, t_f] + \int_{t_0}^{t_f} J_2(Z, \dot{Z}, U, \dot{U}, t) dt \quad (3)$$

Indeks prestasi J diminimumkan terhadap parameter keadaan dari persamaan (2). Indeks prestasi J mempunyai

dua suku. Suku pertama, J_1 , adalah fungsi penalti tahap awal-akhir, yang hanya bergantung kepada waktu awal dan akhir dari interval kontrol $[t_0, t_f]$ dan pada keadaan yang dievaluasi pada dua waktu tersebut. Suku kedua dari J adalah integral yang dievaluasi dalam interval kontrol $[t_0, t_f]$. J adalah fungsi skalar yang diminimumkan terhadap $U(t)$ dan memenuhi kendala yang dinyatakan oleh persamaan (2). Kendala lainnya dapat ditambahkan, misalnya batas-batas posisi dan kecepatan struktur. Kendala tersebut dapat dinyatakan sebagai kendala tambahan:

$$|Z| \leq b \quad (4)$$

Bentuk indek prestasi untuk kontrol struktur, biasanya dipilih sebagai bentuk kuadratik dalam $Z(t)$ dan $U(t)$. Dengan menetapkan $t_0=0$, indek prestasi ditulis sebagai:

$$J = \int_0^{t_f} [Z^T(t) Q Z(t) + U^T(t) R U(t)] dt \quad (5)$$

Pada persamaan (5), interval waktu $[0, t_f]$ dibuat lebih lama daripada interval waktu gaya luar, Q adalah matrik definit positif atau dapat berupa matrik semi-definit positif berdimensi $2n \times 2n$, dan R adalah matrik definit positif berdimensi $m \times m$. Matrik Q dan R disebut sebagai matrik bobot. Harga Q dan R , diatur sedemikian rupa sehingga dicapai timbal-balik yang baik antara efektifitas reduksi respon dan konsumsi energi kontrol.

Nilai Q yang besar menunjukkan bahwa reduksi respon diberikan prioritas di atas gaya kontrol yang dibutuhkan. Sebaliknya bila R relatif besar bila dibandingkan dengan Q , berarti gaya kontrol lebih mendapat prioritas daripada reduksi respon. Solusi masalah kontrol optimal dengan metode faktor pengali Lagrange menghasilkan besar gaya kontrol $U(t)$ sebagai berikut:

$$U(t) = G Z(t) = -\frac{1}{2} R^{-1} B^T P(t) Z(t) \quad (6)$$

dengan $G(t) = -\frac{1}{2} R^{-1} B^T P(t)$ adalah faktor pengali kontrol dan $Z(t)$ diperoleh dari hasil pengukuran.

Dalam aplikasi struktur, matrik Riccati $P(t)$ menunjukkan nilai yang konstan selama interval kontrol, mendekati nol dengan cepat begitu mendekati t_f . Dengan demikian $P(t)$ dalam banyak kasus dapat didekati dengan suatu matrik konstan P yang didapat dari Persamaan Riccati berikut:

$$PA - \frac{1}{2} PBR^{-1}B^TP + A^TP + 2Q = 0 \quad (7)$$

Sehingga faktor pengali kontrol $G(t)$ menjadi konstan:

$$G = -\frac{1}{2} R^{-1} B^T P \quad (8)$$

dan dapat dihitung setelah karakteristik struktur, matrik Q dan R ditentukan.

Dengan mensubstitusi persamaan (6) ke dalam persamaan (2), perilaku sistem dengan gaya kontrol menjadi:

$$\dot{Z}(t) = (A + BG)Z(t) + WF(t), \quad Z(t_0) = Z_0 \quad (9)$$

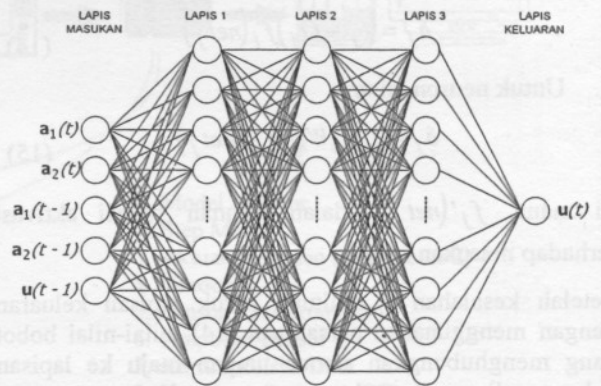
Persamaan (9) menunjukkan perubahan parameter struktur dari sistem putaran-terbuka A pada persamaan (2) menjadi sistem putaran tertutup $A+BG$.

2.3 Jaringan Saraf Tiruan

Metode kontrol optimal membutuhkan perhitungan yang rumit sehingga unit pengolah data (PC) memerlukan waktu yang relatif lama untuk menghitung gaya kontrol. Untuk mengatasi hal ini akan digunakan metode kontrol jaringan saraf tiruan.

2.3.1 Arsitektur Jaringan Saraf Tiruan

Algoritma jaringan saraf yang digunakan adalah jaringan umpan maju. Satu set masukan $a(t)$ dihubungkan dengan masukan lapisan neuron i dan keluaran $u(t)$ diterima pada lapisan keluaran neuron k . Beberapa lapisan tersembunyi j dipasang antara lapisan masukan dan keluaran untuk memperbesar kemampuan belajar jaringan saraf tentang sistem dinamik yang dilatih. Masing-masing neuron mengirimkan keluarannya ke lapisan di atasnya dan menerima masukan dari lapisan di bawahnya. Oleh karena itu, keluaran ditentukan dengan umpan maju, dengan keluaran neuron pada masing-masing lapisan berasal dari keluaran neuron pada lapisan sebelumnya yang berfungsi sebagai masukan. Arsitektur jaringan saraf tiruan dapat dilihat pada Gambar (2).



Gambar 2 Skema Jaringan Saraf Tiruan

Dalam jaringan saraf, semua keluaran O_i dari neuron pada setiap lapisan dikalikan dengan bobot W_{ji} dan hasilnya dijumlahkan untuk mendapatkan masukan net_j , di mana:

$$net_j = \sum_i O_i W_{ji} \quad (10)$$

Keluaran dari masing-masing neuron diberikan oleh fungsi aktivasi yang bersifat terdiferensialkan dan monoton naik, sedemikian hingga:

$$O_j = f_j(net_j) \quad (11)$$

Nilai bobot W_{ji} ditentukan selama proses latihan dengan meminimumkan jumlah kuadrat kesalahan err antara target keluaran yang diinginkan t_j pada neuron keluaran j dan keluaran yang dihasilkan O_j .

Didefinisikan jumlah kuadrat kesalahan *err* adalah:

$$err = 0,5 \sum_j (t_j - O_j)^2 \quad (12)$$

Untuk mendapatkan nilai optimal bobot W_{ji} digunakan metode rambat mundur yang merupakan metode optimasi berdasarkan momentum dan gradien.

2.3.2 Latihan jaringan saraf tiruan

Masukan jaringan saraf berupa data latihan a_j yang diumpan-majukan untuk menghasilkan keluaran O_j . Keluaran ini kemudian dibandingkan dengan target U_j yang diinginkan. Jumlah kuadrat kesalahan *err* yang terjadi diminimumkan dengan mengubah bobot W_{ji} sedemikian rupa sehingga:

$$\Delta W_{ji} = \alpha \delta_j O_j \quad (13)$$

di mana α adalah konstanta belajar ($0 < \alpha < 1$), δ_j adalah kesalahan pada neuron j dan O_j adalah keluaran pada neuron j

Kesalahan δ_j didefinisikan sebagai:

1. Untuk neuron keluaran

$$\delta_j = (t_j - O_j) f_j'(net_j) \quad (14)$$

2. Untuk neuron lainnya

$$\delta_j = \sum_k (\delta_k W_{kj}) f_j'(net_j) \quad (15)$$

di mana $f_j'(net_j)$ adalah turunan fungsi aktivasi terhadap masukan net_j .

Setelah kesalahan δ_j dihitung untuk lapisan keluaran dengan menggunakan persamaan (14), nilai-nilai bobot yang menghubungkan semua umpan maju ke lapisan keluaran disesuaikan dengan menggunakan persamaan (14). persamaan (15) digunakan untuk menghitung δ_j pada lapisan sebelum lapisan keluaran. Proses rambat mundur diteruskan dengan prosedur yang sama hingga mencapai lapisan masukan. Perhitungan diumpanmajukan kembali untuk menentukan kesalahan yang baru pada lapisan keluaran. Proses latihan dilakukan secara iteratif sampai kesalahan yang dihasilkan berada di bawah batas kesalahan yang ditentukan.

Setelah tahap latihan selesai, jaringan saraf dapat memodelkan sistem dinamik yang sebenarnya. Jaringan saraf mempunyai kemampuan yang besar dalam menyelesaikan masalah sistem dinamik yang rumit maupun non-linier.

2.4 Kontrol Jaringan Saraf Tiruan

Algoritma jaringan saraf telah banyak digunakan dalam bidang kontrol untuk menggantikan bagian perhitungan gaya kontrol yang rumit [1-3]. Dalam studi ini, jaringan saraf digunakan untuk menggantikan algoritma kontrol

klasik dengan suatu model ekivalen yang mempunyai fungsi transfer yang sama. Bagian ekivalen ini hanya memerlukan data respon percepatan struktur $\ddot{X}$ sebagai masukan dan gaya kontrol U sebagai keluaran.

Data masukan dan keluaran yang digunakan selama proses latihan diperoleh dari hasil simulasi numerik dengan menggunakan parameter struktur hasil identifikasi berdasarkan data hasil pengujian vibrasi.

3 PENGUJIAN

Model struktur yang digunakan untuk pengujian adalah portal baja dua tingkat yang merupakan model struktur bangunan dan diidealisasikan sebagai bangunan geser dua dimensi dengan dua derajat kebebasan. Portal baja dibuat dari pelat dengan ukuran $35,6 \times 2,2 \text{ mm}^2$, momen inersia $I = 0,1554 \times 10^{11} \text{ m}^4$, kerapatan massa $\gamma = 78,50 \times 10^3 \text{ N/m}^3$ dan modulus young $E = 2,1 \times 10^{11} \text{ N/m}^2$. Dengan perletakan jepit diatas meja getar.

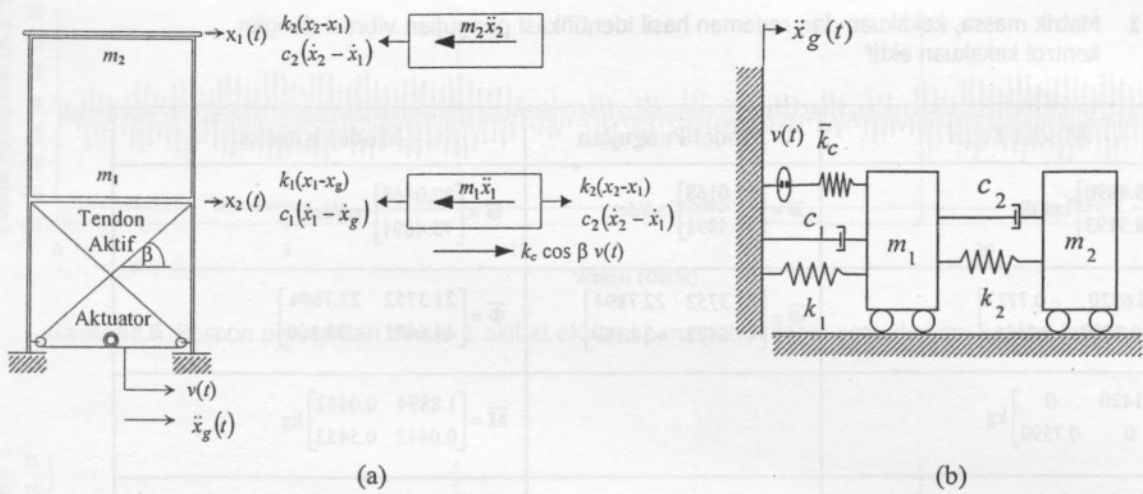
Pengujian dilakukan dengan menggunakan meja getar ukuran $70 \times 90 \text{ cm}^2$. Peralatan dan skema pengujian dapat dilihat pada Gambar (4) dan (14).

Model struktur mendapat eksitasi gaya luar berupa percepatan dasar $\ddot{x}_g(t)$ yang dibangkitkan oleh motor step yang menggerakkan landasan meja getar. Motor step bekerja berdasarkan satu sinyal analog yang dibangkitkan oleh pembangkit sinyal yang telah dikonversi sebelumnya oleh perangkat akuisisi data menjadi dua sinyal digital dan satu sinyal pulsa. Akibat dari percepatan dasar ini, struktur melakukan suatu gerakan dinamik. Gerakan struktur diukur dengan menggunakan akselerometer Bruel & Kjaer 4395. Kemudian sinyal respon percepatan yang telah diperkuat oleh perangkat penguat sinyal amplifier Bruel & Kjaer 2525, dikirim ke unit pengolahan data (PC) dengan menggunakan perangkat akuisisi data National Instrument dengan menggunakan program LabView. Kontrol Jaringan Saraf Tiruan menghitung besarnya sinyal yang harus diberikan kepada aktuator yang berfungsi sebagai pembangkit gaya kontrol pada struktur.

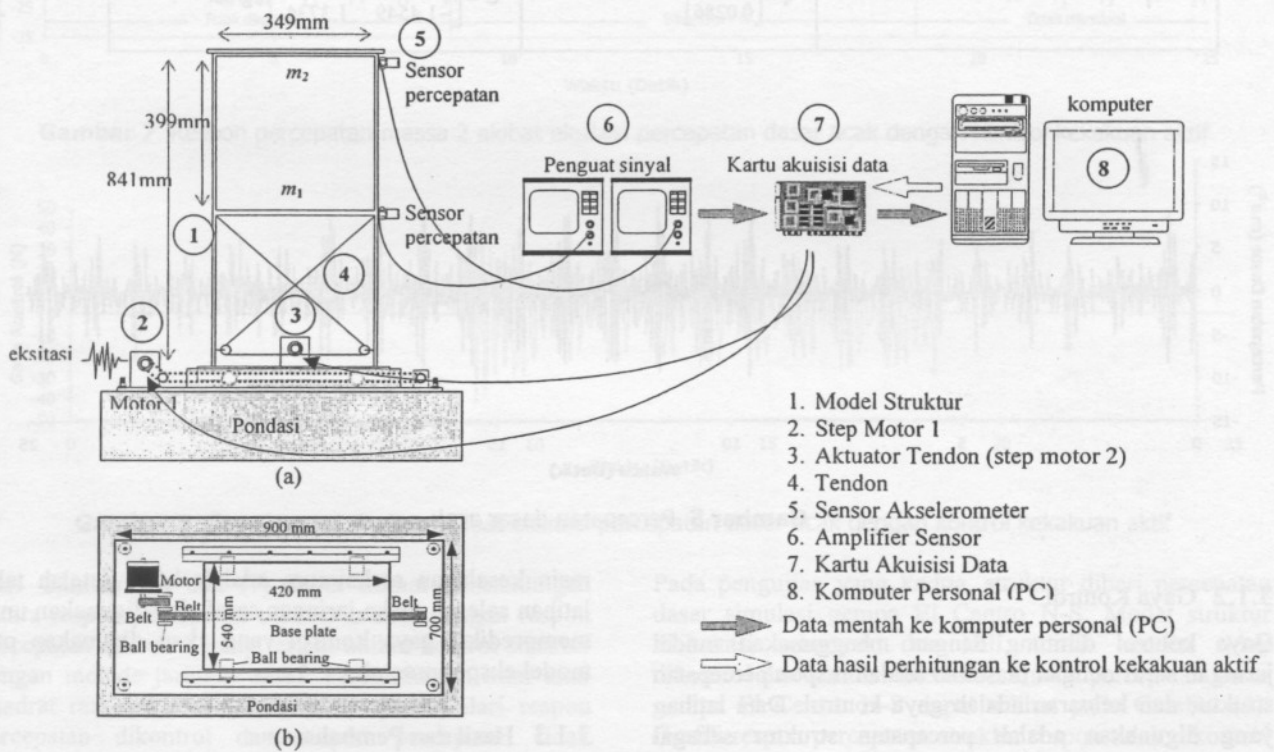
Pada studi ini akan di gunakan dua jenis sumber gaya kontrol pada struktur, yaitu kontrol dengan kekakuan aktif dan kontrol dengan massa aktif.

3.1 Kontrol Struktur dengan Kekakuan Aktif

Gambar (3) menunjukkan model struktur bangunan dengan dua derajat kebebasan yang mengalami eksitasi percepatan dasar $\ddot{x}_g(t)$. Gaya kontrol diberikan kepada struktur pada massa 1 dengan menggunakan sepasang tendon yang digerakan oleh aktuator pada dasar struktur. Tendon berfungsi sebagai pengaku struktur yang bekerja secara aktif mengurangi perpindahan relatif horisontal untuk menjaga keamanan struktur dan mengurangi percepatan absolut struktur untuk menjamin kenyamanan. Skema pengujian lengkap dapat dilihat pada Gambar (4).



Gambar 3 Model struktur dengan kontrol kekakuan aktif (a) Model fisik, (b) Model massa-pegas



Gambar 4 Model struktur bangunan dua tingkat dengan kekakuan aktif dipasang pada meja getar. (a) Tampak samping, (b) Tampak atas

3.1.1 Identifikasi Model Matematik Struktur

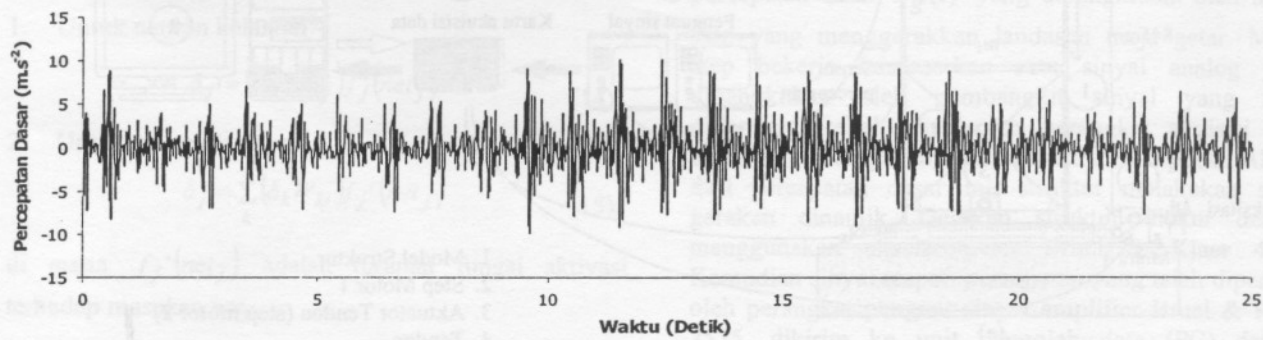
Untuk menjamin agar model matematik struktur yang akan digunakan dalam perhitungan gaya kontrol sama dengan model fisik yang sebenarnya, maka harus dilakukan koreksi matrik massa dan matrik kekakuan hasil perhitungan secara teori dengan menggunakan parameter dinamik hasil pengujian vibrasi [4]. Matrik redaman diperoleh dengan menggunakan rasio redaman hasil pengujian dan besarnya diambil secara proporsional

terhadap matrik kekakuan. Parameter-parameter fisik model struktur yang diperoleh dari hasil perhitungan teori maupun identifikasi berdasarkan data pengujian vibrasi dapat dilihat pada Tabel (1).

Untuk menguji keandalan metode kontrol jaringan saraf, dalam studi eksperimental ini akan digunakan percepatan dasar acak dan percepatan dasar gempa El Centro N-S seperti yang diperlihatkan pada Gambar (5) dan (9).

Tabel 1 Matrik massa, kekakuan dan redaman hasil identifikasi pengujian vibrasi dengan kontrol kekakuan aktif

Model Teori	Model Pengujian	Model Koreksi
$\omega = \begin{bmatrix} 28.8890 \\ 78.3193 \end{bmatrix} \text{ rad/det}$	$\bar{\omega} = \begin{bmatrix} 27.0168 \\ 75.4891 \end{bmatrix} \text{ rad/det}$	$\bar{\bar{\omega}} = \begin{bmatrix} 27.0168 \\ 75.4891 \end{bmatrix} \text{ rad/det}$
$\Phi = \begin{bmatrix} 0.6920 & -0.7727 \\ -0.7727 & 0.8488 \end{bmatrix}$	$\bar{\Phi} = \begin{bmatrix} 21.3752 & 22.7894 \\ 44.6472 & -38.169 \end{bmatrix}$	$\bar{\bar{\Phi}} = \begin{bmatrix} 21.3752 & 22.7894 \\ 44.6472 & -38.169 \end{bmatrix}$
$M = \begin{bmatrix} 1.1420 & 0 \\ 0 & 0.7590 \end{bmatrix} \text{ kg}$		$\bar{M} = \begin{bmatrix} 1.8894 & 0.0442 \\ 0.0442 & 0.5453 \end{bmatrix} \text{ kg}$
$K = \begin{bmatrix} 4262.6861 & -2456.0059 \\ -2456.0059 & 2456.0059 \end{bmatrix} \text{ kg/det}^2$		$\bar{K} = \begin{bmatrix} 6385.2064 & -2364.4296 \\ -2364.4296 & 1545.4867 \end{bmatrix} \text{ kg/det}^2$
	$\bar{\zeta} = \begin{bmatrix} 0.0221 \\ 0.0286 \end{bmatrix}$	$\bar{\bar{C}} = \begin{bmatrix} 5.4031 & -1.4549 \\ -1.4549 & 1.3724 \end{bmatrix} \text{ kg/det}$



Gambar 5 Percepatan dasar acak

3.1.2 Gaya Kontrol

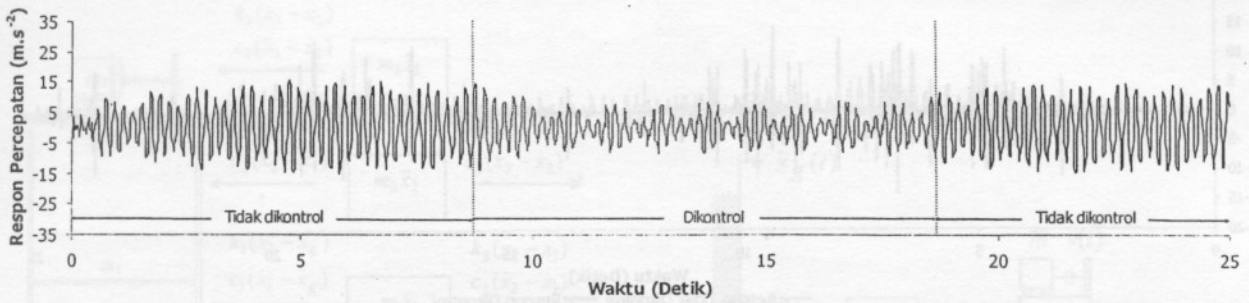
Gaya kontrol dihitung dengan menggunakan model jaringan saraf dengan masukan adalah respon percepatan struktur dan keluaran adalah gaya kontrol. Data latihan yang digunakan adalah percepatan struktur sebagai masukan dengan keluaran adalah gaya kontrol yang dihitung dengan menggunakan metode kontrol optimal. Percepatan dasar yang digunakan adalah percepatan dasar acak dengan amplitudo absolut maksimum 0,35 g.

Jumlah neuron yang digunakan adalah 50, jumlah lapisan neuron adalah 3 dan fungsi aktivasi tansigmoid, purelin. Latihan dimulai dengan menetapkan harga bobot W_{ji} dan bias b secara acak. Konstanta belajar awal adalah $1,10^{-6}$, faktor penambahan konstanta belajar adalah 1,05, faktor pengurangan konstanta belajar adalah 0,7 dan

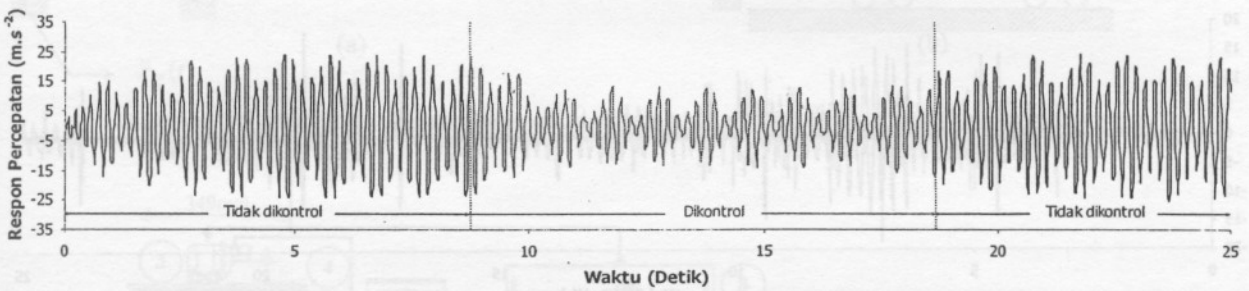
rasio kesalahan maksimum adalah 1,00. Setelah tahap latihan selesai, maka jaringan saraf siap digunakan untuk memprediksi gaya kontrol yang akan digunakan pada model eksperimental.

3.1.3 Hasil dan Pembahasan

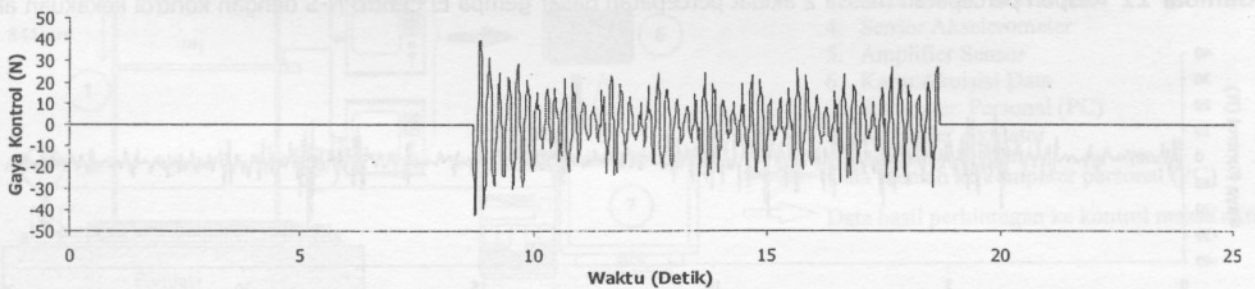
Pada pengujian yang pertama, struktur diberi percepatan dasar acak selama 25 detik. Selama 8,75 detik pertama, struktur berada pada kondisi tidak dikontrol. Kemudian gaya kontrol diaktifkan sampai detik ke-18,69. Selanjutnya gaya kontrol dinonaktifkan sampai detik ke-25. Grafik respon percepatan struktur pada massa 1 dan massa 2 dapat dilihat pada Gambar (6) dan (7). Dan grafik gaya kontrol yang diperlukan untuk menghasilkan respon tersebut dapat dilihat pada Gambar (8).



Gambar 6 Respon percepatan massa 1 akibat eksitasi percepatan dasar acak dengan kontrol kekakuan aktif



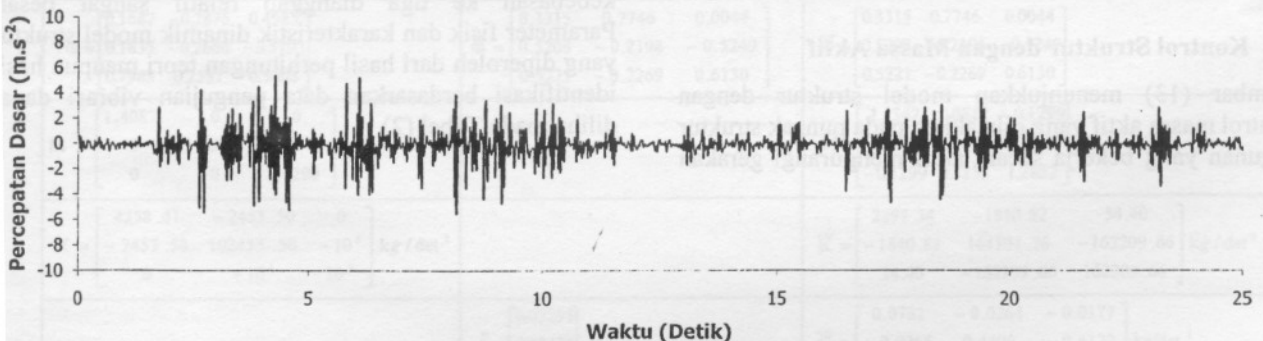
Gambar 7 Respon percepatan massa 2 akibat eksitasi percepatan dasar acak dengan kontrol kekakuan aktif



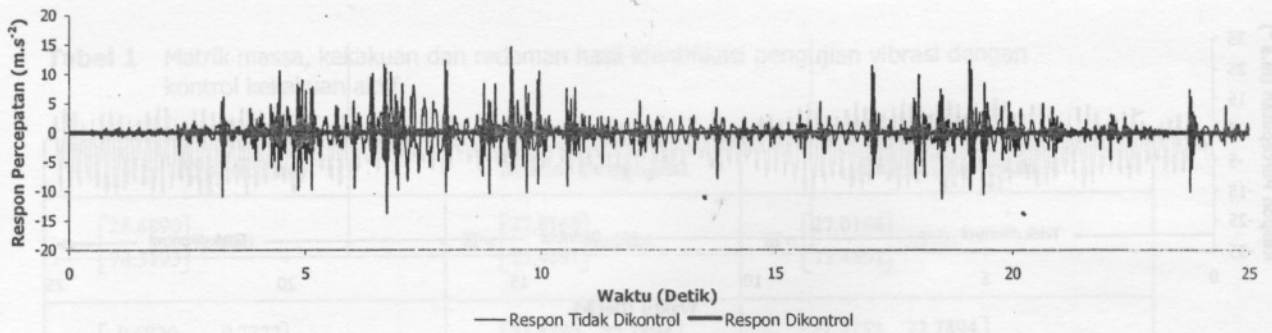
Gambar 8 Gaya kontrol struktur akibat eksitasi percepatan dasar acak dengan kontrol kekakuan aktif

Dari Gambar (6) dan (7) dapat dilihat perbandingan antara respon percepatan tidak dikontrol dengan respon percepatan dikontrol yang terjadi akibat kontrol struktur dengan metode jaringan saraf. Perbandingan nilai akar kuadrat rata-rata rms (*root mean square*) dari respon percepatan dikontrol dan respon percepatan tidak dikontrol selama bekerjanya gaya kontrol berkisar antara 0,53 – 0,58 dengan gaya kontrol maksimum sebesar 14,9 N.

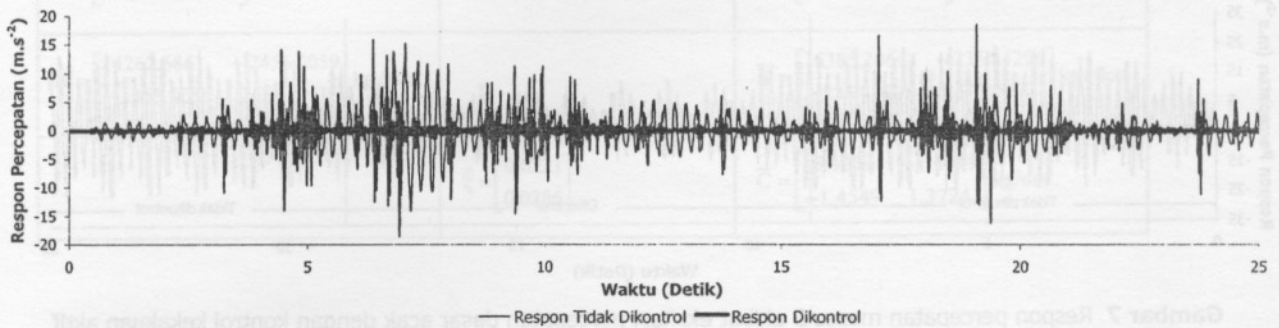
Pada pengujian yang kedua, struktur diberi percepatan dasar simulasi gempa El Centro N-S. Model struktur dieksitasi sebanyak dua kali, untuk kondisi tidak dikontrol dan kondisi dikontrol. Grafik percepatan dasar gempa El Centro N-S dapat dilihat pada Gambar (9). Grafik respon percepatan struktur respon tidak dikontrol dengan respon dikontrol dari massa 1 dan massa 2 dapat dilihat pada Gambar (10) dan (11). Gambar (12) memperlihatkan grafik gaya kontrol yang diperlukan untuk menghasilkan respon struktur dikontrol tersebut.



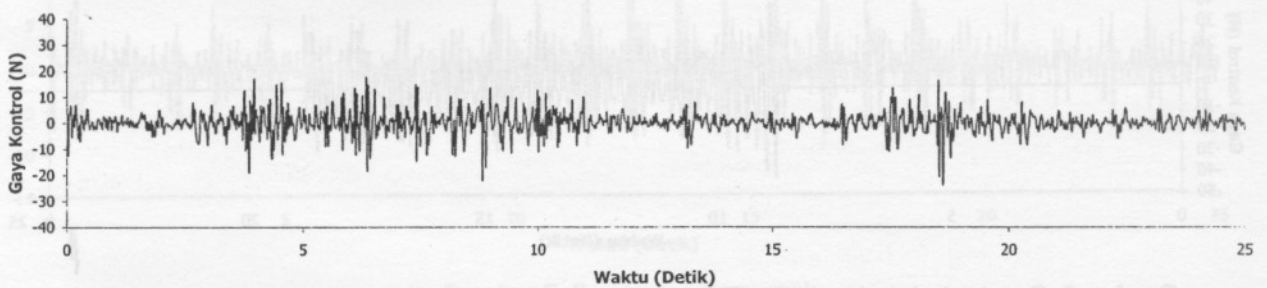
Gambar 9 Catatan percepatan dasar gempa El Centro N-S



Gambar 10 Respon percepatan massa 1 akibat percepatan dasar gempa El Centro N-S dengan kontrol kekakuan aktif



Gambar 11 Respon percepatan massa 2 akibat percepatan dasar gempa El Centro N-S dengan kontrol kekakuan aktif



Gambar 12 Gaya kontrol akibat percepatan dasar gempa El Centro N-S dengan kontrol kekakuan aktif

Perbandingan nilai akar kuadrat rata-rata rms (*root mean square*) dari respon percepatan dikontrol dan respon percepatan berkisar antara 0,46 – 0,68 dengan gaya kontrol maksimum sebesar 4,2 N.

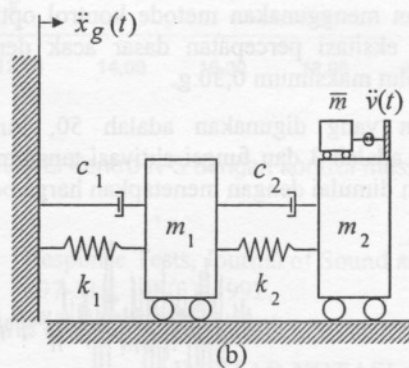
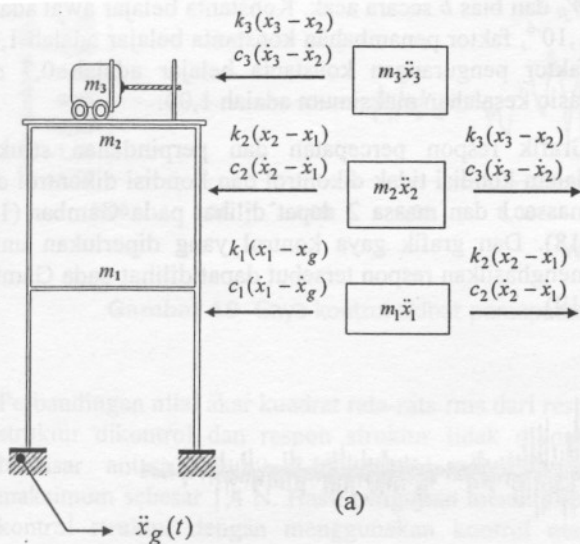
Hasil pengujian menunjukkan bahwa metode kontrol struktur dengan menggunakan kontrol kekakuan aktif dengan metode kontrol jaringan saraf mampu mereduksi respon struktur dengan efektif

3.2 Kontrol Struktur dengan Massa Aktif

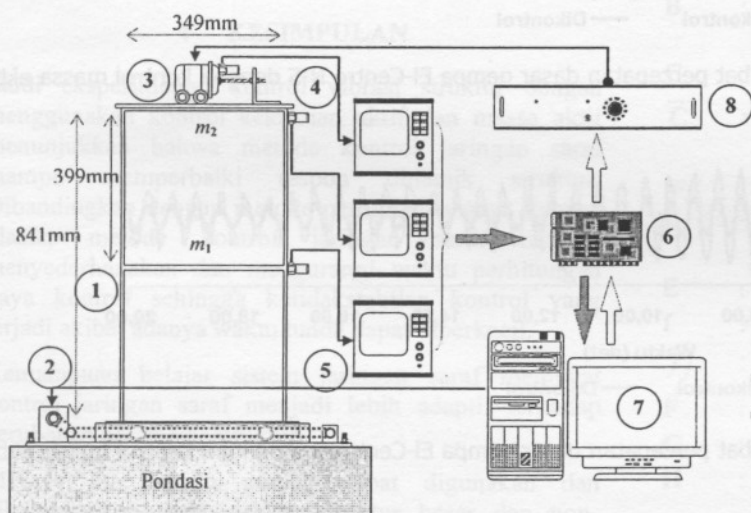
Gambar (13) menunjukkan model struktur dengan kontrol massa aktif yang diletakkan pada puncak struktur bangunan yang bekerja secara aktif mengurangi gerakan

horizontal struktur. Struktur diberikan beban dinami berupa eksitasi percepatan dasar $\ddot{x}_g(t)$. Skema pengujian lengkap dapat dilihat pada Gambar (14).

Penambahan massa aktif pada puncak struktur mengubah karakteristik struktur awal, dari model dinamik dengan dua derajat kebebasan menjadi model dinamik dengan tiga derajat kebebasan. Kekakuan pada derajat kebebasan ke tiga dianggap relatif sangat besar. Parameter fisik dan karakteristik dinamik model struktur yang diperoleh dari hasil perhitungan teori maupun hasil identifikasi berdasarkan data pengujian vibrasi dapat dilihat pada Tabel (2).



Gambar 13 Model struktur dengan kontrol massa aktif. (a) Model fisik, (b) Model massa-pegas



1. Model Struktur
2. Step Motor 1
3. Aktuator dan Massa Aktif
4. Sensor Akselerometer
5. Amplifier Sensor
6. Kartu Akuisisi Data
7. Komputer Personal (PC)
8. Amplifier Aktuator

➡ Data mentah ke komputer personal (PC)
 ➡ Data hasil perhitungan ke kontrol massa aktif

Gambar 14 Skema pengujian model struktur bangunan dua tingkat dengan kontrol massa aktif

Tabel 2 Matrik massa, kekakuan dan redaman hasil identifikasi pengujian vibrasi struktur dengan kontrol massa aktif

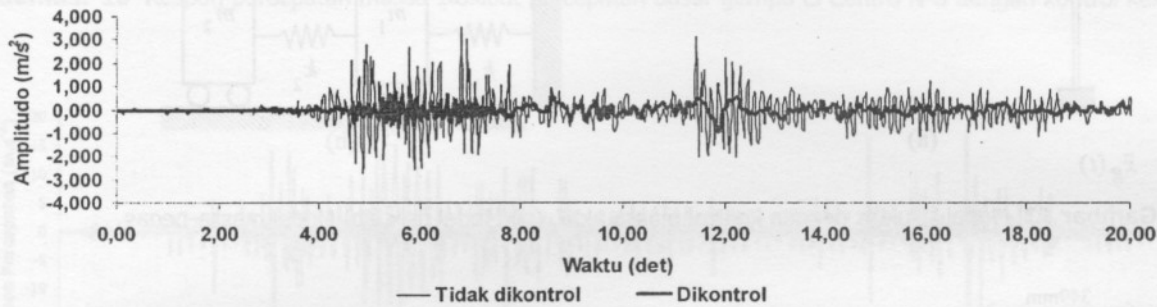
Model Teori	Model Pengujian	Model Koreksi
$\omega = \begin{bmatrix} 14.66 \\ 53.09 \\ 431.97 \end{bmatrix} \text{ rad/det}$	$\bar{\omega} = \begin{bmatrix} 13.61 \\ 43.46 \\ 458.67 \end{bmatrix} \text{ rad/det}$	$\bar{\omega} = \begin{bmatrix} 13.61 \\ 43.46 \\ 458.67 \end{bmatrix} \text{ rad/det}$
$\Phi = \begin{bmatrix} 0.1687 & -0.7876 & 0.4985 \\ 0.1835 & -0.2666 & -0.5793 \\ 0.7988 & 0.2557 & 0.3403 \end{bmatrix}$	$\bar{\Phi} = \begin{bmatrix} 0.3315 & 0.7746 & 0.0044 \\ 0.5208 & -0.2198 & -0.5249 \\ 0.5221 & -0.2269 & 0.6130 \end{bmatrix}$	$\bar{\Phi} = \begin{bmatrix} 0.3315 & 0.7746 & 0.0044 \\ 0.5208 & -0.2198 & -0.5249 \\ 0.5221 & -0.2269 & 0.6130 \end{bmatrix}$
$M = \begin{bmatrix} 1.4087 & 0 & 0 \\ 0 & 1.6805 & 0 \\ 0 & 0 & 1.4290 \end{bmatrix} \text{ kg}$		$\bar{M} = \begin{bmatrix} 1.1342 & 0.0882 & -0.1299 \\ 0.0882 & 2.3699 & 0.3253 \\ -0.1299 & 0.3253 & 1.2852 \end{bmatrix} \text{ kg}$
$K = \begin{bmatrix} 4258.41 & -2453.50 & 0 \\ -2453.50 & 102453.50 & -10^5 \\ 0 & -10^5 & 10^5 \end{bmatrix} \text{ kg/det}^2$		$\bar{K} = \begin{bmatrix} 2297.34 & -1840.82 & 54.40 \\ -1840.82 & 164104.76 & -162209.66 \\ 54.40 & -162209.66 & 162209.66 \end{bmatrix} \text{ kg/det}^2$
	$\bar{\xi} = \begin{bmatrix} 0.02295 \\ 0.07420 \\ 0.0598 \end{bmatrix}$	$\bar{C} = \begin{bmatrix} 0.0782 & -0.0264 & -0.0177 \\ -0.0265 & 0.4406 & -0.4122 \\ -0.0176 & -0.4122 & 0.4313 \end{bmatrix} \text{ kg/det}^1$

Gaya kontrol yang digunakan adalah gaya kontrol jaringan saraf dengan masukan adalah respon percepatan struktur dan keluaran adalah gaya kontrol. Data latihan yang digunakan adalah percepatan struktur sebagai masukan dengan keluaran adalah gaya kontrol yang dihitung dengan menggunakan metode kontrol optimal dengan beban eksitasi percepatan dasar acak dengan amplitudo absolut maksimum 0,30 g.

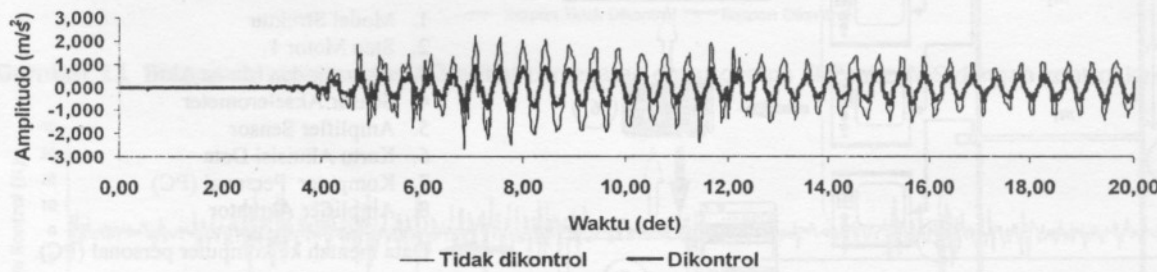
Jumlah neuron yang digunakan adalah 50, jumlah lapisan neuron adalah 3 dan fungsi aktivasi tansigmoid, purelin. Latihan dimulai dengan menetapkan harga bobot

W_{ji} dan bias b secara acak. Konstanta belajar awal adalah $1,10^{-6}$, faktor penambahan konstanta belajar adalah 1,05, faktor pengurangan konstanta belajar adalah 0,7 dan rasio kesalahan maksimum adalah 1,00.

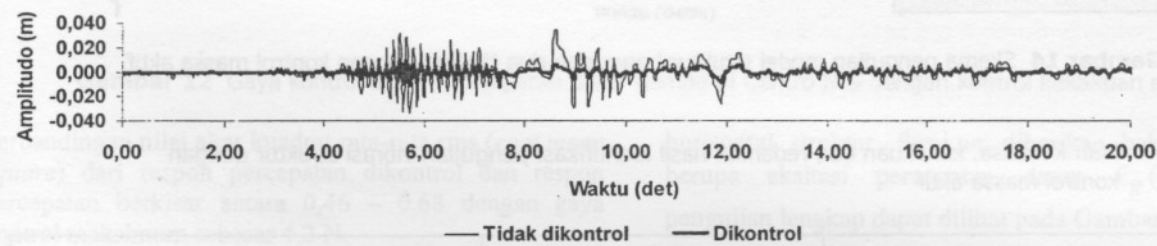
Grafik respon percepatan dan perpindahan struktur dalam kondisi tidak dikontrol dan kondisi dikontrol dari massa 1 dan massa 2 dapat dilihat pada Gambar (15)-(18). Dan grafik gaya kontrol yang diperlukan untuk menghasilkan respon tersebut dapat dilihat pada Gambar (19).



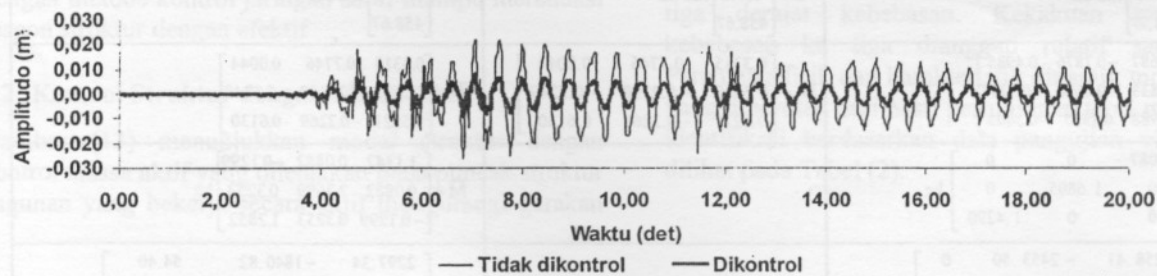
Gambar 15 Respon percepatan massa 1 akibat percepatan dasar gempa El-Centro N-S dengan kontrol massa aktif



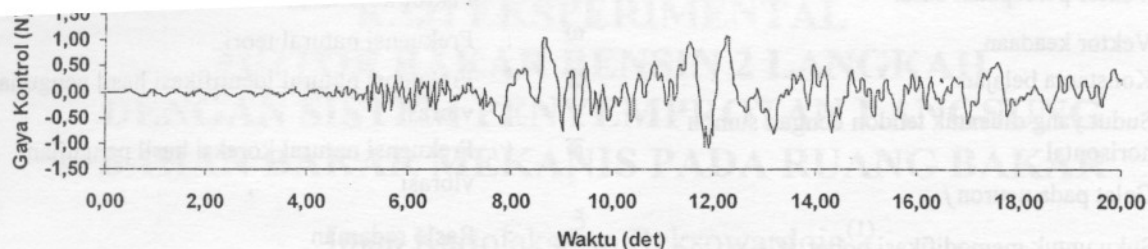
Gambar 16 Respon percepatan massa 2 akibat percepatan dasar gempa El-Centro N-S dengan kontrol massa aktif



Gambar 17 Respon perpindahan massa 1 akibat percepatan dasar gempa El-Centro N-S dengan kontrol massa aktif



Gambar 18 Respon perpindahan massa 2 akibat percepatan dasar gempa El-Centro N-S dengan kontrol massa aktif



Gambar 19 Gaya kontrol akibat percepatan dasar gempa El Centro N-S dengan kontrol massa aktif

Perbandingan nilai akar kuadrat rata-rata rms dari respon struktur dikontrol dan respon struktur tidak dikontrol berkisar antara 0,3 – 0,46 dengan gaya kontrol maksimum sebesar 1,4 N. Hasil pengujian menunjukkan kontrol struktur dengan menggunakan kontrol massa aktif dengan metode kontrol jaringan saraf mampu mereduksi respon struktur dengan efektif

4 KESIMPULAN

Studi eksperimental kontrol vibrasi struktur dengan menggunakan kontrol kekakuan aktif dan massa aktif menunjukkan bahwa metode kontrol jaringan saraf mampu memperbaiki respon dinamik struktur. Dibandingkan dengan metode perhitungan gaya kontrol klasik, metode kontrol jaringan saraf mampu menyederhanakan dan mengurangi waktu perhitungan gaya kontrol sehingga ketidakstabilan kontrol yang terjadi akibat adanya waktu tunda dapat diperkecil.

Kemampuan belajar sistem jaringan saraf membuat kontrol jaringan saraf menjadi lebih adaptif terhadap perubahan parameter struktur.

Metode ini dengan mudah dapat digunakan dan dikembangkan pada struktur-struktur besar dan non-linier dengan menggunakan parameter struktur yang diperoleh baik dari hasil identifikasi di laboratorium maupun identifikasi langsung di lapangan.

DAFTAR PUSTAKA

1. Setio, H.D., Halim, Budi, S., Gunawan, Tommy, Setio, S., "Studi Eksperimental Kontrol Aktif Struktur dengan Menggunakan Jaringan Saraf Tiruan", Prosiding Konferensi Nasional Rekayasa Kegempaan, ITB, hal. VII-1. 4-5 November, 1999.
2. Setio, H.D., Setio, S., Foek Cong, Wong, "Kontrol Vibrasi Aktif Struktur dengan Menggunakan Observer Jaringan Saraf Tiruan", Prosiding Lokakarya dan Seminar, Sistem Kendali di Industri, 1998.
3. Setio, H.D., Setio, S., Timoteus, "Observer Design on Actively Controlled Structure Under Seismic Excitation", Proceedings of the Computational Methods and Simulation in Engineering, ECL, Lyon, France, 1997.
4. Setio, S., Setio, H.D. and Jezequel, L., A Method of Non-Linear Modal Identification from Frequency

Response Tests, Journal of Sound and Vibration, pp. 497-515, 158(3), 1992.

DAFTAR NOTASI

- | | |
|------------|---|
| A | : Matrik ruang keadaan |
| b | : Bias pada jaringan saraf tiruan |
| B | : Matrik lokasi gaya kontrol pada persamaan ruang keadaan |
| C | : Matrik redaman struktur |
| $\bar{C}$ | : Matrik redaman koreksi hasil pengujian vibrasi |
| err | : Jumlah kuadrat kesalahan |
| E | : Matrik lokasi gaya eksitasi luar struktur pada persamaan dinamik |
| E | : Modulus elastisitas |
| f | : Vektor gaya eksitasi luar |
| f_j | : Fungsi aktivasi pada neuron- <i>j</i> |
| F | : Vektor gaya luar |
| G | : Matrik faktor pengali kontrol |
| H | : Matrik lokasi gaya kontrol pada persamaan dinamik |
| I | : Momen inersia |
| I | : Matrik identitas |
| J | : Indek prestasi (<i>Performance index</i>) |
| k_c | : Kekakuan tendon |
| K | : Matrik kekakuan struktur |
| $\bar{K}$ | : Matrik kekakuan koreksi hasil pengujian vibrasi |
| M | : Matrik massa struktur |
| $\bar{M}$ | : Matrik massa koreksi hasil pengujian vibrasi |
| net_j | : Masukan pada neuron <i>j</i> |
| O_i | : Keluaran pada neuron <i>i</i> |
| P | : Matrik Riccati |
| Q | : Matrik bobot reduksi respon |
| R | : Matrik bobot gaya kontrol |
| U | : Vektor gaya kontrol |
| v | : Vektor perpindahan tendon |
| W | : Matrik lokasi gaya eksitasi luar struktur pada persamaan ruang keadaan |
| W_{ji} | : Bobot yang berada di antara neuron ke- <i>j</i> pada suatu lapisan dengan neuron ke- <i>i</i> pada lapisan sebelumnya |

