

PREDIKSI RESPONS STRUKTUR BANGUNAN BERDASARKAN SPEKTRA GEMPA INDONESIA DI PULAU SUMATERA MENGGUNAKAN JARINGAN SARAF TIRUAN

Hendra Jingga¹⁾, Reni Suryanita²⁾, Enno Yuniarto²⁾

¹⁾Mahasiswa Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Riau

²⁾Dosen Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Riau

Kampus Bina Widya J. HR Soebrantas KM 12,5 Pekanbaru, Kode Pos 28293

Email : hendra.jingga.4362@gmail.com

Abstract

Sumatera Island is one of the most active seismic area in Indonesia. The high seismic activity combined with mostly soft soil condition turn some location in this island into a devastating shaking area especially for highrise building. If not well designed, highrise reinforced concrete (RC) building may experience excessive deformation and endanger its occupants. Due to these facts, this study aims to predict deformation characteristics of highrise RC building under earthquake loading using artificial neural network (ANN). Prior to ANN analysis, modal response spectrum analysis is conducted to produce building response data sets. By selecting 8 capital cities and 3 other cities in Sumatera Island as seismic location, 1080 data sets are generated for ANN training and 405 data sets for testing. The ANN analysis uses 3 layers: input layer, hidden layer, and output layer. Building geometry, soil condition, and seismic load are selected as input parameters, while story-drift, velocity, and acceleration are selected as output parameters. After 6000 iterations at training process, average mean-squared errors (MSE) of 3×10^{-4} and 4×10^{-4} are achieved for training and testing process, respectively. The calculated R^2 is ranging from 83% to 95% which is adequately high for prediction rate. This shows that ANN is a very promising tool to predict story-drift, velocity, and acceleration of highrise RC building under earthquake loading.

Keywords: artificial neural network (ANN), Sumatera Island, modal response spectrum analysis, structural response

A. PENDAHULUAN

Indonesia merupakan salah satu daerah yang paling rentan terhadap aktivitas seismik atau gempa bumi. Gambar 1 menunjukkan bahwa Indonesia dilintasi oleh Lingkaran Api Pasifik (*Pacific Ring of Fire*) yang banyak mengalami pergerakan tektonik maupun aktivitas vulkanik. Gunung Krakatau termasuk dalam barisan gunung api aktif sepanjang Lingkaran Api Pasifik. Akibatnya, gempa dengan intensitas kuat sering menghantam Indonesia, khususnya Pulau Sumatera, misalnya gempa dengan intensitas 7,9 SR di Kota Padang pada tahun 2009 dan gempa dengan intensitas 9,3 SR di Kota Banda Aceh pada tahun 2004.



Gambar 1 Lingkaran Api Pasifik
(National Geographic)

Kota-kota di sisi Barat Pulau Sumatera seperti Banda Aceh, Padang, dan Bengkulu

cenderung mengalami pergerakan tanah yang lebih besar dibandingkan sisi Timur Pulau Sumatera. Hal tersebut disebabkan oleh pusat gempa yang lebih dekat dengan sisi Barat Pulau Sumatera. Pada tahun 2004, Kota Banda Aceh bahkan mengalami bencana tsunami yang disebabkan oleh gempa intensitas kuat yang terjadi di dasar laut dan gelombang air merambat hingga ke daerah pesisir.

Berdasarkan fakta geografi di atas, pergerakan tanah yang terjadi di Pulau Sumatera khususnya di sisi Barat memiliki daya rusak yang sangat besar khususnya untuk bangunan tinggi. Bangunan tinggi cenderung memiliki kekakuan yang lebih rendah sehingga dapat mengalami deformasi yang besar jika dikenakan pergerakan tanah akibat gempa kuat. Jika tidak direncanakan dengan baik, deformasi yang berlebihan tersebut dapat merusak komponen struktural, yaitu terjadi retak yang berlebihan hingga keruntuhan yang mendadak. Bangunan tinggi dari beton bertulang umumnya sangat berat dan berbahaya jika runtuh dan menimpa penghuni gedung. Selain itu, deformasi berlebihan juga dapat merusak komponen nonstruktural yang sangat penting, misalnya menyebabkan pintu tidak dapat dibuka sehingga menghambat proses evakuasi.

Analisis struktur yang baik akan sangat mendukung perencanaan bangunan terhadap beban gempa. Beberapa jenis analisis struktur ditawarkan di dalam SNI 1726-2012 sesuai dengan kebutuhan dan kompleksitas bangunan yang ditinjau. Salah satu yang dapat digunakan untuk kasus gedung beton bertulang bertingkat banyak adalah analisis spektrum respons ragam. Analisis spektrum respons ragam umumnya digunakan jika analisis statik ekuivalen tidak diizinkan oleh peraturan. Analisis ini dapat dilakukan dengan bantuan program elemen hingga.

Analisis spektrum respons ragam cukup akurat dalam memprediksi respons struktur. Namun, proses pemodelan dan *running analysis* memerlukan waktu yang cukup lama khususnya untuk bangunan

yang kompleks. Selain itu, analisis spektrum respons umumnya harus dibantu oleh komputer dan program elemen hingga yang dimaksud biasanya berbayar dan hanya bisa dioperasikan oleh operator yang sudah terlatih.

Seringkali saat merencanakan sistem struktur dan arsitektural suatu bangunan, estimasi terhadap kinerja struktur sangat diperlukan sebelum melakukan analisis detail. Dalam konteks yang telah dibahas sebelumnya, parameter dinamis seperti simpangan lantai, kecepatan, dan percepatan termasuk dalam kategori yang penting dan sangat menentukan hasil desain. Oleh karena itu, estimasi terhadap ketiga parameter tersebut perlu dilakukan dengan cepat dan mudah.

Dalam bidang *computer science*, salah satu metode estimasi/prediksi yang dapat digunakan adalah Metode Jaringan Saraf Tiruan (JST) atau dikenal dengan istilah *Artificial Neural Network* (ANN) dalam bahasa Inggris. JST dapat memprediksi *output* berdasarkan *input* yang diberikan dengan akurasi yang cukup tinggi jika telah di-*training* dengan volume data yang cukup besar dan mewakili. JST yang sudah di-*training* dapat memprediksi *output* dengan kecepatan yang sangat tinggi. Khusus untuk konteks analisis struktur, prediksi JST akan sangat membantu dalam proses desain pendahuluan suatu bangunan bertingkat banyak.

Penelitian terdahulu yang menggunakan JST untuk memprediksi kasus-kasus gempa luar negeri telah banyak dilakukan, seperti yang dilakukan oleh Bojórquez et al. (2012), Mardiyono et al. (2012), Suryanita dan Adnan (2013), dan Lee dan Han (2002). Namun untuk kasus gempa Indonesia, belum banyak penelitian yang ditemukan penulis.

Berdasarkan latar belakang tersebut, maka beberapa permasalahan berikut dapat dirumuskan:

1. Bagaimana respons struktur bertingkat banyak di wilayah Pulau Sumatera berdasarkan Spektrum Respons Gempa Indonesia?

2. Bagaimana potensi Jaringan Saraf Tiruan dalam memprediksi respons struktur bertingkat banyak berdasarkan Spektrum Respons Gempa Indonesia di wilayah mikrozonasi Pulau Sumatera?

A.1. Analisis Spektrum Respons Ragam

Analisis spektrum respons ragam mengacu pada persyaratan yang diberikan dalam SNI 1726-2012. Tetapi sebelumnya, analisis ragam (*modal analysis*) perlu dilakukan untuk mengetahui karakteristik dinamis dari struktur gedung, seperti periode getar dan bentuk getar struktur. Persamaan 1 merupakan persamaan dasar untuk melakukan analisis ragam, dimana $[\bar{K}]$ adalah matriks kekakuan struktur, $[\bar{M}]$ adalah matriks massa, ω adalah frekuensi sudut getaran struktur, dan $\{a\}$ adalah matriks amplitudo getaran struktur.

$$([\bar{K}] - \omega^2[\bar{M}])\{a\} = \{0\} \quad (1)$$

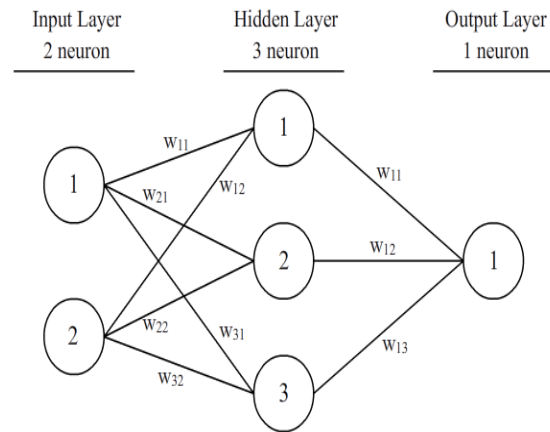
Untuk melakukan analisis spektrum respons ragam, fungsi spektrum respons gempa diperlukan. Dalam penelitian ini, fungsi spektrum respons gempa yang digunakan mengacu pada persyaratan SNI 1726-2012 dan Peta Gempa Indonesia tahun 2010.

A.2. Metode Jaringan Saraf Tiruan

Jaringan Saraf Tiruan (JST) adalah model perhitungan yang meniru mekanisme kerja jaringan saraf makhluk hidup. JST terdiri dari neuron-neuron yang merupakan unit pengolahan informasi seperti pada jaringan saraf biologis. JST telah digunakan dalam berbagai disiplin ilmu karena mampu memodelkan perhitungan yang kompleks dengan nonlinearitas tinggi seperti permasalahan yang umumnya dijumpai di alam.

Struktur JST umumnya terdiri dari *input layer*, *hidden layer*, dan *output layer* (Gambar 2). *Input layer* berisi neuron-neuron yang menerima data langsung dari luar (eksternal). *Hidden layer* menerima sinyal dari *input layer* dan meneruskannya ke *output layer*. Jumlah neuron dalam *hidden layer* mempengaruhi keakuratan dan

kemampuan JST dalam memodelkan nonlinearitas. *Output layer* berisi neuron-neuron yang merepresentasikan target dan *output* dari model perhitungan. Selisih target dan *output* dari model perhitungan JST adalah tingkat kesalahan (*error*) JST.



Gambar 2 Skema JST Sederhana

Pada penelitian ini, digunakan salah satu jenis JST yang paling banyak digunakan dalam bidang teknik sipil, yaitu JST *Backpropagation* (BP). Proses iterasi dan algoritma *training* dapat dilihat secara detail pada tulisan yang dibuat oleh Basheer dan Hajmeer (2000). Persamaan 2 menunjukkan fungsi untuk menghitung *net input* (ξ_j^l) dari tiap neuron pada suatu *layer*, dimana w_{ji}^l adalah faktor bobot JST dan x_i^{l-1} adalah nilai neuron pada *layer* sebelumnya. Persamaan 3 menunjukkan fungsi sigmoid untuk menghitung nilai akhir dari suatu neuron.

$$\xi_j^l = \sum_{i=1}^{N_{l-1}} w_{ji}^l x_i^{l-1} \quad (2)$$

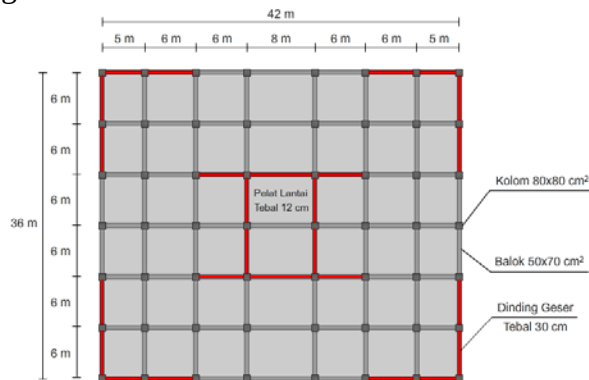
$$\sigma(\xi) = \frac{1}{1 + e^{-\xi}} \quad (3)$$

B. METODOLOGI PENELITIAN

Data respons struktur dikumpulkan dengan melakukan analisis spektrum respons ragam dan kemudian data tersebut digunakan untuk melakukan *training* dan *testing* dalam analisis JST.

B.1. Model Struktur Bangunan

Struktur gedung yang ditinjau merupakan struktur gedung perkantoran dengan denah lantai seperti yang terlihat pada Gambar 3. Denah lantai adalah identik mulai dari lantai dasar (*base*) hingga lantai atap (*rooftop*). Garis warna merah pada Gambar 3 menunjukkan lokasi dinding geser.



Gambar 3 Denah Lantai Gedung

Jumlah tingkat gedung adalah bervariasi, yaitu 10 lantai untuk Model 1, 15 lantai untuk Model 2, dan 20 lantai untuk Model 3. Tinggi kolom di atas lantai dasar adalah 4,5 m, sedangkan tinggi kolom di atas lantai lainnya adalah 4 m. Dengan demikian, tinggi total Model 1 adalah 40,5 m, tinggi total Model 2 adalah 60,5 m, dan tinggi total Model 3 adalah 80,5 m. Data geometri struktur untuk seluruh model ditabulasikan dalam Tabel 1.

Tabel 1 Data Geometri Struktur Gedung Model 1, Model 2, dan Model 3

Karakteristik Geometri	Model 1	Model 2	Model 3
Jumlah bentang arah X	7	7	7
Jumlah bentang arah Y	6	6	6
Total panjang bentang arah X	42 m	42 m	42 m
Total panjang bentang arah Y	36 m	36 m	36 m
Jumlah tingkat	10	15	20
Tinggi total gedung	40,5 m	60,5 m	80,5 m

Material beton yang digunakan adalah K-300 ($f'_c = 25$ MPa). Dimensi elemen struktur yang digunakan adalah sebagai berikut:

1. Balok 50x70 cm²,

2. Kolom 80x80 cm²,
3. Pelat lantai tebal 12 cm,
4. Dinding geser tebal 30 cm.

B.2. Prosedur Analisis Spektrum Respons Ragam

Analisis spektrum respons ragam dilakukan dengan bantuan program elemen hingga. Prosedur analisisnya adalah sebagai berikut:

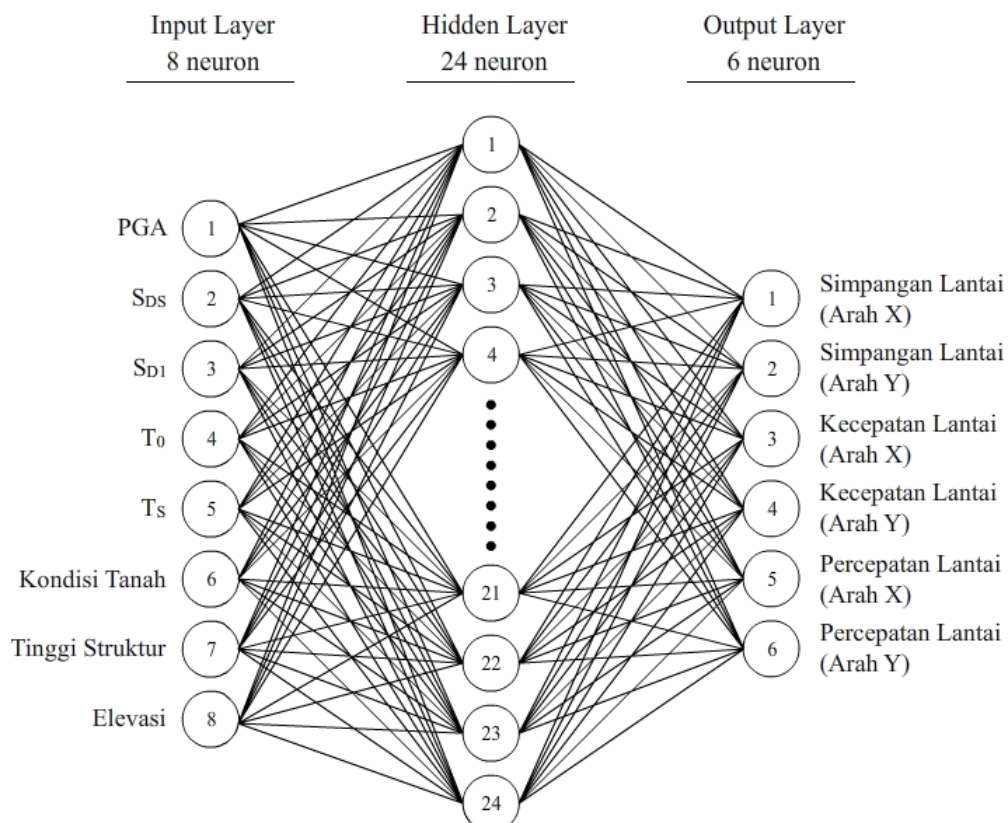
1. Memodelkan seluruh komponen struktur gedung dalam program elemen hingga, yaitu terdiri dari balok, kolom, pelat lantai, dan dinding geser beton bertulang sesuai dengan dimensi dan spesifikasi material yang telah ditetapkan sebelumnya.
2. Memasukkan seluruh beban yang bekerja.
3. Menetapkan 100% beban mati (berat sendiri dan beban mati tambahan) sebagai *mass source* untuk analisis dinamik.
4. Mendefinisikan dan melakukan analisis ragam untuk memperoleh karakteristik getaran bebas struktur (periode getar, bentuk ragam, dan partisipasi massa). Analisis ragam dilakukan hingga bentuk ragam ke-20 menggunakan *ritz vectors*. *Ritz vectors* dipilih karena mampu menghasilkan partisipasi massa yang lebih tinggi dibandingkan *eigen vectors* dengan jumlah ragam yang sama.
5. Mendefinisikan fungsi spektrum respons percepatan desain (S_a vs T) berdasarkan grafik spektrum respons yang telah ditetapkan untuk 11 kota dan 3 kondisi tanah, sehingga totalnya adalah 33 fungsi spektrum respons percepatan desain.
6. Memasukkan beban gempa spektrum respons berupa percepatan (*acceleration*) yang besarnya ditentukan oleh fungsi spektrum respons percepatan desain yang telah dimasukkan pada langkah ke-5. Percepatan gempa diberikan pada arah horizontal saja, tidak untuk vertikal. Untuk menggabungkan respons individual dari tiap ragam (hasil analisis

ragam), digunakan Metode Kombinasi Kuadrat Lengkap (CQC). Rasio redaman diambil sama dengan 5% untuk struktur beton bertulang (Wight & MacGregor, 2012).

7. Menjalankan analisis spektrum respons ragam dan menganalisis keluaran *software* elemen hingga berupa respons struktur, yaitu simpangan, kecepatan, dan percepatan pusat lantai, serta *base shear* untuk seluruh kasus beban gempa (33 kasus) dan model struktur (3 model). Selain itu dari analisis ragam, karakteristik dinamik lainnya dari struktur dapat ditentukan, yaitu partisipasi massa, bentuk ragam, dan periode getar.

B.3. Prosedur Analisis Metode Jaringan Saraf Tiruan (JST)

Metode Jaringan Saraf Tiruan (JST) digunakan untuk memprediksi respons struktur terhadap beban gempa. Parameter yang dipilih sebagai *input* adalah parameter geometri struktur, kondisi tanah, dan beban gempa. Sedangkan simpangan, kecepatan, dan percepatan pusat lantai merupakan parameter *output* yang diprediksi oleh JST. Arsitektur JST terdiri dari 1 *input layer* dengan 8 neuron, 1 *hidden layer* dengan 24 neuron, dan 1 *output layer* dengan 6 neuron (Gambar 4). Jenis JST yang digunakan adalah JST *Backpropagation* (BP) dengan fungsi sigmoid sebagai fungsi aktivasi.



Gambar 4 Arsitektur JST untuk Memprediksi Respons Struktur

Data untuk *training* dan *testing* JST diperoleh dari hasil analisis struktur spektrum respons ragam dengan metode elemen hingga. Dari 11 kota di Pulau Sumatera yang dianalisis pengaruh karakteristik beban gempanya terhadap struktur, sebanyak 8 ibukota provinsi di Pulau Sumatera digunakan sebagai

kumpulan data *training*, sedangkan 3 kota lainnya digunakan sebagai data *testing*. Untuk setiap kasus beban gempa, dihasilkan 10 nilai simpangan lantai untuk Model 1 (10 lantai), 15 nilai simpangan lantai untuk Model 2 (15 lantai), dan 20 nilai simpangan lantai untuk Model 3 (20 lantai) pada arah horizontal. Hal yang sama

berlaku untuk kecepatan dan percepatan. Dengan demikian, 45 set data bisa diperoleh untuk analisis JST per kasus gempa.

Kumpulan data untuk *training* JST menggunakan 8 ibukota provinsi dengan 3 kondisi tanah (lunak, sedang, dan keras), sehingga menghasilkan 24 kasus beban gempa. Jumlah data yang dapat dikumpulkan untuk *training* JST adalah 24 kasus beban gempa dikali dengan 45 set data per kasus beban gempa, yaitu sama dengan 1080 set data. Sedangkan untuk *testing*, dengan cara yang sama tetapi untuk 3 lokasi gempa saja, diperoleh 405 set data.

Training JST dilakukan dengan 1080 set data. Parameter *training* JST seperti *learning rate*, koefisien momentum, dan rentang normalisasi akan dicoba-coba sehingga menghasilkan hasil *training* yang terbaik. Proses *training* dihentikan jika salah satu kriteria berikut telah tercapai:

1. Nilai *Mean Squared Errors* (MSE) lebih kecil atau sama dengan 0,0001.
2. Jumlah iterasi sudah melebihi 50000 kali.
3. JST sudah mengalami *overtraining*, yaitu ditandai dengan naiknya MSE jika iterasi diteruskan.

Selain dengan parameter MSE, JST juga diperiksa kinerjanya dengan menghitung parameter R^2 . JST dianggap mampu memprediksi *output* dengan baik jika nilai R^2 lebih besar dari 80%. MSE dan R^2 dapat dihitung menggunakan Persamaan 4 dan Persamaan 5, dimana T_i adalah nilai target (nilai *output* yang diharapkan), Y_i adalah nilai *output* yang diprediksi JST, dan T_{avg} adalah rerata dari seluruh nilai T_i .

$$MSE = 0,5(T_i - Y_i)^2 \quad (4)$$

$$R^2 = 1 - \left[\frac{\sum_i^n (T_i - Y_i)^2}{\sum_i^n (T_i - T_{avg})^2} \right] \quad (5)$$

Setelah proses *training* selesai, JST dapat diuji dengan 405 set data yang telah dikumpulkan sebelumnya (proses *testing*). Pada proses *testing*, MSE dan R^2 dihitung dan dievaluasi kembali. Jika MSE dan R^2 memenuhi syarat pada proses *testing*, maka

JST sudah berhasil dilatih dan dapat dikembangkan menjadi *software* prediksi respons struktur, yaitu khususnya untuk simpangan, kecepatan, dan percepatan pusat lantai.

C. ANALISIS DAN PEMBAHASAN

C.1. Analisis Ragam

Berdasarkan hasil analisis ragam pada Tabel 2, diperoleh bahwa untuk seluruh model struktur, partisipasi massa sudah melebihi 90%, yaitu sesuai dengan persyaratan SNI 1726-2012.

Tabel 2 Hasil Analisis Ragam

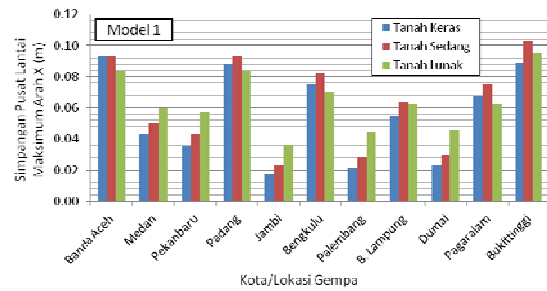
	Model 1	Model 2	Model 3
Partisipasi Massa (%)	98,5	98,7	98,7
Periode fundamental (detik)	0,65	1,16	1,77

C.2. Analisis Spektrum Respons Ragam

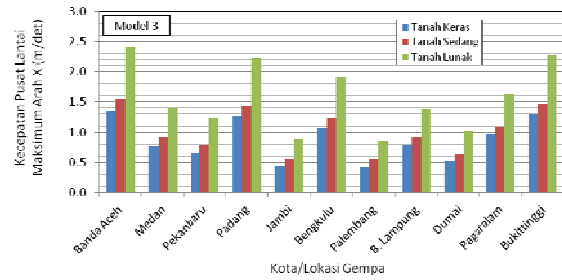
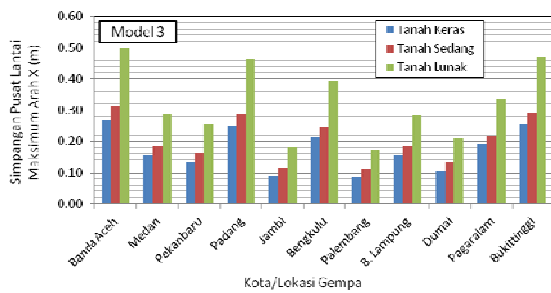
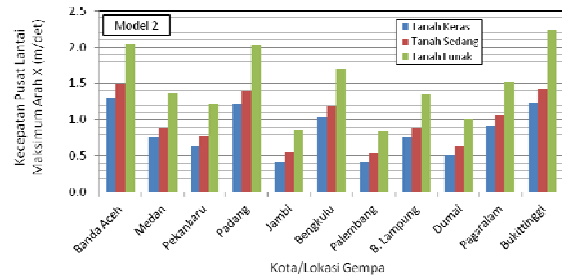
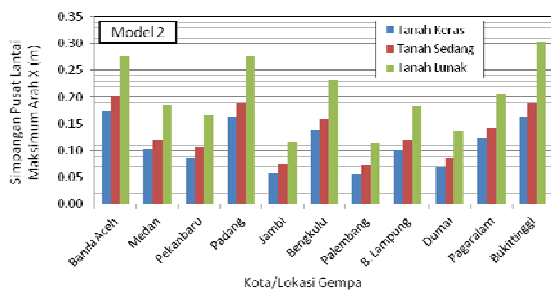
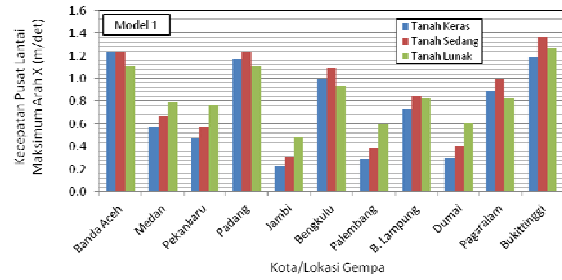
Berdasarkan hasil analisis spektrum respons ragam (Gambar 5), diperoleh bahwa:

1. Untuk lokasi gempa dan kondisi tanah yang sama, secara umum respons struktur maksimum yang paling besar dialami oleh Model 3, kemudian disusul oleh Model 2, dan yang paling kecil adalah Model 1. Hal tersebut disebabkan Model 3 merupakan model struktur yang paling tinggi dan memiliki kekakuan yang paling rendah.
2. Untuk model struktur dan kondisi tanah yang sama, kekuatan gempa untuk 11 kota tersebut dapat diklasifikasikan menjadi 3 kelas berdasarkan respons struktur yang dialami, yaitu:
 - a. Gempa kuat, yaitu terletak pada Kota Banda Aceh, Bukittinggi, Padang, dan Bengkulu.
 - b. Gempa sedang, yaitu terletak pada Kota Medan, Pekanbaru, Bandar Lampung, dan Pagaralam.
 - c. Gempa lemah, yaitu terletak pada Kota Jambi, Palembang, dan Dumai.

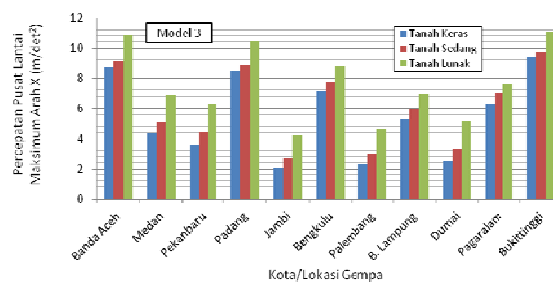
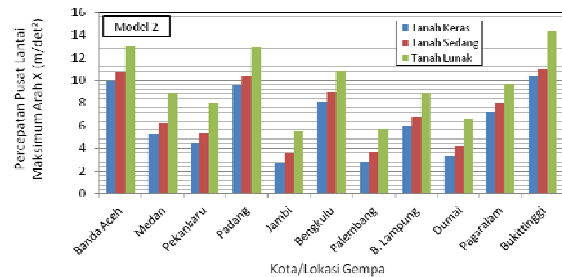
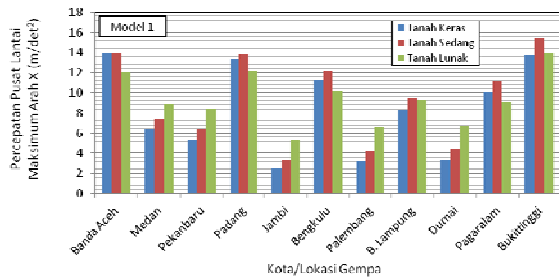
Simpangan Pusat Lantai Maksimum



Kecepatan Pusat Lantai Maksimum



Percepatan Pusat Lantai Maksimum



Gambar 5 Hasil Analisis Spektrum Respons Ragam untuk Respons Maksimum

C.3. Analisis JST

Berdasarkan hasil analisis spektrum respons ragam, maka set data untuk *training* dan *testing* JST dapat ditabulasikan seperti pada Tabel 3 dan Tabel 4. Tabel-tabel tersebut tidak memuat seluruh data yang

digunakan secara lengkap, melainkan memberikan pola penyusunan data yang mencakup seluruh lokasi gempa, kondisi tanah, dan model struktur yang digunakan.

Tabel 3 Set Data untuk *Training* JST

No.	Lokasi Gempa	Parameter Input JST								No.	Lokasi Gempa	Parameter Output JST					
		PGA (g)	S_{DS} (g)	S_{DI} (g)	T_0 (detik)	T_s (detik)	Kondisi Tanah	Tinggi Struktur (m)	Elevasi (m)			Simpangan		Kecepatan		Percepatan	
												Arah X (m)	Arah Y (m)	Arah X (m)	Arah Y (m)	Arah X (m)	Arah Y (m)
1.	B. Aceh	0,621	0,899	0,557	0,124	0,619	0	40,5	4,5	1.	B. Aceh	0,0067	0,0075	0,1262	0,1272	4,1815	3,3948
2.	B. Aceh	0,621	0,899	0,557	0,124	0,619	0	40,5	8,5	2.	B. Aceh	0,0146	0,0161	0,2396	0,2469	5,7762	4,9957
3.	B. Aceh	0,621	0,899	0,557	0,124	0,619	0	40,5	12,5	3.	B. Aceh	0,0237	0,0260	0,3590	0,3713	6,8525	6,1938
4.	B. Aceh	0,621	0,899	0,557	0,124	0,619	0	40,5	16,5	4.	B. Aceh	0,0338	0,0368	0,4831	0,4986	7,5491	6,9656
5.	B. Aceh	0,621	0,899	0,557	0,124	0,619	0	40,5	20,5	5.	B. Aceh	0,0442	0,0480	0,6112	0,6284	8,0290	7,5253
6.	B. Aceh	0,621	0,899	0,557	0,124	0,619	0	40,5	24,5	6.	B. Aceh	0,0548	0,0594	0,7421	0,7601	8,5830	8,0635
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
79.	B. Lampung	0,369	0,561	0,322	0,115	0,573	0	40,5	36,5	79.	B. Lampung	0,0498	0,0525	0,6651	0,6619	7,2028	6,7043
80.	B. Lampung	0,369	0,561	0,322	0,115	0,573	0	40,5	40,5	80.	B. Lampung	0,0549	0,0578	0,7290	0,7266	8,2830	7,7319
81.	B. Aceh	0,621	0,899	0,642	0,143	0,714	1	40,5	4,5	81.	B. Aceh	0,0067	0,0079	0,1251	0,1305	4,0144	3,3161
82.	B. Aceh	0,621	0,899	0,642	0,143	0,714	1	40,5	8,5	82.	B. Aceh	0,0146	0,0169	0,2388	0,2553	5,6358	4,9560
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
1079.	B. Lampung	0,369	0,604	0,587	0,195	0,973	2	80,5	76,5	1079.	B. Lampung	0,2695	0,2852	1,3089	1,3103	6,1607	5,8995
1080.	B. Lampung	0,369	0,604	0,587	0,195	0,973	2	80,5	80,5	1080.	B. Lampung	0,2846	0,3009	1,3838	1,3887	6,9891	6,7307

Catatan: Kondisi tanah: 0 = tanah keras, 1 = tanah sedang, 2 = tanah lunak.

Catatan: Kondisi tanah: 0 = tanah keras, 1 = tanah sedang, 2 = tanah lunak.

Tabel 4 Set Data untuk *Testing* JST

No.	Lokasi Gempa	Parameter Input JST								No.	Lokasi Gempa	Parameter Output JST					
		PGA (g)	S_{DS} (g)	S_{DI} (g)	T_0 (detik)	T_s (detik)	Kondisi Tanah	Tinggi Struktur (m)	Elevasi (m)			Simpangan		Kecepatan		Percepatan	
												Arah X (m)	Arah Y (m)	Arah X (m)	Arah Y (m)	Arah X (m)	Arah Y (m)
1.	Dumai	0,143	0,221	0,22	0,2	0,998	0	40,5	4,5	1.	Dumai	0,0017	0,0019	0,0298	0,0318	0,8948	0,7745
2.	Dumai	0,143	0,221	0,22	0,2	0,998	0	40,5	8,5	2.	Dumai	0,0036	0,0042	0,0576	0,0625	1,2880	1,1839
3.	Dumai	0,143	0,221	0,22	0,2	0,998	0	40,5	12,5	3.	Dumai	0,0058	0,0067	0,0872	0,0949	1,5804	1,5151
4.	Dumai	0,143	0,221	0,22	0,2	0,998	0	40,5	16,5	4.	Dumai	0,0083	0,0095	0,1181	0,1280	1,7813	1,7387
5.	Dumai	0,143	0,221	0,22	0,2	0,998	0	40,5	20,5	5.	Dumai	0,0109	0,0124	0,1498	0,1618	1,9182	1,8948
6.	Dumai	0,143	0,221	0,22	0,2	0,998	0	40,5	24,5	6.	Dumai	0,0135	0,0153	0,1822	0,1960	2,0630	2,0428
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
29.	Bukittinggi	0,611	1,016	0,525	0,103	0,516	0	40,5	36,5	29.	Bukittinggi	0,0808	0,0857	1,0805	1,0815	11,8519	11,0783
30.	Bukittinggi	0,611	1,016	0,525	0,103	0,516	0	40,5	40,5	30.	Bukittinggi	0,0891	0,0944	1,1856	1,1885	13,7926	12,9106
31.	Dumai	0,143	0,29	0,274	0,189	0,945	1	40,5	4,5	31.	Dumai	0,0022	0,0025	0,0396	0,0418	1,2048	1,0245
32.	Dumai	0,143	0,29	0,274	0,189	0,945	1	40,5	8,5	32.	Dumai	0,0047	0,0055	0,0763	0,0821	1,7346	1,5600
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
404.	Bukittinggi	0,611	0,915	0,969	0,212	1,059	2	80,5	76,5	404.	Bukittinggi	0,4448	0,4710	2,1547	2,1579	9,8466	9,4217
405.	Bukittinggi	0,611	0,915	0,969	0,212	1,059	2	80,5	80,5	405.	Bukittinggi	0,4697	0,4970	2,2761	2,2848	11,0813	10,6618

Catatan: Kondisi tanah: 0 = tanah keras, 1 = tanah sedang, 2 = tanah lunak.

Catatan: Kondisi tanah: 0 = tanah keras, 1 = tanah sedang, 2 = tanah lunak.

Setelah mencoba-coba variasi parameter *training* JST, hasil *training* terbaik diperoleh dengan menetapkan nilai beberapa besaran sebagai berikut:

1. Jumlah iterasi : 6000 *epochs*
2. *Learning rate* : 0,05
3. Koefisien momentum : 0
4. Rentang normalisasi variabel adalah 0 – 0,5

Berdasarkan Gambar 6, secara visual JST yang dilatih sudah mampu memprediksi simpangan dan kecepatan lantai dengan baik, yaitu ditunjukkan dengan dekatnya distribusi titik-titik target

vs. prediksi ke garis diagonal (garis *perfect fit*). Namun, JST yang dihasilkan kurang baik dalam memprediksi percepatan.

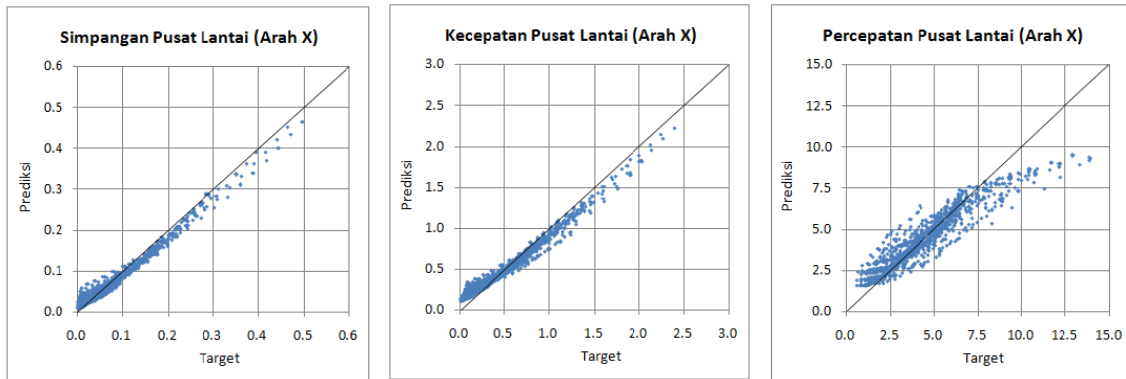
C.3.1. Mean-Squared Errors (MSE)

Proses *training* JST dilakukan hingga iterasi ke-6000 dan diperoleh nilai MSE rata-rata akhir sebesar 0,0003. Sebelum *training*, nilai MSE adalah 0,11229, yaitu 375 kali MSE JST yang sudah di-*training*. Gambar 7 menunjukkan pola penurunan MSE seiring dengan berjalannya proses *training*. Pada iterasi ke-1, nilai MSE turun menjadi 0,0071.

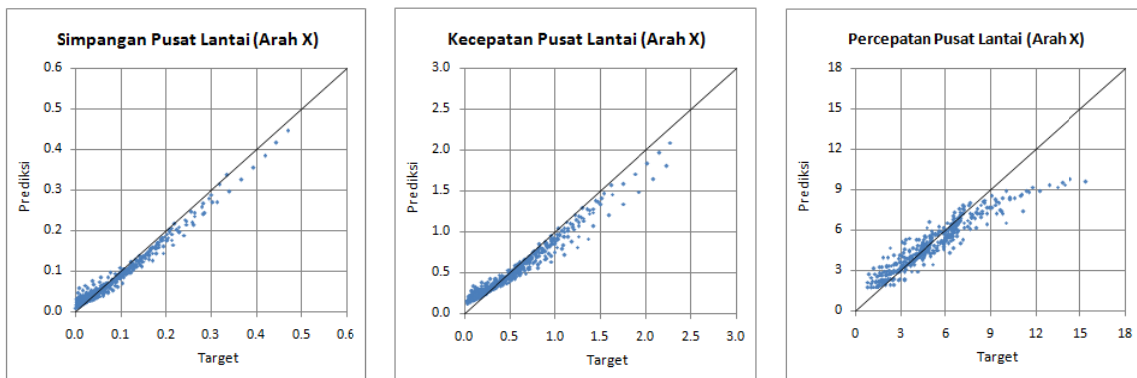
Penurunan nilai MSE paling drastis terjadi pada iterasi ke-10 hingga iterasi ke-200, yaitu dari 0,0060 menjadi 0,0006. Di atas iterasi ke-200 menuju iterasi ke-6000, nilai MSE hanya turun menjadi setengahnya,

yaitu dari 0,0006 menjadi 0,0003. Hal tersebut ditunjukkan oleh kemiringan garis kurva nomor iterasi vs. MSE yang sangat landai (Gambar 7).

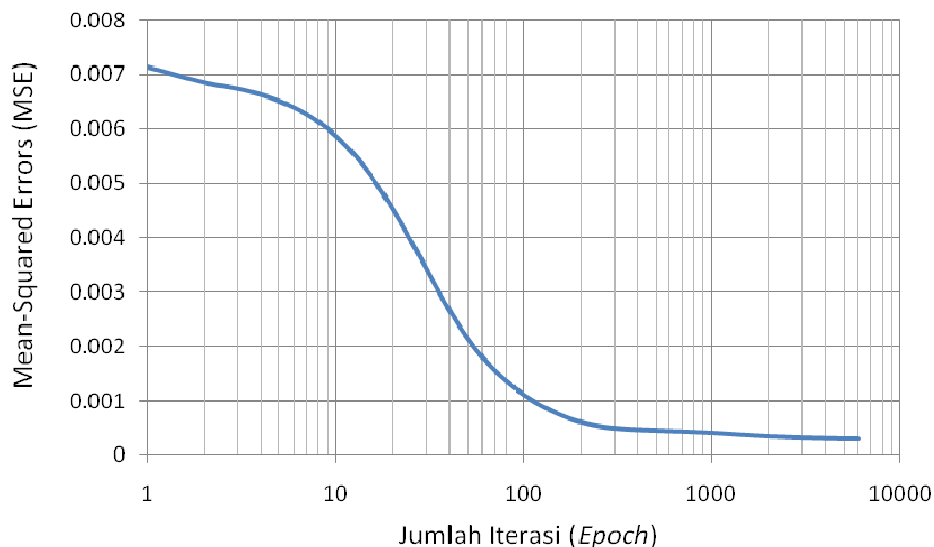
Proses Training



Proses Testing



Gambar 6 *Plot Prediksi vs. Target untuk Proses Training dan Testing*



Gambar 7 Grafik Jumlah Iterasi vs. MSE

C.3.2. Parameter R^2

Parameter R^2 digunakan sebagai kriteria untuk menentukan kecocokan nilai target dengan nilai prediksi JST. Kecocokan nilai target dengan nilai prediksi JST dianggap sempurna jika R^2 bernilai 1. Berdasarkan rincian nilai R^2 yang ditabulasikan dalam Tabel 5, dapat dinyatakan bahwa prediksi JST terhadap simpangan, kecepatan, maupun percepatan pusat lantai sudah sangat baik ($R^2 > 80\%$). Hasil perhitungan R^2 juga konsisten dengan Gambar 6 dimana prediksi simpangan dan kecepatan pusat lantai lebih baik dibandingkan prediksi percepatan pusat lantai.

Tabel 5 Nilai Parameter R^2 untuk Prediksi JST

	Prediksi Simpangan Pusat Lantai	Prediksi Kecepatan Pusat Lantai	Prediksi Percepatan Pusat Lantai
Nilai R^2 untuk <i>Training</i>	96,5%	94,4%	84,9%
Nilai R^2 untuk <i>Testing</i>	95,8%	92,5%	83,6%

D. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian ini, dapat disimpulkan beberapa hal sebagai berikut:

1. Bangunan tinggi memiliki periode getar yang lebih tinggi dibandingkan bangunan yang lebih rendah. Akibatnya, bangunan tinggi mengalami perpindahan yang lebih besar, tetapi percepatannya cenderung lebih kecil.
2. Lokasi gempa di Pulau Sumatera dapat diklasifikasikan berdasarkan kekuatannya terhadap struktur, yaitu:
 - a. Gempa kuat, yaitu terletak pada Kota Banda Aceh, Bukittinggi, Padang, dan Bengkulu.
 - b. Gempa sedang, yaitu terletak pada Kota Medan, Pekanbaru, Bandar Lampung, dan Pagaralam.

- c. Gempa lemah, yaitu terletak pada Kota Jambi, Palembang, dan Dumai.
3. Kondisi tanah lunak menghasilkan simpangan, kecepatan, dan percepatan pusat lantai yang lebih besar dibandingkan tanah keras. Namun, untuk struktur yang sangat kaku (gedung pendek), dapat terjadi hal yang sebaliknya.
 4. Parameter *input* JST adalah parameter gempa (PGA , S_{DS} , S_{DI} , T_0 , T_s), kondisi tanah, tinggi total struktur, dan elevasi pusat lantai yang ditinjau. Parameter *output* JST adalah simpangan pusat lantai, kecepatan pusat lantai, dan percepatan pusat lantai.
 5. Arsitektur JST yang digunakan adalah 3 lapis, yaitu *input layer* (8 neuron), *hidden layer* (24 neuron), dan *output layer* (6 neuron).
 6. Jumlah data untuk *training* JST adalah 1080 set data, sedangkan untuk *testing* JST menggunakan 405 set data.
 7. JST yang sudah di-*training* mampu memprediksi simpangan lantai dan kecepatan lantai dengan baik, yaitu dengan akurasi mencapai 95%. Namun, JST kurang baik dalam memprediksi percepatan lantai (akurasi sekitar 83%).
 8. MSE rerata dari hasil analisis JST adalah 0,0003. Angka tersebut menunjukkan bahwa JST yang dihasilkan dapat memprediksi simpangan, kecepatan, dan percepatan pusat lantai dengan baik.

E. SARAN

1. Parameter *input* dan *output* JST dapat divariasikan lagi untuk memperoleh kinerja yang lebih baik dalam memprediksi *output*.
2. Jumlah lapisan dan neuron pada *hidden layer* dapat divariasikan lagi untuk meningkatkan kemampuan prediksi JST.

3. Ketiga parameter *output* yang dipilih sebelumnya dapat dipisahkan menjadi tiga buah arsitektur JST dibandingkan dengan satu JST untuk memprediksi ketiga parameter *output* sekaligus.

F. DAFTAR PUSTAKA

- Badan Standardisasi Nasional. (2012). SNI 1726-2012: Tata Cara Perencanaan Ketahanan Gempa untuk Struktur Bangunan Gedung dan Non Gedung.
- Basheer, I., & Hajmeer, M. (2000). Artificial neural networks: fundamentals, computing, design, and application. *Journal of Microbiological Methods*, 43(1), 3-31.
- Bojórquez, E., Bojórquez, J., Ruiz, S. E., & Reyes-Salazar, A. (2012). Prediction of inelastic response spectra using artificial neural networks. *Mathematical Problems in Engineering*, 2012.
- Che, Z.-G., Chiang, T.-A., & Che, Z.-H. (2011). Feed-forward neural networks training: A comparison between genetic algorithm and back-propagation learning algorithm. *Int. J. Innov. Comp. Inf. Control*, 7(10), 5839-5851.
- Computer and Structures, Inc. (2013). Modal Analysis. Diakses pada 10 April 2015 dari <https://wiki.csiamerica.com/display/kb/Modal+analysis>.
- Denizer, B. (2008). *Artificial Neural Network Analysis of the Mechanical Properties of Tungsten Fiber/Bulk Metallic Glass Matrix Composites via Neutron Diffraction and Finite Element Modeling*: ProQuest.
- Lee, S. C., & Han, S. W. (2002). Neural-network-based models for generating artificial earthquakes and response spectra. *Computers & structures*, 80(20), 1627-1638.
- Mardiyono, M., Suryanita, R., & Adnan, A. (2012). Intelligent monitoring system on prediction of building damage index using artificial neural network. *TELKOMNIKA Indonesian Journal of Electrical Engineering*, 10(1), 155-164.
- National, G. Ring of Fire. Retrieved February 15th, 2015, from http://education.nationalgeographic.com/education/encyclopedia/ring-fire/?ar_a=1
- Setio, H. D., Widarbo, R., & Rante Patta, P. (2008). Kontrol Vibrasi Aktif Pada Struktur Yang Mengalami Beban Dinamik Dengan Menggunakan Jaringan Saraf Tiruan Dan Algoritma Genetik. *Dinamika Teknik Sipil*, 8(2), 137-148.
- Suryanita, R., & Adnan, A. (2013). *Application of neural networks in bridge health prediction based on acceleration and displacement data domain*. Paper presented at the Proceedings of the International MultiConference of Engineers and Computer Scientists.
- Sutojo, T., Mulyanto, E., & Suhartono, V. (2010). *Kecerdasan Buatan*. Yogyakarta: C.V ANDI OFFSET.
- U.S. Nuclear Regulatory Commission. (2006). Combining Modal Responses and Spatial Components in Seismic Response Analysis.
- Wight, J. K., & MacGregor, J. G. (2012). *Reinforced Concrete Mechanics & Design*. United States of America: Pearson Education, Inc.