

PREDIKSI TINGKAT KERUSAKAN STRUKTUR BANGUNAN BETON BERTULANG BERDASARKAN RIWAYAT WAKTU GEMPA DENGAN METODE JARINGAN SARAF TIRUAN

Muhamad Zulfakar¹⁾, Reni Suryanita²⁾, Enno Yuniarto³⁾

¹ Jurusan Teknik Sipil, Universitas Riau, Jl. Subrantas KM 12.5 Pekanbaru 28293

Email: zulfakarmuhamad@gmail.com

² Jurusan Teknik Sipil, Universitas Riau, Jl. Subrantas KM 12.5 Pekanbaru 28293

Email: reni.suryanita@eng.unri.ac.id

³ Jurusan Teknik Sipil, Universitas Riau, Jl. Subrantas KM 12.5 Pekanbaru 28293

Email: enno_yuniarto@yahoo.com

Abstract

Indonesia is one of the countries that located in quake zone. The potential of earthquake that could cause the damage to the building should be considered into the design of the building. Therefore, one of the solutions to analyzing the structural responses and the damage level promptly and easily when the earthquake occurred is with using Artificial Neural Network (ANN). The building model is a reinforced concrete building with 10 floors and height between floor is 3.6 m. Model building receives a load of earthquake based on earthquake time history of New Zealand, San Francisco, Cape Mendocino, El Centro, Loma Prieta, San Fernando, Kocaeli, Nenana and Danieli. Each time history scaled to 0,5g, 0,75g, and 1,0g. In addition, this earthquake time history also scaled to the PGA of Pekanbaru. Artificial Neural Network (ANN) are designed in 4 architectural models using MATLAB program. Model 1 is ANN with the input of the displacement, velocity and, Model 2 is ANN with the input of displacement, Model 3 is ANN with the input of velocity, and Model 4 is JST with the input of acceleration. Output of the ANN is the damage level of building with the category of Safe, Immediate Occupancy (IO), Life Safety (LS) or in a condition of Collapse Prevention (CP). Artificial neural network trained with 8 data sets of earthquake time history, and the remaining 1 data set of earthquake time history was used for simulation. Artificial neural network models has the prediction rate to predict the damage level between 85%-95%. The results from simulation with the 913 data from time history of Danieli's earthquake for all scales is 93,32% data could be predicted correctly by ANN Model 1. For the Model 2, Model 3, Model 4 in a row could provide prediction correctly up to 92,11%, 91,46% and 87,62%. This indicates that artificial neural networks can predict the damage level of building with average accuracy 90,13%.

Keywords: Artificial neural network, structural response, time history, damage level.

A. Pendahuluan

Indonesia merupakan salah satu negara yang rawan mengalami gempa bumi. Beberapa daerah pernah terjadi gempa dengan kekuatan besar. Diantaranya, Aceh diluluhlantakkan oleh gempa dengan kekuatan 9,3 SR dan sekaligus menyebabkan gelombang tsunami tanggal 26 Desember 2004. Selanjutnya pada tahun 2005 Pulau Nias juga diguncang gempa dengan kekuatan 8,7 SR yang disertai

gelombang tsunami. Pada 27 Mei 2006, Yogyakarta juga diguncang gempa berkekuatan 5,9 SR mengakibatkan kerugian baik materil maupun korban jiwa. Pada 30 September 2009 gempa bumi juga terjadi di Kota Padang yang berkekuatan 7,9 SR berpotensi tsunami. Potensi gempa bumi yang dapat menghancurkan gedung atau bangunan harus diperhitungkan dalam perencanaan gedung itu sendiri. Oleh karena itu, untuk mengantisipasi segala

sesuatu yang terjadi pada bangunan, perlu diketahui respon dan perilaku struktur tersebut saat terjadi gempa.

Beban gempa menjadi aspek penting yang perlu diperhitungkan dalam mendesain bangunan terutama dari segi struktural. Ada 2 pendekatan yang digunakan untuk memperhitungkan beban lateral (gempa bumi) yang bekerja pada suatu struktur, yaitu analisis secara statik ekuivalen dan analisis dinamik (respon spektra atau *time history*). Analisis riwayat waktu (*time history*) sangat cocok digunakan untuk analisis struktur yang tidak beraturan terhadap pengaruh gempa rencana. Mengingat gerakan tanah akibat gempa di suatu lokasi sulit diperkirakan dengan tepat, maka untuk analisis beban gempa dapat didekati dengan gerakan tanah yang disimulasikan. Dalam analisis ini digunakan hasil rekaman akselerogram gempa sebagai input data percepatan gerakan tanah akibat gempa. Dari hasil analisis ini dapat dilihat pengaruh beban gempa per interval waktu selama durasi gempa yang terjadi terhadap struktur bangunan yang ditinjau.

Untuk mengetahui tingkat kerusakan bangunan akibat gempa, dapat digunakan metode kecerdasan buatan (*artificial intelligen*) untuk mendeteksi efek gempa terhadap struktur yang kita tinjau sehingga kerusakan yang ditimbulkan dapat diperkirakan dengan cepat. Oleh karena itu penelitian menggunakan jaringan saraf tiruan ini dilakukan untuk memprediksi tingkat kerusakan struktur berdasarkan efek gempa yang terjadi. Kesehatan struktur secara keseluruhan dapat dipantau secara rutin dan berkala melalui monitoring kesehatan bangunan.

Jaringan saraf tiruan seperti manusia, belajar dari suatu contoh karena mempunyai karakteristik yang adaptif, yaitu dapat belajar dari data-data sebelumnya dan mengenal pola data yang selalu berubah. Selain itu, JST merupakan sistem yang tidak bebas, artinya semua keluaran atau kesimpulan yang ditarik oleh jaringan

didasarkan pada pengalamannya selama mengikuti proses pembelajaran / pelatihan.

Prediksi perilaku dari suatu gedung akibat beban gempa akan sangat mempengaruhi kesiapan dari pemilik dan pengguna gedung apabila terjadi gempa. Dari prediksi ini, dapat ditentukan kondisi dan penanganan yang tepat terhadap gedung yang mengalami kerusakan akibat gempa.

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

1. Bagaimana respon struktur apabila terjadi gempa yaitu perpindahan, kecepatan, percepatan dan tingkat kerusakan struktur.
2. Bagaimana proses pelatihan jaringan saraf tiruan yang terbaik untuk memprediksi perilaku seismik bangunan sesuai dengan data input (perpindahan, kecepatan, dan percepatan) dan output (tingkat kerusakan/*damage level*) yang ada.
3. Bagaimana keakuratan prediksi yang dihasilkan jaringan saraf tiruan untuk output yang sudah ditentukan

B. TINJAUAN PUSTAKA

B.1 Gempa Bumi

Kejadian gempa bumi sangat erat kaitannya dengan gerakan lempeng tektonik. Gempa bumi adalah bergetarnya permukaan tanah karena pelepasan energi secara tiba-tiba akibat dari pecah atau slipnya massa batuan di lapisan kerak bumi.

Gempa bumi bisa diakibatkan oleh adanya pertemuan lempeng benua, tumbukan meteor, keruntuhan tanah di dalam gua maupun aktivitas gunung berapi. Adapun tingkat kekuatan atau intensitas getaran gempa berbeda di setiap kejadiannya, kekuatan getaran gempa tersebut biasanya diukur menggunakan tiga macam skala yaitu:

- a. Skala Richter (R), merupakan besaran energi yang dilepas tepat di pusat gempa.

- b. Skala Modified Mercalli (MM), menunjukkan tingkat kerusakan yang diakibatkan oleh gempa atau intensitas lokal.
- c. Skala gravitasi bumi (g), menggambarkan besarnya percepatan tanah maksimum yang terjadi pada saat gempa.

B.2 Analisis Ragam

Analisis ragam (*modal analysis*) adalah analisis yang menentukan gerak struktur pada kondisi getaran bebas, dimana gerakannya hanya dipengaruhi oleh kondisi awal. Kondisi seperti ini jarang dijumpai namun, analisis ini memberikan sifat dinamis yang paling penting dari struktur yaitu periode natural dan pola perubahan bentuknya (*mode shapes*).

Persyaratan jumlah ragam telah diatur pada Pasal 7.9.1 SNI 1726-2012, dimana jumlah ragam harus cukup untuk mendapatkan partisipasi massa ragam terkombinasi sebesar paling sedikit 90% dari massa aktual dalam masing-masing arah horisontal ortogonal dari respon yang ditinjau oleh model. Apabila belum mencukupi maka, jumlah ragam harus ditambah sampai memenuhi syarat partisipasi massa ragam.

Periode alami struktur menunjukkan tingkat kefleksibelan suatu struktur. Perlunya mengetahui periode alami struktur agar resonansi pada struktur dapat dihindari. Resonansi struktur adalah keadaan dimana frekuensi alami pada struktur sama dengan frekuensi beban luar yang bekerja sehingga mengakibatkan keruntuhan pada struktur.

Menurut SNI 1726-2012 periode pendekatan (T_a) dalam detik, ditentukan dari Persamaan berikut:

$$T_a = C_t (H_n)^x \quad (1)$$

dimana H_n adalah ketinggian struktur diatas dasar sampai ketinggian struktur (m) dan koefisien C_t dan x ditentukan dari Tabel 1.

Periode fundamental (T) tidak boleh melebihi hasil perkalian dari koefisien untuk batasan atas periode yang dihitung

(C_u) dengan periode fundamental pendekatan (T_a). Koefisien C_u ditentukan dari Tabel 2.

Tabel 1 Koefisien C_t dan x

Tipe Struktur	C_t	x
Rangka baja pemikul momen	0,0724	0,8
Rangka beton pemikul momen	0,0466	0,9
Rangka baja dengan bresing eksentris	0,0731	0,75
Rangka baja dengan bresing terkekang terhadap tekuk	0,0731	0,75
Semua sistem struktur lainnya	0,0488	0,75

Sumber : SNI 1726-2012

Tabel 2 Koefisien C_u

Parameter Percepatan Respon Spektral Desain pada Periode 1 Detik, S_{DI}	C_u
$\geq 0,4$	1,4
0,3	1,4
0,2	1,5
0,15	1,6
$\leq 0,1$	1,7

Sumber : SNI 1726-2012

B.3 Analisis Riwayat Waktu

Analisis riwayat waktu adalah suatu cara analisa dinamik struktur, dimana suatu model matematik dari struktur dikenakan riwayat waktu dari gempa-gempa hasil pencatatan atau gempa-gempa tiruan terhadap riwayat waktu dari respon struktur ditentukan.

Data percepatan permukaan tanah (PGA) berupa akselerogram, yaitu grafik perbandingan percepatan permukaan tanah (PGA) terhadap waktu atau durasi saat terjadinya gempa. Data akselerogram ini akan menjadi parameter gempa masukan untuk suatu perancangan atau analisis struktur. Gaya gempa masukan yang digunakan berupa percepatan maksimum permukaan tanah (PGA) dari rekaman gempa sebenarnya. Percepatan tanah puncak harus ditentukan dengan studi spesifik-situs dengan mempertimbangkan pengaruh amplifikasi yang secara spesifik, atau percepatan tanah puncak PGA_M .

$$PGA_M = F_{PGA} PGA \quad (2)$$

Keterangan :

PGA_M = Percepatan tanah puncak yang disesuaikan dengan pengaruh klasifikasi situs

PGA = Percepatan tanah puncak terpetakan

F_{PGA} = Koefisien situs dari Tabel 3

Tabel 3 Koefisien Situs, F_{PGA}

Kelas situs	$PGA \leq 0,1$	$PGA = 0,2$	$PGA = 0,3$	$PGA = 0,4$	$PGA \geq 0,5$
SA	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
SB	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
SC	1,2	1,2	1,1	1,0	1,0
SD	1,6	1,4	1,2	1,1	1,0
SE	2,5	1,7	1,2	0,9	0,9
SF	Lihat pasal 6.9 SNI 1726-2012				

Sumber : SNI 1726-2012

Pasal 11.1.4, SNI-1726-2012, mengenai parameter respon menetapkan setiap gerak tanah dalam analisis harus dikalikan dengan I/R, sesuai konsep desain kapasitas untuk gempa rencana.

Tabel 4 Faktor Keutamaan Gempa (I)

Kategori resiko	Faktor keutamaan gempa (I)
I atau II	1,0
III	1,25
IV	1,5

Sumber : SNI 1726-2012

Tabel 5 Koefisien Modifikasi Respon (R)

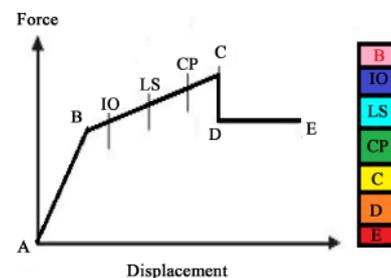
Sistem Penahan Gaya Seismik	Koefisien Modifikasi Respon (R)
Rangka baja dengan bresing eksentrik	8
Rangka baja dengan bresing konsentrik khusus	7
Dinding geser beton bertulang khusus	7
Dinding geser beton bertulang biasa	6

Sumber : SNI 1726-2012

B.4 Level Kinerja

Performance levels berdasarkan FEMA 356 berturut-turut dari respon yang paling kecil, terdiri atas:

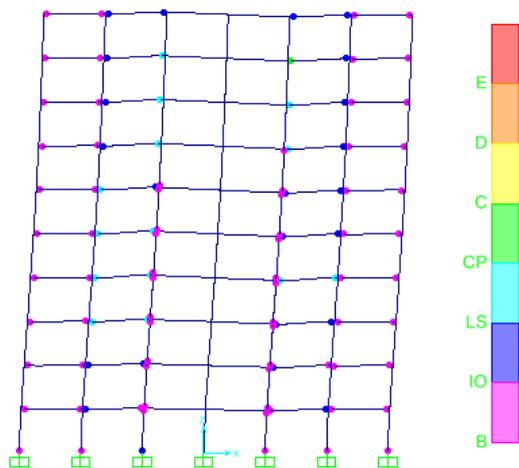
1. *Fully Operational (FO)* adalah kondisi yang mana bangunan tetap dapat beroperasi langsung setelah gempa terjadi (*operational state*). Hal ini terjadi karena elemen struktur utama tidak mengalami kerusakan sama sekali dan elemen non-struktur hanya mengalami kerusakan sangat kecil sehingga tidak menjadi masalah (*damage state*).
2. *Immediate Occupancy (IO)* adalah suatu kondisi yang mana struktur secara umum masih aman untuk kegiatan operasional segera setelah gempa terjadi (*damage state*). Ada kerusakan yang sifatnya minor, namun perbaikannya tidak mengganggu pemakai bangunan. Oleh karena itu bangunan pada level ini juga hampir langsung dapat dipakai setelah kejadian gempa.
3. *Life Safety (LS)* adalah suatu kondisi yang mana struktur bangunan mengalami kerusakan sedang, sehingga diperlukan perbaikan, namun bangunan masih stabil dan mampu melindungi pemakai dengan baik. Bangunan dapat ditempati kembali setelah selesai perbaikan (*operational state*).
4. *Collapse Prevention (CP)* adalah suatu kondisi yang mana struktur bangunan mengalami kerusakan parah. Elemen non-struktur sudah runtuh. Pada *performance level* ini bangunan sudah tidak dapat dipakai (*operational state*).



Gambar 1 Tahapan Keruntuhan Sendi Plastis

Tabel 6 Tingkat Kerusakan Struktur Berdasarkan Terbentuknya Sendi Plastis Pada *Software* Elemen Hingga

Keterangan	Penjelasan
A	Awal Pembebanan, belum ada sendi plastis.
B	Menunjukkan batas linier yang kemudian diikuti terjadinya pelelehan pertama pada struktur, warna merah muda.
IO	<i>Immediate Occupancy</i> , warna biru tua.
LS	<i>Life Safety</i> , warna biru muda.
CP	<i>Collapse Prevention</i> , warna hijau.
C	Batas maksimum gaya geser yang masih mampu ditahan gedung, warna kuning.
D	Terjadi degradasi kekuatan struktur, warna orange.
E	Runtuh, warna merah



Gambar 2 Mekanisme Kemunculan Sendi Plastis Pada Balok dan Kolom

B.5 Jaringan Saraf Tiruan

Pengetahuan mengenai sel saraf biologi didalam otak telah mengilhami pengembangan sistem komputasi yang disebut Jaringan Saraf Tiruan (JST). Arsitektur dan operasi JST bisa

digambarkan dalam bentuk model matematis dan komputasi untuk klasifikasi data, *cluster* dan regresi non-parametrik atau sebagai simulasi dari model saraf biologi. Elemen penting dari paradigma pengolahan informasi tersebut yang didasarkan dan terinspirasi dari sistem saraf biologis, seperti proses informasi pada otak manusia, merupakan struktur dari sistem pengolahannya yang terdiri dari sejumlah elemen pemrosesan yang saling terhubung (*neuron*), yang bekerja serentak untuk memberikan solusi dari permasalahan sesuai dengan tujuan perancangannya.

Pola rangkaian *neuron-neuron* dalam jaringan yang disebut sebagai arsitektur jaringan sangat menentukan keandalan suatu JST. Selain itu, bobot penghubung yang ditentukan oleh algoritma pelatihan dan fungsi aktivasi untuk mengolah masukan yang akan diterima oleh *neuron* juga memiliki peran penting dalam penentuan keandalan JST.

Pelatihan JST dilakukan untuk mengembangkan kemampuan memorisasi dan generalisasi. Kemampuan memorisasi JST adalah kemampuan untuk mengingat dan mengambil secara sempurna pola yang telah dipelajari. Yang dimaksud dengan kemampuan generalisasi adalah kemampuan JST untuk memberikan respon yang dapat diterima dari data dan pola-pola *input* yang serupa (tapi tidak identik) terhadap pola yang sebelumnya sudah dipelajari.

Kemampuan JST ini memungkinkan untuk mendapatkan informasi dari sekumpulan data yang rumit dan menyelesaikan permasalahan yang tidak terstruktur dan sulit didefinisikan. Kemampuan belajar (*self organizing*) membuat JST mampu memilih suatu *input* data ke dalam kateogir yang sudah diklasifikasikan untuk menemukan jawaban terbaik dan menggambarkan objek yang diinginkan secara keseluruhan maupun hanya sebagian data dari objek tersebut.

Kelebihan yang diberikan JST antara lain :

- a. Belajar *adaptive*
Kemampuan untuk mempelajari bagaimana melakukan pekerjaan berdasarkan data yang diberikan untuk pelatihan atau pengalaman awal.
- b. *Self-Organization*
Kemampuan untuk membuat organisasi sendiri atau representasi dari informasi yang diterimanya selama proses pembelajaran.
- c. *Real Time Operation*
Perhitungan JST dapat dilakukan secara paralel sehingga perangkat keras yang dirancang dan diproduksi secara khusus dapat mengambil keuntungan dari kemampuan ini.

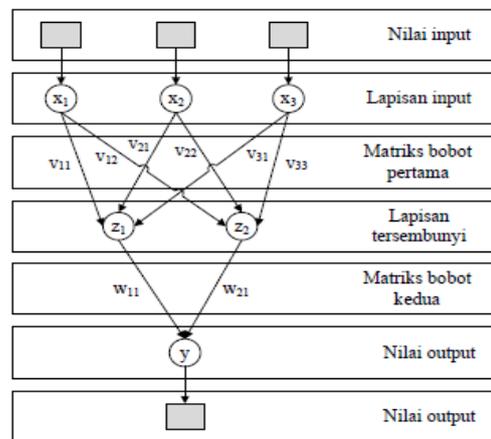
Selain memiliki kelebihan, JST juga mempunyai beberapa kekurangan, antara lain :

- a. Tidak efektif untuk operasi numerik dengan presisi tinggi.
- b. Tidak efisien untuk operasi algoritma aritmatik, operasi logika dan simbolis.
- c. Proses pelatihan akan memerlukan waktu yang lama untuk jumlah data yang banyak.

Baik tidaknya suatu model JST salah satunya ditentukan oleh hubungan antar neuron atau yang biasa disebut sebagai arsitektur jaringan. *Neuron-neuron* tersebut terkumpul dalam lapisan yang disebut *neuron layer*. Lapisan-lapisan penyusun JST dibagi menjadi tiga, yaitu :

- a. Lapisan *Input*
Unit-unit dalam lapisan *input* disebut unit-unit *input* yang bertugas menerima pola *input*-an dari luar yang menggambarkan suatu permasalahan.
- b. Lapisan Tersembunyi
Unit-unit dalam lapisan tersembunyi disebut unit-unit tersembunyi yang nilai *output*-nya tidak dapat diamati secara langsung.
- c. Lapisan *Output*
Unit-unit dalam lapisan *output* disebut unit-unit *output*, yang merupakan solusi JST terhadap suatu permasalahan.

Jaringan dengan lapisan banyak memiliki 3 jenis lapisan, yaitu lapisan *input*, lapisan tersembunyi, dan lapisan *output*. Kelebihan jaringan lapisan banyak adalah dapat menyelesaikan permasalahan yang lebih kompleks dibandingkan dengan jaringan lapisan tunggal. Contoh JST yang menggunakan jaringan lapisan banyak adalah *Madaline*, *Backpropogation*, dan *Neocognitron*.



Gambar 3 JST Lapisan Banyak
(Sutojo et al., 2010)

Menurut Goel (2011) ada 2 kriteria tingkat kesalahan suatu prediksi yang dapat ditentukan untuk mengetahui akurasi prediksi, yaitu :

1. *Correlation Coefficient (R)*

Correlation Coefficient (R) merupakan perbandingan antara hasil prediksi dengan nilai yang sebenarnya. Nilai R dapat dihitung dengan persamaan berikut :

$$R = \frac{\sum xy}{\sqrt{\sum x^2 \sum y^2}} \quad (3)$$

Dengan :

- x = $X - X'$
- y = $Y - Y'$
- X = Nilai pengamatan
- X' = Rata-rata nilai X
- Y = Nilai Prediksi
- Y' = Rata-rata nilai Y

Menurut Mahyudin (2012) koefisien korelasi adalah pengukuran statistik kovarian atau asosiasi antara dua

variabel. Untuk memudahkan melakukan interpretasi mengenai kekuatan hubungan antara dua variabel dibuat kriteria sebagai berikut :

- R = 0 : Tidak ada korelasi
- 0 < R ≤ 0,25 : Korelasi sangat lemah
- 0,25 < R ≤ 0,50 : Korelasi cukup
- 0,50 < R ≤ 0,75 : Korelasi kuat
- 0,75 < R ≤ 0,99 : Korelasi sangat kuat
- R = 1 : Korelasi sempurna

2. Mean Square Error (MSE)

Mean Square Error (MSE) merupakan besarnya tingkat kesalahan hasil prediksi, dimana semakin kecil (mendekati 0) nilai MSE maka hasil prediksi akan semakin akurat. Nilai RMSE dapat dihitung dengan persamaan sebagai berikut :

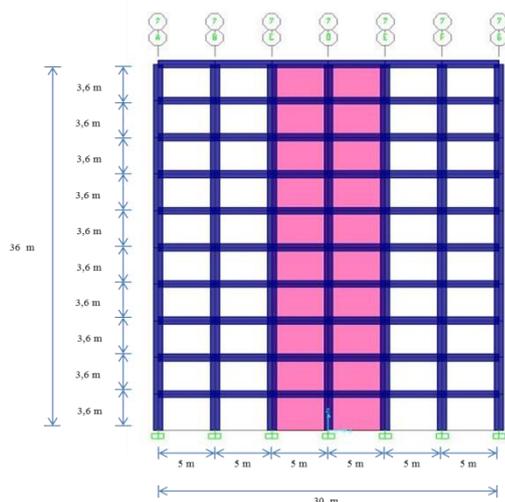
$$MSE = \sqrt{\frac{\sum(X - Y)^2}{n}} \quad (4)$$

Dengan :
n = Jumlah Data

C. METODOLOGI PENELITIAN

C.1 Data Struktur

Struktur gedung yang ditinjau memiliki denah lantai yang sama mulai dari lantai dasar (*base*) hingga lantai atap (*rooftop*).



Gambar 4 Denah Model Gedung 10 Lantai.

Model yang digunakan dalam analisis ini adalah gedung perkantoran 10 lantai, ketinggian antar lantai 3,6 m. Bentuk bangunan beraturan dengan bentang arah X dan Y simetris. Jumlah bentang 6 dan panjang bentang 5 m. Baja tulangan yang digunakan adalah BJTD 40 dengan $f_y = 240$ Mpa dan $f_u = 400$ Mpa

Dimensi elemen struktur yang digunakan adalah sebagai berikut :

1. Balok 70 x 50 cm², $f_c' = 30$ Mpa
2. Kolom 80 x 80 cm², $f_c' = 30$ Mpa
3. Pelat lantai tebal 20 cm, $f_c' = 30$ Mpa
4. Dinding geser tebal 25 cm, $f_c' = 30$ Mpa

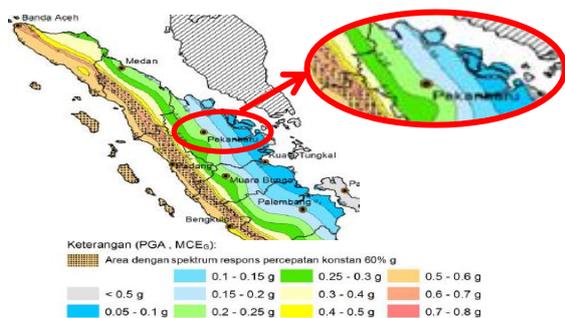
C.2 Data Beban

Penelitian ini bertujuan untuk melihat pengaruh beban gempa terhadap perilaku struktur rencana, sehingga data beban yang digunakan berupa beban mati, beban hidup dan beban gempa. Beban gempa yang digunakan adalah berupa catatan respon riwayat waktu (*time history*). Penyesuaian skala yang digunakan ditentukan berdasarkan standar perencanaan ketahanan gempa Indonesia SNI 1726-2012 dengan kondisi tanah sedang.

Data riwayat waktu yang digunakan terdiri dari 9 data. Dari setiap riwayat waktu tersebut akan diskalakan sesuai dengan daerah pekanbaru dan pada kondisi tanah sedang. Data riwayat waktu tersebut antara lain :

1. New Zealand (PGA = 0,255g)
2. San Fransisco (PGA = 0,095g)
3. Cape Mendocino (PGA = 0,15g)
4. El Centro (PGA = 0,319g)
5. Loma Prieta (PGA = 0,12g)
6. San Fernando (PGA = 0,028g)
7. Kocaely, Turkey (PGA = 0,01g)
8. Nenana (PGA = 0,004g)
9. Daneli, Alaska (PGA = 0,008g)

Setiap data riwayat waktu tersebut akan diskalakan menjadi 0,5g, 0,75g, dan 1,0g. Selain itu, data riwayat waktu itu juga akan diskalakan pada daerah Pekanbaru.



Gambar 5 Nilai Percepatan Puncak Tanah (PGA) untuk Kota Pekanbaru (SNI 1726-2012)

Dari Gambar 5, dapat ditentukan bahwa nilai PGA untuk Kota Pekanbaru adalah 0,214g. Nilai PGA ini akan diskalakan sesuai dengan peraturan SNI 1726-2012. Percepatan tanah puncak harus ditentukan dengan studi spesifik-situs dengan mempertimbangkan pengaruh amplifikasi yang secara spesifik, atau percepatan tanah puncak PGA_M . Sesuai dengan Tabel 3, untuk nilai $PGA = 0,214g$ maka:

$$F_{PGA} = 1,372$$

$$\begin{aligned} PGA_M &= F_{PGA} \cdot PGA \\ &= 1,372 (0,214g) \\ &= 0,294g \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} PGA_{M(Di\ Skalakan)} &= PGA_M (I/R) \\ &= 0,294g (1/7) \\ &= 0,042g \end{aligned}$$

Jadi skala gempa Kota Pekanbaru yang digunakan untuk analisis *time history* adalah 0,042g.

C.3 Tahapan Analisis Riwayat Waktu

Analisis *time history* dilakukan dengan cara memodelkan struktur gedung sesuai dengan data yang akan digunakan ke dalam *software* elemen hingga. Berikut penjelasan tahapan analisis dengan *software* elemen hingga:

1. Memodelkan struktur sesuai dengan data material dan dimensi yang telah ditetapkan. Pemodelan seluruh komponen struktur dimulai dari balok, kolom, pelat lantai, dan dinding geser

dilakukan satu persatu dalam *software* elemen hingga.

2. Memasukkan beban hidup yang akan digunakan.

Tabel 7 Beban Hidup Untuk Gedung

Jenis Beban Hidup	Berat (kg/m ²)
Atap bangunan	100
Lantai rumah tinggal	125
Lantai sekolah, kantor, toko, rumah sakit	250
Lantai ruang olahraga	400

Sumber: PPIUG 1983

Dari Tabel 7 diatas, beban hidup yang bekerja pada gedung perkantoran adalah sebagai berikut:

$$\text{Beban hidup pada lantai} = 250 \text{ kg/m}^2$$

$$\text{Beban hidup pada atap} = 100 \text{ kg/m}^2$$

3. Melakukan analisis ragam akibat berat sendiri.
4. Memperbaiki model yang digunakan apabila langkah 3 tidak terpenuhi.
5. Memasukkan data *time history* sebagai beban gempa sesuai dengan skala 0,5g, 0,75g, 1,0g dan sesuai dengan skala Pekanbaru.
6. Mendefinisikan nilai sendi plastis (*hinges properties*). Penelitian ini menggunakan format *default* yang ada pada *software* elemen hingga dikarenakan *software* tersebut diadopsi berdasarkan FEMA-356.
7. Menganalisis perilaku struktur hasil dari analisis riwayat waktu berupa perpindahan, kecepatan, dan percepatan struktur.
8. Menentukan tingkat kerusakan struktur dan waktu terjadinya kerusakan tersebut berdasarkan analisis riwayat waktu.

C.4 Tahapan Pelatihan JST

Analisis tingkatan kerusakan struktur pada gedung 10 lantai ini menggunakan metode JST dengan jenis arsitektur jaringan lapisan banyak *backpropagation*. Parameter yang dipilih sebagai *input* adalah respon

struktur tersebut yaitu perpindahan, kecepatan dan percepatan struktur. Sementara parameter *output* yang akan diprediksi adalah tingkat kerusakan struktur dalam kategori *Safe*, *Immediate Occupancy* (IO), *Life Safety* (LS) atau dalam kondisi *Collapse Prevention* (CP). Proses prediksi dengan metode jaringan saraf tiruan ini menggunakan program MATLAB. Arsitektur jaringan dan fungsi aktivasi serta jumlah lapisan *hidden layer* dapat ditentukan di program ini.

Dari data analisis riwayat waktu, digunakan data pelatihan JST berupa 8 set data. Sementara 1 set data lainnya digunakan untuk pengujian JST. Arsitektur jaringan menggunakan jaringan lapisan banyak *backpropagation* dengan 1 *input layer* terdiri dari 9 neuron (perpindahan, kecepatan dan percepatan pada arah x, y, dan z), 1 *hidden layer* dengan 10 neuron, dan 1 *output layer* dengan 1 neuron.

Training JST dilakukan sehingga diperoleh kondisi terbaik dengan penetapan beberapa parameter berikut :

- a. Jumlah iterasi adalah 3000 kali.
- b. Nilai koefisien korelasi (R) diatas 85%.

Pengujian JST dilakukan untuk mengetahui tingkat akurasi prediksi JST menggunakan data baru yang belum pernah dilatih pada JST. Hasil pengujian ini akan menunjukkan kemampuan JST untuk memprediksi kategori kerusakan struktur gedung yang ditinjau berdasarkan respon struktur terhadap gempa.

Untuk *output* yang berupa kategori *Safe*, *Immediate Occupancy* (IO), *Life Safety* (LS) atau dalam kondisi *Collapse Prevention* (CP) dimasukkan kedalam MATLAB sebagai data target prediksi. *Safe* yang merupakan keadaan untuk kategori kerusakan mulai dari tahap awal sampai pada tahap B diberi kode 1. *Immediate Occupancy* (IO) diberi kode 2, *Life Safety* (LS) diberi kode 3 dan *Collapse Prevention* (CP) diberi kode 4.

Dalam penelitian ini, jaringan saraf tiruan dirancang dalam beberapa model seperti yang ditunjukkan pada Tabel 8.

Model 1 merupakan jaringan saraf tiruan dengan data *input* berupa perpindahan, kecepatan dan percepatan pada titik yang ditinjau untuk memprediksi *output* yaitu tingkat kerusakan bangunan. Sedangkan model lainnya merupakan jaringan saraf tiruan dengan hanya 1 data *input* saja, yaitu perpindahan, kecepatan ataupun percepatan. Hal ini dilakukan untuk menganalisis tingkat akurasi prediksi dengan *input* yang berbeda-beda.

Tabel 8 Model Jaringan Saraf Tiruan

Pemodelan JST	Data Input
Model 1	Perpindahan, kecepatan dan percepatan
Model 2	Perpindahan
Model 3	Kecepatan
Model 4	Percepatan

D. HASIL DAN PEMBAHASAN

Analisis ragam struktur menjabarkan hasil dari getaran bebas yang terjadi pada model gedung 10 lantai yang ditinjau. Jumlah ragam dipengaruhi oleh terpenuhinya syarat partisipasi massa ragam. Berdasarkan SNI 1726-2012 jumlah ragam yang diambil menghasilkan partisipasi massa ragam melebihi 90% massa aktual arah horizontal tegak lurus dari struktur. Pada penelitian ini jumlah ragam getar yang digunakan sebanyak 12 ragam. Tabel 9 memperlihatkan hasil partisipasi ragam ke-12 untuk ketiga pemodelan.

Tabel 9 Partisipasi Massa Ragam

Partisipasi Massa Ragam (%)		Keterangan
Arah X	Arah Y	
99,681	99,681	Memenuhi

Periode fundamental getaran (*fundamental period of vibration*) adalah periode pada ragam pertama dari hasil analisis ragam karena nilainya yang paling besar. Dalam hal ini SNI 1726-2012 juga memberikan batasan nilai periode fundamental tidak boleh melebihi $C_u T_a$.

Tabel 10 Nilai Periode dan Frekuensi Alami Bangunan

No	Periode (detik)	Frekuensi (siklus/detik)
1	0.873	1.146
2	0.873	1.146
3	0.268	3.728
4	0.268	3.728
5	0.15	6.657
6	0.15	6.657
7	0.109	9.186
8	0.109	9.186
9	0.08	12.572
10	0.08	12.572
11	0.05	20.194
12	0.05	20.194

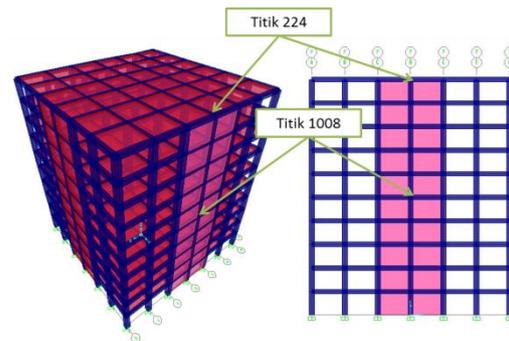
Nilai periode fundamental sesuai dengan SNI 1726-2012 harus kurang dari $C_u T_a$. Dari hasil perhitungan diperoleh nilai $C_u T_a = 1,004$ detik. Dengan nilai periode fundamental struktur sebesar 0,873 detik, maka struktur bangunan telah memenuhi syarat sesuai dengan SNI 1726-2012.

Periode alami struktur bangunan mencerminkan tingkat *flexibility* struktur tersebut. Semakin besar nilai periode fundamental struktur maka semakin besar tingkat *flexibility* struktur tersebut. Dengan nilai periode fundamental struktur yang memenuhi syarat kurang dari $C_u T_a$, maka struktur berada pada kondisi fleksibilitas yang aman.

Analisis Riwayat Waktu

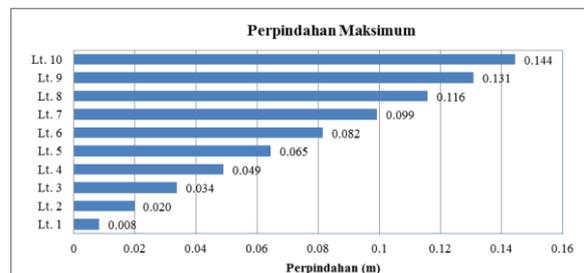
Arah penerapan gaya gempa yang digunakan dalam desain harus merupakan arah yang akan menghasilkan pengaruh beban paling kritis. Untuk mensimulasikan arah pengaruh gempa rencana yang sembarangan terhadap struktur gedung, pengaruh pembebanan gempa dalam arah utama yang ditentukan harus dianggap efektif 100% dan harus dianggap terjadi bersamaan dengan pengaruh pembebanan gempa dalam arah tegak lurus pada arah utama pembebanan tadi, tetapi dengan

efektivitas 30% (SNI 1726-2012, Pasal 7.5.3.a).



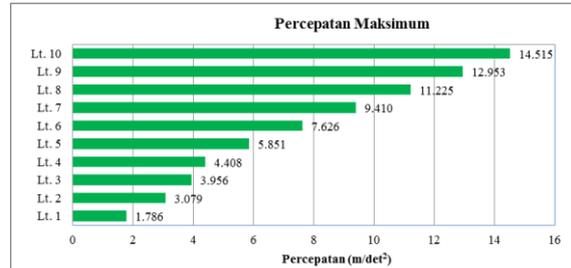
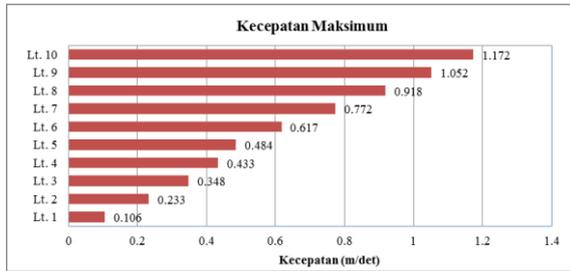
Gambar 6 Denah Gedung dan Titik Tinjauan Analisis Riwayat Waktu

Hasil dari analisis riwayat waktu ini menunjukkan bahwa nilai dari respon struktur yaitu perpindahan mengalami penurunan seiring dengan berkurangnya ketinggian struktur. Perpindahan maksimal pada titik 224 (lantai 10) pada gempa New Zealand 1g adalah 0,144 m (pada $t = 7,45$ detik) sedangkan perpindahan maksimal pada titik 1008 (lantai 5) adalah 0,064 m (pada $t = 7,4$ detik). Hal ini juga berlaku pada kecepatan dan percepatan. Untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada Gambar 7.



Gambar 7 Perpindahan Maksimum (New Zealand 1g)

Kecepatan maksimal pada titik 224 (lantai 10) pada gempa New Zealand 1g adalah 1,172 m/det (pada $t = 7,55$ detik) sedangkan kecepatan maksimal pada titik 1008 (lantai 5) adalah 0,484 m/det (pada $t = 7,7$ detik). Sedangkan untuk percepatan maksimal pada titik 224 (lantai 10) adalah 14,515 m/det^2 (pada $t = 7,5$ detik) sedangkan percepatan maksimal pada titik 1008 (lantai 5) adalah 5,851 m/det^2 (pada $t = 7,5$ detik).



Gambar 8 Kecepatan dan Percepatan Maksimum (New Zealand 1g)

Tabel 11 Waktu Deteksi Kerusakan Struktur

No	Time History	PGA		Waktu Deteksi Kerusakan (detik)				
		Asli	Skala Gempa	B	IO	LS	CP	Akhir Gempa
1	New Zealand	0,255 g $t_{puncak} = 8,54$ det	0,5 g	3,1	7,3	8,5	10,3	10,95
			0,75 g	3,05	6,9	7,45	8,45	9,9
			1 g	3,05	6,5	7,05	7,45	7,7
			Pekanbaru	3,95	N/A	N/A	N/A	30
2	San Fransisco	0,095 g $t_{puncak} = 1,735$ det	0,5 g	0,8	1,75	N/A	N/A	11,25
			0,75 g	0,75	1,5	1,8	1,95	4,7
			1 g	0,65	1,5	1,65	1,8	3
			Pekanbaru	1,25	N/A	N/A	N/A	30
3	Cape Mendocino	0,154 g $t_{puncak} = 9,72$ detik	0,5 g	0,25	8,6	8,95	9,95	10,15
			0,75 g	0,2	8,1	8,55	8,95	9,25
			1 g	0,15	8,0	8,5	8,55	8,65
			Pekanbaru	3,05	N/A	N/A	N/A	30
4	El Centro	0,319 g $t_{puncak} = 2,007$ det	0,5 g	0,15	1,85	2,1	2,15	3,4
			0,75 g	0,15	1,35	1,85	1,9	2,9
			1 g	0,15	1,15	1,8	1,85	2,55
			Pekanbaru	0,95	N/A	N/A	N/A	15
5	Loma Prieta	0,12 g $t_{puncak} = 12,73$ det	0,5 g	0,25	10,8	11,3	11,75	13,1
			0,75 g	0,2	10,4	10,85	11,25	12,45
			1 g	0,2	9,4	10,7	10,8	12
			Pekanbaru	1,45	N/A	N/A	N/A	30
6	San Fernando	0,028 g $t_{puncak} = 13,72$ det	0,5 g	0,15	10,75	11,6	12,05	12,15
			0,75 g	0,1	9,8	10,7	11	12,2
			1 g	0,1	8,75	10	10,75	11,4
			Pekanbaru	0,8	N/A	N/A	N/A	30
7	Kocaeli	0,01 g $t_{puncak} = 17,1$ det	0,5 g	0,05	0,8	2,2	4	14,05
			0,75 g	0,05	0,55	0,8	2	3,4
			1 g	0,05	0,5	0,75	0,85	2,4
			Pekanbaru	0,35	N/A	N/A	N/A	30
8	Nenana	0,004 g $t_{puncak} = 10,675$ det	0,5 g	0,05	0,8	1,8	3,2	6,35
			0,75 g	0,05	0,55	0,85	1,25	3,45
			1 g	0,05	0,45	0,6	0,85	2,1
			Pekanbaru	0,15	22,85	N/A	N/A	30
9	Danieli	0,008 g $t_{puncak} = 21,245$ det	0,5 g	0,15	3,4	3,95	4,75	5,9
			0,75 g	0,15	3	3,45	3,9	4,95
			1 g	0,1	1,25	3,2	3,35	4,6
			Pekanbaru	0,35	N/A	N/A	N/A	30

Keterangan : t_{puncak} = Waktu puncak gempa asli
 N/A = Tingkat kerusakan tidak tercapai

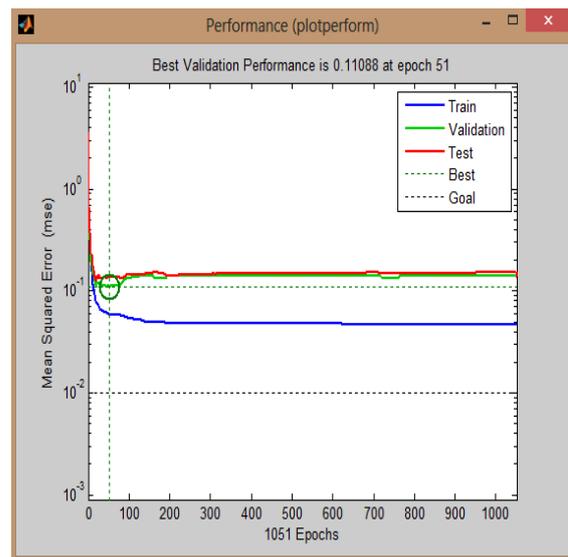
Tabel 11 menunjukkan waktu deteksi untuk tingkat kerusakan struktur. Waktu deteksi ini ditentukan berdasarkan kondisi sendi plastis yang muncul pada analisis riwayat waktu yang dilakukan. Untuk gempa New Zealand dengan skala gempa 0,5g, kondisi B terdeteksi muncul pada $t = 3,1$ detik. Kondisi IO muncul pada $t = 7,3$ detik, kondisi LS muncul pada $t = 8,5$ detik dan kondisi CP muncul pada $t = 10,3$ detik. Analisis riwayat waktu untuk gempa New Zealand skala 0,5g dihentikan pada $t = 10,95$. Dari Tabel 11 dapat disimpulkan bahwa semakin besar skala gempa yang terjadi, maka waktu deteksi dari masing – masing kondisi semakin cepat. Sedangkan untuk gempa yang diskalakan sesuai dengan daerah pekanbaru menunjukkan bahwa gedung tetap berada pada kondisi aman karena tidak ada kondisi yang muncul melebihi kondisi B (*safe*).

Prediksi Dengan Jaringan Saraf Tiruan

Parameter *input* jaringan saraf tiruan yang akan dibuat adalah respon struktur tersebut yaitu perpindahan, kecepatan dan percepatan struktur. Sementara parameter *output* yang akan diprediksi adalah tingkat kerusakan struktur dalam kategori *Safe*, *Immediate Occupancy* (IO), *Life Safety* (LS) atau dalam kondisi *Collapse Prevention* (CP). Dalam penelitian ini, jaringan saraf tiruan dibuat dalam beberapa model. Model 1 merupakan jaringan saraf tiruan dengan data *input* berupa perpindahan, kecepatan dan percepatan pada titik yang ditinjau untuk memprediksi *output* yaitu tingkat kerusakan bangunan. Sedangkan model lainnya merupakan jaringan saraf tiruan dengan hanya 1 data *input* saja, dari perpindahan, kecepatan ataupun percepatan. Hal ini dilakukan untuk menganalisis tingkat akurasi prediksi dengan *input* yang berbeda-beda.

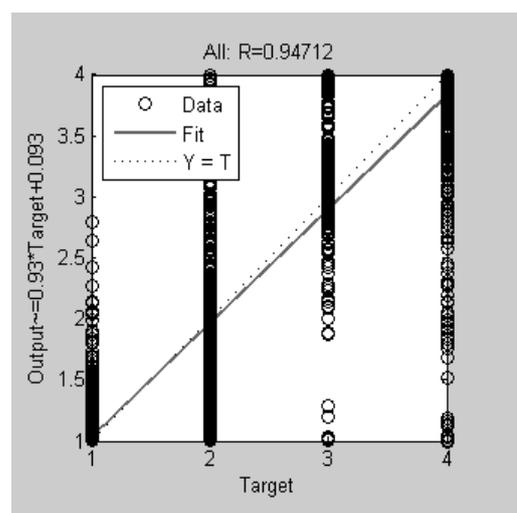
Gambar 9 menunjukkan bahwa untuk JST Model 1 diperoleh nilai *Mean Squared Error* (MSE) terbaik 0,11088. Nilai MSE ini sudah mendekati 0. JST akan

semakin baik dalam memprediksi jika nilai MSE semakin mendekati 0.



Gambar 9 MSE Jaringan Saraf Tiruan Model 1

Dari Gambar 10 diperoleh nilai R untuk JST Model 1 adalah 0,9471. Nilai R yang semakin dekat dengan 1 menunjukkan bahwa hasil prediksi mendekati yang sebenarnya. Maka dapat disimpulkan bahwa hasil prediksi dengan menggunakan jaringan saraf tiruan ini memiliki tingkat akurasi tinggi dengan korelasi yang sangat kuat.



Gambar 10 Grafik R untuk Jaringan Saraf Tiruan Model 1

Hasil untuk model jaringan saraf tiruan lainnya dapat dilihat pada Tabel 12 berikut:

Tabel 12 Kinerja JST dalam Memprediksi Struktur

Model JST	MSE	R
Model 1	0,11088	0,94712
Model 2	0,10924	0,93841
Model 3	0,23407	0,86543
Model 4	0,33196	0,79339

Dari Tabel 12 dapat disimpulkan bahwa model JST dengan tingkat korelasi

terbaik adalah Model 1, dengan data *input* berupa semua respon struktur bangunan yang ditinjau yaitu perpindahan, kecepatan dan percepatan (arah X, Y, dan Z). Sedangkan JST dengan tingkat korelasi terburuk adalah Model 4, dengan data *input* berupa percepatan (arah X, Y, dan Z).

Untuk menguji tingkat akurasi JST dalam memprediksi kinerja bangunan, dilakukan proses simulasi JST menggunakan data riwayat waktu Danieli untuk semua skala dengan jumlah 913 data. Hasil simulasi JST untuk Model 1 ditunjukkan pada Tabel 13.

Tabel 13 Simulasi Prediksi Menggunakan JST Model 1

No.	Riwayat Waktu	Waktu (detik)	Target		Prediksi			Keterangan Hasi Prediksi
1	Danieli 0,5g	0	SAFE	1	1.019	1	SAFE	Benar
2	Danieli 0,5g	0.05	SAFE	1	1.0175	1	SAFE	Benar
3	Danieli 0,5g	0.1	SAFE	1	1.0245	1	SAFE	Benar
4	Danieli 0,5g	0.15	SAFE	1	1.0226	1	SAFE	Benar
5	Danieli 0,5g	0.2	SAFE	1	1.0625	1	SAFE	Benar
6	Danieli 0,5g	0.25	SAFE	1	1.0416	1	SAFE	Benar
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
70	Danieli 0,5g	3.45	IO	2	2.0011	2	IO	Benar
71	Danieli 0,5g	3.5	IO	2	1.9602	2	IO	Benar
72	Danieli 0,5g	3.55	IO	2	1.4088	1	SAFE	Salah
73	Danieli 0,5g	3.6	IO	2	1.4343	1	SAFE	Salah
74	Danieli 0,5g	3.65	IO	2	1.5101	2	IO	Benar
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
85	Danieli 0,5g	4.2	LS	3	3.3426	3	LS	Benar
86	Danieli 0,5g	4.25	LS	3	3.8801	4	CP	Salah
87	Danieli 0,5g	4.3	LS	3	3.8644	4	CP	Salah
88	Danieli 0,5g	4.35	LS	3	3.2352	3	LS	Benar
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
909	Danieli -PKU	29.8	SAFE	1	1.045	1	SAFE	Benar
910	Danieli -PKU	29.85	SAFE	1	1.019	1	SAFE	Benar
911	Danieli -PKU	29.9	SAFE	1	1.014	1	SAFE	Benar
912	Danieli -PKU	29.95	SAFE	1	1.024	1	SAFE	Benar
913	Danieli -PKU	30	SAFE	1	1.042	1	SAFE	Benar

Hasil dari simulasi untuk Model 1 adalah 852 data bisa diprediksi dengan benar, sedangkan 61 data lainnya salah diprediksi oleh JST Model 1. Dari 913 data tersebut, 93,32% data dapat diprediksi dengan benar. Simulasi juga dilakukan pada model JST lainnya. Hasilnya ditunjukkan pada Tabel 4.

Tabel 14 Hasil Simulasi JST

Model JST	Prediksi		Persentase Benar
	Benar	Salah	
Model 1	852	61	93,32%
Model 2	841	72	92,11%
Model 3	835	78	91,46%
Model 4	800	113	87,62%

Dari hasil simulasi, dapat disimpulkan bahwa JST Model 1 adalah yang terbaik dari semua model yang telah dibuat dengan persentase benar 93,32%. Model 1, Model 2 dan Model 3 memiliki persentase benar diatas 90%. Sedangkan untuk Model 4, persentase benar hanya mencapai 87,62%. Hasil simulasi ini menunjukkan bahwa JST dapat memprediksi tingkat kerusakan struktur gedung dengan akurasi rata-rata 90,13%. Dengan tingkat akurasi ini dapat disimpulkan bahwa JST sudah memiliki tingkat korelasi yang tinggi.

E. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian tugas akhir ini dapat disimpulkan beberapa hal sebagai berikut:

1. Perpindahan pada setiap lantai akan meningkat seiring bertambahnya ketinggian struktur bangunan akibat gempa yang terjadi. Hal yang sama juga terjadi untuk kecepatan dan percepatan pada setiap lantai yang akan semakin besar seiring bertambahnya tinggi struktur bangunan.
2. Dari hasil *training* JST diperoleh nilai *MSE* dan *R* kondisi terbaik adalah pada JST Model 1 dengan data *input* berupa respon struktur bangunan yang ditinjau yaitu perpindahan, kecepatan dan percepatan (arah X, Y, dan Z). Hal ini

ditunjukkan nilai *MSE* yang semakin mendekati 0 dan nilai *R* hampir mendekati 1. Sedangkan JST dengan tingkat korelasi terburuk adalah Model 4, dengan data *input* berupa percepatan (arah X, Y, dan Z). Hasil *training* JST berupa nilai *MSE* dan *R* untuk semua model adalah sebagai berikut:

- a. Model 1, $MSE = 0,11088$ dan $R = 0,94712$
 - b. Model 2, $MSE = 0,10924$ dan $R = 0,93841$
 - c. Model 3, $MSE = 0,23407$ dan $R = 0,86543$
 - d. Model 4, $MSE = 0,33196$ dan $R = 0,79339$
3. Dari hasil simulasi JST dengan 913 data dari riwayat waktu gempa Danieli untuk semua skala, 93,32% data dapat diprediksi dengan benar oleh JST Model 1. Sedangkan untuk Model 2, Model 3, dan Model 4 berturut-turut mampu memprediksi dengan benar 92,11%, 91,46%, dan 87,62%.
 4. Dengan rata-rata prediksi mencapai 90,13%, maka JST yang dirancang sudah memiliki tingkat korelasi dan akurasi yang tinggi.

F. SARAN

Adapun beberapa saran apabila dilakukan penelitian lebih lanjut, yaitu sebagai berikut:

1. Parameter *input* dan *output* pada JST dapat divariasikan lagi untuk mendapatkan hasil yang lebih baik.
2. Untuk pengembangan lebih lanjut, bangunan yang ditinjau dapat divariasikan dalam bentuk bangunan tidak beraturan.
3. Hasil dari penelitian ini dapat dikembangkan untuk membuat program yang dapat memprediksi kinerja bangunan dari data *input* berupa perpindahan, kecepatan dan percepatan yang dapat diperoleh dengan memasang sensor pada titik yang akan ditinjau.

G. DAFTAR PUSTAKA

- Dewobroto, W. (2005). Evaluasi Kinerja Struktur Baja Tahan Gempa Dengan Analisa Pushover, 1–28.
- Goel, A. (2011). ANN-Based Approach for Predicting Rating Curve of an Indian River. *ISRN Civil Engineering*, 2011.
- Jingga, H. (2015). Prediksi Respons Struktur Bangunan Berdasarkan Spektra Gempa Indonesia di Pulau Sumatera Menggunakan Jaringan Saraf Tiruan, 2(2), 1–11.
- Mahyudin. (2012). Model Prediksi Liku Kalibrasi Menggunakan Pendekatan Jaringan saraf Tiruan (JST) (Studi Kasus: Sub DAS Siak Hulu), (2011), 1–18.
- Mardiyono, 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. <http://doi.org/10.11591/telkomnika.v10i1.665>
- Pawirodikromo, W. (2012). *Seismologi Teknik & Rekayasa Kegempaan*. Yogyakarta: Pustaka Pelajar.
- PPIUG-1983. (1983). *Peraturan Pembebanan Indonesia Untuk Gedung*. Bandung: Offset.
- Salim, V. (2016). Evaluasi Jaringan Saraf Tiruan Dalam Memprediksi Respons Struktur Gedung Bertingkat Berdasarkan Spektra Gempa di Wilayah Indonesia, 3, 1–10.
- Setio, H. D., Widarbo, R., & Patta, P. R. (2008). Kontrol Vibrasi Aktif Pada Struktur yang Mengalami Beban Dinamik dengan Menggunakan Jaringan Saraf Tiruan dan Algoritma Genetik, 8, 137–148.
- SNI 1726-2012. (2012). *Tata Cara Perencanaan Ketahanan Gempa Untuk Struktur Bangunan Gedung dan Non Gedung*. Jakarta: Badan Standardisasi Nasional.
- SNI 2847-2013. (2013). *Persyaratan Beton Struktural Untuk Bangunan Gedung*. Jakarta: Badan Standardisasi Nasional.
- Suhariyanto. (2013). *Rekayasa Gempa*. Yogyakarta: Kepel Press.
- Suryanita, R. (2015). Prediksi Kerusakan Model Jembatan Beton Bertulang Berdasarkan Mutu Beton dengan Metode Jaringan Saraf Tiruan, 368–375.
- Sutojo, T., Mulyanto, E., & Suhartono, V. (2010). *Kecerdasan Buatan*. Yogyakarta: CV. Andi Offset.
- Wijaya, A. (2016). Prediksi Respons Struktur Jembatan Beton Prategang Berdasarkan Spektrum Gempa Indonesia dengan Metode Jaringan Saraf Tiruan, 1–15.
- Zhao, J., Ivan, J., & DeWolf, J. (1998). Structural Damage Detection Using Artificial Neural Networks. *Journal of Infrastructure Systems*, (September), 1–5. <http://doi.org/10.1109/CIMSA.2012.6269593>