

**PREDIKSI RESPONS STRUKTUR JEMBATAN BETON PRATEGANG
BERDASARKAN SPEKTRUM GEMPA INDONESIA DENGAN METODE
JARINGAN SARAF TIRUAN**

Andi Wijaya¹⁾, Reni Suryanita²⁾, Zulfikar Djauhari²⁾

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

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

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

Email : andy_cuang@yahoo.com

Abstract

The design of prestressed concrete bridge on high-risk seismic zones should consider the responses characteristic of the bridge structure. The structural responses such as displacement, velocity, and acceleration which are based on Indonesia's Seismic Hazard Map, could be predicted by using Artificial Neural Network (ANN) method. In this research, the bridge model was adopted from the real prestressed concrete bridge located in Kecamatan Tapung, Kabupaten Kampar to analyze the bridge structural response and evaluate the potential of ANN to predict the results. The bridge structure was modeled in finite element software, then the response spectrum analysis was performed based on RSNi 2833-201X. For the seismic locations, 34 capital cities and 5 other big cities in Indonesia were chosen. Then by adding 3 soil conditions, 117 data sets were produced. Based on the analysis results, the largest structural response was observed in Palu City with 0,0738 m of displacement, 1,8406 m/sec of velocity, and 24,7666 m/sec² of acceleration. For the ANN analysis, 102 data sets were used in training phase and the remaining 15 data sets were used in testing phase. After the training and testing process, the ANN model has the potency to predict bridge structural response at 93 to 97% of prediction rate and the calculated Mean-Squared Errors (MSE) is as low as 0,00019. This indicates that the ANN model adopted in this research is capable of predicting the structural response of bridge with high accuracy.

Keywords: prestress concrete bridge, structural responses, Artificial Neural Network (ANN), response spectrum

A. PENDAHULUAN

Jembatan adalah struktur bangunan yang berfungsi untuk menghubungkan lintasan yang terputus karena suatu rintangan seperti sungai, lembah, laut, jalan raya, ataupun perlintasan lainnya. Secara umum struktur jembatan terbagi menjadi dua bagian utama, yaitu struktur atas dan struktur bawah. Bagian struktur atas terdiri dari balok utama (*girder*), diafragma, pelat lantai kendaraan, dan trotoar. Bagian dari struktur bawah jembatan pada umumnya meliputi pangkal jembatan (*abutment*), pilar jembatan (*pier*), dan fondasi.

Struktur atas jembatan merupakan bagian yang berfungsi menerima beban

secara langsung, meliputi berat sendiri, beban mati tambahan, beban lalu lintas kendaraan, beban pejalan kaki, dan sebagainya. Sedangkan struktur bawah jembatan berfungsi untuk memikul seluruh beban struktur atas dan beban lain yang ditimbulkan oleh tekanan tanah, aliran air, gesekan pada tumpuan, dan sebagainya. Selain itu, struktur jembatan juga didesain untuk mampu menerima beban lingkungan, salah satunya adalah beban gempa. Hal ini dikarenakan beban gempa dapat mengakibatkan terjadinya perpindahan *joint* dan elemen struktur jembatan yang dapat

menyebabkan terjadinya keruntuhan pada jembatan.

Standar perencanaan ketahanan gempa untuk struktur jembatan diatur dalam SNI 2833-2008, peraturan ini digunakan untuk memperoleh grafik respons spektrum gempa dengan pembagian wilayah gempa menjadi enam zona. Lebih lanjut, SNI 2833-2008 kemudian diperbaharui menjadi RSNI 2833-201X. Pada pembaharuan terhadap peraturan ini, grafik respons spektrum gempa merupakan olahan dari berbagai rumus empiris, sehingga hasil grafik untuk tiap lokasi akan berbeda antara satu dan lainnya. Selain itu, penentuan nilai awal PGA , S_I , dan S_S juga beragam karena nilai tersebut mempunyai *range* yang subjektif.

Penelitian yang mengacu pada RSNI 2833-201X sebelumnya sudah pernah dilakukan, yaitu pada studi kasus jembatan Banjarsari di Kabupaten Probolinggo oleh Elianto (2014). Penelitian ini berupa analisis struktur jembatan terhadap beban lateral. Penulis belum menemukan publikasi penelitian mengenai respons struktur jembatan akibat beban gempa yang telah mengacu pada peraturan RSNI 2833-201X. Sehingga penelitian mengenai respons struktur jembatan terhadap gempa menggunakan RSNI 2833-201X menarik untuk diteliti lebih lanjut.

Dalam kajian ini, dilakukan pemodelan struktur jembatan dengan bantuan *software* elemen hingga. Selanjutnya, hasil respons struktur jembatan yang didapatkan dari *software* elemen hingga akan diprediksi dengan menggunakan Jaringan Saraf Tiruan (JST). JST merupakan salah satu cabang ilmu Kecerdasan Buatan (*Artificial Intelligence*) yang mampu memodelkan hubungan antara variabel kompleks dengan nonlinearitas yang tinggi. Berdasarkan uraian tersebut, maka kajian ini akan difokuskan untuk mengetahui respons struktur jembatan akibat gempa dengan mengacu pada RSNI 2833-201X dan ketelitian JST dalam memprediksi hasil respons struktur jembatan di wilayah Indonesia.

Berdasarkan latar belakang tersebut, maka kajian yang dilakukan adalah sebagai berikut.

1. Respons struktur jembatan di wilayah Indonesia berdasarkan peta gempa Indonesia 2010 dengan metode respons spektrum gempa.
2. Potensi JST dalam memprediksi respons struktur jembatan di wilayah Indonesia berdasarkan respons spektrum gempa Indonesia.

A.1. Jembatan Beton Prategang

Beton prategang adalah kombinasi antara beton, baja, dan kabel tendon. Pada struktur dengan bentang yang panjang, struktur beton bertulang biasanya tidak cukup untuk menahan tegangan lentur, sehingga terjadi retak-retak pada daerah yang mempunyai tegangan lentur, geser, ataupun puntir yang tinggi. Untuk mengatasi keretakan serta keterbatasan yang lain, maka dilakukan penegangan pada struktur beton bertulang.

Keuntungan penggunaan beton prategang diantaranya sebagai berikut.

1. Dapat memikul beban lentur yang lebih besar dari beton bertulang.
2. Dapat dipakai pada bentang yang lebih panjang dengan mengatur defleksinya.
3. Ketahanan geser dan puntir bertambah dengan adanya penegangan.
4. Dapat dipakai pada rekayasa konstruksi tertentu, misalnya konstruksi jembatan segmen.
5. Pada penampang yang diberi penegangan tarik dapat dieliminasi karena besarnya gaya tekan disesuaikan dengan beban yang akan diterima.

Kekurangan struktur beton prategang relatif lebih sedikit dibanding berbagai kelebihanannya, diantaranya sebagai berikut.

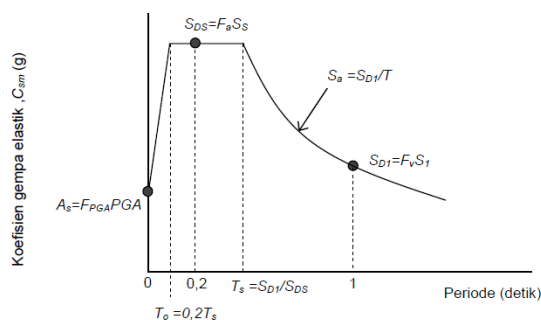
1. Memerlukan peralatan khusus seperti tendon, angkur, mesin penarik kabel, dan lain-lain.
2. Memerlukan keahlian khusus baik dalam perencanaan maupun pelaksanaannya.

Beban-beban yang harus dianalisis dalam suatu perencanaan jembatan terbagi

atas tiga kelompok, yaitu beban permanen, beban lalu lintas, dan beban gempa.

A.2. Respons Spektrum Gempa Indonesia

Respons spektrum adalah grafik yang menyatakan hubungan antara periode getar struktur (T) dengan respons struktur maksimum saat mengalami getaran gempa tertentu. Untuk kebutuhan praktis, maka respons spektrum disederhanakan dalam bentuk grafik (Gambar 1).



Gambar 1 Bentuk Tipikal Respons Spektrum Gempa (RSNI 2833-201X)

Prosedur untuk memperoleh grafik respons spektrum gempa adalah sebagai berikut.

1. Menentukan parameter respons spektrum percepatan gempa berupa percepatan puncak batuan dasar (PGA), parameter respons spektral percepatan gempa untuk periode pendek (S_s), dan parameter respons spektral percepatan gempa untuk periode 1,0 detik (S_1) pada peta gempa Indonesia 2010.
2. Menentukan kelas situs berdasarkan kondisi tanah.
3. Menentukan faktor amplifikasi terkait percepatan yang mewakili getaran periode 0 detik (F_{PGA}), periode 0,2 detik (F_a), dan periode 1,0 detik (F_v).
4. Menghitung koefisien percepatan awal muka tanah untuk periode 0 detik (A_s), periode pendek (S_{DS}), dan periode 1 detik (S_{D1}) dengan Persamaan 1, Persamaan 2, dan Persamaan 3.

$$A_s = F_{PGA} \times PGA \quad (1)$$

$$S_{DS} = F_a \times S_s \quad (2)$$

$$S_{D1} = F_v \times S_1 \quad (3)$$

5. Menghitung nilai periode percepatan puncak awal (T_0) dan periode percepatan puncak akhir (T_s) dengan Persamaan 4 dan Persamaan 5.

$$T_0 = 0,2 T_s \quad (4)$$

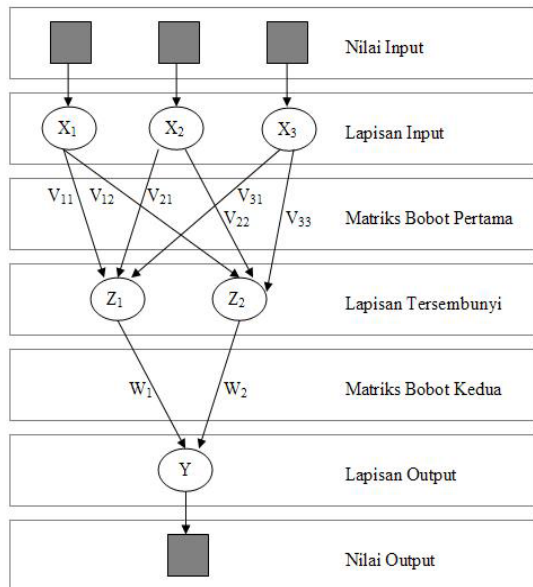
$$T_s = \frac{S_{D1}}{S_{DS}} \quad (5)$$

A.3. Jaringan Saraf Tiruan (JST)

Jaringan Saraf Tiruan (JST) adalah model matematika atau model komputasi yang cara kerjanya merupakan penyederhanaan dari model jaringan biologi otak manusia. Hal ini dikarenakan pada prinsipnya JST merupakan suatu program komputer yang dibuat berdasarkan cara kerja jaringan biologi otak manusia.

Dilihat dari segi fungsi, JST diciptakan untuk merancang suatu komputer, yang dapat difungsikan untuk melakukan proses belajar dari suatu contoh kejadian. Sedangkan dari struktur rancangan, JST merupakan suatu alat penghitung yang ditujukan untuk dapat melakukan sesuatu yang serupa dengan cara kerja jaringan biologi otak manusia. Seperti halnya otak manusia, jaringan saraf juga terdiri dari beberapa neuron yang mempunyai hubungan antara satu dengan lainnya. Neuron-neuron tersebut akan mentransformasikan informasi yang diterima melalui sambungan keluarnya menuju ke neuron-neuron yang lain, hubungan ini dikenal dengan nama bobot (*weight*).

Struktur JST umumnya terdiri dari *input layer*, *hidden layer*, dan *output layer* seperti yang ditampilkan pada Gambar 2. *Input layer* berisi neuron-neuron yang menerima data langsung dari luar. *Hidden layer* menerima sinyal dari *input layer* dan meneruskannya ke *output layer*. *Output layer* berisi neuron-neuron yang merepresentasikan target dan *output* dari model perhitungan. Selisih target dan *output* dari model perhitungan JST adalah tingkat kesalahan JST.



Gambar 2 Arsitektur Jaringan Saraf Tiruan

JST *Backpropagation* merupakan salah satu algoritma yang terdiri dari tiga proses perhitungan, yaitu perhitungan maju (*forward*), perhitungan mundur (*backpropagation*), dan perubahan bobot dan bias. Tingkat kesalahan JST *Backpropagation* dinyatakan dalam *Mean-Squared Errors (MSE)* yang dihitung dengan Persamaan 6.

$$MSE = 0,5(T_i - Y_i)^2 \quad (6)$$

Dengan $T_i - Y_i$ = selisih nilai *output* aktual dengan yang diprediksi JST.

Selain dengan menghitung *MSE*, akurasi dari prediksi JST dapat ditentukan dengan menghitung koefisien determinasi (R^2) pada Persamaan 7. Semakin baik prediksi JST terhadap nilai yang sebenarnya (target), maka nilai R^2 mendekati 1.

$$R^2 = 1 - \left[\frac{\sum_i^n (T_i - Y_i)^2}{\sum_i^n (T_i - T_{avg})^2} \right] \quad (7)$$

Dengan T_i adalah nilai target dan T_{avg} adalah nilai rerata dari seluruh nilai target sebanyak n buah data.

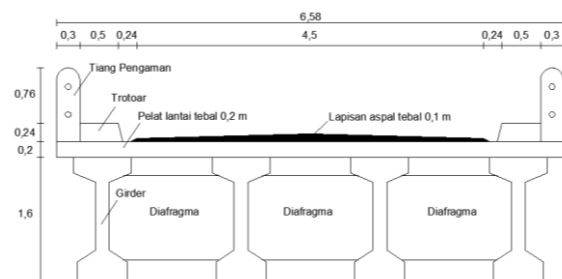
B. METODOLOGI PENELITIAN

Analisis struktur jembatan beton prategang dilakukan menggunakan *software* elemen hingga. Data hasil analisis respons struktur yang ditinjau adalah berupa

perpindahan, kecepatan, dan percepatan. Data ini nantinya akan dijadikan sebagai data *training* dan *testing* JST.

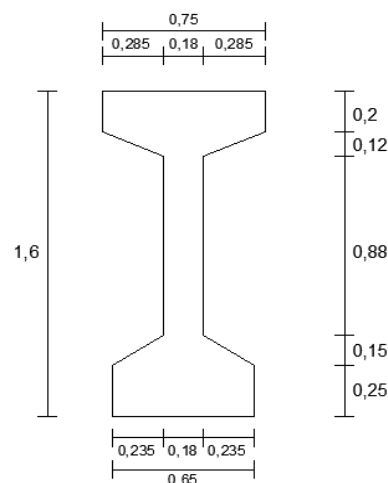
B.1. Data Struktur Jembatan Beton Prategang

Pemodelan struktur jembatan beton prategang mengacu pada studi kasus pembangunan jembatan beton prategang di Kecamatan Tapung, Kabupaten Kampar, Provinsi Riau.



Keterangan: dimensi dalam satuan meter

Gambar 3 Cross Section Jembatan



Keterangan: dimensi dalam satuan meter

Gambar 4 Detail Dimensi Penampang Girder

Data struktur jembatan yang dianalisis adalah sebagai berikut.

1. Tipe konstruksi = balok *girder* prategang tipe I
2. Mutu beton *girder* = K-500
3. Panjang total = 30,6 meter
4. Lebar total = 6,58 meter
5. Jumlah bentang = 1 bentang

6. Jumlah lajur = 1 lajur
7. Lebar lajur = 4,5 meter
8. Jumlah girder = 4 buah
9. Dimensi girder = bervariasi
10. Tebal pelat lantai = 0,2 meter
11. Mutu beton pelat lantai = K-350
12. Tebal diafragma = 0,2 meter
13. Mutu beton diafragma = K-350

B.2. Analisis Respons Struktur Jembatan Menggunakan Metode Elemen Hingga

Analisis respons struktur jembatan dengan metode respons spektrum gempa dilakukan dengan bantuan *software* elemen hingga untuk memodelkan seluruh komponen jembatan beton prategang dalam bentuk tiga dimensi. Prosedur analisis tersebut adalah sebagai berikut.

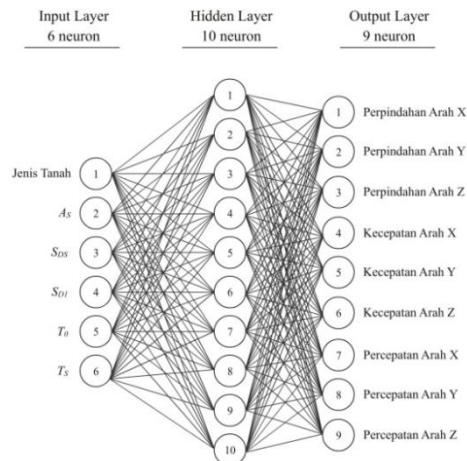
1. Memodelkan struktur jembatan beton prategang sesuai dengan *Detail Engineering Design (DED)* studi kasus yang digunakan. Pemodelan ini dibuat menggunakan *Bridge Modeler Wizard* yang tersedia pada *software* elemen hingga. Pemodelan jembatan menggunakan *Bridge Modeler Wizard* ini harus dilakukan secara bertahap. Tahap pertama, dilakukan pendefinisian panjang jembatan menggunakan menu *layout line*. Kedua, material dan dimensi komponen struktur dibuat menggunakan menu *basic properties*. Ketiga, gelagar, diafragma, dan perletakan menggunakan menu *bridge component properties*. Keempat, tendon prategang pada masing-masing girder menggunakan menu *prestress tendons*. Kelima, beban mati tambahan dan beban lalu lintas menggunakan menu *load cases*. Beban mati tambahan diantaranya beban aspal pada lajur kendaraan, beban trotoar, *kerb*, dan pagar pengaman pada bagian kiri dan kanan lajur kendaraan. Sementara untuk beban lalu lintas diantaranya adalah beban terbagi merata pada lajur kendaraan, beban garis pada bagian tengah jembatan dengan arah tegak

lurus lajur kendaraan, beban truk dengan beban titik pada lajur kendaraan, dan beban pejalan kaki pada trotoar.

2. Melakukan analisis ragam hingga partisipasi massa ragam kumulatif sudah melebihi 90%. Analisis ragam dilakukan hingga ragam ke-200 dengan partisipasi massa ragam kumulatif sudah mencapai 90%. Kemudian, dilakukan pendefinisian fungsi respons spektrum (C_{sm} vs T) berdasarkan grafik respons spektrum untuk 39 kota dengan 3 jenis tanah yang telah ditetapkan sebelumnya. Jumlah dari fungsi respons spektrum tersebut ada sebanyak 117 set data. Kemudian, masing-masing fungsi respons spektrum tersebut dimasukkan kedalam analisis beban gempa respons spektrum menggunakan menu *load cases*. Beban gempa yang dimasukkan adalah berupa percepatan pada arah X dan arah Y.
3. Menjalankan analisis respons spektrum untuk mendapatkan keluaran berupa respons struktur, diantaranya adalah perpindahan, kecepatan, dan percepatan pada tengah bentang struktur jembatan untuk arah X, Y, dan Z. Hasil analisis ini berjumlah 117 kasus beban gempa.

B.3. Analisis Respons Struktur Jembatan Menggunakan Metode JST

Analisis respons struktur jembatan terhadap beban gempa di 34 ibu kota provinsi dan 5 kota besar lainnya di Indonesia dilakukan menggunakan metode JST dengan jenis JST *Backpropagation (BP)*. Parameter yang dipilih sebagai *input* adalah jenis tanah dan 5 parameter beban gempa. Sementara untuk parameter *output* yang diprediksi adalah berupa perpindahan, kecepatan, dan percepatan pada arah X, Y, dan Z. Arsitektur JST dalam penelitian ini terdiri dari 1 *input layer* dengan 6 neuron, 1 *hidden layer* dengan 10 neuron, dan 1 *output layer* dengan 9 neuron yang ditampilkan pada Gambar 5.



Gambar 5 Arsitektur JST untuk Memprediksi Respons Struktur

Hasil analisis respons spektrum struktur jembatan yang diperoleh dengan menggunakan metode elemen hingga, selanjutnya dijadikan sebagai data untuk *training* dan *testing* JST. Dalam kajian ini, untuk *training* JST dipilih 34 ibu kota provinsi, sementara untuk *testing* JST dipilih 5 kota besar lainnya di Indonesia. Selanjutnya masing-masing kota divariasikan dengan tiga kondisi jenis tanah (keras, sedang, dan lunak), sehingga menghasilkan 102 kasus beban gempa untuk *training* dan 15 kasus beban gempa untuk *testing*.

Secara rinci, ibu kota provinsi dan kota besar yang dianalisis diuraikan sebagai berikut.

1. Ibu kota provinsi (*training* JST), yaitu Kota Ambon, Banda Aceh, Bandar Lampung, Bandung, Banjarmasin, Bengkulu, Denpasar, Gorontalo, Jakarta, Jambi, Jayapura, Kendari, Tanjung Pinang, Kupang, Makassar, Mamuju, Manado, Manokwari, Mataram, Medan, Padang, Palangka Raya, Palembang, Palu, Pangkal Pinang, Pekanbaru, Pontianak, Samarinda, Semarang, Serang, Surabaya, Tanjung Selor, Ternate, dan Yogyakarta.
2. Kota besar lainnya (*testing* JST), yaitu Kota Balikpapan, Cirebon, Kolaka, Rengat, dan Timika.

Training JST dilakukan dengan cara melakukan *trial* pada beberapa parameter,

seperti mengubah posisi urutan data, *learning rate*, jumlah *hidden layer*, jumlah neuron pada *hidden layer*, dan rentang normalisasi. *Trial* ini dilakukan hingga didapatkan hasil *training* yang terbaik. Proses *training* dihentikan jika telah dicapai salah satu dari kriteria berikut.

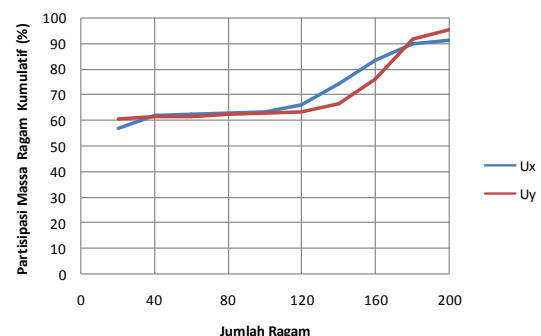
1. Jumlah iterasi sudah melebihi 50000 kali.
2. Nilai *MSE* lebih kecil dari 0,0001.
3. JST sudah mengalami *overtraining*, yaitu ditandai dengan naiknya *MSE* jika iterasi diteruskan.

Kinerja JST akan diperiksa terhadap koefisien determinasi (R^2). Jika nilai R^2 sudah lebih besar dari 80%, maka kinerja JST dianggap mampu memprediksi *output* dengan baik. Kemudian, 15 kasus set data yang telah dikumpulkan sebelumnya akan diuji terhadap JST yang sudah di *training*. Pada proses *testing* akan dianalisis kembali parameter *MSE* dan R^2 . JST dianggap sudah mampu dalam memprediksi respons struktur berupa perpindahan, kecepatan, dan percepatan pada struktur jembatan dengan baik, jika hasil *MSE* dan R^2 pada proses *testing* sudah memenuhi syarat.

C. ANALISIS DAN PEMBAHASAN

C.1. Analisis Respons Spektrum Ragam Jembatan (*Modal Analysis*)

Berdasarkan hasil analisis partisipasi massa ragam pada Gambar 6, diperoleh partisipasi massa ragam kumulatif untuk model struktur jembatan sudah melebihi 90%, hal ini telah sesuai dengan persyaratan RSNI 2833-201X.

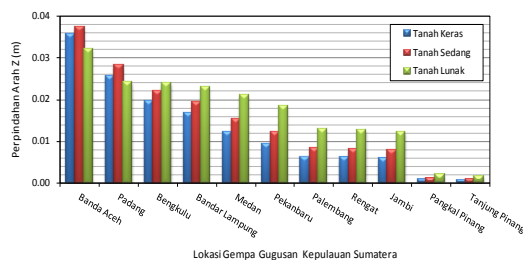


Gambar 6 Partisipasi Massa Ragam Kumulatif

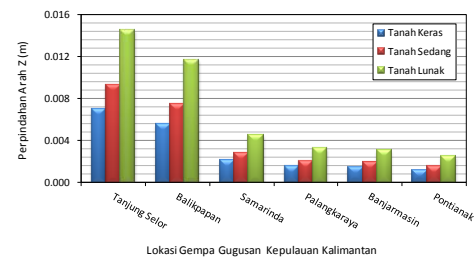
C.2. Analisis Respons Spektrum Gempa Struktur Jembatan

Berdasarkan hasil analisis respons spektrum dapat diuraikan beberapa hal sebagai berikut.

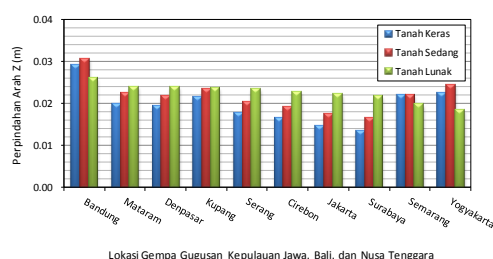
1. Perpindahan, kecepatan, dan percepatan pada tengah bentang struktur jembatan secara berurutan dari yang paling maksimum hingga minimum terjadi pada arah Z, arah Y, dan terakhir arah X. Hal ini disebabkan oleh tingkat kekakuan struktur pada arah Z paling kecil, diikuti oleh arah Y, dan terakhir yang paling besar adalah arah X.
2. Perpindahan, kecepatan, dan percepatan pada tengah bentang struktur jembatan paling maksimum (arah Z) untuk jenis tanah keras, sedang, maupun lunak terjadi di Kota Palu, Sulawesi Tengah, sementara untuk yang terkecil terjadi di Kota Tanjung Pinang, Kepulauan Riau.
3. Pola nilai perpindahan, kecepatan, dan percepatan maksimum mengikuti pola spektrum permukaan tanah puncak (S_{DS}), semakin besar S_{DS} untuk suatu jenis tanah, menyebabkan nilai perpindahan, kecepatan, dan percepatan juga akan semakin besar. Hal ini dikarenakan model struktur jembatan memiliki periode getar yang relatif rendah ($\leq 0,269$ detik), maka hampir seluruh ragam utama akan dikenakan percepatan konstan sebesar S_{DS} , dengan nilai S_{DS} berbeda untuk tiap lokasi dan jenis tanah. Oleh karena itu, nilai perpindahan, kecepatan, dan percepatan maksimum untuk suatu lokasi dapat terjadi pada jenis tanah keras, sedang, ataupun lunak..
4. Urutan perpindahan, kecepatan, dan percepatan (arah Z dan tanah lunak) pada tengah bentang struktur jembatan untuk lokasi kota di Indonesia berdasarkan gugusan kepulauan, dari yang paling maksimum hingga minimum adalah sebagai berikut.
 - a. Sumatera: Banda Aceh, Padang, Bengkulu, Bandar Lampung, Medan, Pekanbaru, Palembang, Rengat, Jambi, Pangkal Pinang, dan Tanjung Pinang.
 - b. Jawa, Bali, dan Nusa Tenggara: Bandung, Mataram, Denpasar, Kupang, Serang, Cirebon, Jakarta, Surabaya, Semarang, dan Yogyakarta.
 - c. Kalimantan: Tanjung Selor, Balikpapan, Samarinda, Palangkaraya, Banjarmasin, dan Pontianak.
 - d. Sulawesi: Palu, Mamuju, Gorontalo, Kendari, Manado, Kolaka, dan Makassar.
 - e. Maluku dan Papua: Manokwari, Jayapura, Timika, Ambon, dan Ternate.



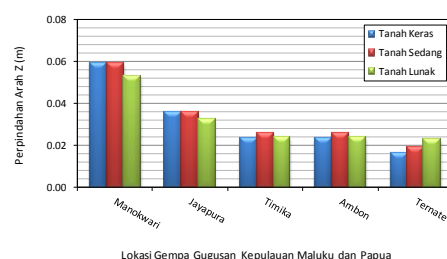
(a)



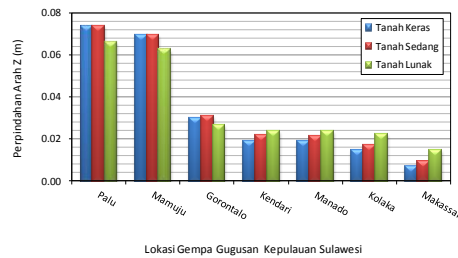
(b)



(c)

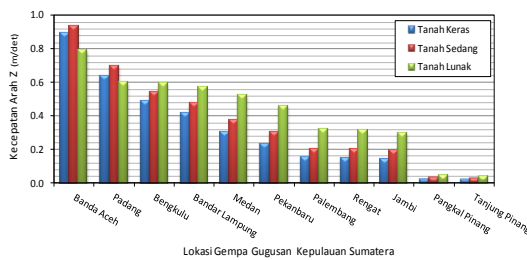


(d)

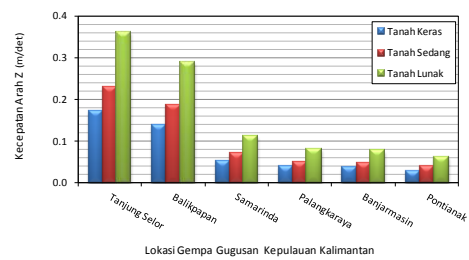


(e)

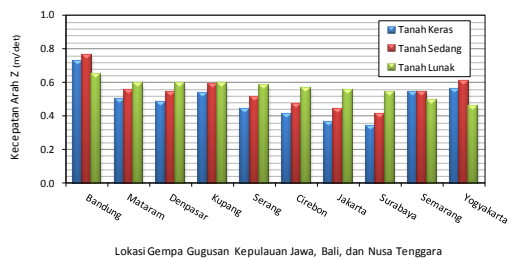
Gambar 7 Perpindahan Pada Tengah Bentang Jembatan Arah Z Berdasarkan Gugusan Kepulauan. (a) Sumatera, (b) Kalimantan, (c) Jawa, Bali, dan Nusa Tenggara, (d) Maluku dan Papua, (e) Sulawesi



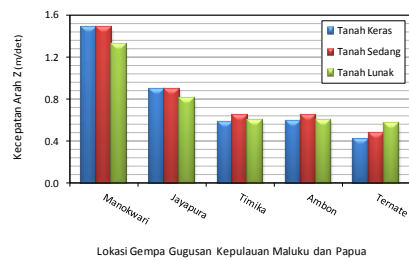
(a)



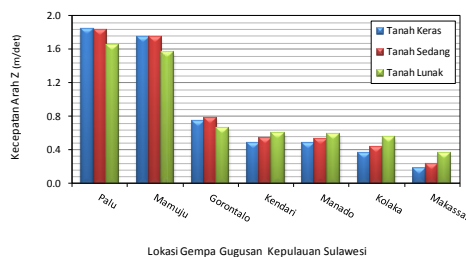
(b)



(c)

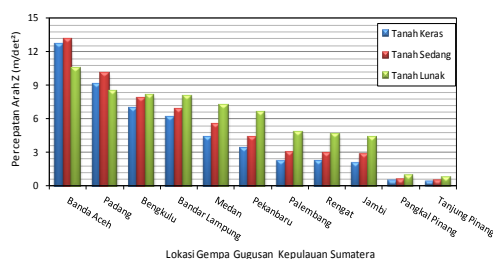


(d)

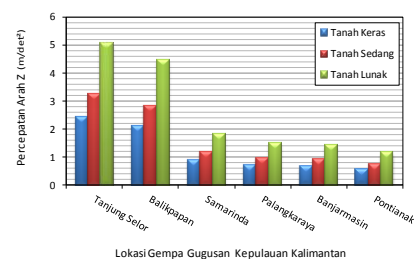


(e)

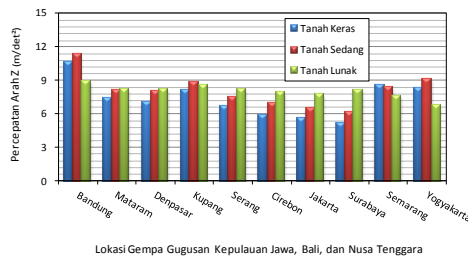
Gambar 8 Kecepatan Pada Tengah Bentang Jembatan Arah Z Berdasarkan Gugusan Kepulauan. (a) Sumatera, (b) Kalimantan, (c) Jawa, Bali, dan Nusa Tenggara, (d) Maluku dan Papua, (e) Sulawesi



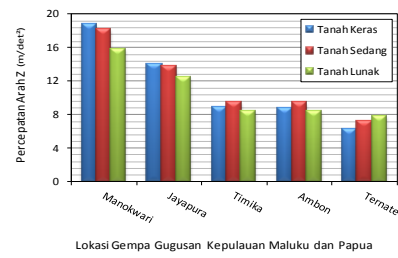
(a)



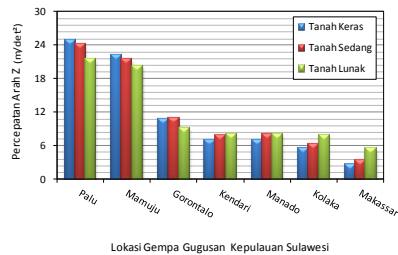
(b)



(c)



(d)



(e)

Gambar 9 Percepatan Pada Tengah Bentang Jembatan Arah Z Berdasarkan Gugusan Kepulauan. (a) Sumatera, (b) Kalimantan, (c) Jawa, Bali, dan Nusa Tenggara, (d) Maluku dan Papua, (e) Sulawesi

C.3. Prediksi Respons Struktur Jembatan Menggunakan Metode JST

Parameter *input* yang dipilih dalam penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Jenis tanah, yaitu diberi kode 1 untuk tanah keras, 2 untuk tanah sedang, dan 3 untuk tanah lunak.
2. Koefisien percepatan awal muka tanah (A_S).
3. Spektrum permukaan tanah pada periode pendek (S_{DS}).
4. Spektrum permukaan tanah pada periode 1,0 detik (S_{D1}).
5. Periode percepatan puncak awal (T_0).

6. Periode percepatan puncak akhir (T_s).

Parameter *output* dalam penelitian ini adalah perpindahan, kecepatan, dan percepatan pada arah X, Y, dan Z.

Berdasarkan hasil analisis respons spektrum, data untuk *training* dan *testing* JST dapat ditabulasikan seperti pada Tabel 1 dan Tabel 2. Tabel-tabel tersebut tidak memuat seluruh data yang digunakan, melainkan memberikan pola penyusunan data yang mencakup seluruh lokasi gempa dan kondisi jenis tanah yang digunakan. Penyusunan data diurutkan dari risiko gempa terkecil hingga terbesar.

Tabel 1 Set Data untuk *Training* JST

No	Lokasi	Parameter Input						No	Lokasi	Parameter Output								
		Jenis Tanah	As (g)	S _{DS} (g)	S _{D1} (g)	T _s (detik)	T ₀ (detik)			Perpindahan (m)			Kecepatan (m/det)			Percepatan (m/det ²)		
										Arah X	Arah Y	Arah Z	Arah X	Arah Y	Arah Z	Arah X	Arah Y	Arah Z
1	Tanjung Pinang	1	0.0300	0.0300	0.0884	2.9467	0.5893	1	Tanjung Pinang	0.0002	0.0003	0.0008	0.0104	0.0097	0.0199	0.244	0.284	0.381
2	Tanjung Pinang	2	0.0400	0.0400	0.1248	3.1200	0.6240	2	Tanjung Pinang	0.0002	0.0005	0.0011	0.0139	0.0129	0.0266	0.325	0.379	0.507
3	Tanjung Pinang	3	0.0625	0.0625	0.1820	2.9120	0.5824	3	Tanjung Pinang	0.0003	0.0007	0.0017	0.0218	0.0203	0.0419	0.510	0.599	0.797
4	Pangkal Pinang	1	0.0360	0.0360	0.0935	2.5972	0.5194	4	Pangkal Pinang	0.0002	0.0004	0.0010	0.0125	0.0116	0.0239	0.295	0.343	0.459
5	Pangkal Pinang	2	0.0480	0.0480	0.1320	2.7500	0.5500	5	Pangkal Pinang	0.0003	0.0005	0.0013	0.0166	0.0155	0.0319	0.390	0.442	0.603
6	Pangkal Pinang	3	0.0750	0.0750	0.1925	2.5667	0.5133	6	Pangkal Pinang	0.0004	0.0008	0.0020	0.0260	0.0242	0.0499	0.609	0.707	0.950
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
91	Banda Aceh	1	0.4500	1.3500	0.7150	0.5296	0.1059	91	Banda Aceh	0.0070	0.0152	0.0356	0.3215	0.4341	0.8935	6.793	9.324	12.638
92	Banda Aceh	2	0.4725	1.4175	0.8250	0.5820	0.1164	92	Banda Aceh	0.0074	0.0160	0.0374	0.3266	0.4552	0.9356	6.853	9.700	13.160
93	Banda Aceh	3	0.4050	1.2150	1.3200	1.0864	0.2173	93	Banda Aceh	0.0063	0.0136	0.0320	0.2410	0.3876	0.7940	4.860	6.834	10.471
94	Manokwari	1	0.9500	2.2500	1.2350	0.5489	0.1098	94	Manokwari	0.0118	0.0253	0.0594	0.5609	0.7233	1.4883	12.052	16.186	18.735
95	Manokwari	2	0.9500	2.2500	1.4250	0.6333	0.1267	95	Manokwari	0.0117	0.0253	0.0593	0.5389	0.7217	1.4828	11.491	15.422	18.231
96	Manokwari	3	0.8550	2.0250	2.2800	1.1259	0.2252	96	Manokwari	0.0105	0.0228	0.0533	0.4388	0.6467	1.3256	9.178	12.431	15.818
97	Mamuju	1	1.3000	2.6500	2.0800	0.7849	0.1570	97	Mamuju	0.0138	0.0298	0.0698	0.6383	0.8486	1.7419	13.713	18.182	22.176
98	Mamuju	2	1.3000	2.6500	2.4000	0.9057	0.1811	98	Mamuju	0.0137	0.0298	0.0698	0.6225	0.8476	1.7389	13.374	17.527	21.483
99	Mamuju	3	1.1700	2.3850	3.8400	1.6101	0.3220	99	Mamuju	0.0124	0.0268	0.0628	0.5515	0.7623	1.5635	11.774	15.396	20.236
100	Palu	1	1.4000	2.8000	2.2100	0.7893	0.1579	100	Palu	0.0146	0.0315	0.0738	0.6790	0.8967	1.8406	14.661	19.433	24.767
101	Palu	2	1.4000	2.8000	2.5500	0.9107	0.1821	101	Palu	0.0145	0.0315	0.0738	0.6626	0.8957	1.8376	14.318	18.654	24.192
102	Palu	3	1.2600	2.5200	4.0800	1.6190	0.3238	102	Palu	0.0131	0.0283	0.0664	0.5878	0.8056	1.6523	12.650	16.536	21.528

Tabel 2 Set Data untuk *Testing* JST

No	Lokasi	Parameter Input						No	Lokasi	Parameter Output								
		Jenis Tanah	As (g)	S_{DS} (g)	S_{D1} (g)	T_s (detik)	T_0 (detik)			Perpindahan (m)		Kecepatan (m/det)		Percepatan (m/det ²)				
										Arah X	Arah Y	Arah Z	Arah X	Arah Y	Arah Z	Arah X	Arah Y	Arah Z
1	Rengat	1	0.1380	0.2292	0.3117	1.3601	0.2720	1	Rengat	0.0012	0.0026	0.0060	0.0586	0.0733	0.1505	1.2840	1.6620	2.2712
2	Rengat	2	0.1806	0.3056	0.4329	1.4166	0.2833	2	Rengat	0.0016	0.0034	0.0081	0.0775	0.0979	0.2010	1.6939	2.1817	2.9306
3	Rengat	3	0.2737	0.4775	0.6392	1.3386	0.2677	3	Rengat	0.0025	0.0054	0.0126	0.1191	0.1530	0.3139	2.6088	3.4261	4.6796
4	Cirebon	1	0.2902	0.6198	0.3914	0.6314	0.1263	4	Cirebon	0.0032	0.0070	0.0163	0.1536	0.1990	0.4089	3.3121	4.4677	5.8969
5	Cirebon	2	0.3274	0.7197	0.4792	0.6658	0.1332	5	Cirebon	0.0037	0.0081	0.0190	0.1744	0.2309	0.4742	3.7444	5.0662	6.9954
6	Cirebon	3	0.3631	0.8632	0.7560	0.8758	0.1752	6	Cirebon	0.0045	0.0097	0.0227	0.1915	0.2759	0.5658	4.0359	5.5161	7.8935
7	Balikpapan	1	0.1164	0.2112	0.1428	0.6761	0.1352	7	Balikpapan	0.0011	0.0024	0.0056	0.0547	0.0677	0.1391	1.1983	1.5497	2.1086
8	Balikpapan	2	0.1552	0.2816	0.2016	0.7159	0.1432	8	Balikpapan	0.0015	0.0032	0.0074	0.0724	0.0904	0.1858	1.5832	2.0489	2.8375
9	Balikpapan	3	0.2425	0.4400	0.2940	0.6682	0.1336	9	Balikpapan	0.0023	0.0049	0.0116	0.1145	0.1412	0.2902	2.5098	3.2734	4.4530
10	Kolaka	1	0.2577	0.5544	0.3031	0.5466	0.1093	10	Kolaka	0.0029	0.0062	0.0146	0.1422	0.1781	0.3666	3.0818	4.1225	5.5469
11	Kolaka	2	0.2974	0.6608	0.3850	0.5826	0.1165	11	Kolaka	0.0035	0.0074	0.0174	0.1650	0.2123	0.4366	3.5560	4.7429	6.3866
12	Kolaka	3	0.3510	0.8416	0.6084	0.7229	0.1446	12	Kolaka	0.0044	0.0095	0.0222	0.1942	0.2696	0.5535	4.1206	5.6553	7.8579
13	Timika	1	0.4740	0.8952	0.6285	0.7021	0.1404	13	Timika	0.0047	0.0101	0.0236	0.2270	0.2870	0.5896	4.9444	6.4463	8.8421
14	Timika	2	0.4863	0.9794	0.7233	0.7385	0.1477	14	Timika	0.0051	0.0110	0.0258	0.2397	0.3137	0.6441	5.1877	6.8357	9.5396
15	Timika	3	0.4266	0.9174	1.1376	1.2400	0.2480	15	Timika	0.0047	0.0103	0.0242	0.2072	0.2930	0.6008	4.4116	5.8243	8.4555

Setelah dilakukan proses *trial* sebanyak kurang lebih 150 kali terhadap variasi parameter *training* JST, diperoleh hasil *training* terbaik dengan jumlah iterasi sebanyak 50000 *epochs*, koefisien *learning rate* sebesar 0,05, rentang normalisasi

variabel maksimum hingga minimum sebesar 0 – 0,5, dan 1 *hidden layer* dengan jumlah neuron sebanyak 10 neuron.

Hasil prediksi JST pada tahap *training* dan *testing* dapat dilihat pada Tabel 3 dan Tabel 4.

Tabel 3 Hasil Prediksi JST pada Tahap *Training*

No	Perpindahan (m)						No	Kecepatan (m/det)					
	Arah X		Arah Y		Arah Z			Arah X		Arah Y		Arah Z	
	Target	Output	Target	Output	Target	Output		Target	Output	Target	Output	Target	Output
1	0,0002	0,0007	0,0003	0,0015	0,0008	0,0036	1	0,0104	0,0342	0,0097	0,0441	0,0199	0,0906
2	0,0002	0,0007	0,0005	0,0015	0,0011	0,0036	2	0,0139	0,0336	0,0129	0,0432	0,0266	0,0887
3	0,0003	0,0008	0,0007	0,0017	0,0017	0,0039	3	0,0218	0,0369	0,0203	0,0479	0,0419	0,0984
4	0,0002	0,0008	0,0004	0,0017	0,0010	0,0040	4	0,0125	0,0376	0,0116	0,0489	0,0239	0,1004
5	0,0003	0,0008	0,0005	0,0017	0,0013	0,0040	5	0,0166	0,0371	0,0155	0,0483	0,0319	0,0991
6	0,0004	0,0009	0,0008	0,0019	0,0020	0,0044	6	0,0260	0,0411	0,0242	0,0539	0,0499	0,1106
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
91	0,0070	0,0060	0,0152	0,0129	0,0356	0,0302	91	0,3215	0,2727	0,4341	0,3664	0,8935	0,7521
92	0,0074	0,0063	0,0160	0,0137	0,0374	0,0321	92	0,3266	0,2901	0,4552	0,3894	0,9356	0,7994
93	0,0063	0,0058	0,0136	0,0126	0,0320	0,0296	93	0,2410	0,2673	0,3876	0,3592	0,7940	0,7374
94	0,0118	0,0105	0,0253	0,0227	0,0594	0,0533	94	0,5609	0,4874	0,7233	0,6478	1,4883	1,3298
95	0,0117	0,0107	0,0253	0,0231	0,0593	0,0541	95	0,5389	0,4947	0,7217	0,6572	1,4828	1,3491
96	0,0105	0,0107	0,0228	0,0231	0,0533	0,0542	96	0,4388	0,4952	0,6467	0,6580	1,3256	1,3506
97	0,0138	0,0125	0,0298	0,0269	0,0698	0,0631	97	0,6383	0,5791	0,8486	0,7670	1,7419	1,5744
98	0,0137	0,0126	0,0298	0,0273	0,0698	0,0639	98	0,6225	0,5867	0,8476	0,7769	1,7389	1,5947
99	0,0124	0,0128	0,0268	0,0277	0,0628	0,0650	99	0,5515	0,5967	0,7623	0,7898	1,5635	1,6213
100	0,0146	0,0128	0,0315	0,0277	0,0738	0,0650	100	0,6790	0,5962	0,8967	0,7893	1,8406	1,6201
101	0,0145	0,0130	0,0315	0,0280	0,0738	0,0657	101	0,6626	0,6031	0,8957	0,7982	1,8376	1,6384
102	0,0131	0,0132	0,0283	0,0284	0,0664	0,0667	102	0,5878	0,6125	0,8056	0,8104	1,6523	1,6634

No	Percepatan (m/det ²)					
	Arah X		Arah Y		Arah Z	
	Target	Output	Target	Output	Target	Output
1	0,2443	0,7429	0,2842	0,9674	0,3809	1,4770
2	0,3250	0,7290	0,3789	0,9486	0,5066	1,4487
3	0,5105	0,7995	0,5994	1,0444	0,7971	1,5923
4	0,2951	0,8142	0,3425	1,0643	0,4586	1,6220
5	0,3895	0,8047	0,4423	1,0513	0,6027	1,6026
6	0,6093	0,8891	0,7072	1,1659	0,9498	1,7726
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
91	6,7934	5,8518	9,3237	7,7997	12,6380	10,6056
92	6,8527	6,2284	9,7005	8,2992	13,1602	11,2329
93	4,8600	5,7346	6,8344	7,6443	10,4706	10,4097
94	12,0519	10,5009	16,1857	13,9485	18,7348	18,1717
95	11,4908	10,6582	15,4219	14,1561	18,2308	18,4228
96	9,1784	10,6703	12,4312	14,1721	15,8176	18,4421
97	13,7131	12,4911	18,1817	16,5733	22,1764	21,3356
98	13,3740	12,6558	17,5266	16,7904	21,4835	21,5964
99	11,7738	12,8726	15,3956	17,0761	20,2360	21,9395
100	14,6613	12,8630	19,4335	17,0634	24,7667	21,9244
101	14,3181	13,0125	18,6537	17,2605	24,1924	22,1609
102	12,6498	13,2161	16,5358	17,5288	21,5283	22,4830

Tabel 4 Hasil Prediksi JST pada Tahap *Testing*

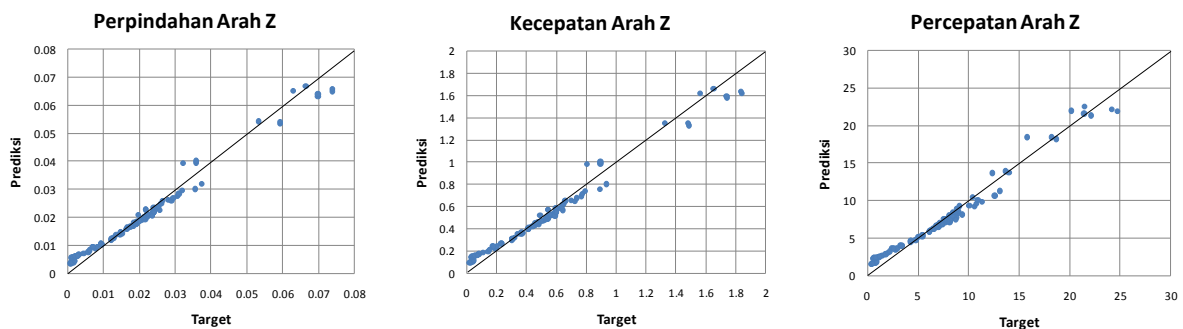
No	Perpindahan (m)						No	Kecepatan (m/det)					
	Arah X		Arah Y		Arah Z			Arah X		Arah Y		Arah Z	
	Target	Output	Target	Output	Target	Output		Target	Output	Target	Output	Target	Output
1	0,0012	0,0016	0,0026	0,0034	0,0060	0,0080	1	0,0586	0,0723	0,0733	0,0972	0,1505	0,1995
2	0,0016	0,0018	0,0034	0,0039	0,0081	0,0091	2	0,0775	0,0820	0,0979	0,1105	0,2010	0,2270
3	0,0025	0,0025	0,0054	0,0054	0,0126	0,0126	3	0,1191	0,1128	0,1530	0,1525	0,3139	0,3131
4	0,0032	0,0031	0,0070	0,0066	0,0163	0,0155	4	0,1536	0,1396	0,1990	0,1888	0,4089	0,3876
5	0,0037	0,0034	0,0081	0,0075	0,0190	0,0175	5	0,1744	0,1570	0,2309	0,2123	0,4742	0,4358
6	0,0045	0,0041	0,0097	0,0088	0,0227	0,0206	6	0,1915	0,1857	0,2759	0,2507	0,5658	0,5148
7	0,0011	0,0017	0,0024	0,0038	0,0056	0,0088	7	0,0547	0,0795	0,0677	0,1071	0,1391	0,2199
8	0,0015	0,0019	0,0032	0,0041	0,0074	0,0097	8	0,0724	0,0874	0,0904	0,1179	0,1858	0,2420
9	0,0023	0,0024	0,0049	0,0053	0,0116	0,0124	9	0,1145	0,1112	0,1412	0,1504	0,2902	0,3087
10	0,0029	0,0028	0,0062	0,0061	0,0146	0,0143	10	0,1422	0,1280	0,1781	0,1732	0,3666	0,3556
11	0,0035	0,0032	0,0074	0,0069	0,0174	0,0161	11	0,1650	0,1449	0,2123	0,1960	0,4366	0,4025
12	0,0044	0,0039	0,0095	0,0084	0,0222	0,0198	12	0,1942	0,1781	0,2696	0,2405	0,5535	0,4938
13	0,0047	0,0045	0,0101	0,0098	0,0236	0,0230	13	0,2270	0,2068	0,2870	0,2789	0,5896	0,5726
14	0,0051	0,0049	0,0110	0,0105	0,0258	0,0247	14	0,2397	0,2230	0,3137	0,3004	0,6441	0,6168
15	0,0047	0,0047	0,0103	0,0101	0,0242	0,0236	15	0,2072	0,2126	0,2930	0,2867	0,6008	0,5885

No	Percepatan (m/det ²)					
	Arah X		Arah Y		Arah Z	
	Target	Output	Target	Output	Target	Output
1	1,2840	1,5506	1,6620	2,0594	2,2712	3,0574
2	1,6939	1,7577	2,1817	2,3381	2,9306	3,4473
3	2,6088	2,4139	3,4261	3,2191	4,6796	4,6559
4	3,3121	2,9877	4,4677	3,9870	5,8969	5,6865
5	3,7444	3,3616	5,0662	4,4864	6,9954	6,3477
6	4,0359	3,9774	5,5161	5,3079	7,8935	7,4221
7	1,1983	1,7041	1,5497	2,2661	2,1086	3,3469
8	1,5832	1,8717	2,0489	2,4915	2,8375	3,6601
9	2,5098	2,3800	3,2734	3,1737	4,4530	4,5943
10	3,0818	2,7407	4,1225	3,6567	5,5469	5,2454
11	3,5560	3,1025	4,7429	4,1404	6,3866	5,8903
12	4,1206	3,8135	5,6553	5,0893	7,8579	7,1377
13	4,9444	4,4316	6,4463	5,9127	8,8421	8,2043
14	5,1877	4,7796	6,8357	6,3757	9,5396	8,7985
15	4,4116	4,5566	5,8243	6,0790	8,4553	8,4181

Kinerja JST akan dievaluasi menggunakan parameter MSE dan R^2 serta divalidasi dengan Matlab 2010. Berdasarkan Gambar 10 dan Gambar 11, JST yang telah dilatih sudah mampu memprediksi perpindahan, kecepatan, dan perpindahan dengan sangat baik, hal ini ditunjukkan dengan cukup dekatnya antara distribusi titik-titik target dan prediksi ke garis diagonal.

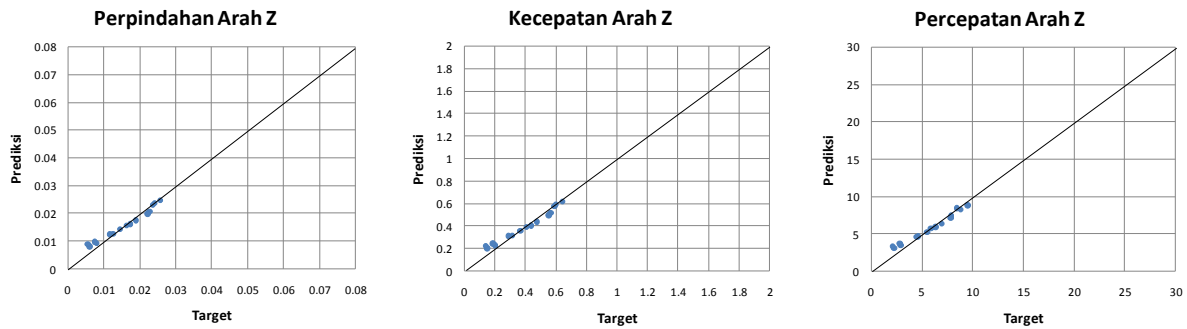
Sebelum dilakukan *training*, nilai MSE awal adalah 0,0715. Penurunan nilai MSE paling signifikan terjadi pada iterasi ke-1 hingga iterasi ke-9, yaitu dari 0,0205 menjadi 0,00637. Di atas iterasi ke-9 menuju iterasi ke-50000, nilai MSE hanya turun sebesar 0.00618, yaitu dari 0,00637 menjadi 0,00019. Gambar 12 menunjukkan pola penurunan MSE seiring dengan berjalannya proses *training*.

Proses *Training*

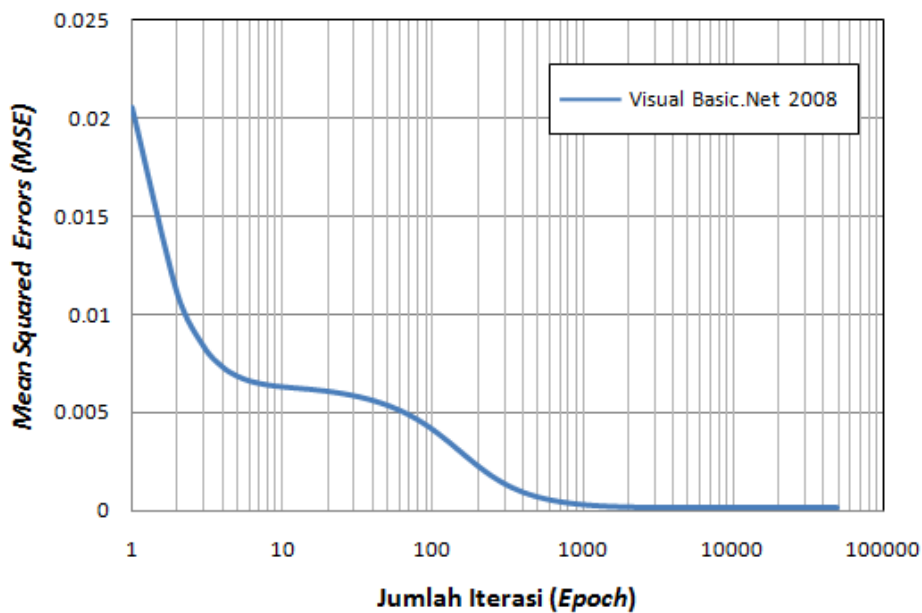


Gambar 10 *Plot* Prediksi vs. Target untuk Proses *Training*

Proses Testing



Gambar 11 *Plot Prediksi vs. Target untuk Proses Testing*



Gambar 12 Grafik Jumlah Iterasi vs. MSE

Untuk menentukan ketepatan nilai target dengan nilai prediksi JST dapat digunakan koefisien determinasi (R^2). Jika R^2 bernilai 1, maka hasil prediksi JST terhadap target dianggap tepat. Perhitungan R^2 untuk perpindahan, kecepatan, dan percepatan untuk arah X, Y, dan Z ditampilkan pada Tabel 5 dan Tabel 6. Berdasarkan kedua tabel tersebut, untuk hasil *training* dan *testing* diperoleh nilai R^2 yang berkisar antara 93,0% hingga 97,2%. Dari nilai tersebut dapat disimpulkan bahwa prediksi JST untuk perpindahan, kecepatan, dan percepatan tengah bentang struktur jembatan dapat mewakili 93,0% hingga 97,2% dari seluruh data. Hal tersebut menunjukkan tingkat ketepatan nilai target

dengan nilai prediksi JST sudah sangat baik.

Program yang digunakan untuk memprediksi respons struktur jembatan dengan metode JST dalam analisis ini adalah Visual Basic.NET 2008. Hasil prediksi JST dengan menggunakan program ini akan divalidasi menggunakan *software* Neural Network Toolbox pada Matlab 2010. Hal ini dilakukan untuk memeriksa tingkat keakuratan prediksi JST dengan menggunakan program yang berbeda. Adapun kinerja JST dengan menggunakan kedua bahasa pemrograman tersebut akan dibandingkan terhadap parameter MSE, R^2 , dan waktu yang diperlukan dalam proses *training*.

Tabel 5 Perhitungan R^2 untuk *Training* JST

No.	Perpindahan (m)						Kecepatan (m/s)						Percepatan (m/s ²)					
	Arah X		Arah Y		Arah Z		Arah X		Arah Y		Arah Z		Arah X		Arah Y		Arah Z	
	$(T_i - Y_i)^2$	$(T_i - T_{avg})^2$	$(T_i - Y_i)^2$	$(T_i - T_{avg})^2$	$(T_i - Y_i)^2$	$(T_i - T_{avg})^2$	$(T_i - Y_i)^2$	$(T_i - T_{avg})^2$	$(T_i - Y_i)^2$	$(T_i - T_{avg})^2$	$(T_i - Y_i)^2$	$(T_i - T_{avg})^2$	$(T_i - Y_i)^2$	$(T_i - T_{avg})^2$	$(T_i - Y_i)^2$	$(T_i - T_{avg})^2$	$(T_i - Y_i)^2$	$(T_i - T_{avg})^2$
1	0.0003743	0.0196294	0.0003768	0.0196804	0.0003772	0.0196815	0.0003172	0.0184690	0.0003768	0.0196697	0.0003772	0.0196752	0.0002989	0.0180995	0.0003182	0.0183959	0.0005051	0.021822
2	0.0002849	0.0190882	0.0002924	0.0191791	0.0002920	0.0191775	0.0002161	0.0177644	0.0002918	0.0191669	0.0002910	0.0191624	0.0001963	0.0173543	0.0002212	0.0177311	0.0003731	0.0204387
3	0.0002293	0.0178888	0.0002431	0.0180445	0.0002430	0.0180434	0.0001275	0.0162245	0.0002424	0.0180293	0.0002407	0.0180168	0.0001005	0.0157012	0.0001350	0.0162311	0.0002658	0.0187710
4	0.0004357	0.0193095	0.0004424	0.0193797	0.0004420	0.0193791	0.0003522	0.0180446	0.0004420	0.0193704	0.0004414	0.0193682	0.0003241	0.0176289	0.0003552	0.0179852	0.0005690	0.0207210
5	0.0003312	0.0186682	0.0003421	0.0187809	0.0003422	0.0187794	0.0002360	0.0172303	0.0003410	0.0187633	0.0003406	0.0187615	0.0002073	0.0167701	0.0002529	0.0172932	0.0004204	0.0198792
6	0.0002620	0.0172809	0.0002815	0.0174669	0.0002817	0.0174667	0.0001281	0.0154342	0.0002798	0.0174438	0.0002781	0.0174318	0.0000942	0.0148544	0.0001434	0.0155217	0.0002846	0.0179227
7	0.0009173	0.0188776	0.0009346	0.0189795	0.0009346	0.0189789	0.0007338	0.0174865	0.0009332	0.0189646	0.0009332	0.0189652	0.0006771	0.0170476	0.0007456	0.0174614	0.00011456	0.0201428
8	0.0007624	0.0180938	0.0007868	0.0182392	0.0007865	0.0182390	0.0005466	0.0164731	0.0007856	0.0182267	0.0007833	0.0182164	0.0004845	0.0159723	0.0005648	0.0164923	0.0009070	0.0190418
9	0.0006253	0.0163798	0.0006674	0.0166159	0.0006680	0.0166175	0.0003381	0.0143037	0.0006639	0.0165909	0.0006616	0.0165796	0.0002601	0.0136422	0.0003647	0.0143980	0.0006545	0.0166932
10	0.0008984	0.0182811	0.0009170	0.0183869	0.0009167	0.0183854	0.0007013	0.0168593	0.0009168	0.0183792	0.0009152	0.0183724	0.0006543	0.0164788	0.0007495	0.0170110	0.0011248	0.0194852
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
93	0.0002443	0.0052345	0.0002783	0.0053913	0.0002785	0.0053925	0.0003855	0.0013358	0.0002565	0.0052959	0.0002415	0.0052294	0.0009201	0.0006524	0.0004471	0.0012531	0.0000016	0.0037621
94	0.0018280	0.0687641	0.0017095	0.0680025	0.0017087	0.0679942	0.0013017	0.0706548	0.0018115	0.0686473	0.0018955	0.0691602	0.0028935	0.0756074	0.0034121	0.0781573	0.0001333	0.0532608
95	0.0012379	0.0676032	0.0012844	0.0679020	0.0012838	0.0678978	0.0010941	0.0672511	0.0013204	0.0681755	0.0013472	0.0683681	0.0008338	0.0652845	0.0010923	0.0674043	0.0001555	0.0485976
96	0.0004997	0.0476064	0.0005310	0.0482188	0.0005307	0.0482294	0.0017807	0.0340292	0.0004043	0.0478852	0.0004733	0.0476561	0.0026771	0.0307343	0.0026663	0.0329547	0.0028958	0.0292307
97	0.0020828	0.1104814	0.0021162	0.1106399	0.0021173	0.1106432	0.0019603	0.1113307	0.0021149	0.1106477	0.0021147	0.1106406	0.0017960	0.1106087	0.0017637	0.1100137	0.0002972	0.0908114
98	0.0015051	0.1096287	0.0016281	0.1105651	0.0016276	0.1105657	0.0007177	0.1035854	0.0015899	0.1102730	0.0015690	0.1100932	0.0006205	0.1029258	0.0003695	0.0989592	0.000054	0.0824502
99	0.0002687	0.0802662	0.0002206	0.0810067	0.0002202	0.0810145	0.0011405	0.0722270	0.0002408	0.0806506	0.0002516	0.0804487	0.0014521	0.0703960	0.0019252	0.0670488	0.0012200	0.0684155
100	0.0036732	0.1295244	0.0036681	0.1293935	0.0036675	0.1293907	0.0038327	0.1325683	0.0036685	0.1294211	0.0036673	0.1294070	0.0038900	0.1335652	0.0038295	0.1327644	0.0033963	0.1256410
101	0.0029131	0.1283770	0.0030686	0.1293011	0.0030703	0.1293070	0.0019800	0.1237877	0.0030213	0.1290158	0.0029918	0.1288149	0.0020502	0.1250049	0.0013234	0.1183420	0.0017350	0.1174327
102	0.0000133	0.0945895	0.0000442	0.0954752	0.0000442	0.0954834	0.0003404	0.0875551	0.0000072	0.0951097	0.0000093	0.0948769	0.0003857	0.0874000	0.0006723	0.0883524	0.0003831	0.0829791
T_{avg}	0.1401050		0.1402869		0.1402908		0.1359007		0.1402486		0.1402682		0.1345343		0.1356316		0.1455412	
Jumlah	0.0385712	1.3378139	0.0399818	1.3427914	0.0399779	1.3428130	0.0358232	1.2814030	0.0401062	1.3421806	0.0402030	1.3419405	0.0366110	1.2676921	0.0393041	1.2646746	0.0389612	1.2481367
R^2	0.971		0.970		0.970		0.972		0.970		0.970		0.971		0.969		0.969	

Tabel 6 Perhitungan R^2 untuk *Testing* JST

No.	Perpindahan (m)						Kecepatan (m/s)						Percepatan (m/s ²)					
	Arah X		Arah Y		Arah Z		Arah X		Arah Y		Arah Z		Arah X		Arah Y		Arah Z	
	$(T_i - Y_i)^2$	$(T_i - T_{avg})^2$	$(T_i - Y_i)^2$	$(T_i - T_{avg})^2$	$(T_i - Y_i)^2$	$(T_i - T_{avg})^2$	$(T_i - Y_i)^2$	$(T_i - T_{avg})^2$	$(T_i - Y_i)^2$	$(T_i - T_{avg})^2$	$(T_i - Y_i)^2$	$(T_i - T_{avg})^2$	$(T_i - Y_i)^2$	$(T_i - T_{avg})^2$	$(T_i - Y_i)^2$	$(T_i - T_{avg})^2$	$(T_i - Y_i)^2$	$(T_i - T_{avg})^2$
1	0.0001779	0.0044806	0.0001802	0.0044831	0.0001798	0.0044820	0.0001051	0.0042824	0.0001811	0.0044922	0.0001813	0.0044976	0.0000854	0.0041947	0.0001077	0.0043499	0.0002599	0.0051749
2	0.0000473	0.0028064	0.0000497	0.0028144	0.0000498	0.0028146	0.0000115	0.0026323	0.0000508	0.0028256	0.0000509	0.0028298	0.0000049	0.0025553	0.0000167	0.0027441	0.0001122	0.0034124
3	0.0000003	0.0004807	0.0000001	0.0004846	0.0000001	0.0004847	0.0000001	0.0004883	0.0000000	0.0004924	0.0000000	0.0004924	0.0000000	0.0004924	0.0000000	0.0004924	0.0000000	0.0005087
4	0.0000332	0.0000140	0.0000309	0.0000135	0.0000309	0.0000135	0.0001100	0.0000314	0.0000331	0.0000147	0.0000341	0.0000152	0.00001265	0.0000310	0.00001576	0.0000534	0.0000186	0.0000508
5	0.0001057	0.0004618	0.0001076	0.0004720	0.0001074	0.0004717	0.0001691	0.0004477	0.0001101	0.0004759	0.0001110	0.0004766	0.0001763	0.0004428	0.0001763	0.0005259	0.0001764	0.0006213
6	0.0001901	0.0021781	0.0002074	0.0022497	0.0002076	0.0022506	0.0000189	0.0011524	0.0002014	0.0022261	0.0001964	0.0022076	0.0000041	0.0009409	0.0000296	0.0012026	0.0000934	0.0018785
7	0.0004864	0.0049138	0.0004945	0.0049257	0.0004945	0.0049253	0.0003445	0.0046726	0.0004930	0.0049233	0.0004923	0.0049273	0.0003076	0.0045885	0.0003498	0.0047451	0.0006446	0.0056655
8	0.0002335	0.0032773	0.0002406	0.0032913	0.0002404	0.0032910	0.0001256	0.0030382	0.0002399	0.0032930	0.0002386	0.0032913	0.0001001	0.0029584	0.0001336	0.0031195	0.0002845	0.0036391
9	0.0000217	0.0008018	0.0000277	0.0008307	0.0000279	0.0008312	0.0000061	0.0005587	0.0000266	0.0008265	0.0000258	0.0008237	0.0000203	0.0004952	0.0000068	0.0005701	0.0000084	0.0007399
10	0.0000096	0.0000591	0.0000061	0.0000671	0.0000061	0.0000672	0.0001120	0.0000085	0.0000076	0.0000090	0.0000090	0.0000090	0.00000596	0.00001399	0.0000058	0.0001479	0.0000029	0.0000228
11	0.0000854	0.0001280	0.0000797	0.0001235	0.0000795	0.0001234	0.0002252	0.0001996	0.0000843	0.0001284	0.0000879	0.0001324	0.0002474	0.0001968	0.0002474	0.0002100	0.0001036	0.0001549
12	0.0002530	0.0018540	0.0002698	0.0019102	0.0002699	0.0019104	0.0001458	0.0012935	0.0002688	0.0019036	0.0002687	0.0019016	0.0001134	0.0011295	0.0002184	0.0014679	0.0002180	0.0018157
13	0.0000279	0.0029234	0.0000194	0.0028434	0.0000193	0.0028426	0.0000282	0.0036596	0.0000270	0.0028557	0.0000217	0.0028646	0.0003162	0.0038661	0.0001942	0.0034773	0.0001710	0.0039427
14	0.0000573	0.0046898	0.0000546	0.0046853	0.0000546	0.0046856	0.0001567	0.0048989	0.0000558	0.0046908	0.0000561	0.0046906	0.0002002	0.0049867	0.0001443	0.0047797	0.0002309	0.0059434
15	0.0000104	0.0031765	0.0000150	0.0032674	0.0000150	0.0032679	0.0000163	0.0028873	0.0000128	0.0032286	0.0000114	0.0032033	0.0000253	0.0019099	0.0000442	0.0018257	0.0000006	0.0030098
T_{avg}	0.1028156		0.1028581		0.1028608		0.1014857		0.1028749		0.1029293		0.1008242		0.1019287		0.1106951	
Jumlah	0.0017397	0.0322452	0.0017832	0.0324616	0.0017828	0.0324616	0.0017975	0.0293712	0.0017862	0.0324377	0.0017853	0.0324135	0.0019135	0.0286360	0.0020564	0.0294696	0.0023605	0.0365354
R^2	0.946		0.945		0.945		0.939		0.945		0.945		0.933		0.930		0.935	

Perbandingan kinerja *training* JST dengan tinjauan *MSE* dapat dilihat pada Gambar 13. Berdasarkan Gambar 13, dapat dilihat bahwa pada awal *training*, *MSE* Visual Basic.NET 2008 turun secara signifikan pada iterasi ke-1 hingga iterasi ke-6, sedangkan *MSE* Neural Network Toolbox Matlab 2010 turun secara perlahan. Pada iterasi ke-50000, Visual Basic.NET 2008 menghasilkan

sebesar 97%, sedangkan untuk Neural Network Toolbox Matlab 2010 menghasilkan rata-rata R^2 sebesar 93,9%. Hal tersebut menunjukkan tingkat ketepatan nilai target dengan nilai prediksi JST menggunakan kedua *software* tersebut sudah sangat baik.

Proses *training* JST sampai iterasi ke-50000 untuk Visual Basic.NET 2008 membutuhkan waktu selama 100 detik, sedangkan untuk Neural Network Toolbox Matlab 2010 membutuhkan waktu selama 617 detik. Hal tersebut menunjukkan bahwa kinerja JST untuk kedua *software* tersebut sudah sangat efisien, karena hanya membutuhkan waktu yang tergolong singkat dalam melakukan proses *training*.

D. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil kajian ini, dapat disimpulkan beberapa hal sebagai berikut.

1. Pola nilai perpindahan, kecepatan, dan percepatan maksimum mengikuti pola spektrum permukaan tanah puncak (S_{DS}), semakin besar S_{DS} untuk suatu jenis tanah, menyebabkan nilai perpindahan, kecepatan, dan percepatan juga akan semakin besar. Hal ini dikarenakan model struktur jembatan memiliki periode getar yang relatif rendah ($\leq 0,269$ detik), maka hampir seluruh ragam utama akan dikenakan percepatan konstan sebesar S_{DS} , dengan nilai S_{DS} berbeda untuk tiap lokasi dan jenis tanah. Oleh karena itu, nilai perpindahan, kecepatan, dan percepatan maksimum untuk suatu lokasi dapat terjadi pada jenis tanah keras, sedang, ataupun lunak.
2. Hasil analisis respons struktur jembatan di wilayah Indonesia berdasarkan Respons Spektrum Gempa Indonesia pada RSNI 2833-201X, menunjukkan bahwa respons struktur (jenis tanah keras dan arah Z) terbesar terjadi di Kota Palu, Sulawesi Tengah dengan nilai perpindahan sebesar 0,0738 m, kecepatan sebesar 1,8406 m/det, dan

percepatan sebesar 24,7666 m/det². Sementara itu, respons struktur (jenis tanah keras dan arah Z) terkecil terjadi di Kota Tanjung Pinang, Kepulauan Riau dengan nilai perpindahan sebesar 0,000792 m, kecepatan sebesar 0,0199 m/det, dan percepatan sebesar 0,38087 m/det².

3. Nilai MSE untuk parameter perpindahan, kecepatan, dan percepatan pada tahap *training* dan *testing* JST adalah relatif kecil, dengan nilai rata-rata MSE akhir sebesar 0,00019 dan 0,00023. Hal tersebut menunjukkan bahwa JST sudah sangat baik dalam memprediksi perpindahan, kecepatan, dan percepatan pada struktur jembatan yang dianalisis.
4. Nilai R^2 untuk *training* dan *testing* JST berkisar antara 93,0% hingga 97,2%, yang memperlihatkan bahwa prediksi JST untuk perpindahan, kecepatan, dan percepatan tengah bentang struktur jembatan dapat mewakili 93,0% sampai 97,2% dari seluruh data. Hal tersebut menunjukkan tingkat ketepatan nilai target dengan nilai prediksi JST sudah sangat baik.
5. Hasil kinerja JST untuk parameter MSE , R^2 , dan waktu yang diperlukan dalam proses *training* menggunakan bahasa pemrograman Visual Basic.NET 2008 dan Neural Network Toolbox Matlab 2010 tersebut sudah sangat baik.

E. SARAN

1. *Software* berbasis JST yang digunakan dalam penelitian ini dapat digunakan menjadi alat bantu ataupun alternatif lain dalam memprediksi respons struktur jembatan beton prategang berupa perpindahan, kecepatan, dan percepatan. Namun, bisa juga dilakukan *training* terhadap berbagai variasi parameter *input* dan *output* lainnya yang berhubungan dengan struktur jembatan. Untuk parameter *input* seperti jumlah bentang, dimensi elemen struktur, dan

material elemen struktur, sedangkan untuk parameter *output* seperti *base shear*, gaya geser, dan momen pada *girder*. Sehingga prediksi JST yang diperoleh dapat dikembangkan untuk berbagai variasi data model struktur jembatan yang lebih luas.

2. Jumlah lapisan dan neuron pada *hidden layer* dapat divariasikan lagi untuk meningkatkan kemampuan prediksi JST.
3. Untuk pengembangan penelitian kedepan, metode analisis JST juga dapat digunakan untuk memprediksi berbagai analisis lainnya yang berhubungan dengan pengaruh gempa terhadap struktur jembatan di Indonesia.

F. DAFTAR PUSTAKA

- Aldiamar, F. (2007). Analisa Risiko Gempa dan Pembuatan Respon Spektra Desain Untuk Jembatan Suramadu dengan Pemodelan Sumber Gempa 3D. Tesis, Institut Teknologi Bandung.
- Ansori, M. B., Sugihardjo, H., & Sidharta, A. S. (2012). Studi Respon Seismik Jembatan Balok Komposit Sederhana yang Diretrofit dengan Link Slab Ditinjau dari Wilayah Zona Gempa. *Jurnal Teknik ITS*, 1(1), D97-D102.
- Badan Standardisasi Nasional. (2008). SNI 2833-2008: Standar Perencanaan Ketahanan Gempa untuk Jembatan.
- Badan Standardisasi Nasional. (2013). RSNI 2833-201X: Perancangan Jembatan terhadap Beban Gempa. *Bridge Design Manual*. (1992). Panduan Perencanaan Teknik Jembatan. *Directorate General of Highway Ministry of Public Works Republic of Indonesia*.
- Elianto, R. (2014). Studi Beban Gempa pada Pilar Jembatan dengan Pembangunan Bertahap. Tesis, Universitas Gadjah Mada.
- 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.
- Pangastuti, P. (2014). Metode Jaringan Syaraf Tiruan *Backpropagation* untuk Mengukur Tingkat Korelasi Prestasi Mahasiswa (Studi Kasus Pada Universitas Dian Nuswantoro Semarang). Skripsi, Fakultas Ilmu Komputer.
- Paz, M. (1985). *Dinamika Struktur: Teori & Perhitungan Edisi Kedua*. Jakarta: Erlangga.
- Solichin., & Fitra, T. M. (2011). Perencanaan Struktur Jembatan Beton Prategang Bentang 50 Meter. Tesis, Universitas Kristen Maranatha.
- Supriyadi, D. (2012). Sistem Informasi Penyebaran Penyakit Demam Berdarah Menggunakan Metode Jaringan Syaraf Tiruan *Backpropagation*. Universitas Diponegoro.
- Suyadi. (2013). Perilaku Jembatan Bentang Menerus Akibat Beban Gempa Rencana SNI-1726-2002 dengan Peta Gempa 2010. *Jurnal Teknik Sipil*, 12(2), 75-85.
- Suryanita, R. (2014). *Integrated Bridge Health Monitoring, Evaluation and Alert Systeem Using Neuro Genetic Hybrids*. Tesis, Universiti Teknologi Malaysia.
- 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*, 1, 13-15.
- Wight, J. K., & MacGregor, J. G. (2012). *Reinforced Concrete Mechanics & Design*. United States of America: Pearson Education, Inc.