

# PREDIKSI KERUSAKAN MODEL TIANG JEMBATAN BETON BERTULANG BERDASARKAN MUTU BETON DENGAN METODE JARINGAN SARAF TIRUAN

Reni Suryanita<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Riau  
[reni.suryanita@eng.unri.ac.id](mailto:reni.suryanita@eng.unri.ac.id)

## ABSTRAK

Artikel ini bertujuan untuk memprediksi kerusakan pada tiang jembatan yang dimodelkan dengan skala model kecil menggunakan metode Jaringan Saraf Tiruan (JST). Model tiang jembatan skala kecil (*mini scale*) ini dimaksudkan untuk menggambarkan perilaku struktur jembatan (*prototype*) dalam bentuk model laboratorium. *Prototype* jembatan yang dianalisis berupa jembatan 1 bentang berukuran 34 meter, sedangkan model jembatan menggunakan skala 1:34. Skala model ini dimaksudkan untuk mengatasi keterbatasan ruang, bahan material dan alat pengujian di laboratorium. Kinerja struktur jembatan dianalisis dengan metode analisis beban dorong (*Pushover Analysis*). Tingkat kerusakan yang ditimbulkan berdasarkan standard FEMA 356 dimana level kerusakan dikategorikan kepada *Immediate Occupancy (IO)*, *Life Safety (LS)* dan *Collapse Prevention (CP)*. Arsitektural model Jaringan Saraf Tiruan yang digunakan terdiri dari *input* berupa mutu beton, gaya geser dan perpindahan. Sedangkan *output* yang diprediksi adalah tingkat kerusakan. Berdasarkan hasil analisis, kerusakan pada model tiang jembatan dapat diprediksi menggunakan metode JST dengan tingkat kesalahan (*Mean Squared Error*) sebesar 0.0106 dan nilai regresi (R) untuk proses *training* dan *testing* masing-masing sebesar 0.986 dan 0.99. Dengan demikian dapat disimpulkan metode JST dapat digunakan untuk memprediksi kerusakan pada tiang jembatan yang dimodelkan dengan skala laboratorium dengan prediksi mendekati 99 persen nilai yang ditargetkan.

**Kata kunci:** analisis beban dorong, Jaringan Saraf Tiruan, skala model, tiang jembatan, tingkat kerusakan.

## 1. PENDAHULUAN

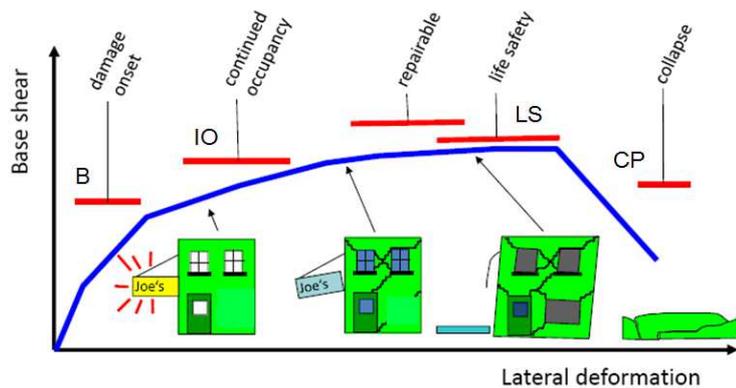
Wilayah Indonesia yang terdiri dari ribuan sungai dan selat telah menyebabkan pesatnya pembangunan jembatan sebagai penghubung antar daerah dan bahkan antar pulau di Indonesia. Seiring dengan pertumbuhan pembangunan jembatan di Indonesia, upaya pemeliharaan perlu dilakukan terhadap struktur jembatan yang sudah ada. Ditinjau dari bentuk strukturalnya, jembatan sangat rawan terhadap kerusakan dan bahkan keruntuhan ketika mengalami bencana alam, seperti banjir dan gempa bumi. Kerusakan terbesar adalah runtuhnya pilar atau tiang yang menopang berdirinya jembatan. Kerusakan tiang jembatan paling fatal akibat gempa bumi yang pernah ada dapat dilihat pada Gambar 1. Pada gambar tersebut terlihat gempa Kobe yang terjadi pada tahun 1995 telah menimbulkan kerusakan skala besar pada 637 tiang jembatan (*pier*) dengan bentang jembatan lebih dari 1300 bentang. Diperkirakan 50 bentang dari jembatan yang rusak tersebut perlu dibangun kembali.

Karakteristik jembatan ditentukan dari periode fundamental getaran mayoritas jembatan yang umumnya berkisar 0,2-1,2 detik. Dalam rentang ini respons struktur jembatan menyerupai periode dominan gerakan tanah yang disebabkan gempa (Kunde & Jangid, 2003). Untuk struktur jembatan yang kaku, seperti jembatan normal dengan bentang pendek perioda waktu getar seringkali sangat kecil, yaitu kecil dari 0,2 detik. Bahkan untuk beberapa jembatan ada yang mempunyai respons struktur hampir sama dengan percepatan tanah.



Gambar.1 Keruntuhan *Higashi-Nada Viaduct* pada tahun 1995 akibat gempa Kobe (Chen & Duan, 2003)

Tingkat kinerja struktur jembatan berdasarkan Standar Federal Emergency Management Agency (FEMA) 356 (ASCE, 2000) dapat diilustrasikan dengan tahap-tahap keruntuhan bangunan seperti pada Gambar.2. Tahap analisis statis nonlinear (*pushover analysis*) dapat dinyatakan sebagai tingkat transisi kerusakan operasional (B) dan tingkat kerusakan (*damage level*) sebagai *Immediate Occupancy* (IO), *Life Safety* (LS) dan *Collapse Prevention* (CP) seperti yang terlihat pada Gambar.2.



Gambar.2 Tingkat kinerja dan deformasi struktur.

Berdasarkan Gambar.2 dapat dilihat bahwa IO menyatakan tingkat kerusakan ringan dan struktur dapat di huni kembali. Tingkat LS menyatakan kerusakan moderat (sedang) dimana setelah terjadinya gempa bumi, struktur mengalami kerusakan yang memerlukan perbaikan untuk dapat dihuni kembali. Sedangkan tingkat CP menyatakan struktur mengalami kerusakan berat dan tidak bisa dihuni kembali.

Umumnya masalah yang dihadapi dalam pemeliharaan jembatan konvensional tidak dapat dilepaskan dari kerusakan yang disebabkan oleh kesalahan konstruksi dan kesalahan manusianya sendiri. Untuk mengurangi kesalahan dalam konstruksi dapat dilakukan dengan usaha pendekatan perkiraan terbaik menggunakan metode Jaringan Saraf Tiruan (JST) atau dikenal juga dengan *Artificial Neural Network*. Jaringan Saraf Tiruan (JST) adalah model perhitungan yang meniru mekanisme kerja jaringan saraf makhluk hidup. JST terdiri dari neuron-neuron yang merupakan unit pengolahan informasi seperti pada jaringan saraf biologis. JST telah digunakan dalam berbagai disiplin ilmu karena mampu memodelkan perhitungan yang kompleks dengan nonlinearitas tinggi.

Struktur JST umumnya terdiri dari *input layer*, *hidden layer*, dan *output layer*. *Input layer* berisi neuron-neuron yang menerima data langsung dari luar (eksternal). *Hidden layer* menerima sinyal dari *input layer*

dan meneruskannya ke *output layer*. Jumlah neuron dalam *hidden layer* mempengaruhi keakuratan dan kemampuan JST dalam memodelkan nonlinearitas. Sedangkan *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.

Aplikasi penggunaan JST di dalam monitoring kesehatan jembatan telah dikembangkan dalam penelitian sebelumnya (Suryanita & Adnan, 2013, 2014). Dalam penelitian sebelumnya ini JST dapat memprediksi tingkat kerusakan struktur jembatan sebesar 98% mendekati nilai target. Selain itu JST juga dapat memprediksi tingkat kerusakan yang ditimbulkan di dalam sistem peringatan dini yang dikoneksikan dengan jaringan internet. Sehingga dapat memberikan informasi tentang kesehatan jembatan kepada instansi terkait dan masyarakat umum. Dengan semakin berkembang teknologi informasi, maka peranan JST di bidang ilmu teknik sipil semakin diperlukan.

Dalam pengujian di laboratorium, model tiang dibuat sedemikian rupa dikarenakan keterbatasan ruang dan alat sehingga diperoleh skala prototip jembatan dengan model jembatan yaitu skala 1:34. Pembuatan model tiang jembatan menggunakan hukum kemiripan (*Similitude Law*) yang diturunkan dari teorema Buckingham Pi. Studi hubungan kuantitatif antara model skala laboratorium dan prototip nya telah dikembangkan oleh Lu et al (2008) and Beyer (2013). Banyak faktor yang perlu disederhanakan dan diasumsikan untuk membuat model skala laboratorium yang berperilaku mendekati perilaku struktur prototip yang sebenarnya (*full scale*). Untuk itu kajian makalah ini bertujuan memprediksi kerusakan jembatan beton bertulang pada model tiang jembatan skala laboratorium berdasarkan variasi mutu beton. Diharapkan dengan diketahuinya prediksi tingkat kerusakan pada jembatan akan membantu pihak terkait dan masyarakat umum untuk mengetahui kesehatan suatu jembatan.

## 2. METODOLOGI

Studi kasus pada kajian ini adalah struktur jembatan beton bertulang dengan satu bentang sepanjang 34 m seperti pada Gambar.3. Panjang bentang adalah 34m dengan dan tiang (pier) ditengah bentang.



Gambar.3 Bentang jembatan dengan tiang (pier) di tengah jembatan.

Skala model tiang jembatan dibuat berdasarkan rasio ukuran yang sebenarnya (prototip) terhadap ukuran model skala laboratorium yang diperoleh dari perhitungan persamaan *similitude* yang terdapat pada Tabel.1. Adapun model tiang (*pier*) dengan skala laboratorium 1:34 dapat dilihat pada Gambar 4.



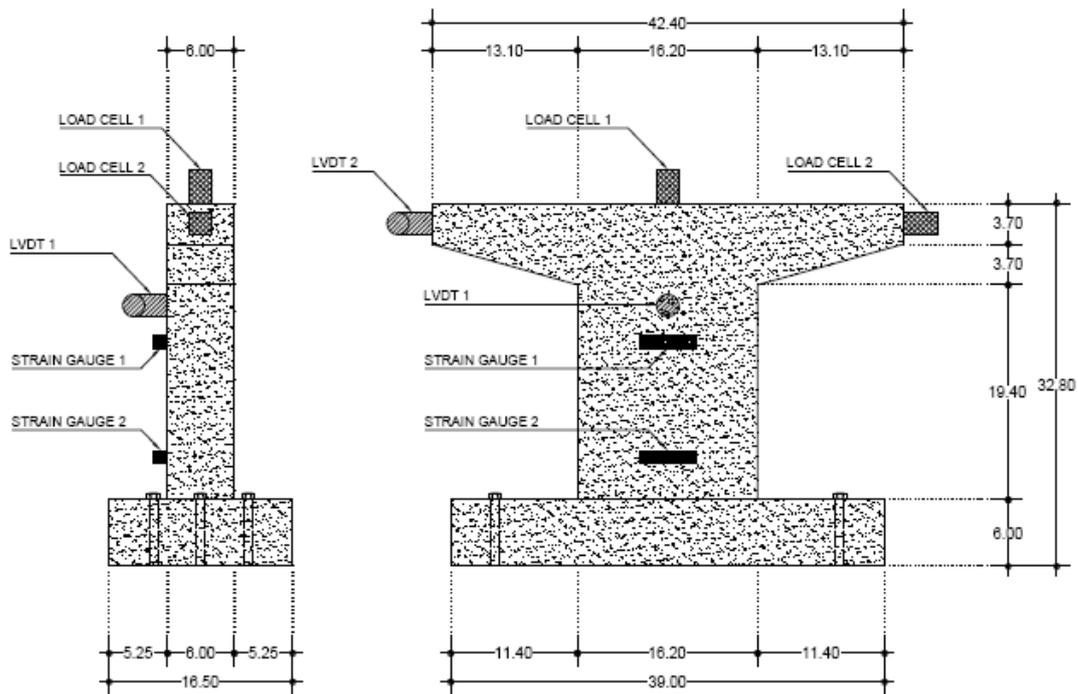
Gambar.4 Model tiang (pier) skala laboratorium

Tabel. 1 Parameter skala model yang digunakan

Parameter	Persamaan	Nilai skala (S)	Ukuran model
Dimensi (panjang dan tinggi), $S_l$	$S_l = \frac{l_p}{l_m} = 34$	34	$l_m = \frac{l_p}{S_l} = \frac{l_p}{34}$
Percepatan (a) and Gravitasi(g), asumsi $S_a=S_g=1$	$S_a = \frac{a_p}{a_m} = 1$	1	$a_m = \frac{a_p}{S_a} = \frac{a_p}{1}$
Modulus Young, E (*), $S_E$	Untuk tiang : $S_E = \frac{E_p}{E_m} = \frac{4700\sqrt{f_p}}{4700\sqrt{f_m}}$ $S_E = \frac{\sqrt{40}}{\sqrt{30}}$	1.155	$E_m = \frac{E_p}{S_E} = \frac{E_p}{1.155}$
Massa (m), $S_m$	$S_m = S_\rho \cdot S_l^3$	39304	$m_m = \frac{m_p}{S_m} = \frac{m_p}{39304}$
Kekakuan (k), $S_k$	$S_k = S_E \cdot S_l$	39.26	$k_m = \frac{k_p}{S_k} = \frac{k_p}{39.26}$
Perioda (t), $S_t$	$S_t = \left( \frac{S_m}{S_k} \right)^{\frac{1}{2}}$	31.64	$T_m = \frac{T_p}{S_t} = \frac{T_p}{31.64}$
Gaya (F), $S_f$	$S_E \cdot S_l^2$	1492	$F_m = \frac{F_p}{S_f} = \frac{F_p}{1492}$

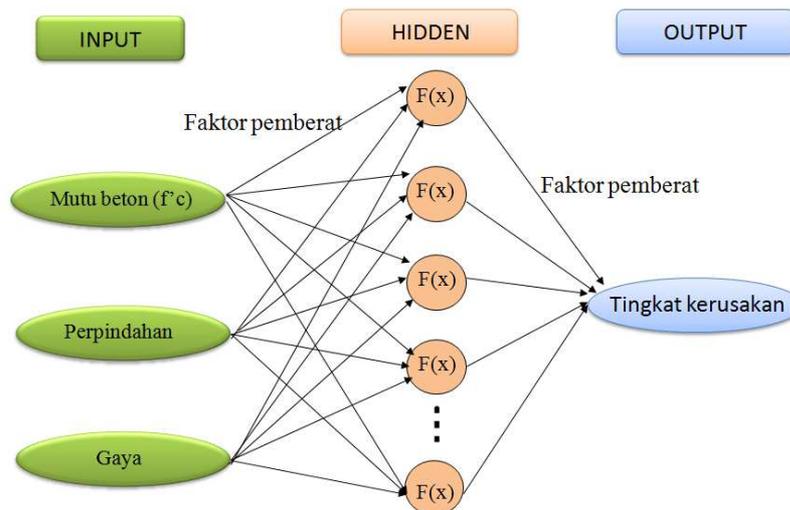
Catatan:  $E_{\text{beton}} = 4700 \sqrt{f_c}$  dengan  $f_c$  pada hari ke 28 pengujian kekuatan beton dalam satuan MPa (satuan SI) (*American Concrete Institute 318 Code*)

Ukuran model tiang yang dibuat berdasarkan persamaan similitude pada Tabel 1. Tinggi model adalah 32,8 cm dengan lebar 42,4 cm dengan mutu beton 30 MPa. Dalam pengujian statis non linear (*pushover test*) digunakan 2 strain gauge yang dipasang pada permukaan model dan 2 sensor LVDT yang dipasang pada bagian atas tiang dengan penambahan massa yang diberikan melalui *load cell*. Beban dorong diberikan melalui *load cell* yang dipasang lateral pada pertengahan lengan tiang model seperti terlihat pada Gambar 5.



Gambar.5 Ukuran model dan posisi sensor pada pengujian beban dorong lateral

Data untuk proses training dan testing dalam sistem Jaringan Saraf Tiruan dihasilkan dari analisis beban dorong nonlinier statis (*Pushover analysis*) menggunakan SAP2000. Input data terdiri dari mutu beton ( $F'c$ ), perpindahan (DISPL), dan gaya (FORCE) yang digunakan dalam proses training. Sedangkan data output adalah tingkat kerusakan (DAMAGE) yang ditimbulkan pada tiang jembatan akibat beban dorong. Arsitektural model Jaringan Saraf Tiruan untuk model tiang jembatan skala kecil dapat dilihat pada Gambar 6 berikut.



Gambar 6. Arsitektural model Jaringan Saraf Tiruan

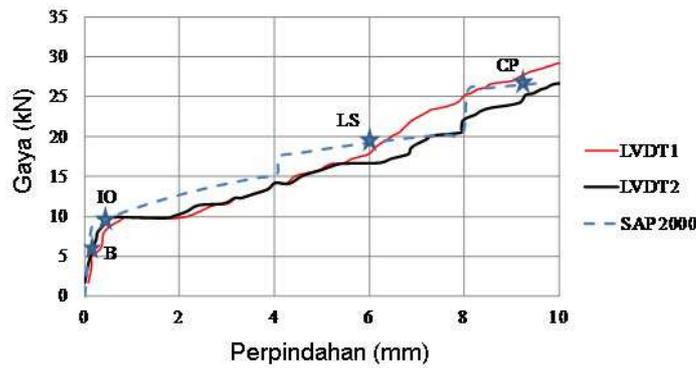
Mutu beton model tiang jembatan yang disimulasikan di dalam program SAP2000 berkisar mulai 20 Mpa sampai dengan 30 Mpa. Proses training menggunakan 75 persen data perpindahan dan gaya, sedangkan proses testing menggunakan 25 persen data perpindahan dan gaya yang dihasilkan melalui analisis statis non linear. Simulasi prediksi menggunakan Jaringan Saraf Tiruan menggunakan program MATLAB. Mutu beton ( $F_c$ ) yang digunakan untuk proses *training* dan *testing* JST yaitu yaitu 20 Mpa, 21 Mpa, 22 MPa, 24MPa, 26MPa, 28 Mpa, 29 Mpa dan 30 Mpa seperti terlihat pada Tabel 2.

Tabel.2 Data input dan output untuk proses *training* dan *testing* Jaringan Saraf Tiruan

NO.	INPUT			OUTPUT	NO.	INPUT			OUTPUT	NO.	INPUT			OUTPUT
	$F_c$	DISPL	FORCE	DAMAGE		$F_c$	DISPL	FORCE	DAMAGE		$F_c$	DISPL	FORCE	DAMAGE
1	20	0.45033	11.32	B	36	22	5.23263	10.15	CP	72	27	3.82079	16.659	IO
2	20	0.45608	11.411	B	37	22	5.43384	11.711	CP	73	27	4.82079	16.969	LS
3	20	0.65252	12.729	B	38	24	0.51011	12.822	B	74	27	5.16672	17.074	LS
4	20	0.66613	12.775	B	39	24	0.51575	12.912	B	75	27	5.16684	8.746	CP
5	20	1.66613	13.046	B	40	24	0.73923	14.418	B	76	27	5.42698	12.026	CP
6	20	2.66613	13.31	IO	41	24	0.75263	14.464	B	77	27	5.44739	12.084	CP
7	20	3.66613	13.57	IO	42	24	1.75263	14.769	B	78	27	5.78799	12.135	CP
8	20	4.66613	13.824	LS	43	24	2.75263	15.068	IO	79	27	5.7172	11.731	CP
9	20	5.07676	13.926	LS	44	24	3.75263	15.361	IO	80	29	0.58271	14.647	B
10	20	5.07688	7.952	CP	45	24	4.75263	15.648	LS	81	29	0.84461	16.422	B
11	20	5.19295	9.906	CP	46	24	5.13279	15.755	LS	82	29	0.86023	16.477	B
12	20	5.35039	11.231	CP	47	24	5.1329	9.02	CP	83	29	1.86023	16.823	B
13	20	5.39554	11.458	CP	48	24	5.26234	11.193	CP	84	29	2.86023	17.162	IO
14	21	0.46531	11.696	B	49	24	5.44532	12.724	CP	85	29	3.86023	17.495	IO
15	21	0.47104	11.787	B	50	24	5.48787	12.938	CP	86	29	4.86023	17.82	LS
16	21	0.67424	13.152	B	51	24	5.48371	12.904	CP	87	29	5.1932	17.926	LS
17	21	0.68783	13.198	B	52	26	0.53989	13.571	B	88	29	5.19333	10.115	CP
18	21	1.68783	13.477	B	53	26	0.78248	15.21	B	89	29	5.33064	12.271	CP
19	21	2.68783	13.751	IO	54	26	0.79942	15.268	B	90	29	5.53951	13.897	CP
20	21	3.68783	14.019	IO	55	26	1.79942	15.59	B	91	29	5.57911	14.026	CP
21	21	4.68783	14.281	LS	56	26	2.79942	15.905	IO	92	29	5.63625	14.035	CP
22	21	5.09079	14.385	LS	57	26	3.79942	16.213	IO	93	29	4.51224	3.616	CP
23	21	5.09091	7.854	CP	58	26	4.79942	16.516	LS	94	30	0.59616	14.985	B
24	21	5.21737	9.836	CP	59	26	5.15275	16.62	LS	95	30	0.86415	16.804	B
25	21	5.41213	11.346	CP	60	26	5.15287	8.213	CP	96	30	0.87896	16.855	B
26	22	0.48026	12.072	B	61	26	5.27024	9.694	CP	97	30	1.87896	17.209	B
27	22	0.48598	12.162	B	62	26	5.27034	9.593	CP	98	30	2.87896	17.556	IO
28	22	0.69593	13.574	B	63	26	5.38937	11.549	CP	99	30	3.87896	17.896	IO
29	22	0.70948	13.621	B	64	26	5.42571	11.863	CP	100	30	4.87896	18.228	LS
30	22	1.70948	13.909	B	65	26	5.65188	13.018	CP	101	30	5.206	18.335	LS
31	22	2.70948	14.191	IO	66	26	5.61086	12.268	CP	102	30	5.20613	10.372	CP
32	22	3.70948	14.467	IO	67	27	0.55475	13.944	B	103	30	5.34503	12.553	CP
33	22	4.70948	14.738	LS	68	27	0.80402	15.63	B	104	30	5.56736	14.285	CP
34	22	5.1048	14.842	LS	69	27	0.82079	15.688	B	105	30	5.59954	14.39	CP
35	22	5.10492	8.148	CP	70	27	1.82079	16.019	B	106	30	5.65215	14.399	CP
					71	27	2.82079	16.342	IO	107	30	5.23529	9.017	CP

## HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengujian tingkat kerusakan pada model tiang jembatan skala laboratorium ini dilakukan untuk mengidentifikasi perilaku non linear dari tiang jembatan ukuran yang sebenarnya. Pengujian dengan metode beban dorong (*pushover test*) telah memberikan hasil mendekati yang analisis secara numerikal menggunakan SAP2000 seperti yang terlihat pada Gambar 7. Validasi hasil numerik dengan menggunakan pengujian beban dorong terhadap model ukuran laboratorium telah menghasilkan kurva deformasi ideal yang dapat memberikan informasi perilaku tiang jembatan yang sebenarnya. Pada pengujian di laboratorium telah menghasilkan retak pertama terjadi akibat gaya 9 kN. Sedangkan perpindahan maksimum yang dihasil adalah sebesar 9 mm akibat gaya lateral 26 kN.



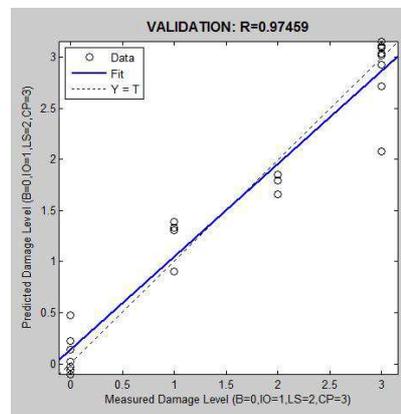
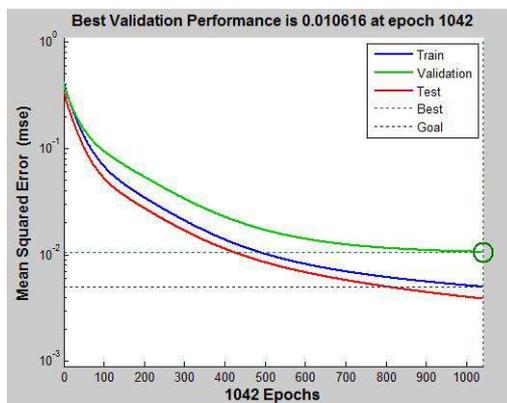
Gambar 7. Kurva statis nonlinear akibat beban lateral pada model tiang jembatan

Hasil perpindahan dan gaya yang ditimbulkan akibat beban lateral pada pengujian di laboratorium divalidasi dengan hasil simulasi numerik SAP2000 dengan berbagai mutu beton mulai dari 20 MPa sampai 30 MPa menggunakan metode Jaringan Saraf Tiruan. Hasil prediksi deformasi yang ditimbulkan untuk mutu 23 MPa dapat dilihat pada Tabel 3.

Tabel.3 Data validasi prediksi deformasi menggunakan mutu beton 23 MPa

F'c	Displacement	Force	Damage		
	(mm)	(kN)	Level	Actual	Prediction
23	0.495197	12.447	B	0	-0.11
23	0.500878	12.537	B	0	-0.11
23	0.717594	13.997	B	0	-0.05
23	0.731079	14.043	B	0	-0.05
23	1.731079	14.339	B	0	0.28
23	2.731079	14.63	IO	1	0.55
23	3.731079	14.914	IO	1	0.92
23	4.731079	15.193	LS	2	1.79
23	5.118798	15.299	LS	2	2.26
23	5.118919	8.76	CP	3	3.42
23	5.244609	10.871	CP	3	3.20
23	5.421492	12.353	CP	3	3.19
23	5.463956	12.567	CP	3	3.21

Hasil *training* dan *testing* data menggunakan Jaringan Saraf Tiruan telah menghasilkan nilai kesalahan terbaik (*Mean Squared Error, MSE*) sebesar 0.010616 dan nilai regresi validasi sebesar 0.97459 seperti terlihat pada Gambar 8.



Gambar 8. Nilai kesalahan (MSE) dan Regresi hasil prediksi tingkat kerusakan model tiang jembatan

### 3. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil analisis yang telah dilakukan dapat disimpulkan bahwa untuk mengetahui perilaku non linear suatu struktur jembatan dapat dilakukan pengujian dengan model skala laboratorium dengan persamaan similitude laws berdasarkan teorema Buckingham. Pengujian di laboratorium dapat dilakukan dengan pengujian beban dorong (*Pushover test*). Nilai MSE sebesar Nilai MSE ini mendekati nilai nol yang berarti nilai prediksi telah menghasilkan kesalahan relatif kecil yaitu kecil dari 5% . Sedangkan nilai regresi validasi sebesar 0.97459 mengidentifikasi hasil prediksi mendekati 97, 5 % mendekati nilai aktual nya. Dengan demikian aplikasi metode Jaringan Saraf Tiruan (JST) pada model struktur jembatan dapat menjadi solusi bagi perencana struktur dalam memprediksi keruntuhan prototip jembatan yang sebenarnya.

### DAFTAR PUSTAKA

- Anonim. (1996). *Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Building Volume 1*. California: Applied Technology Council.
- ASCE. (2000). FEMA 356 Prestandard and Commentary for The Seismic Rehabilitation of Buildings (Vol. FEMA 356).
- Beyer, K. (2013). *Testing Methods in Earthquake Engineering*. Paper presented at the E-SEER Workshop October 16-18, 2013 Universiti Teknologi Malaysia.
- Chen, W.-F., & Duan, L. (Eds.). (2003). *Bridge Engineering Seismic Design*. Florida: CRC Press.
- Kunde, M., & Jangid, R. (2003). Seismic behavior of isolated bridges: A-state-of-the-art review. *Electronic Journal of Structural Engineering*, 3(2), 140-169.
- Lu, X., Fu, G., Shi, W., & Lu, W. (2008). Shake table model testing and its application. *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, 17(1), 181-201. doi:10.1002/tal.338.
- Mamesah, H. Y., Wallah, S. E., & Windah, R. S. (2014). Analisis Pushover pada Bangunan dengan Soft First Story. *JURNAL SIPIL STATIK*, 2(4).
- Nurjannah, S. A., & Megantara, Y. (2011). Pemodelan Struktur Bangunan Gedung Bertingkat Beton Bertulang Rangka Terbuka Simetris di Daerah Rawan Gempa Dengan Metoda Analisis Pushover.
- Pawirodikromo, W. (2012). *Seismologi Teknik dan Kegempaan*. Yogyakarta: Pustaka Pelajar.
- Pranata, Y. A. (2013). Evaluasi Kinerja Gedung Beton Bertulang Tahan Gempa dengan Pushover Analysis (sesuai ATS-40, FEMA 356 dan FEMA 440).
- Suryanita, R., & Adnan, A. (2013). Application of Neural Networks in Bridge Health Prediction based on Acceleration and Displacement Data Domain. *Lecture Notes in Engineering and Computer Science: Proceedings of The International MultiConference of Engineers and Computer Scientists 2013, 13-15 March, 2013, Hong Kong*, 2202(1), pp.42-47.
- Suryanita, R., & Adnan, A. (2014). Early-Warning System in Bridge Monitoring Based on Acceleration and Displacement Data Domain. In G.-C. Yang, S.-I. Ao, X. Huang, & O. Castillo (Eds.), *Transactions on Engineering Technologies* (Vol. 275, pp. 157-169): Springer Netherlands.