



MONOGRAF

Aplikasi Jaringan Saraf Tiruan dalam Pemantauan Kesehatan Struktur Jembatan Beton Bertulang

Reni Suryanita, ST., MT., Ph.D

Aplikasi Jaringan Saraf Tiruan dalam
Pemantauan Kesehatan Struktur Jembatan
Beton Bertulang

Undang-undang Nomor 19 Tahun 2002, tentang Hak Cipta

PASAL 2

- (1) Hak Cipta merupakan hak eksekutif bagi Pencipta dan Pemegang Hak Cipta untuk mengumumkan atau memperbanyak ciptaanya, yang timbul secara otomatis setelah suatu ciptaan dilahirkan tanpa mengurangi pembatasan menurut perundang-undangan yang berlaku.

PASAL 72

- (1) Barang siapa dengan sengaja dan tanpa hak melakukan perbuatan sebagaimana dimaksud dalam Pasal 2 ayat (1) atau Pasal 49 ayat (1) dan ayat (2) dipidana penjara masing-masing paling singkat 1 (satu) bulan dan/atau denda paling sedikit Rp. 1.000.000,00 (Satu Juta Rupiah), atau paling lama 7 (tujuh) tahun dan/atau denda paling banyak Rp. 5.000.000.000,00 (Lima Miliar Rupiah).
- (2) Barang siapa dengan sengaja menyiarkan, memamerkan, mengedarkan, atau menjual kepada umum suatu Ciptaan atau barang hasil pelanggaran Hak Cipta atau Hak Terkait sebagaimana dimaksud pada ayat (1) dipidana dengan pidana penjara paling lama 5 (lima) tahun dan/atau denda paling banyak Rp. 500.000.000,00 (lima ratus juta rupiah).

MONOGRAF

Aplikasi Jaringan Saraf Tiruan dalam Pemantauan Kesehatan Struktur Jembatan Beton Bertulang

Reni Suryanita, ST., MT., Ph.D.

**Penerbit
UR Press Pekanbaru
2018**

**APLIKASI JARINGAN SARAF TIRUAN DALAM
PEMANTAUAN KESEHATAN STRUKTUR JEMBATAN
BETON BERTULANG**

Penulis : Reni Suryanita, ST., MT., Ph.D
Cover dan Tata Letak : UR Press
Diterbitkan oleh UR Press, Desember 2018
Ukuran buku: 15,5 cm x 23 cm

Alamat Penerbit:
Badan Penerbit Universitas Riau
UR Press, Jl Patimura No. 9 Gobah Pekanbaru 28132 Riau
Indonesia
Telp (0761) 22961 Fax (0761) 857397
Email: unri_press@yahoo.co.id
ANGGOTA IKAPI

Hak Cipta dilindungi Undang-undang
Dilarang mengutip atau memperbanyak sebagian atau seluruh isi
buku ini tanpa izin tertulis dari penulis.

Isi diluar tanggung jawab percetakan.

Cetakan Pertama: Desember 2018

ISBN 978-979-792-887-2

KATA PENGANTAR

Alhamdulillah, puji dan syukur kehadiran Allah SWT yang telah melimpahkan rahmat-Nya dan kesempatan kepada penulis untuk menyelesaikan penulisan monograf dengan judul Aplikasi Jaringan Saraf Tiruan dalam Pemantauan Kesehatan Struktur Jembatan Beton Bertulang. Buku monograf ini menampilkan hasil penelitian penulis bersama tim peneliti dan mahasiswa tugas akhir pada Jurusan Teknik Sipil Universitas Riau dari tahun 2015 hingga tahun 2018. Materi buku ini selaras dengan berkembangnya teknologi Kecerdasan Buatan (*Artificial Intelligence, AI*) pada era Revolusi Industri 4.0 ini. Topik yang dibahas dalam buku ini adalah penerapan Jaringan Saraf Tiruan (JST) atau disebut dengan nama lain *Artificial Neural Networks* dalam monitoring struktur jembatan. JST merupakan salah satu cabang ilmu AI yang dapat digunakan untuk memprediksi atau meramalkan sesuatu proses berdasarkan cara kerja otak manusia. Materi buku ini terbagi kedalam 3 bagian yaitu bagian pendahuluan tentang latar belakang penerapan metode JST untuk monitoring kesehatan jembatan, bagian isi mengupas tentang teori dasar dan perhitungan menggunakan metode JST dan bagian akhir menampilkan perhitungan dan analisis hasil penerapan metode JST dalam pemantauan kesehatan struktur jembatan.

Buku Monograf ini diharapkan dapat menjadi referensi bagi akademisi dan praktisi struktur jembatan dalam kegiatan pemeriksaan dan pemantauan secara berkala. Pada kesempatan ini

penulis mengucapkan terima kasih atas bantuan berbagai pihak mulai dari proses penyusunan hingga penerbitan buku monograf ini. Semoga kehadiran buku monograf ini dapat mempermudah pembaca dalam memahami penerapan Jaringan Saraf Tiruan dalam pemantauan kesehatan struktur jembatan beton bertulang.

Pekanbaru, 15 Desember 2018

Penulis

DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR	vi
DAFTAR GAMBAR	x
DAFTAR TABEL.....	xii
BAB 1. PENDAHULUAN	1
1.1. Latar Belakang Permasalahan	1
1.2. Tujuan.....	10
1.3. Ruang Lingkup dan Batasan Masalah.....	10
1.4. Inovasi Penelitian	11
BAB 2. TINJAUAN PUSTAKA	13
2.1 Pembebanan Jembatan	13
2.1.1 Beban Permanen	14
2.1.2 Beban Lalu Lintas.....	15
2.1.3 Beban Gempa.....	17
2.2 Respons Spektrum Gempa Indonesia.....	21
2.3 Analisis Getaran Bebas Struktur	25
2.4 Perpindahan, Kecepatan, dan Percepatan.....	27
2.5 Jaringan Saraf Tiruan (JST)	30
2.5.1 Arsitektur jaringan saraf tiruan	31
2.5.2 Jaringan Saraf Tiruan Backpropagation	33
2.5.3 Koefisien Determinasi (R^2).....	33
2.5.4 Normalisasi Variabel Jaringan Saraf Tiruan.....	34
2.5.5 Sistem Pemantauan Kesehatan Jembatan	35
BAB 3. METODOLOGI PENELITIAN	41
3.1. Analisis Elemen Hingga	42

3.1.1	Dimensi dan Material Komponen Struktur.....	43
3.2.	Pembebanan Struktur Jembatan Beton Prategang.....	46
3.2.1	Perhitungan Beban Permanen.....	46
3.2.2	Perhitungan Beban Lalu Lintas	48
3.2.	Pengembangan Jaringan Saraf Tiruan	57
3.3.	Pembuatan Sistem Pemantauan Cerdas.....	67
BAB 4.	HASIL DAN PEMBAHASAN	69
4.1.	Training dan Testing Jaringan Saraf Tiruan.....	69
4.2.	Pemantauan Jembatan Menggunakan Sensor.....	76
4.3.	Perangkat Lunak Pemantauan Jembatan	77
BAB 5.	KESIMPULAN DAN REKOMENDASI	79
5.1.	Kesimpulan.....	79
5.2.	Rekomendasi	82
DAFTAR PUSTAKA		83
GLOSARIUM.....		89
INDEX		91

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1. Keruntuhan Higashi-Nada Viaduct (Rute 3).....	7
Gambar 1.2 Keruntuhan jembatan Nishinomiya-ko (Rute 5).....	7
Gambar 2.1 Beban Truk “T” (BMS,1992).....	17
Gambar 2.2 Bentuk Tipikal Respons Spektrum Gempa.....	25
Gambar 2.3 Alat Pengukur Perpindahan (<i>LVDT</i>).....	29
Gambar 2.4 Alat Pengukur Kecepatan (<i>UPV</i>).....	29
Gambar 2.5 Alat Pengukur Percepatan (<i>Accelerometer</i>).....	29
Gambar 2.6 Alat <i>Accelerometer</i> pada Jembatan.....	30
Gambar 2.7 Alat <i>LVDT</i> pada Jembatan.....	30
Gambar 2.8 Arsitektur Jaringan Saraf Tiruan.....	32
Gambar 3. 1 Bagan alir penelitian.....	41
Gambar 3. 2 <i>Cross Section</i> jembatan (dalam satuan meter).....	43
Gambar 3. 3 Dimensi penampang <i>girder</i> (dalam satuan meter) ...	44
Gambar 3. 4 Respons Spektrum di kota Banda Aceh.....	54
Gambar 3. 5 Arsitektur JST respons struktur jembatan.....	58
Gambar 3. 6 Arsitektur JST kinerja jembatan.....	59
Gambar 3. 7 Arsitektur JST untuk Contoh Iterasi <i>Training</i> JST ..	60
Gambar 3. 8 Prosedur sistem pemantauan jembatan di server	68
Gambar 4. 1 Hasil prediksi perpindahan arah X.....	70
Gambar 4. 2 Hasil prediksi perpindahan arah Y.....	70
Gambar 4. 3 Hasil prediksi kecepatan arah X.....	71
Gambar 4. 4 Hasil prediksi kecepatan arah Y.....	71
Gambar 4. 5 Hasil prediksi percepatan arah X.....	72

Gambar 4. 6 Hasil prediksi percepatan arah Y	73
Gambar 4. 7 Grafik Jumlah Iterasi vs. <i>MSE</i>	74
Gambar 4. 8 Screenshot perangkat lunak JST Visual Basic coding.	75
Gambar 4. 9 Susunan perangkat pemantauan jembatan	77
Gambar 4. 10 Sistem pemantauan dan pendeteksi kesehatan jembatan.....	78

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1. Berat Isi untuk Beban Permanen (BMS, 1992)	14
Tabel 2.2. Jumlah Lajur Lalu Lintas Rencana (BMS, 1992)	15
Tabel 2.3 Analisis program komputer untuk desain jembatan.....	20
Tabel 2.4 Kelas Situs (Badan Standardisasi Nasional)	22
Tabel 2.5 Faktor Amplifikasi Periode 0 dan 0,2 Detik (F_{PGA}/F_a) ..	23
Tabel 2.6 Faktor Amplifikasi untuk Periode 1 Detik (F_v).....	23
Tabel 2.7 Penerapan JST dalam Studi Teknik Jembatan	39
Tabel 3.2 Parameter Data Gempa Bumi	50
Tabel 3.3 Parameter Gempa Elastik (C_{sm}) Banda Aceh.....	55

BAB 1. PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang Permasalahan

Jembatan merupakan salah satu infrastruktur yang dibangun sebagai penghubung dua lokasi. Adakalanya jembatan dilewati oleh berbagai jenis kendaraan berat seperti *dump truck* dengan muatan berlebih. Untuk itu jembatan harus memiliki kapasitas kekuatan yang cukup untuk menahan beban berat dan beban bergerak yang melewatinya. Konstruksi jembatan juga harus dipantau oleh pihak yang memiliki otoritas dalam pemeliharaan jembatan di Indonesia yaitu Dinas Pekerjaan Umum Bina Marga agar dapat digunakan dalam waktu yang lama dalam masa layan jembatan. Selain itu pemantauan terhadap jembatan secara rutin bertujuan untuk memastikan keselamatan publik pengguna jembatan dan meminimalkan biaya pemeliharaan dan perbaikan jika terjadi kerusakan. Dengan demikian pemeliharaan jembatan secara rutin dapat memperpanjang umur jembatan. Pengoperasian dan pemeliharaan jembatan menjadi lebih kompleks dengan bertambahnya usia jembatan. Salah satu upaya penting dalam mengetahui kinerja jembatan dalam masa layan adalah melalui pemantauan kesehatan jembatan (*Bridge Health Monitoring*).

Prosedur pemantauan kesehatan struktur harus mengacu pada hasil identifikasi terhadap kerusakan struktur tersebut. Pemantauan struktur jembatan dapat juga digunakan untuk melacak aspek kinerja atau kondisi jembatan dengan cara proaktif, menggunakan

data terukur dan simulasi analitik. Konsep pemantauan kesehatan struktur dapat dijelaskan dalam hal manajemen kesehatan preventif dalam ilmu kedokteran. Diagnosis dan tindakan pencegahan dini terhadap penyakit berdampak lebih baik karena peluang untuk sembuh secara signifikan lebih tinggi. Konsep diagnosis seperti ini dalam bidang struktur jembatan dapat menggantikan pemeliharaan berbasis waktu dengan gejala kerusakan yang dapat dideteksi secara dini dengan kata lain penerapan pemeliharaan struktur jembatan berbasis kesehatan struktur. Pemantauan kesehatan struktur jembatan ini juga dapat membantu otoritas pihak berwenang dalam pengambilan keputusan yang rasional.

Umumnya konstruksi jembatan di negara berkembang masih menggunakan pemantauan secara konvensional dalam standarisasi konstruksi jembatan. Pendekatan konvensional ini tidak sesuai lagi dalam era digital sekarang ini. Penerapan sistem dan teknologi informasi sudah banyak diterapkan pada sistem pemantauan kesehatan struktural jembatan di negara-negara maju. Variasi data dan informasi hasil pemantauan jembatan harus direkam secara aktual (*real time*) sehingga struktur jembatan dapat diamati di ruang pemantauan atau dari jarak jauh menggunakan koneksi internet. Dengan demikian, para praktisi jembatan secara rasional dapat membuat keputusan yang tepat berdasarkan hasil pemantauan kesehatan jembatan yang lebih akurat. Sistem pemantauan ini terus berkembang seiring dengan berkembangnya teknologi di era Revolusi Industri Generasi 4.0 dengan menggunakan sistem kecerdasan buatan (*Artificial Intelligence*). Salah satu cabang ilmu

kecerdasan buatan adalah Jaringan Saraf Tiruan (*Artificial Neural Networks*) yang telah berhasil diterapkan dalam penelitian sistem pemantauan kesehatan struktur, baik pada bangunan maupun pada jembatan beton bertulang. Diantara penelitian terdahulu yang telah menerapkan metode Jaringan Saraf Tiruan dalam pemantauan kesehatan struktur jembatan yaitu peneliti Reni Suryanita & Adnan, (2013), Reni Suryanita & Adnan (2014), Reni Suryanita, Mardiyono, & Adnan (2017), dan Reni Suryanita, Mardiyono, & Maizir (2018).

Sistem pemantauan struktur jembatan Indonesia perlu dikembangkan mengikuti perkembangan era digitalisasi. Apalagi Indonesia merupakan salah satu daerah rawan gempa bumi di dunia. Oleh karena itu perencanaan desain struktur dibuat agar mampu memikul beban gempa. Konsep desain ini telah diatur dalam SNI 1726-2002 (SNI-1726-2012, 2012), yang berisi tentang standar perencanaan ketahanan gempa untuk struktur bangunan gedung. Sementara itu, khusus untuk struktur jembatan diatur dalam SNI 2833 (BSN, 2016) tentang perencanaan jembatan untuk pembebanan gempa.

Kajian perencanaan beban gempa pada desain jembatan di Indonesia telah dilakukan oleh beberapa peneliti terdahulu, seperti yang dilakukan oleh Aldiamar (2007) dan (Setiati & Aprianto, 2017) yang membahas perbandingan perencanaan jembatan terhadap pembebanan gempa tahun 2005 dan peta gempa tahun 2010. Sebagian besar data penelitian yang ada hanya membahas perencanaan gempa pada struktur jembatan. Jarang dijumpai *data*

base penelitian jembatan yang membahas sistem pemantauan berdasarkan ilmu kecerdasan buatan (*Artificial Intelligence*) dan prediksi kesehatan struktur jembatan akibat pembebanan gempa bumi. Untuk itu buku monograf ini membahas tentang prediksi respons struktur jembatan dan kinerja struktur jembatan dengan metode respons spektrum gempa dan metode riwayat waktu gempa menggunakan Jaringan Saraf Tiruan.

Dalam dua dekade terakhir, sistem pemantauan struktur secara konvensional telah mulai menggabungkan pengamatan visual dan model matematika perilaku struktur. Saat ini sistem pemantauan struktur secara konvensional telah berkembang menjadi sistem pemantauan secara modern yang menggunakan sensor, dan teknik penalaran otomatis dalam pemantauan jembatan. Ada banyak faktor ketidakpastian dalam proyek konstruksi jembatan yang berdampak besar pada kestabilan struktur jembatan. Di antara faktor-faktor tersebut adalah rendahnya tingkat pemahaman dan pengalaman para praktisi tentang konstruksi dan metode pelaksanaan. Kegagalan dalam pembangunan jembatan dapat menyebabkan kerusakan yang parah pada elemen jembatan dan bahkan mungkin menyebabkan runtuhnya struktur jembatan. Keruntuhan jembatan dapat terjadi secara tiba-tiba tanpa peringatan dini (*warning*) seperti yang terjadi pada Jembatan I-35W di Minneapolis, Minnesota yang dirancang pada tahun 1964. Beberapa tahun setelah keruntuhan Jembatan I-35W di Minneapolis, peneliti Hao (2009) melakukan investigasi dan mengungkapkan bahwa keruntuhan Jembatan I-35W disebabkan

oleh kesalahan dalam pemeliharaan dan penggunaan material pelat *gusset* berukuran lebih kecil dari yang seharusnya untuk konstruksi jembatan tersebut.

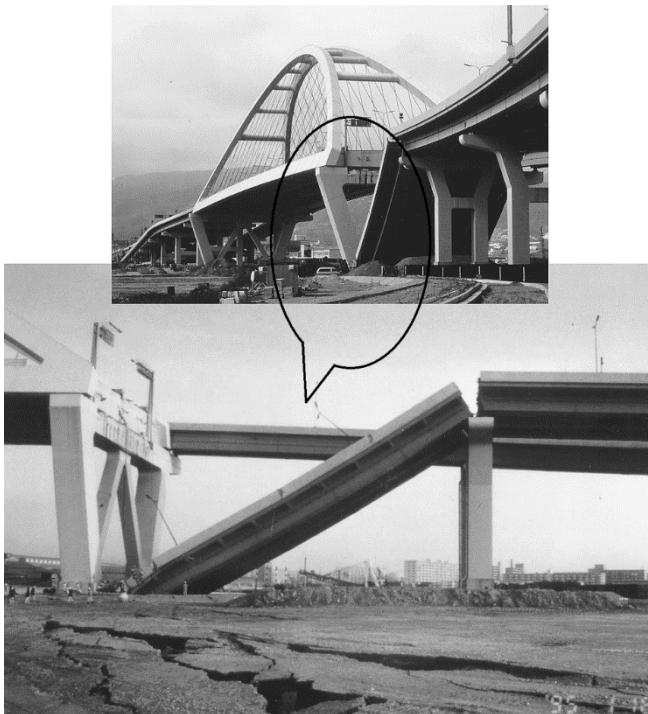
Keruntuhan jembatan yang juga berakibat fatal terjadi pada Jembatan Kutai Kartanegara di Kalimantan Timur pada tanggal 26 November 2011, sekitar 10 tahun setelah konstruksinya selesai dibangun. Jembatan Kutai Kartanegara ini disebut juga sebagai Jembatan Golden Gate Indonesia, yaitu jembatan gantung terpanjang di Indonesia dengan panjang 710 m, namun runtuh dalam waktu kurang dari 20 detik. Tim evaluasi dan investigasi yang ditunjuk oleh Kementerian Pekerjaan Umum mengumumkan bahwa penyebab runtuhnya jembatan Kutai Kartanegara ini adalah akumulasi gaya-gaya yang bekerja pada jembatan tersebut sehingga menyebabkan rapuhnya baut serta lelehnya material jembatan. Selain itu faktor penyebab lainnya adalah prosedur pemeliharaan jembatan tidak dilakukan dengan dengan cara yang benar sesuai standar pelaksanaan. Keruntuhan jembatan Kutai Kartanegara terjadi ketika pekerjaan pemeliharaan jembatan sedang berlangsung. Faktor-faktor ini telah menyebabkan tekanan fatal pada jembatan. Kelalaian dalam pekerjaan pemeliharaan jembatan berdampak lebih besar pada keselamatan manusia, kerusakan fasilitas umum dan ekonomi.

Selain faktor kelalaian manusia dan tingkat pengetahuan pekerja yang rendah, bencana alam seperti gempa bumi juga dapat mempengaruhi stabilitas struktur jembatan. Bahkan jembatan yang dirancang dengan baik dapat mengalami kerusakan sebagai akibat

meningkatnya kerentanan jembatan terhadap modifikasi non-struktural serta kerusakan struktural. Begitu juga dengan usia konstruksi dapat menimbulkan permasalahan yang dihadapi oleh pihak yang berwenang terhadap pemeliharaan jembatan. Tahun pembuatan konstruksi jembatan dapat menjadi indikator tingkat kerusakan. Semakin tinggi tahun pembuatan jembatan, maka semakin berpeluang memiliki resiko terhadap kerusakan jembatan yang lebih tinggi. Salah satu contohnya adalah pembangunan konstruksi jembatan Rute 3 dan Rute 5 Hanshin Expressway di Kobe ketika gempa Kobe terjadi. Rute 3 dibangun pada tahun 1965 hingga 1970, sedangkan Rute 5 selesai dibangun pada awal hingga pertengahan 1990-an. Kedua rute ini sejajar satu sama lain, namun Rute 3 dibangun di daerah daratan sedangkan Rute 5 dibangun sebagian besar di daerah tanah reklamasi. Meskipun kondisi tanah yang berpotensi lebih buruk adalah pada Rute 5, namun efek kerusakan yang timbul setelah gempa Kobe pada tahun 1995 menunjukkan Rute 5 jauh lebih baik kondisinya daripada Rute 3. Rute 3 diperkirakan mengalami kerusakan kecil hingga kerusakan skala besar pada 637 dermaga, dengan kerusakan lebih dari 1300 bentang jembatan dan sekitar 50 bentangnya perlu penggantian seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1.1. Pada saat yang sama, Rute 5 hanya mengalami kerusakan satu bentang jembatan akibat deformasi tanah yang menimbulkan pergeseran pada bentang jembatan. seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1.2.



Gambar 1. 1. keruntuhan Higashi-Nada Viaduct (Rute 3)
(Duan & Chen, 2003)



Gambar 1. 2 Keruntuhan jembatan Nishinomiya-ko (Rute 5)
(Duan & Chen, 2003)

Salah satu upaya yang perlu dilakukan untuk mengatasi resiko kerusakan besar pada jembatan, adalah dengan memantau kondisi jembatan sebelum timbulnya kerusakan. Oleh karena itu, agar mendapatkan masa layan jembatan yang lama dan mengurangi biaya pemeliharaan, maka perlu pelaksanaan yang tepat mulai dari tahap desain hingga tahap konstruksi. Salah satu upaya yang dapat dilakukan adalah dengan membuat sistem manajemen pemantauan kesehatan jembatan selama masa layan jembatan. Sistem manajemen pemantauan ini dapat membantu dalam pengambilan keputusan pemeliharaan dengan mempertimbangkan baik keselamatan struktural dan ekonomi.

Masalah-masalah hambatan pada sistem pemantauan diantaranya kesalahan dalam menginterpretasikan data pemantauan dan pembuatan laporan yang memerlukan waktu lebih lama sehingga pengiriman data ke sistem database (server) akan terlambat. Dalam prakteknya, hasil pemantauan diputuskan sesuai dengan tingkat keahlian praktisi di lapangan. Oleh karena itu, keakuratan dan keandalan hasil pemantauan tergantung kepada pengalaman praktisi. Dengan demikian, para praktisi yang tidak berpengalaman membutuhkan pelatihan khusus sebelum mereka masuk ke lapangan. Mereka harus memahami pengetahuan dasar teknik jembatan tidak hanya dalam teori tetapi juga dalam aplikasi untuk proyek. Namun, sistem pemantauan kesehatan jembatan yang tersedia saat ini yang dapat mengevaluasi dan menganalisis jembatan akibat gempa jumlahnya sangat sedikit dan peralatan

yang digunakan pun masih sangat terbatas. Sistem pemantauan secara konvensional ini belum dapat sepenuhnya menyelesaikan persoalan yang timbul dalam pemeliharaan jembatan. Sistem pemantauan secara konvensional kesulitan dalam penyimpanan data dan melaporkan hasil pemantauan secara aktual. Untuk itu diperlukan inovasi dalam mengembangkan sistem pemantauan kesehatan jembatan dengan menggunakan ilmu Kecerdasan Buatan. Kesalahan terjadi saat melakukan analisis dan menafsirkan pembacaan data dapat dipecahkan dan diminimalkan menggunakan metode Jaringan Saraf Tiruan. Metode ini dikenal dengan istilah metode cerdas yang dapat diterapkan pada sistem pemantauan untuk prediksi kinerja jembatan selama dan setelah gempa bumi secara optimal, akurat dan cepat. Jaringan Saraf Tiruan (JST) memiliki kemampuan untuk memodelkan hubungan non-linear antara satu set variabel input dan output yang sesuai tanpa perlu persamaan matematika yang ditentukan sebelumnya. Selain itu, JST tidak memerlukan informasi awal tentang hubungan antara input model dan output yang sesuai. Dibandingkan dengan metode konvensional, JST mentoleransi data yang relatif tidak tepat, *noise* atau tidak lengkap. Hal ini memungkinkan JST dapat mengatasi keterbatasan metode yang ada dan dapat diterapkan pada banyak kasus dalam bidang Teknik Sipil. Namun, sedikit sekali referensi yang membahas tentang kesehatan struktur jembatan menggunakan sistem sistem JST untuk memprediksi kesehatan jembatan.

1.2. Tujuan

Dalam studi ini, sistem pemantauan dan sistem analisis terintegrasi dalam sistem cerdas yang dapat digunakan untuk memprediksi tingkat kerusakan jembatan di zona seismik termasuk wilayah gempa tinggi dan rendah.

Adapun tujuan studi yang dipaparkan dalam buku ini adalah untuk mengidentifikasi kinerja struktur jembatan berdasarkan nilai respons struktur jembatan, meliputi percepatan dan perpindahan mengikuti riwayat waktu respon struktur jembatan akibat beban gempa. Selain itu, monograf ini juga menampilkan sistem pemantauan cerdas dengan mengintegrasikan analisis, prediksi tingkat kerusakan dan sistem peringatan dini kegempaan untuk struktur jembatan.

1.3. Ruang Lingkup dan Batasan Masalah

Hasil penelitian dapat dipengaruhi oleh beberapa variabel dan faktor yang terlibat. Oleh karena itu, ruang lingkup dan batasan harus didefinisikan dengan jelas untuk mendapatkan hasil yang terbaik sebagaimana disebutkan dalam tujuan penelitian. Ruang lingkup dan batasan masalah yang dibahas dalam penelitian ini adalah:

1. Model jembatan merupakan jembatan prategang dengan total panjang adalah 30,6 meter.

2. Analisis dinamis menggunakan metode riwayat waktu non linier (*Nonlinear Time History Analysis*) menggunakan SAP2000 ver.14.2.
3. Model jembatan dianalisis menggunakan 12 data percepatan gempa bumi dari database *Pacific Earthquake Engineering Research* (PEER) dan data respons spektra Indonesia.
4. Tingkat kerusakan yang ditimbulkan dikategorikan berdasarkan *Federal Emergency Management Agency* (FEMA) 356 yaitu *Immediate Occupancy* (IO), *Life Safety* (LS) dan *Collapse Prevention* (CP).

1.4. Inovasi Penelitian

Dalam praktik saat ini, pemantauan dan analisis data tidak terintegrasi dalam satu sistem tunggal. Oleh karena itu, metode kecerdasan buatan dalam sistem pemantauan kesehatan jembatan ini dikembangkan berdasarkan analisis numerik metode elemen hingga. Sehingga dapat dihasilkan kinerja seismik struktur jembatan dan tingkat kerusakan yang ditimbulkan akibat pembebanan gempa maupun beban dinamik berupa beban dengan fungsi waktu (t) lainnya. Selain berfungsi sebagai alat pemantau kesehatan struktur jembatan yang mudah digunakan berdasarkan data real di lapangan, fitur utama utama dari sistem ini juga mampu memprediksi tingkat kesehatan struktur jembatan jika menerima pembebanan di luar sistem yang telah diinputkan ke dalam sistem utama. Data input si kinerja akan terus peningkatan masukan yang

diperoleh dari simulasi numerik dan data lapangan. Oleh karena itu, sistem ini bermanfaat bagi kalangan pengguna mulai dari perencana hingga pengawas struktur jembatan. Hal ini disebabkan sistem ini bukan hanya sebagai alat pemantauan dengan peringatan untuk publik, tetapi pada saat yang sama sistem ini mampu mengontrol prosedur dan fase konstruksi serta menganalisis dan meramalkan perilaku jembatan di masa depan pada durasi waktu tertentu.

Paparan di atas memberikan gambaran secara umum inovasi yang dikembangkan dalam penelitian ini untuk menghasilkan perangkat digital dari sistem seismik cerdas untuk jembatan. Alat pemantauan dan analisis nya dapat dioperasikan di unit komputer atau perangkat seluler. Sistem cerdas ini bertindak sebagai komponen yang memfasilitasi sistem untuk meramalkan kinerja seismik dan tingkat kerusakan.

BAB 2. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Pembebanan Jembatan

Jembatan merupakan salah satu infrastruktur yang berfungsi untuk menghubungkan dua lokasi yang terputus karena suatu rintangan seperti sungai, lembah, laut, jalan raya, ataupun perlintasan lainnya. Oleh karena itu jembatan sangat dibutuhkan guna memperlancar kegiatan sehari-hari. Dengan demikian perencanaan jembatan harus memenuhi syarat lendutan, kekakuan, dan ketahanan terhadap beban yang bekerja.

Pembebanan jembatan merupakan sejumlah beban yang digunakan dalam perhitungan struktur jembatan agar tidak mengalami kehancuran selama masa layan (umur) jembatan. Adapun beban-beban yang harus dianalisis dalam suatu perencanaan jembatan terbagi atas tiga kelompok, yaitu beban permanen, dan beban lalu lintas, dan beban gempa. Sedangkan analisis struktur jembatan dapat dikategorikan dalam 2 kelompok yaitu analisis statis dan analisis dinamis. Analisis struktural jembatan bertujuan untuk mengevaluasi perilaku jembatan akibat berbagai beban. Analisis statis adalah solusi independensi waktu (t) dengan kata lain fungsi beban tidak terikat waktu (t). Sedangkan analisis dinamis adalah solusi yang terikat dengan waktu (t). Pada analisis statis, jembatan menerima beban statis seperti beban permanen (tetap) pada jembatan tersebut, sedangkan analisis dinamis dimana jembatan menerima beban dinamis seperti beban kendaraan, angin dan gempa selama masa layan jembatan tersebut.

Seiring dengan perkembangan waktu dan kemudahan dalam perhitungan, analisis struktur jembatan dapat diselesaikan dengan metode yang tepat seperti mode tunggal, spektral multimode, *Multiple Support Response-Spectrum* (MSRS), dan metode riwayat waktu (Duan & Chen, 2003).

2.1.1 Beban Permanen

Beban permanen terdiri dari berat sendiri dan beban mati tambahan yang dipikul oleh struktur jembatan. Untuk mengetahui besarnya beban permanen, dapat digunakan nilai berat isi yang terdapat pada Tabel 2.1 (BMS, 1992).

1. Berat sendiri (*self weight*) adalah berat material penyusun elemen struktur atau profil. Termasuk juga bagian jembatan yang terdiri dari elemen struktural seperti *girder*, pelat lantai, dan diafragma.
2. Beban mati tambahan adalah berat seluruh bahan yang menimbulkan suatu beban pada jembatan yang terdiri dari elemen non-struktural. Adapun beban mati tambahan yaitu aspal, trotoar, *kerb*, dan pagar pengaman.

Tabel 2.1. Berat Isi untuk Beban Permanen (BMS, 1992)

No	Bahan	Berat/Satuan Isi (kN/m ³)	Kerapatan Massa (kg/m ³)
1	Lapisan permukaan beraspal	22	2240
2	Aspal	22	2240
3	Beton	22,0 - 25,0	2240 - 2600
4	Beton prategang	25,0 - 26,0	2500 - 2640
5	Beton bertulang	23,5 - 25,5	2400 - 2600
6	Baja	77	7850

2.1.2 Beban Lalu Lintas

Berdasarkan standar pembebanan jembatan, beban lalu lintas merupakan beban bergerak dengan gaya bekerjanya beban dapat berubah posisi. Adapun untuk perencanaan beban lalu lintas pada jembatan terdiri dari beban lajur “D”, beban truk “T”, dan beban pejalan kaki. Beban lajur “D” bekerja pada seluruh lebar jalur kendaraan dan menimbulkan pengaruh pada jembatan yang ekuivalen dengan suatu iring-iringan kendaraan yang sebenarnya. Jumlah total beban lajur “D” yang bekerja tergantung pada lebar jalur kendaraan itu sendiri. Sedangkan beban truk “T” adalah satu kendaraan berat dengan 3 as yang ditempatkan pada beberapa posisi dalam lajur lalu lintas rencana. Tiap as terdiri dari dua bidang kontak pembebanan yang dianggap sebagai simulasi pengaruh berat roda kendaraan. Hanya satu truk “T” diterapkan per lajur lalu lintas rencana.

Lajur lalu lintas rencana harus mempunyai lebar minimum sebesar 2,75 meter. Jumlah maksimum lajur lalu lintas yang digunakan untuk berbagai lebar jembatan dapat dilihat pada Tabel 2.2.

Tabel 2.2. Jumlah Lajur Lalu Lintas Rencana (BMS, 1992)

Jenis Jembatan	Lebar Jalan Kendaraan Jembatan (m)	Jumlah Lajur Lalu Lintas Rencana
Lajur tunggal	4,0 - 5,0	1
Dua arah, tanpa median	5,5 - 8,25	2
	11,25 - 15,0	4
Jalan kendaraan majemuk	10,0 - 12,9	3
	11,25 - 15,0	4
	15,1 - 18,75	5
	18,8 - 22,5	6

Ketentuan pembebanan jembatan yang disyaratkan oleh Peraturan Perencanaan Teknik Jembatan:

1. Beban lajur “D” terdiri dari beban terbagi merata (*UDL*) dan beban garis (*KEL*).

a. *UDL* mempunyai intensitas q kPa yang besarnya tergantung pada panjang total (L). Adapun intensitas q dinyatakan dengan rumus sebagai berikut:

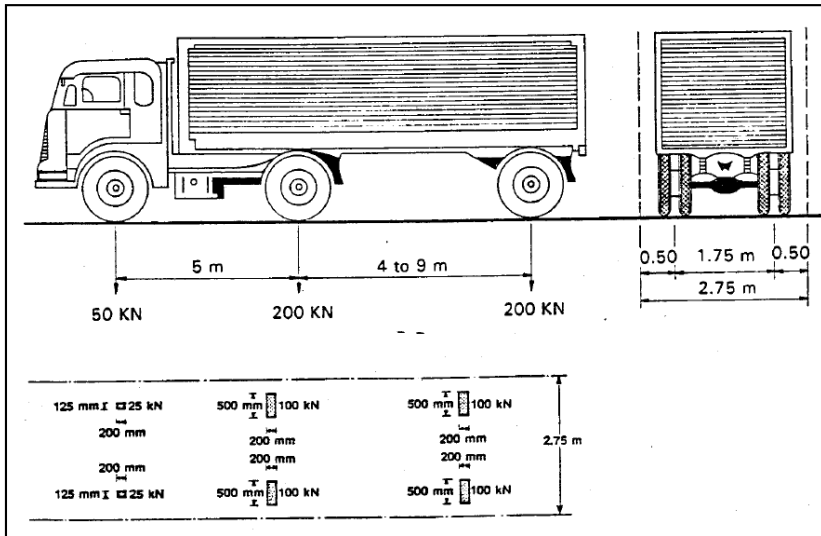
$$L \leq 30 \text{ m} ; q = 8 \text{ kPa} \quad (2.1)$$

$$L > 30 \text{ m} ; q = 8 \left(0.5 + \frac{15}{L} \right) \text{ kPa} \quad (2.2)$$

b. *KEL* mempunyai intensitas p sebesar 44 kN/m yang ditempatkan dalam kedudukan sembarang sepanjang jembatan dan tegak lurus pada arah lalu lintas.

2. Beban truk “T” terdiri dari kendaraan truk semi-trailer yang mempunyai susunan dan beban as seperti pada Gambar 2.1. Berat dari masing-masing as disebarkan menjadi 2 beban titik sama besar yang merupakan bidang kontak antara roda dengan permukaan lantai. Jarak antara as tersebut dapat diubah-ubah antara 4 – 9 meter untuk mendapatkan pengaruh terbesar pada arah memanjang jembatan. Terlepas dari panjang atau susunan bentang, hanya ada satu kendaraan truk “T” yang bisa ditempatkan pada satu lajur lalu lintas rencana.

3. Semua elemen dari trotoar atau jembatan penyeberangan yang langsung memikul pejalan kaki harus direncanakan untuk beban nominal sebesar 5 kPa.



Gambar 2.1 Beban Truk “T” (BMS, 1992).

2.1.3 Beban Gempa

Metode analisis pembeban gempa pada struktur jembatan dapat dibagi 3, yaitu analisis dengan metode statis ekuivalen, respons spektrum, dan metode dinamis riwayat waktu gempa. Beban gempa didefinisikan sebagai gerakan percepatan tanah dari arah transversal dan longitudinal yang diterima struktur. Peneliti terdahulu yang telah mempelajari tentang kinerja jembatan di bawah beban gempa, menggunakan berbagai jenis untuk analisis seismik, seperti analisis respons spektrum dan analisis riwayat waktu yaitu oleh Ning & Zhou (2011) dan (Ates & Constantinou, 2011). Hasil penelitian mereka menunjukkan bahwa percepatan dan perpindahan model menggunakan riwayat waktu jauh lebih besar daripada model menggunakan respons spektra. Sedangkan (Kong, Chen, Li, & Jiang, 2012) mempelajari perilaku jembatan jembatan

gelagar menerus sepanjang lima bentang. Model ini telah dianalisis menggunakan analisis riwayat waktu nonlinear (*Nonlinear Time History Analysis*). Hasil penelitiannya menunjukkan bahwa bagian atas tiang (*pier*) pada model jembatan yang telah diperkaku memiliki respons perpindahan yang lebih kecil daripada model jembatan yang tidak diperkaku pada *pier* nya. Peneliti lain, Konakli & Kiureghian (2011) telah memperkenalkan formulasi umum dari metode *Multiple Support Response Spectrum* (MSRS). Metode MSRS terbatas pada analisis respon linier pada dua model jembatan sebenarnya (*real model*). Hasilnya menunjukkan bahwa kedua model memiliki perpindahan yang berbeda dan menimbulkan efek yang lebih signifikan terhadap respon jembatan karena struktur jembatan diperkaku dan bentang jembatan lebih pendek.

Model analisis seismik harus digunakan untuk menggambarkan respon struktur aktual. Respon seismik dari komponen jembatan seperti tiang jembatan (*pier*), dek dan abutment telah dipelajari oleh banyak peneliti sejak beberapa dekade lalu. Studi penelitian yang lebih rinci diperlukan dengan peningkatan pengetahuan di teknologi jembatan. Kajian peneliti terdahulu terhadap pembebanan seismik dengan analisis dinamis nonlinear pada struktur jembatan telah dilakukan oleh Ni Choine et al. (2016) dan Ma et al. (2017) dengan membahas dasar teori jembatan beton dengan tiang (*pier*) kolom yang memikul beban gempa.

Pada umumnya hasil penelitian yang menggunakan pembebanan seismik menghasilkan respons struktur jembatan berupa percepatan, kecepatan, dan perpindahan (Zeng & Dimitrakopoulos, 2016), rasio Peak Ground Velocity dan Peak Ground Acceleration (Guo, Wu, & Guo, 2016), dan kekuatan internal lainnya seperti gaya aksial, momen lentur, stres, dan gaya geser (Arifi, Suseno, Hidayat, & Grahadika, 2017)(Meidiansyah, Purwanto, & Fauzan, 2016). Analisis jembatan di bawah beban gempa lebih mudah diselesaikan dengan program komputer menggunakan metode elemen hingga bahkan untuk masalah non-linear yang rumit seperti yang telah dilakukan pada penelitian terdahulu (Reni Suryanita, 2015). Selanjutnya, program komputer dengan metode elemen hingga dapat digunakan untuk mengambil keputusan dan kebijakan dalam desain bagi perencana struktur. Tabel 2.3 menunjukkan analisis elemen hingga pada program komputer dapat digunakan dalam memecahkan permasalahan struktur jembatan.

Tabel 2.3 Analisis program komputer untuk desain jembatan

Peneliti	Model	Analisis	Program Elemen Hingga yang digunakan
Y. Zhang, Harries, & Yuan, (2013)	Prototipe tiang jembatan yang mempunyai lubang persegi	Nonlinear	Open Systems for Earthquake Engineering Simulation (OpenSees)
Behnamfar & Afshari, (2013)	Jembatan rel kereta api	Dinamik Nonlinear	SAP2000
C. H. Zhang & Dai (2012)	Jembatan rangka menerus kaku dengan bentang panjang	Analisis modal dengan eksitasi beban luar	ABAQUS
Álvarez, Aparicio, Jara, & Jara (2012)	Jembatan lengkung bentang panjang	Nonlinear riwayat waktu	SAP2000
Ning & Zhou, (2011)	Jembatan rangka kaku bentang panjang	Respons spektrum dan riwayat waktu	ANSYS
Kong et al., (2012)	Jembatan balok lengkung menerus dengan 5 bentang	Nonlinear riwayat waktu	Midas/Civil Software

Ates & Constantinou (2011)	Jembatan curved box girder 3 bentang	Respons spektra dan riwayat waktu	SAP2000
Bisadi & Head, (2011)	Jembatan dengan 100 konfigurasi pembebanan	Nonlinear riwayat waktu	Open Systems for Earthquake Engineering Simulation (OpenSees)

2.2 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 yang ditampilkan pada Gambar 2.2.

Respons spektrum gempa di seluruh wilayah Indonesia untuk struktur jembatan diatur dalam Standar Nasional Indonesia (BSN, 2016). Prosedur untuk memperoleh grafik respons spektrum gempa berdasarkan SNI sebagai berikut.

1. Menentukan parameter respons spektrum percepatan gempa PGA , S_s , dan S_I pada peta gempa Indonesia 2010.
2. Menentukan kelas situs berdasarkan kondisi jenis tanah yang ditampilkan pada Tabel 2.4.

Tabel 2.4 Kelas Situs (Badan Standardisasi Nasional)

Kelas Situs	Kecepatan Gelombang Geser, \bar{v}_s (m/detik)	Tahanan Penetrasi Standar, \bar{N}	Kuat Geser Tak Terdrainase, \bar{s}_u (kPa)
SA (batuan keras)	> 1500	N/A	N/A
SB (batuan)	750 - 1500	N/A	N/A
SC (tanah keras, sangat padat, dan batuan lunak)	350 - 750	> 50	≥ 100
SD (tanah sedang)	175 - 350	15 - 50	50 - 100
SE (tanah lunak)	< 175	< 15	< 50
	Atau setiap profil lapisan tanah dengan ketebalan lebih dari 3 m dengan karakteristik sebagai berikut:		
	1. Indeks plastisitas, $PI > 20$,		
	2. Kadar air, $w \geq 40\%$,		
	3. Kuat geser tak terdrainase, $\bar{s}_u < 25$ kPa		
SF (tanah khusus, yang membutuhkan investigasi geoteknik spesifik dan analisis respons spesifik-situs)	Setiap profil lapisan tanah yang memiliki salah satu atau lebih dari karakteristik berikut:		
	- Rawan dan berpotensi gagal atau runtuh akibat beban gempa seperti mudah likuifaksi, lempung sangat sensitif, tanah tersementasi lemah.		
	- Lempung sangat organik dan/atau gambut (ketebalan $H > 3$ m).		
	- Lempung berplastisitas sangat tinggi (ketebalan $H > 7,5$ m dengan Indeks Plastisitas $PI > 75$).		
	Lapisan lempung lunak/setengah teguh dengan ketebalan $H > 35$ m		

CATATAN: N/A = tidak dapat digunakan

3. Menentukan faktor amplifikasi F_{PGA} , F_a , dan F_v berdasarkan parameter respons spektrum percepatan gempa yang ditampilkan pada Tabel 2.5 dan Tabel 2.6.

Tabel 2.5 Faktor Amplifikasi Periode 0 dan 0,2 Detik (F_{PGA}/F_a)

Kelas Situs	$PGA \leq 0,1$	$PGA = 0,2$	$PGA = 0,3$	$PGA = 0,4$	$PGA > 0,5$
	$S_s \leq 0,25$	$S_s = 0,5$	$S_s = 0,75$	$S_s = 1,0$	$S_s \geq 1,25$
Batuan Keras (SA)	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
Batuan (SB)	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
Tanah Keras (SC)	1,2	1,2	1,1	1,0	1,0
Tanah Sedang (SD)	1,6	1,4	1,2	1,1	1,0
Tanah Lunak (SE)	2,5	1,7	1,2	0,9	0,9
Tanah Khusus (SF)	SS	SS	SS	SS	SS

CATATAN: Untuk nilai-nilai antara dapat dilakukan interpolasi linear.

Keterangan:

- PGA adalah percepatan puncak batuan dasar mengacu pada Peta Gempa Indonesia 2010 yang dapat dilihat pada Lampiran.
- S_s adalah parameter respons spektral percepatan gempa untuk periode pendek ($T = 0,2$ detik) mengacu pada Peta Gempa Indonesia 2010 yang dapat dilihat pada Lampiran.
- SS adalah lokasi yang memerlukan investigasi geoteknik dan analisis respons dinamik spesifik.

Tabel 2.6 Faktor Amplifikasi untuk Periode 1 Detik (F_v)

Kelas Situs	$S_I \leq 0,1$	$S_I = 0,2$	$S_I = 0,3$	$S_I = 0,4$	$S_I \geq 0,5$
Batuan Keras (SA)	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
Batuan (SB)	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
Tanah Keras (SC)	1,7	1,6	1,5	1,4	1,3
Tanah Sedang (SD)	2,4	2,0	1,8	1,6	1,5
Tanah Lunak (SE)	3,5	3,2	2,8	2,4	2,4
Tanah Khusus (SF)	SS	SS	SS	SS	SS

CATATAN: Untuk nilai-nilai antara dapat dilakukan interpolasi linear.

Keterangan:

- S_I adalah parameter respons spektral percepatan gempa untuk periode 1 detik mengacu pada Peta Gempa Indonesia 2010 yang dapat dilihat pada Lampiran
- SS adalah lokasi yang memerlukan investigasi geoteknik dan analisis respons dinamik spesifik.

- Menghitung koefisien percepatan muka tanah untuk periode 0 detik (A_s), periode pendek (S_{DS}), dan periode 1 detik (S_{D1}) dengan Persamaan 2.3, Persamaan 2.4, dan Persamaan 2.5.

$$A_s = F_{PGA} \times PGA \quad (2.3)$$

$$S_{DS} = F_a \times S_s \quad (2.4)$$

$$S_{D1} = F_v \times S_1 \quad (2.5)$$

5. Menghitung nilai T_0 dan T_s dengan Persamaan 2.6 dan Persamaan 2.7.

$$T_0 = 0,2 T_s \quad (2.6)$$

$$T_s = \frac{S_{D1}}{S_{DS}} \quad (2.7)$$

Koefisien gempa elastik dapat dihitung dengan tahapan sebagai berikut.

1. Untuk periode lebih kecil dari T_0 , koefisien respons gempa elastik (C_{sm}) didapatkan dari Persamaan 2.8.

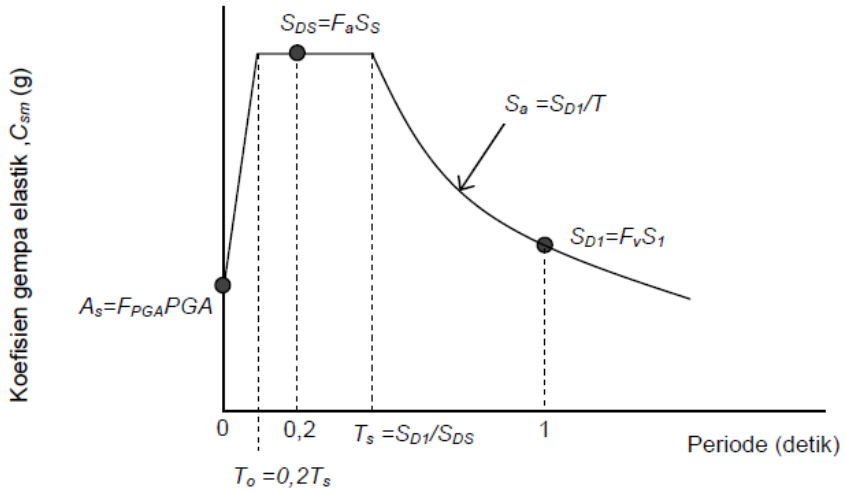
$$C_{sm} = (S_{DS} - A_s) \frac{T}{T_0} - A_s \quad (2.8)$$

2. Untuk periode lebih besar atau sama dengan T_0 , dan lebih kecil atau sama dengan T_s , koefisien C_{sm} didapatkan dari Persamaan 2.9.

$$C_{sm} = S_{DS} \quad (2.9)$$

3. Untuk periode lebih besar dari T_s , koefisien C_{sm} didapatkan dari Persamaan 2.10.

$$C_{sm} = \frac{S_{D1}}{T} \quad (2.10)$$



Gambar 2.2 Bentuk Tipikal Respons Spektrum Gempa

2.3 Analisis Getaran Bebas Struktur

Analisis getaran bebas struktur (*free vibration*) adalah analisis linear dinamik yang dilakukan untuk memperoleh pola perpindahan dan frekuensi getar struktur yang bergetar secara alami tanpa pengaruh beban luar (Computer & Structures, Inc, 2013). Analisis getaran bebas disebut juga dengan analisis ragam (*modal analysis*).

Sistem struktur dengan derajat kebebasan banyak atau *multi degree of freedom* (MDOF) *system* didefinisikan sebagai sistem struktur yang bergetar dengan lebih dari satu buah parameter perpindahan (y_i) dan massa (M_i). Berdasarkan Chopra, (1997), karakteristik getaran bebas sistem MDOF dapat ditentukan dengan menggunakan sistem matriks untuk menyatakan persamaan kesetimbangan gaya, yaitu seperti ditunjukkan pada Persamaan 2.11. $\{\ddot{u}\}$, $\{\dot{u}\}$, dan $\{u\}$ merupakan matriks percepatan, kecepatan, dan

perpindahan. $[\bar{M}]$, $[\bar{C}]$, dan $[\bar{K}]$ adalah matriks massa, redaman, dan kekakuan struktur secara berurutan.

$$[\bar{M}]\{\ddot{u}\} + [\bar{C}]\{\dot{u}\} + [\bar{K}]\{u\} = \{0\} \quad (2.11)$$

Redaman struktur umumnya sangat kecil dan tidak banyak mempengaruhi karakteristik getaran bebas sistem MDOF, seperti periode getar dan pola perpindahan. Untuk penyederhanaan, komponen $[\bar{C}]$ pada Persamaan 2.11 dapat dianggap sama dengan nol, sehingga menjadi Persamaan 2.12. Solusi Persamaan 2.12 dapat diperoleh dengan mensubstitusikan Persamaan 2.13 ke dalam Persamaan 2.12, sehingga dapat diturunkan lagi menjadi Persamaan 2.14. Pada Persamaan 2.13 dan 2.14, matriks $\{a\}$ adalah amplitudo gerak, ω adalah frekuensi sudut getaran dalam satuan rad/detik, dan α adalah faktor modifikasi sudut fase.

$$[\bar{M}]\{\ddot{u}\} + [\bar{K}]\{u\} = \{0\} \quad (2.12)$$

$$\{u\} = \{a\} \sin(\omega t - \alpha) \quad (2.13)$$

$$[[\bar{K}] - \omega^2[\bar{M}]]\{a\} = \{0\} \quad (2.14)$$

Nilai matriks $\{a\}$ pada Persamaan 2.14 tidak mungkin sama dengan nol, sehingga solusi non-trivialnya dapat diperoleh dengan menyamakan determinan komponen $[[\bar{K}] - \omega^2[\bar{M}]]$ dengan nol (Persamaan 2.15). Karena nilai matriks $[\bar{K}]$ dan matriks $[\bar{M}]$ adalah konstan dan bukan nol, maka nilai ω harus ditentukan sedemikian rupa sehingga determinan $[[\bar{K}] - \omega^2[\bar{M}]]$ sama dengan nol. Untuk sistem MDOF dengan n buah derajat kebebasan, akan diperoleh n buah nilai ω yang menunjukkan frekuensi sudut getaran struktur pada ragam ke-1 hingga ragam ke- n .

$$|[\bar{K}] - \omega^2[\bar{M}]| = 0 \quad (2.15)$$

Parameter ω dapat digunakan untuk menghitung periode (T) dan frekuensi (f) getar struktur, yaitu menggunakan Persamaan 2.16 dan 2.17. Parameter f merupakan frekuensi getar yang dinyatakan dalam siklus per detik, berbeda dengan ω yang dinyatakan dalam rad/detik. Parameter T sangat penting untuk analisis spektrum respons ragam, yaitu untuk memperoleh respons struktur maksimum.

$$T = \frac{2\pi}{\omega} \quad (2.16)$$

$$f = \frac{1}{T} = \frac{\omega}{2\pi} \quad (2.17)$$

2.4 Perpindahan, Kecepatan, dan Percepatan

Pada analisis spektrum respons untuk setiap respons ragam individual, hubungan antara perpindahan, kecepatan, dan percepatan maksimum merupakan fungsi dari frekuensi sudut getaran struktur pada ragam tersebut (ω_i). Persamaan 2.18 menunjukkan hubungan antara percepatan maksimum ($S_{a,i}$) dengan perpindahan maksimum struktur ($S_{D,i}$), sedangkan Persamaan 2.19 menunjukkan hubungan antara perpindahan maksimum ($S_{D,i}$) dengan kecepatan maksimum struktur ($S_{v,i}$).

$$S_{a,i} = -\omega_i^2 S_{D,i} \quad (2.18)$$

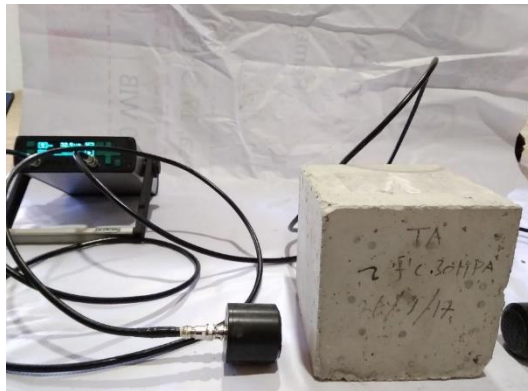
$$S_{v,i} = \omega_i S_{D,i} \quad (2.19)$$

Pada umumnya, pengaplikasian respons struktur berupa perpindahan, kecepatan, dan percepatan di lapangan digunakan untuk *monitoring* kinerja dari suatu struktur. Alat yang digunakan untuk mengukur perpindahan, kecepatan, dan percepatan masing-masing yaitu *Linear Variable Differential Transformer (LVDT)* berfungsi untuk mengukur perubahan panjang atau perpindahan yang terjadi pada suatu struktur akibat beban yang bekerja, *Ultrasonic Pulse Velocity (UPV)* berfungsi untuk mengukur mutu beton, serta kualitas beton, dan *Accelerometer* berfungsi untuk mengukur percepatan kendaraan dan percepatan muka tanah. Ketiga alat tersebut secara berurutan ditampilkan pada Gambar 2.3, Gambar 2.4, dan Gambar 2.5. Adapun alat-alat tersebut juga diaplikasikan pada struktur jembatan seperti yang ditampilkan pada Gambar 2.6 dan Gambar 2.7.

Biasanya ketiga alat ini dipasang secara bersamaan pada titik yang sama, namun kadang kala ada juga dipasang hanya salah satu dari ketiga alat tersebut, karena dengan mengetahui salah satu dari respons struktur tersebut, maka dapat diketahui respons struktur lainnya. Hal ini disebabkan ketiga respons struktur tersebut saling berhubungan, dengan kecepatan merupakan turunan pertama perpindahan terhadap fungsi waktu, percepatan merupakan turunan kedua perpindahan terhadap fungsi waktu, dan percepatan merupakan turunan pertama kecepatan terhadap fungsi waktu.



Gambar 2.3 Alat Pengukur Perpindahan (*LVDT*)



Gambar 2.4 Alat Pengukur Kecepatan (*UPV*)



Gambar 2.5 Alat Pengukur Percepatan (*Accelerometer*)



Gambar 2.6 Alat *Accelerometer* pada Jembatan



Gambar 2.7 Alat *LVDT* pada Jembatan

2.5 Jaringan Saraf Tiruan (JST)

Metode Jaringan Saraf Tiruan (*Artificial Neural Network*, ANN) merupakan cabang ilmu kecerdasan buatan mendefinisikan metode JST ini dengan nama adalah sebuah model matematika atau model komputasi yang cara kerjanya merupakan penyederhanaan

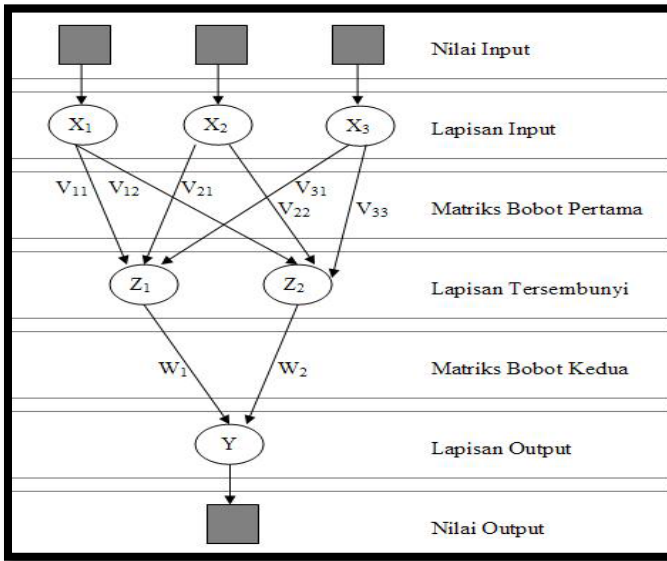
dari model jaringan biologi otak manusia. Hal ini dikarenakan pada prinsipnya JST merupakan suatu program komputer yang dibuat berdasarkan cara kerja jaringan biologi otak manusia.

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*). Pada jaringan saraf, neuron-neuron akan dikumpulkan dalam lapisan-lapisan (*layer*) yang disebut dengan lapisan neuron (*neuron layers*).

2.5.1 Arsitektur jaringan saraf tiruan

Struktur JST umumnya terdiri dari *input layer*, *hidden layer*, dan *output layer*. *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. Untuk lebih

jelasnya, cara kerja dari jaringan saraf tiruan dapat dilihat pada Gambar 2.8.



Gambar 2.8 Arsitektur Jaringan Saraf Tiruan

Pada Gambar 2.8, lapisan *input* (*input layer*) memiliki 3 neuron, yaitu X_1 , X_2 , dan X_3 . Lapisan tersembunyi (*hidden layer*) memiliki 2 neuron, yaitu Z_1 dan Z_2 . Sedangkan lapisan *output* (*output layer*) memiliki 1 neuron, yaitu Y . Proses dari jaringan syaraf tersebut dimulai dari Z_1 dan Z_2 pada *hidden layer* menerima sinyal dari X_1 , X_2 , dan X_3 pada *input layer* dengan bobot masing-masing V_{11} , V_{21} , dan V_{31} . Ketiga impuls neuron tersebut dijumlahkan dengan rumusan $Z_1 = X_1 V_{11} + X_2 V_{21} + X_3 V_{31}$. Kemudian Y pada *output layer* akan menerima sinyal dari Z_1 dan Z_2 dengan bobot masing-masing W_1 dan W_2 . Kedua impuls neuron tersebut dijumlahkan dengan rumusan $Y = Z_1 W_1 + Z_2 W_2$.

2.5.2 Jaringan Saraf Tiruan *Backpropagation*

JST *Backpropagation* merupakan salah satu algoritma yang sering digunakan dalam menyelesaikan masalah-masalah yang rumit. Metode ini merupakan metode yang sangat baik dalam menangani masalah pengenalan pola-pola kompleks.

Karakteristik fungsi aktivasi dari JST *Backpropagation* adalah harus kontinu, dapat didiferensiasikan, dan monoton tidak turun. Fungsi tersebut diuraikan sebagai berikut.

$$f(x) = \frac{1}{1 + e^{-x}} \quad (2.20)$$

$$f(x)' = f(x)[1 - f(x)] \quad (2.21)$$

JST *Backpropagation* terdiri dari tiga proses perhitungan, yaitu perhitungan maju (*forward*), perhitungan mundur (*backpropagation*), dan perubahan bobot dan bias. Pada perhitungan maju, data dimasukkan ke tiap neuron dalam *input layer* dan perhitungan dilanjutkan sampai ke *output layer*. Perbedaan antara nilai *output* yang diprediksi JST dengan nilai *output* yang semestinya (nilai target) disebut tingkat kesalahan (*error*). Nilai *error* tersebut kemudian digunakan untuk memodifikasi faktor bobot JST dalam proses perhitungan mundur dari *output layer* ke *input layer*.

2.5.3 Koefisien Determinasi (R^2)

Selain dengan menghitung *MSE*, akurasi dari prediksi JST dapat ditentukan dengan menghitung koefisien determinasi (R^2).

Menurut Supriyadi, Adi, & Sarwoko (2012), nilai R^2 dihitung dengan Persamaan 2.22, yaitu merupakan fungsi dari selisih *output* prediksi JST (Y_k) dengan nilai target (T_k). Besaran T_{avg} adalah nilai rerata dari seluruh nilai target sebanyak n buah data. Semakin baik prediksi JST terhadap nilai yang sebenarnya (target), maka nilai R^2 mendekati 1.

$$R^2 = 1 - \left[\frac{\sum_k^n (T_k - Y_k)^2}{\sum_k^n (T_k - T_{avg})^2} \right] \quad (2.22)$$

2.5.4 Normalisasi Variabel Jaringan Saraf Tiruan

Parameter *input* dan target pada JST umumnya memiliki dimensi, satuan, dan rentang nilai yang berbeda-beda. Untuk mengurangi kesenjangan antara nilai parameter *input* dan *output*, data mentah yang digunakan untuk melatih JST harus dinormalisasi terlebih dahulu. Normalisasi data mentah JST dilakukan dengan Persamaan 2.23.

$$V_{new} = \frac{V_{old} - MinV}{MaxV - MinV} \times (D_{max} - D_{min}) + D_{min} \quad (2.23)$$

Sel-sel yang mewakili fungsi (γ) yang menjumlahkan produk-produk dari bobot (w_i) dan input (u_i) dan juga menambahkan bias (w_0) seperti yang ditunjukkan dalam persamaan di bawah ini,

$$\gamma = w_0 + \sum_{i=1}^3 u_i w_i \quad (2.24)$$

Umumnya, Jaringan Saraf Tiruan (JST) memiliki satu atau lebih lapisan tersembunyi (*hidden layer*) dan lapisan keluaran (*output layer*). Proses JST ini dihitung dari lapisan input (*input layer*) menuju *hidden layer*. Selanjutnya hasil dari *hidden layer* digunakan untuk menghitung *output layer*. Kesalahan (*error*) dalam sel output dikoreksi dan dihitung kembali nilai kesalahan terbaru dengan menyesuaikan bobot (*weight*) melalui *hidden layer*, dan dihitung kembali menuju lapisan input. Oleh karena itu, konvergensi kesalahan bisa memakan waktu tergantung pada kesalahan yang diizinkan dalam *output layer*. Kesalahan total dalam output JST didefinisikan sebagai,

$$E = \frac{1}{2} \sum_{j \in J} (T_j - O_j)^2 \quad (2.25)$$

di mana T_j menunjukkan *output target*, O_j menunjukkan nilai aktivasi *output layer* dan J adalah banyaknya perulangan untuk proses *learning*.

2.5.5 Sistem Pemantauan Kesehatan Jembatan

Secara umum, tujuan pemantauan jembatan adalah untuk memastikan keselamatan jembatan; perencanaan pemeliharaan yang lebih baik; untuk memperpanjang umur jembatan yang kurang; dan untuk meningkatkan pengetahuan struktur. Pemantauan jembatan juga digunakan untuk melacak aspek kinerja atau kondisi jembatan secara proaktif, menggunakan data terukur dan simulasi analitis

Melalui pemantauan kesehatan jembatan, fenomena yang dapat berdampak negatif pada kinerja masa depan jembatan dapat diidentifikasi. Pemantauan Kesehatan Struktural (SHM) dalam prakteknya membutuhkan pendekatan terstruktur. Berdasarkan Wenzel (2008), hasil terbaik dan paling memuaskan dari SHM akan tercapai jika isu-isu berikut ini ditangani. Pertama, konsep, desain, dan tujuan SHM harus didefinisikan dengan jelas. Kedua, analisis biaya-manfaat dan optimasi instalasi sensor harus dipertimbangkan dengan bijak. Ketiga, perangkat lunak, perangkat keras dan komunikasi dan antarmuka web dalam sistem pemantauan server harus direncanakan dengan hati-hati. Keempat, analisis dan pemeliharaan dan pelaporan berkala harus dilakukan oleh para ahli. Masalah terakhir, sistem threshold dan alert pada server monitoring harus dipersiapkan dengan baik. Masalah-masalah harus ditangani dengan kerja tim yang baik untuk memastikan keberhasilan SHM.

Kecerdasan buatan atau dengan sebutan lain *Artificial Intelligence* (AI) dapat diterapkan pada sistem penyedia server. AI memprediksi hasil observasi berdasarkan metode belajar mandiri. Oleh karena itu, operator memutuskan hasil pemantauan berdasarkan pengamatan online. alkan, menggunakan teknologi yang tersedia (Wenzel, 2009). Sementara itu, pemantauan jangka panjang dapat dikategorikan ke dalam pemantauan permanen. Para peneliti dapat mengamati perilaku struktur jembatan sepanjang masa hidup jembatan.

Era konstruksi jembatan adalah indikator yang baik dari kinerja jembatan yang mungkin, yang tingkat kerusakannya lebih tinggi diharapkan dalam konstruksi yang lebih tua daripada konstruksi yang lebih baru (Chen dan Duan, 2003). Jembatan yang lebih tua mengakumulasi lebih banyak beban sepanjang waktu. Oleh karena itu, pemantauan struktur jembatan perlu dilakukan secara berkala untuk mengetahui kondisi kesehatan jembatan pada waktu yang diberikan. Kerusakan struktur jembatan biasanya didefinisikan sebagai perubahan yang disengaja atau tidak disengaja dalam sifat-sifat material dan geometrik jembatan, termasuk perubahan dalam kondisi batas atau pendukung dan konektivitas struktural, yang berdampak buruk terhadap kemampuan jembatan saat ini atau masa depan. Kerusakan dapat terjadi di bawah beban transien besar seperti gempa bumi gerakan kuat dan juga dapat terakumulasi secara bertahap dalam jangka waktu yang lama karena faktor-faktor seperti kelelahan dan kerusakan korosi. Dalam pemantauan kesehatan jembatan, kerusakan dapat diketahui dan dideteksi secara dini melalui pembacaan data yang diperoleh dari sensor, seperti percepatan, pemindahan, regangan, dll. Pembacaan data dari sensor dikirim ke server lokal melalui akuisisi data. Selanjutnya, data dianalisis dalam sistem pemantauan.

Pemantauan jembatan perlu dilakukan secara teratur untuk menjaga dan mengevaluasi kondisi kesehatan jembatan secara berkala. Secara umum, Teknologi Informasi mampu membantu

otoritas jembatan untuk mengawasi kondisi jembatan dari daerah terpencil melalui koneksi internet. Data diukur oleh sensor yang dipasang dan dikirim ke alat akuisisi. Data ini menggambarkan kondisi jembatan yang sebenarnya. Prediksi kondisi jembatan untuk waktu yang diberikan dapat dilakukan dengan menggunakan algoritma JST. Proses pelatihan dan pengujian pada algoritma JST memanfaatkan data lapangan aktual sebagai input. Output target adalah solusi teoritis dari masalah yang sedang dianalisis. Hasilnya diyakini oleh para peneliti untuk lebih dapat diandalkan daripada metode konvensional lainnya. Beberapa peneliti tertarik untuk mengembangkan algoritme Neural Networks meskipun bentuk dasarnya saat ini memecahkan masalah pemetaan langsung.

Kinerja terbaik Jaringan Saraf bergantung pada pemilihan bobot awal yang sesuai, tingkat pembelajaran, momentum, model arsitektur jaringan dan fungsi aktivasi. Keakuratan hasil pengukuran didasarkan pada nilai *Mean Square Error* (MSE), nilai *Regression* (R), dan durasi waktu saat *Computer Processing Unit* (CPU) dijalankan. Kinerja terbaik dari nilai-nilai MSE adalah nilai prediksi yang paling kecil kesalahannya, yaitu kesalahan terkecil yang terjadi dalam perhitungan. Namun, nilai regresi terbaik adalah nilai tertinggi yang mendekati 1. Regresi dengan nilai mendekati 1 mendefinisikan nilai prediksi hampir 100% mendekati nilai aktual. Kinerja terbaik waktu CPU didefinisikan sebagai waktu terpendek untuk memproses perhitungan di CPU. Waktu CPU diukur dalam detik. Waktu CPU tergantung pada daya komputasi dan spesifikasi

komputer CPU. Sintesis dari beberapa penelitian menggunakan algoritma JST sebagai solusi masalah bidang struktur jembatan ditampilkan dalam Tabel 2.7.

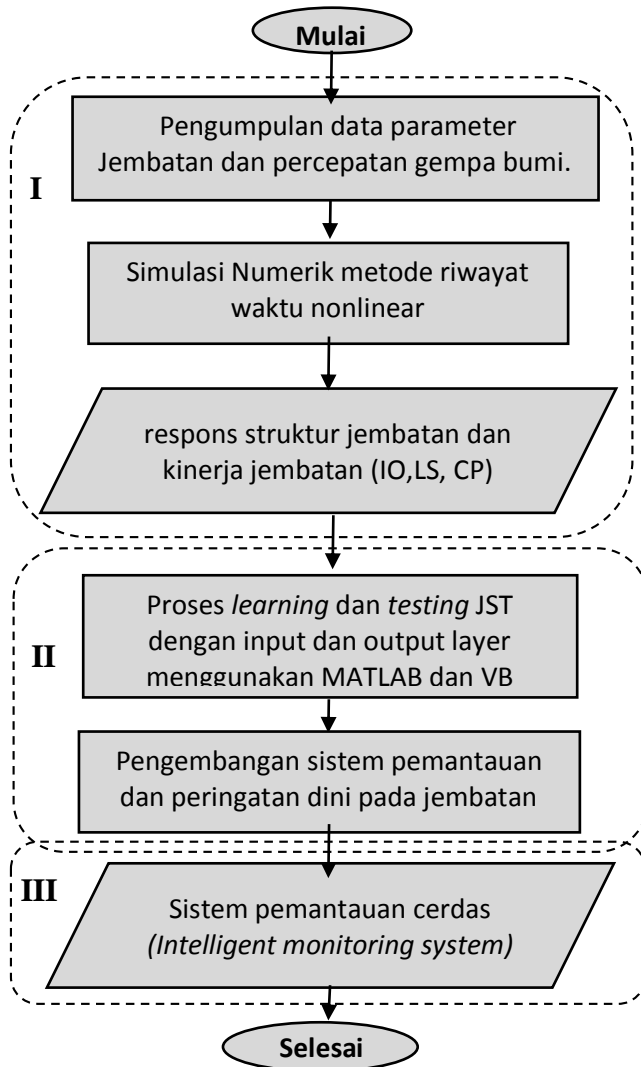
Tabel 2.7 Penerapan JST dalam Studi Teknik Jembatan

PENELITI	INPUT/OUTPUT	MODEL	TUJUAN
Shu, Zhang, Gonzalez, & Karoumi, (2013)	Input: Response dinamik struktur. Output: Lokasi dan tingkat kerusakan	Jembatan rel dengan balok sederhana 1 bentang	Mengidentifikasi kerusakan struktur akibat respons dinamik
Lin & Qun, (2013)	Input: Perpindahan vertikal pada titik pengamatan Output: luas penampang melintang batang	Model jembatan rangka	Mempredikti kerusakan dari jembatan rangka berdasarkan domain waktu
Kerh, Huang, & Gunaratnam, (2011)	Input: kedalaman tanah, jarak episentrum, besarnya magnietudo Output: PGA	Jembatan bentang panjang lebih 500m	Mengidentifikasi potensi kerusakan jembatan
Ok, Son, & Lim, (2012)	Input: regangan aksial dan perpindahan dengan durasi waktu pada titik	Jembatan <i>supported slab-girder</i>	Estimasi perpindahan dinamik akibat beban dinamik

	pengamatan Output: perpindahan dinamik vertikal		
Cheng & Li, (2012)	Input: Sejumlah variabel acak (bobot, beban terpusat, luas penampang melintang, momen inersia, tegangan awal) Output: indeks realibilitas	Jembatan prategang	Estimasi realibilitas jembatan prategang
Gonzalez- Perez & Valdes- Gonzalez, (2011)	Input: Perbedaan energi regangan Output: Kekakuan	Jembatan kenderaan	Mengidentifikasi kerusakan akibat lentur pada girder jembatan.

BAB 3. METODOLOGI PENELITIAN

Prosedur penelitian dibagi menjadi 3 bagian seperti terlihat pada Gambar 3.1.

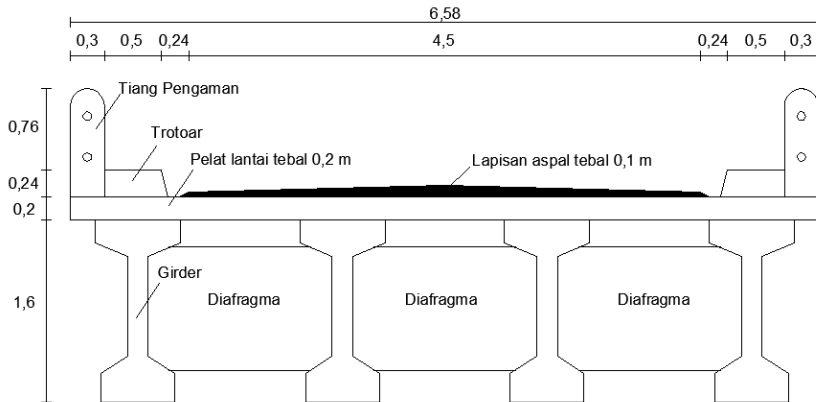


Gambar 3. 1 Bagan alir penelitian

3.1. Analisis Elemen Hingga

Pemodelan struktur jembatan mengacu pada studi kasus pembangunan jembatan beton prategang di Kecamatan Tapung, Kabupaten Kampar Provinsi Riau dengan detail *cross section* ditampilkan pada Gambar 3.2. Data struktur jembatan yang dianalisis adalah sebagai berikut.

1. Tipe *girder* = 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



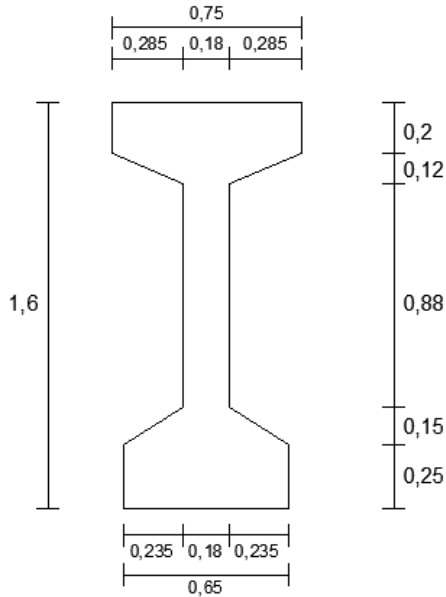
Gambar 3. 2 *Cross Section* jembatan (dalam satuan meter)

3.1.1 Dimensi dan Material Komponen Struktur

Dimensi komponen struktur jembatan yang ditinjau adalah sebagai berikut.

1. *Girder*

Detail dimensi penampang *girder* tipe I ditampilkan pada Gambar 3.3.



Gambar 3. 3 Dimensi penampang *girder* (dalam satuan meter)

2. Pelat Lantai

Pelat lantai beton bertulang memiliki tebal 0,2 meter.

3. Diafragma

Diafragma memiliki tebal 0,2 meter.

Untuk beton prategang pada *girder*, digunakan material-material sebagai berikut.

1. Beton struktural mutu K-500 dengan karakteristik.

a. Kuat tekan beton, $f'_c = 0,83 \cdot \frac{K}{10} = 0,83 \cdot \frac{500}{10} = 41,5 \text{ MPa}$

b. Modulus elastisitas, $E_c = 4700\sqrt{f'_c} = 4700\sqrt{41,5} = 30277,63 \text{ MPa}$

- c. Rasio *Poisson*, $\nu = 0,2$
 - d. Berat per volume, $W_c = 25 \text{ kN/m}^3$
2. Baja tendon dengan karakteristik:
- a. Tegangan leleh, $f_y = 400 \text{ MPa}$
 - b. Modulus elastisitas, $E_s = 200000 \text{ MPa}$
 - c. Rasio *Poisson*, $\nu = 0,3$
 - d. Massa jenis, $\rho = 7850 \text{ kg/m}^3$

Untuk beton bertulang pada pelat lantai, digunakan material-material sebagai berikut.

1. Beton struktural mutu K-350 dengan karakteristik:
- a. Kuat tekan beton, $f'_c = 0,83 \cdot \frac{K}{10} = 0,83 \cdot \frac{350}{10} = 29,05 \text{ MPa}$
 - b. Modulus elastisitas, $E_c = 4700\sqrt{f'_c} = 4700\sqrt{29,05} = 25332,08 \text{ MPa}$
 - c. Rasio *Poisson*, $\nu = 0,2$
 - d. Berat per volume, $W_c = 24 \text{ kN/m}^3$
2. Baja tulangan dengan karakteristik:
- a. Tegangan leleh, $f_y = 400 \text{ MPa}$
 - b. Modulus elastisitas, $E_s = 200000 \text{ MPa}$
 - c. Rasio *Poisson*, $\nu = 0,3$
 - d. Massa jenis, $\rho = 7850 \text{ kg/m}^3$

Untuk beton bertulang pada diafragma, digunakan material-material sebagai berikut:

1. Beton struktural mutu K-350 dengan karakteristik:
- a. Kuat tekan beton, $f'_c = 0,83 \cdot \frac{K}{10} = 0,83 \cdot \frac{350}{10} = 29,05 \text{ MPa}$

- b. Modulus elastisitas, $E_c = 4700\sqrt{f'_c} = 4700\sqrt{29,05} = 25332,08 \text{ MPa}$
 - c. Rasio *Poisson*, $\nu = 0,2$
 - d. Berat per volume, $W_c = 24 \text{ kN/m}^3$
2. Baja tulangan dengan karakteristik:
- a. Tegangan leleh, $f_y = 240 \text{ MPa}$
 - b. Modulus elastisitas, $E_s = 200000 \text{ MPa}$
 - c. Rasio *Poisson*, $\nu = 0,3$
 - d. Massa jenis, $\rho = 7850 \text{ kg/m}^3$

3.2. Pembebanan Struktur Jembatan Beton Prategang

Seluruh data pembebanan diperoleh dari *Bridge Design Manual (BDM)*, yang terdiri dari beban permanen, beban lalu lintas, dan beban gempa.

3.2.1 Perhitungan Beban Permanen

Beban permanen terdiri dari berat sendiri dan beban mati tambahan. Berat sendiri struktur yaitu *girder*, diafragma, dan pelat lantai, dihitung dengan mengalikan volume komponen struktur dengan berat jenisnya. Beban mati tambahan merupakan gabungan dari beban aspal, trotoar, *kerb*, dan pagar pengaman. Untuk lebih detailnya, contoh perhitungan beban permanen jembatan akan dijelaskan sebagai berikut.

1. Beban *girder*

Total panjang jembatan = 30,6 m

$$\begin{aligned} \text{Luas penampang} &= 0,589 \text{ m}^2 \\ \text{Total beban 4 girder} &= 4 \times 0,589 \text{ m}^2 \times 30,6 \text{ m} \times 25 \text{ kN/m}^3 \\ &= 1802,3 \text{ kN} \end{aligned}$$

2. Beban diafragma

$$\begin{aligned} \text{Panjang diafragma} &= 5,98 \text{ m} \\ \text{Luas penampang} &= 0,2 \text{ m} \times 1,076 \text{ m} = 0,2152 \text{ m}^2 \\ \text{Total beban diafragma} &= 5 \times 0,2152 \text{ m}^2 \times 5,98 \text{ m} \times \\ &24 \text{ kN/m}^3 = 154,43 \text{ kN} \end{aligned}$$

3. Beban pelat lantai

$$\begin{aligned} \text{Total panjang jembatan} &= 30,6 \text{ m} \\ \text{Luas penampang} &= 0,2 \text{ m} \times 6,58 \text{ m} = 1,32 \text{ m}^2 \\ \text{Total beban pelat lantai} &= 1,32 \text{ m}^2 \times 30,6 \text{ m} \times 24 \text{ kN/m}^3 = \\ &969,41 \text{ kN} \end{aligned}$$

4. Beban aspal

$$\begin{aligned} \text{Total panjang jembatan} &= 30,6 \text{ m} \\ \text{Luas penampang} &= 0,1 \text{ m} \times 4,5 \text{ m} = 0,45 \text{ m}^2 \\ \text{Total beban aspal} &= 0,45 \text{ m}^2 \times 30,6 \text{ m} \times 22 \text{ kN/m}^3 = \\ &302,94 \text{ kN} \end{aligned}$$

5. Beban trotoar

$$\begin{aligned} \text{Total panjang jembatan} &= 30,6 \text{ m} \\ \text{Luas penampang} &= 0,24 \text{ m} \times 0,5 \text{ m} = 0,12 \text{ m}^2 \\ \text{Total beban trotoar} &= 2 \text{ (kiri dan kanan)} \times 0,12 \text{ m}^2 \times \\ &30,6 \text{ m} \times 24 \text{ kN/m}^3 \\ &= 176,26 \text{ kN} \end{aligned}$$

6. Beban *kerb* dan pagar pengaman

$$\text{Total panjang jembatan} = 30,6 \text{ m}$$

$$\begin{aligned} \text{Luas penampang} &= 4 \text{ kN/m} \\ \text{Total beban } \textit{kerb} \text{ dan pagar pengaman} &= 2 \text{ (kiri dan kanan)} \times \\ & 4 \text{ kN/m} \times 30,6 \text{ m} \\ &= 244,8 \text{ kN} \end{aligned}$$

Berdasarkan perhitungan di atas, maka total beban permanen dapat disimpulkan sebagai berikut,

$$\begin{aligned} \text{Beban } \textit{girder} &= 1802,3 \text{ kN} \\ \text{Beban diafragma} &= 154,43 \text{ kN} \\ \text{Beban pelat lantai} &= 969,41 \text{ kN} \\ \text{Beban aspal} &= 302,94 \text{ kN} \\ \text{Beban trotoar} &= 176,26 \text{ kN} \\ \text{Beban } \textit{kerb} \text{ dan pagar pengaman} &= 244,8 \text{ kN} \\ \text{Total beban permanen} &= 3650,2 \text{ kN} \end{aligned}$$

3.2.2 Perhitungan Beban Lalu Lintas

Beban lalu lintas untuk perencanaan jembatan terdiri dari beban lajur “D”, beban truk “T”, dan beban pejalan kaki. Untuk lebih detailnya, contoh perhitungan beban lalu lintas akan dijelaskan sebagai berikut.

1. Beban lajur (*D*)

a. Beban terbagi merata (*UDL*)

$$q = 8 + \left(0,5 + \frac{15}{30,6}\right) = 9 \text{ kN/m}^2$$

$$UDL = 9 \text{ kN/m}^2 \times 30,6 \text{ m} \times 4,5 \text{ m} = 1377 \text{ kN}$$

b. Beban garis (*KEL*)

$$q = 44 \text{ kN/m}$$

$$KEL = 44 \text{ kN/m} \times 4,5 \text{ m} = 220,5 \text{ kN}$$

2. Beban truk (T)

$$\text{Roda depan} = 2 \times 25 \text{ kN} = 50 \text{ kN}$$

$$\text{Roda tengah dan belakang} = 4 \times 100 \text{ kN} = 400 \text{ kN}$$

$$\text{Beban total 1 truk} = 50 \text{ kN} + 400 \text{ kN} = 450 \text{ kN}$$

3. Beban pejalan kaki di trotoar (TP)

$$q = 5 \text{ kN/m}^2$$

$$TP = 5 \text{ kN/m}^2 \times 2 \text{ (kiri dan kanan)} \times 30,6 \text{ m} \times 0,5 \text{ m} = 153 \text{ kN}$$

Berdasarkan perhitungan di atas, maka total beban lalu lintas dapat disimpulkan sebagai berikut,

$$\text{Beban } UDL = 1377 \text{ kN}$$

$$\text{Beban } KEL = 220,5 \text{ kN}$$

$$\text{Beban } T = 450 \text{ kN}$$

$$\text{Beban } TP = 153 \text{ kN}$$

$$\text{Total beban lalu lintas} = 2200,5 \text{ kN}$$

1. Simulasi Numerik: analisis elemen hingga menggunakan software SAP2000 untuk analisis riwayat waktu non linear. Input beban adalah beban mati, beban hidup, dan 12 beban gempa yang diadopsi dari website Pacific Earthquake Engineering Research (PEER, 2015) dengan nilai *Peak Ground Acceleration* (PGA) skala: 0,5g, 0,75g dan 1,0g seperti terlihat pada Tabel 3.1.

Tabel 3. 1 Parameter Data Gempa Bumi

No	Nama Gempa	Tahun	Magnitude (M_w)	PGV m/s	PGA (g)
1.	San Francisco	1957	5.28	0.0391	0.095
2.	New Zealand	1987	6.6	0.2167	0.255
3.	Cape Mendocino	1992	7.01	0.2014	0.150
4.	Landers, NA	1992	7.28	0.097	0.104
5.	Loma Prieta	1989	6.93	0.1735	0.120
6.	San Fernando	1971	6.61	0.0328	0.046
7.	Northridge-01	1994	6.69	0.0454	0.064
8.	Kobe, Japan	1995	6.90	0.0429	0.034
9.	Chi-chi, Taiwan	1999	7.62	0.0776	0.017
10.	Daneli, Alaska	2002	7.90	0.015	0.008
11.	Nenana Mt, Alaska	2002	6.70	0.0066	0.004
12.	Kocaeli, Turkey	1999	7.51	0.0231	0.010

Data gempa pada Tabel 3.1 untuk menghasilkan kinerja jembatan berdasarkan FEMA 356 (FEMA356, 2000). Sedangkan data percepatan tanah Indonesia yang diadopsi dari penelitian terdahulu (Reni Suryanita, Djauhari, & WIjaya, 2016) untuk menghasilkan respons struktur maksimum pada jembatan.

Untuk data percepatan tanah Indonesia diperoleh dari analisis respons spektrum gempa yang merupakan parameter koefisien gempa elastik (C_{sm}) sebagai fungsi periode getar

struktur (T) yang digambarkan dalam suatu grafik respons spektrum di permukaan tanah. Parameter C_{sm} bergantung pada jenis tanah dan lokasi gempa. Dalam penelitian ini, dipilih 34 ibu kota provinsi di Indonesia dan 5 kota besar lainnya di Indonesia dengan 3 jenis tanah (tanah keras, sedang, dan lunak) sebagai perwakilan lokasi gempa yang dapat dilihat pada Tabel 3.2.

Grafik respons spektrum di permukaan tanah untuk setiap jenis tanah dan lokasi gempa dapat ditentukan berdasarkan prosedur yang ditetapkan dalam (BSN, 2016). Dalam monograf ini ditampilkan perhitungan grafik respons spektrum di permukaan tanah untuk Kota Banda Aceh dengan jenis tanah keras, sedang, dan lunak adalah sebagai berikut:

1. Menentukan parameter respons spektrum percepatan puncak batuan dasar (PGA), respons spektrum percepatan gempa untuk periode pendek (S_s), dan respons spektrum percepatan gempa untuk periode 1,0 detik (S_1) berdasarkan peta gempa Indonesia 2010.

Untuk Kota Banda Aceh, diperoleh sebagai berikut.

$$PGA = 0,45g \quad S_s = 1,35g \quad S_1 = 0,55g$$

2. Menentukan kelas situs berdasarkan jenis tanah.
 - a. Kelas situs untuk tanah keras adalah SC.
 - b. Kelas situs untuk tanah sedang adalah SD.
 - c. Kelas situs untuk tanah lunak adalah SE.

3. Menentukan faktor amplifikasi F_{PGA} , F_a dan F_v berdasarkan kelas situs, PGA , S_s , dan S_l menggunakan Tabel 2.4 dan Tabel 2.5. Karena $0,4g \leq PGA \leq 0,5g$, $S_s \geq 1,25g$ dan $S_l \geq 0,5g$.

a. Untuk tanah keras (kelas situs SC), $F_{PGA} = 1$; $F_a = 1$; dan $F_v = 1,3$.

b. Untuk tanah sedang (kelas situs SD), $F_{PGA} = 1,05$; $F_a = 1,05$; dan $F_v = 1,5$.

c. Untuk tanah lunak (kelas situs SE), $F_{PGA} = 0,9$; $F_a = 0,9$; dan $F_v = 2,4$.

4. Menghitung koefisien percepatan awal muka tanah untuk periode 0 detik (A_s), periode pendek (S_{DS}), dan periode 1 detik (S_{D1}).

a. Untuk tanah keras.

$$A_s = F_{PGA} \times PGA = 1(0,45g) = 0,45g$$

$$S_{DS} = F_a \times S_s = 1(1,35g) = 1,35g$$

$$S_{D1} = F_v \times S_1 = 1,3(0,55g) = 0,715g$$

b. Untuk tanah sedang.

$$A_s = F_{PGA} \times PGA = 1,05(0,45g) = 0,473g$$

$$S_{DS} = F_a \times S_s = 1,05(1,35g) = 1,418g$$

$$S_{D1} = F_v \times S_1 = 1,5(0,55g) = 0,825g$$

c. Untuk tanah lunak.

$$A_s = F_{PGA} \times PGA = 0,9(0,45g) = 0,405g$$

$$S_{DS} = F_a \times S_s = 0,9(1,35g) = 1,215g$$

$$S_{D1} = F_v \times S_1 = 2,4(0,55g) = 1,32g$$

5. Menghitung parameter T_0 dan T_s .

a. Untuk tanah keras.

$$T_s = \frac{S_{D1}}{S_{DS}} = \frac{0,715g}{1,35g} = 0,53 \text{ detik}$$

$$T_0 = 0,2 \times T_s = 0,2 \times 0,53 \text{ detik} = 0,106 \text{ detik}$$

b. Untuk tanah sedang.

$$T_s = \frac{S_{D1}}{S_{DS}} = \frac{0,825g}{1,418g} = 0,582 \text{ detik}$$

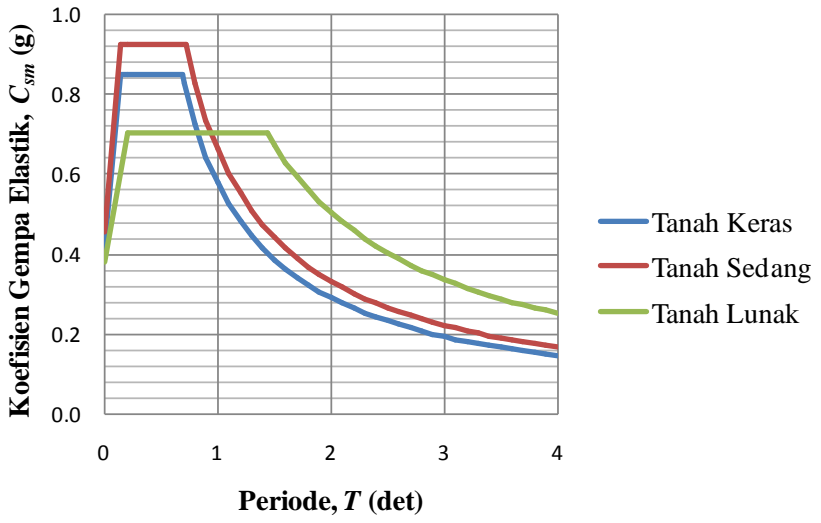
$$T_0 = 0,2 \times T_s = 0,2 \times 0,582 \text{ detik} = 0,116 \text{ detik}$$

c. Untuk tanah lunak.

$$T_s = \frac{S_{D1}}{S_{DS}} = \frac{1,32g}{1,215g} = 1,086 \text{ detik}$$

$$T_0 = 0,2 \times T_s = 0,2 \times 1,086 \text{ detik} = 0,217 \text{ detik}$$

6. Menghitung koefisien gempa elastik (C_{sm}) menggunakan Persamaan 2.8, 2.9, dan 2.10. Proses perhitungan parameter C_{sm} ditampilkan pada Tabel 3.2 dan disimulasikan dalam bentuk grafik yang ditampilkan pada Gambar 3.4. Gambar ini menunjukkan koefisien gempa elastik struktur sebagai fungsi dari periode struktur untuk Kota Banda Aceh. Sementara untuk berbagai kota lain yang dianalisis akan memiliki grafik respons spektrum di permukaan tanah yang berbeda. Hal ini dikarenakan masing-masing kota memiliki tingkat risiko gempa yang berbeda.



Gambar 3. 4 Respons Spektrum di kota Banda Aceh

Tabel 3. 2 Parameter Gempa Elastik (C_{sm}) Banda Aceh

Tanah Keras		Tanah Sedang		Tanah Lunak	
T (detik)	C_{sm} (g)	T (detik)	C_{sm} (g)	T (detik)	C_{sm} (g)
0,000	0,450	0,000	0,473	0,000	0,405
0,106	1,350	0,116	1,418	0,200	1,215
0,530	1,350	0,582	1,418	1,086	1,215
0,600	1,192	0,600	1,375	1,100	1,200
0,700	1,021	0,700	1,179	1,200	1,100
0,800	0,894	0,800	1,031	1,300	1,015
0,900	0,794	0,900	0,917	1,400	0,943
1,000	0,715	1,000	0,825	1,500	0,880
1,100	0,650	1,100	0,750	1,600	0,825
1,200	0,596	1,200	0,688	1,700	0,776
1,300	0,550	1,300	0,635	1,800	0,733
1,400	0,511	1,400	0,589	1,900	0,695
1,500	0,477	1,500	0,550	2,000	0,660
1,600	0,447	1,600	0,516	2,100	0,629
1,700	0,421	1,700	0,485	2,200	0,600
1,800	0,397	1,800	0,458	2,300	0,574
1,900	0,376	1,900	0,434	2,400	0,550
2,000	0,358	2,000	0,413	2,500	0,528
2,100	0,340	2,100	0,393	2,600	0,508
2,200	0,325	2,200	0,375	2,700	0,489
2,300	0,311	2,300	0,359	2,800	0,471
2,400	0,298	2,400	0,344	2,900	0,455
2,500	0,286	2,500	0,330	3,000	0,440
2,600	0,275	2,600	0,317	3,100	0,426
2,700	0,265	2,700	0,306	3,200	0,413
2,800	0,255	2,800	0,295	3,300	0,400
2,900	0,247	2,900	0,284	3,400	0,388
3,000	0,238	3,000	0,275	3,500	0,377
3,100	0,231	3,100	0,266	3,600	0,367
3,200	0,223	3,200	0,258	3,700	0,357
3,300	0,217	3,300	0,250	3,800	0,347
3,400	0,210	3,400	0,243	3,900	0,338
3,500	0,204	3,500	0,236	4,000	0,330
3,600	0,199	3,600	0,229		
3,700	0,193	3,700	0,223		
3,800	0,188	3,800	0,217		
3,900	0,183	3,900	0,212		
4,000	0,179	4,000	0,206		

Analisis metode elemen hingga dilakukan dengan bantuan *software* elemen hingga untuk memodelkan seluruh komponen jembatan beton prategang dalam bentuk tiga dimensi. Prosedur analisis respons spektrum gempa menggunakan *software* elemen hingga 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. Untuk pemodelan 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 pada bagian kiri dan kanan lajur kendaraan, beban *kerb* dan pagar pengaman per satuan panjang pada bagian sudut kiri dan kanan jembatan. 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

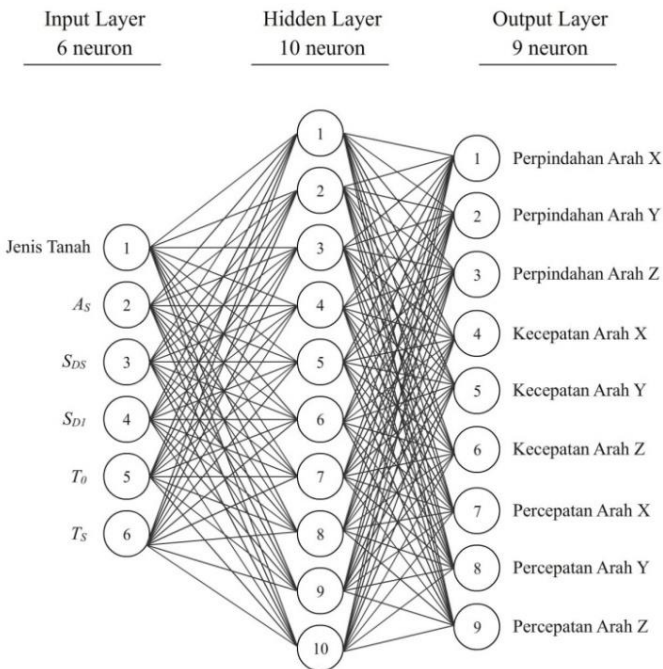
beban titik pada lajur kendaraan, dan beban pejalan kaki pada trotoar.

2. Melakukan analisis ragam hingga partisipasi massa ragam kumulatif 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 kasus beban gempa. 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 dalam satuan meter, kecepatan dalam satuan meter/detik, dan percepatan dalam satuan meter/detik kuadrat, pada tengah bentang struktur jembatan untuk arah X, Y, dan Z. Hasil analisis ini berjumlah 117 set data.

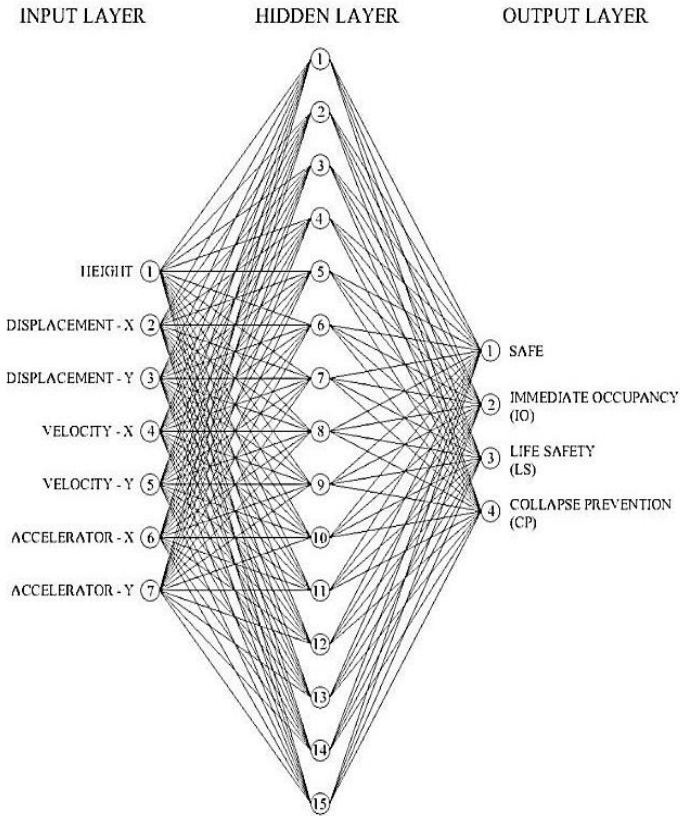
3.2. Pengembangan Jaringan Saraf Tiruan

Analisis respons struktur jembatan terhadap beban gempa di 34 ibu kota provinsi dan 5 kota besar lainnya di Indonesia dilakukan menggunakan metode Jaringan Saraf Tiruan (JST) tipe *Backpropagation* (BP). Arsitektur model input dan output JST

yang digunakan terbagi 2, yaitu respons spektra dan kinerja jembatan. Untuk parameter respons spektra yang dipilih sebagai *input* adalah jenis tanah dan parameter beban gempa. Sementara untuk parameter *output* yang diprediksi adalah berupa perpindahan (*displacement*), kecepatan (*velocity*), dan percepatan (*acceleration*) pada arah X dan Y. Sedangkan parameter kinerja jembatan yang dipilih sebagai input adalah respons struktur jembatan dan sebagai output adalah indeks kerusakan (*damage level*) yang terdiri dari IO, LS dan CP sesuai dengan kriteria kerusakan struktur pada FEMA 356. Arsitektur JST dalam penelitian ini terdiri dari *input layer*, *hidden layer*, dan *output layer*. Arsitektur JST yang digunakan ditampilkan pada Gambar 3.5 dan Gambar 3.6.



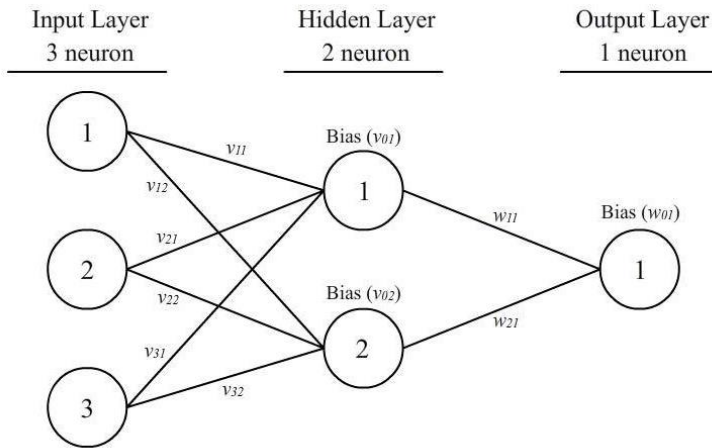
Gambar 3.5 Arsitektur JST respons struktur jembatan



Gambar 3. 6 Arsitektur JST kinerja jembatan

Proses *training* JST dilakukan dengan iterasi yang terdiri dari proses perhitungan maju dan perhitungan mundur. Hal ini bertujuan untuk memodifikasi faktor bobot JST. Metode JST yang diterapkan dalam sistem pemantauan jembatan dilakukan dengan mengembangkan perhitungan berikut di dalam *coding* MATLAB untuk arsitektur JST dengan jumlah neuron yang lebih besar. Berikut langkah perhitungan untuk arsitektur 3 neuron pada *input*

layer, 2 neuron pada *hidden layer*, dan 1 neuron pada *output layer* yang ditampilkan pada Gambar 3.7



Gambar 3. 7 Arsitektur JST untuk Contoh Iterasi *Training* JST

1. Menyiapkan data *input* dan *output* dengan nilai random.

a. Data *input*:

1) Neuron 1 : $x_1 = 1,0$

2) Neuron 2 : $x_2 = 2,0$

3) Neuron 2 : $x_3 = 3,0$

b. Data *output*:

1) Neuron 1 : $t_1 = 2,0$

2. Menentukan faktor bobot JST secara acak.

Faktor Bias:

$v_{01} = 0$ $v_{02} = 1,0$ $w_{01} = 1,0$

Input I menuju *Hidden L*:

$$\begin{array}{lll} v_{11} = -1,0 & v_{21} = 1,0 & v_{31} = 0 \\ v_{12} = 1,0 & v_{22} = -1,0 & v_{32} = 0,5 \end{array}$$

Hidden L menuju *Output L*:

$$w_{11} = 1,0 \quad w_{21} = -1,0$$

3. Melakukan perhitungan fase *Feedforward*.

a. *Input layer* (diambil dari data *input*).

- 1) Nilai neuron 1, $x_1 = 1,0$
- 2) Nilai neuron 2, $x_2 = 2,0$
- 3) Nilai neuron 3, $x_3 = 3,0$

b. *Hidden layer*.

- 1) Nilai neuron 1 (z_1).

$$\begin{aligned} z_{in_1} &= v_{01} + \sum_{i=1}^3 X_i v_{i1} \\ &= 0 + (1,0)(-1,0) + (2,0)(1,0) \\ &\quad + (3,0)(0) \end{aligned}$$

$$z_{in_1} = 1$$

$$z_1 = f(z_{in_1}) = \frac{1}{1 + e^{-(z_{in_1})}} = \frac{1}{1 + e^{-(1)}} = 0,731$$

- 2) Nilai neuron 2 (z_2).

$$\begin{aligned}
z_{in_2} &= v_{02} + \sum_{i=1}^3 X_i v_{i2} \\
&= 1,0 + (1,0)(1,0) + (2,0)(-1,0) \\
&\quad + (3,0)(0,5) \\
z_{in_2} &= 1,5 \\
z_2 = f(z_{in_2}) &= \frac{1}{1 + e^{-(z_{in_2})}} = \frac{1}{1 + e^{-(1,5)}} = 0,818
\end{aligned}$$

c. *Output layer.*

1) Nilai neuron 1 (y_1).

$$\begin{aligned}
y_{in_1} &= w_{01} + \sum_{j=1}^2 z_j w_{j1} \\
y_{in_1} &= 1 + (0,731)(1,0) + (0,818)(-1,0) = 0,913 \\
y_1 = f(y_{in_1}) &= \frac{1}{1 + e^{-(y_{in_1})}} = \frac{1}{1 + e^{-(0,913)}} \\
&= 0,713
\end{aligned}$$

4. Melakukan perhitungan *backpropagation of error*.

a. Menentukan koefisien *training*.

1) *Learning rate*, $\alpha = 1,0$.

b. Menghitung tingkat kesalahan tiap *neuron* (δ_j^l).

1) Neuron pada *output layer*.

$$\begin{aligned}
\delta_{k=1} &= (t_1 - y_1) f'(y_{in_1}) \\
&= (2,0 - 0,713)(0,713)(1 - 0,713) \\
\delta_{k=1} &= 0,263
\end{aligned}$$

2) Neuron pada *hidden layer*.

$$\delta_{j=1} = f'(z_{in_1}) \sum_{k=1}^1 \delta_{k=1} w_{11}$$
$$= 0,731(1 - 0,731)(0,263 \times 1,0)$$

$$\delta_{j=1} = 0,0517$$

$$\delta_{j=2} = f'(z_{in_2}) \sum_{k=1}^1 \delta_{k=1} w_{21}$$
$$= 0,818(1 - 0,818)(0,263 \times (-1,0))$$

$$\delta_{j=2} = -0,0392$$

c. Menghitung perubahan faktor bobot tiap *neuron*.

1) Neuron pada *output layer*.

$$\Delta w_{11} = \alpha \delta_{k=1} z_1 = 1,0(0,263)(0,713)$$

$$\Delta w_{11} = 0,188$$

$$\Delta w_{21} = \alpha \delta_{k=1} z_2 = 1,0(0,263)(0,818)$$

$$\Delta w_{21} = 0,215$$

$$\Delta w_{01} = \alpha \delta_{k=1} w_{01} = 1,0(0,263)(1)$$

$$\Delta w_{01} = 0,263$$

2) Neuron pada *hidden layer*.

$$\Delta v_{11} = \alpha \delta_{j=1} x_1 = 1,0(0,0517)(1,0)$$

$$\Delta v_{11} = 0,0517$$

$$\Delta v_{21} = \alpha \delta_{j=1} x_2 = 1,0(0,0517)(2,0)$$

$$\Delta v_{21} = 0,1034$$

$$\Delta v_{31} = \alpha \delta_{j=1} x_3 = 1,0(0,0517)(3,0)$$

$$\Delta v_{31} = 0,1551$$

$$\Delta v_{01} = \alpha \delta_{j=1} v_{01} = 1,0(0,0517)(0)$$

$$\Delta v_{01} = 0$$

$$\Delta v_{12} = \alpha \delta_{j=2} x_1 = 1,0(-0,0392)(1,0)$$

$$\Delta v_{12} = -0,0392$$

$$\Delta v_{22} = \alpha \delta_{j=2} x_2 = 1,0(-0,0392)(2,0)$$

$$\Delta v_{22} = -0,0784$$

$$\Delta v_{32} = \alpha \delta_{j=2} x_3 = 1,0(-0,0392)(3,0)$$

$$\Delta v_{32} = -0,1176$$

$$\Delta v_{02} = \alpha \delta_{j=2} v_{02} = 1,0(-0,0392)(1,0)$$

$$\Delta v_{02} = -0,0392$$

d. Menghitung faktor bobot baru tiap *neuron*.

1) Neuron pada *output layer*.

$$w_{11}(\text{new}) = 1 + 0,188 = 1,188$$

$$w_{21}(\text{new}) = -1,0 + 0,215 = -0,785$$

$$w_{01}(\text{new}) = 1 + 0,263 = 1,263$$

2) Neuron pada *hidden layer*.

$$v_{11}(\text{new}) = -1,0 + 0,0517 = -0,9483$$

$$v_{21}(\text{new}) = 1,0 + 0,1034 = 1,1034$$

$$v_{31}(\text{new}) = 0 + 0,1551 = 0,1551$$

$$v_{01}(\text{new}) = 0 + 0 = 0$$

$$v_{12}(\text{new}) = 1,0 - 0,0392 = 0,9608$$

$$v_{22}(\text{new}) = -1,0 - 0,0784 = -1,0784$$

$$v_{32}(\text{new}) = 0,5 - 0,1176 = 0,3824$$

$$v_{02}(\text{new}) = 1,0 - 0,0392 = 0,9608$$

5. Melakukan kembali proses ke-3 dengan menggunakan nilai bobot yang baru. Perhitungan selesai apabila nilai *output* yang diperoleh telah mencapai batas toleransi yang ditentukan.

Perhitungan iterasi metode JST secara manual membutuhkan waktu yang cukup lama, oleh karena itu analisis *training* JST dilakukan dengan bantuan komputer menggunakan algoritma *JST Backpropagation* dalam bahasa pemrograman Visual Basic.NET (*Microsoft Visual Studio* 2008) seperti yang telah dilakukan pada penelitian terdahulu untuk bangunan gedung (Reni Suryanita, Maizir, & Jingga, 2017), (R. Suryanita, Maizir, Yuniorto, & Jingga, 2018) (Reni Suryanita & Jingga, 2017) dan pada struktur jembatan (R. Suryanita & Adnan, 2014), (R. Suryanita, Mardiyono, & Adnan, 2017), dan (Reni Suryanita et al., 2018).

Hasil analisis respons spektrum struktur jembatan yang diperoleh dengan menggunakan metode elemen hingga, selanjutnya dijadikan sebagai data untuk *training* dan *testing* JST. Dalam penelitian 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 (lunak, sedang, dan keras), sehingga menghasilkan 102 kasus beban gempa untuk *training* dan 15 kasus beban gempa untuk *testing*, dengan total sebanyak 117 kasus beban gempa.

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 mencapai 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.

Selanjutnya kinerja JST 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 data yang telah dikumpulkan sebelumnya

dilakukan *testing* 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 keakuratan prediksi.

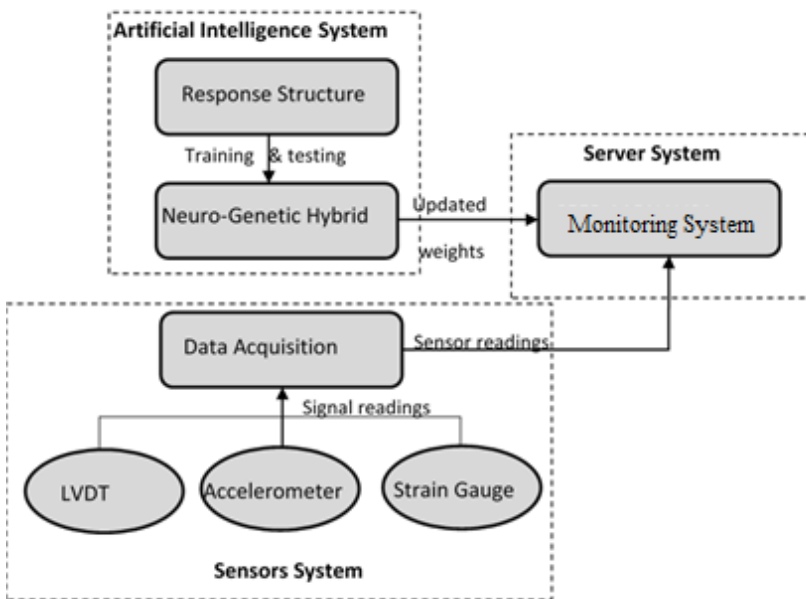
3.3. Pembuatan Sistem Pemantauan Cerdas

Pada tahap ini, sistem Jaringan Saraf Tiruan (JST) menetapkan bobot awal secara acak. Metode JST yang digunakan adalah *Backpropagation Neural Networks* (BPNN). BPNN meliputi proses pelatihan, pengujian dan validasi. Langkah-langkah pelatihan dan pengujian diulang sampai Mean-Squared Error (MSE) dari output yang mencapai kurang dari 1% kesalahan (MSE <0,01). Dengan meminimalkan fungsi kesalahan maka JST mencapai kinerja terbaik. Sementara itu ketepatan nilai regresi dibatasi lebih dari 80% ($R > 0,80$) dengan demikian target dan tujuan mendekati hasil yang mendekati sama. Proses *training* menggunakan 70% data sementara itu 15% data digunakan untuk *testing* dan 15% sisa nya untuk proses validasi.

Hasil prediksi terbaik BPNN bergantung pada pemilihan bobot awal yang sesuai, tingkat pembelajaran, momentum, model arsitektur jaringan dan fungsi aktivasi. Model arsitektur untuk sistem ini memiliki n jumlah input, satu dan dua lapisan tersembunyi dengan n neuron dan output. Bobot (*weight*) JST

menggambarkan cepat atau lambatnya sinyal yang diberikan sel (*neuron*) input.

Sistem pemantauan jembatan dalam penelitian ini memiliki beberapa komponen untuk mendukung fungsi utama yang meliputi sistem server, *Artificial Intelligence*, dan sistem sensor. Sistem pemantauan dalam penelitian diilustrasikan pada Gambar 3.8.



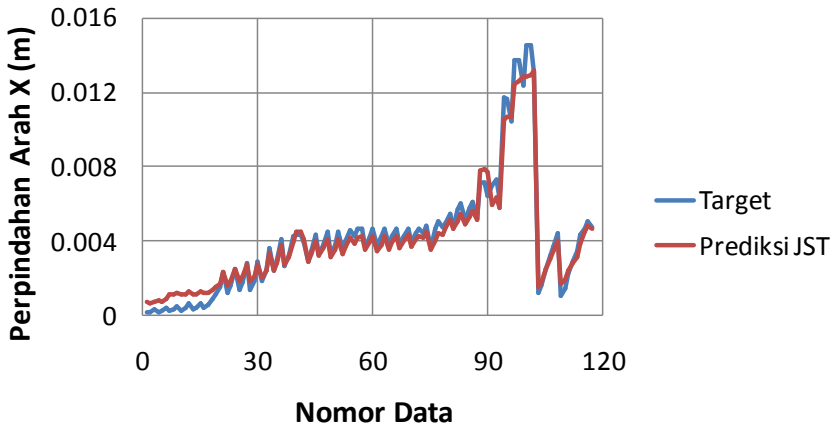
Gambar 3. 8 Prosedur sistem pemantauan jembatan di server

BAB 4. HASIL DAN PEMBAHASAN

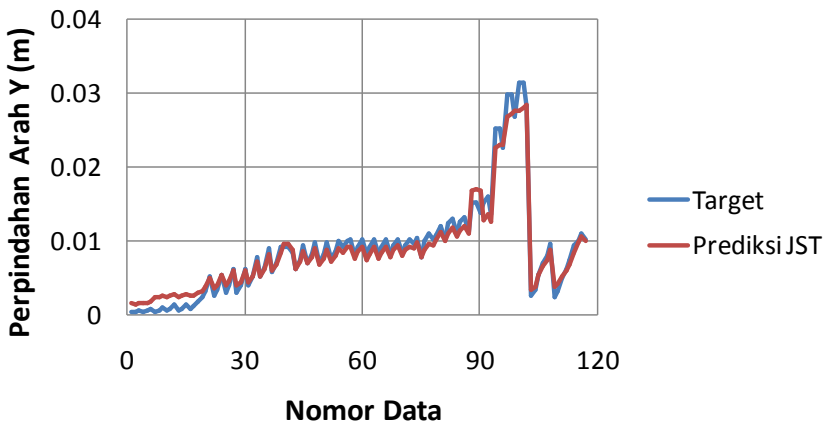
4.1. *Training dan Testing Jaringan Saraf Tiruan*

Hasil proses pembelajaran (*training*) dan pengujian (*testing*) pada Jaringan Saraf Tiruan (JST) menghasilkan bobot (*weight*) optimum yang digunakan di dalam sistem cerdas pemantauan kesehatan jembatan. Kinerja terbaik JST dengan metode *Backpropagation Neural Network* (BPNN) bergantung pada pemilihan bobot awal (*initial weight*), tingkat pembelajaran (*learning rate*), momentum, model arsitektur jaringan, dan fungsi aktivasi. Jumlah total data input dan output adalah 4633 untuk training JST pada sistem monitoring kesehatan jembatan sedangkan pada sistem prediksi respons struktur jembatan menggunakan data 117 yang dihasilkan melalui analisis elemen hingga akibat beban gempa.

Pada nilai perpindahan yang terlalu besar dan yang terlalu kecil, prediksi JST kurang mendekati nilai yang sebenarnya (nilai target), atau memiliki tingkat kesalahan yang cukup besar. Namun pada nilai perpindahan yang relatif sedang, tingkat kesalahan cukup kecil atau mendekati nilai yang sebenarnya (nilai target). Hasil perbandingan antara target dan prediksi yang dilakukan JST ditampilkan pada Gambar 4.1 hingga Gambar 4.6. Untuk nomor data ke-1 sampai 102 merupakan data *training* dan nomor data ke-103 sampai 117 merupakan data *testing*.



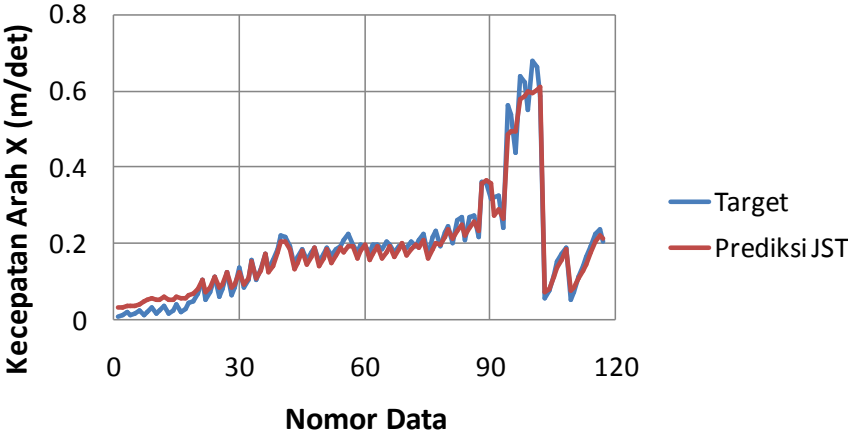
Gambar 4. 1 Hasil prediksi perpindahan arah X



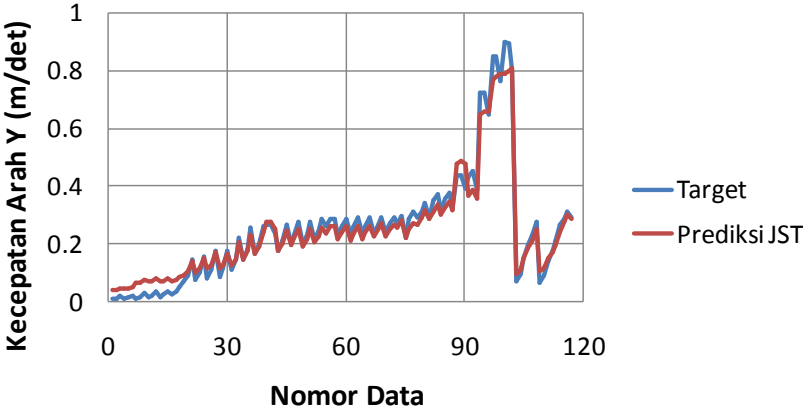
Gambar 4. 2 Hasil prediksi perpindahan arah Y

Kinerja JST yang sudah dilatih dalam memprediksi kecepatan menghasilkan nilai prediksi hampir sama dengan prediksi perpindahan. Pada nilai kecepatan yang terlalu besar dan yang terlalu kecil, prediksi JST kurang mendekati nilai yang

sebenarnya (nilai target), atau memiliki tingkat kesalahan yang cukup besar. Namun pada nilai kecepatan yang relatif sedang, tingkat kesalahan cukup kecil atau mendekati nilai yang sebenarnya (nilai target). Hasil perbandingan antara target dan prediksi yang dilakukan JST ditampilkan pada Gambar 4.2.

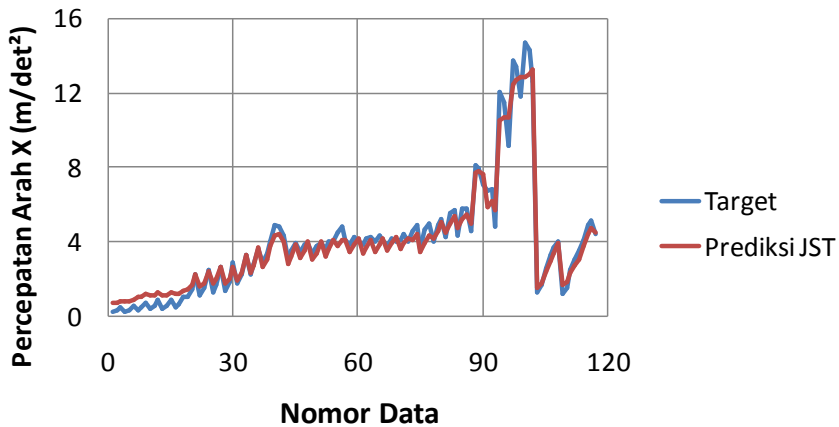


Gambar 4. 3 Hasil prediksi kecepatan arah X

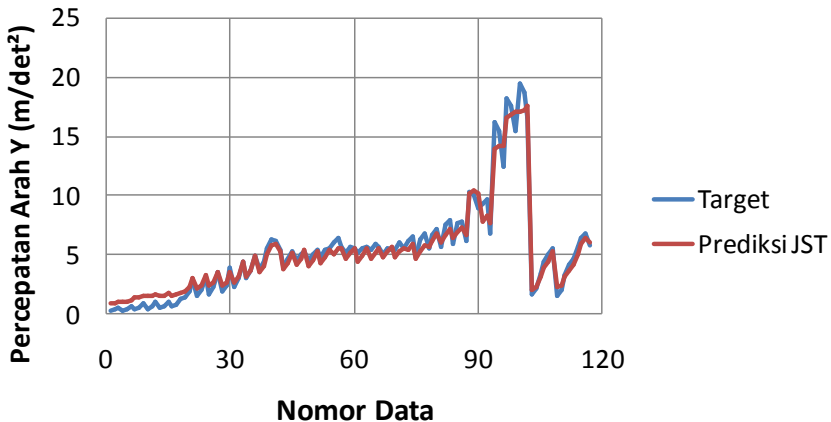


Gambar 4. 4 Hasil prediksi kecepatan arah Y

Hal yang sama dengan nilai perpindahan dan kecepatan, nilai prediksi percepatan pada kinerja JST yang sudah dilatih dalam memprediksi percepatan kurang mendekati nilai yang sebenarnya (nilai target), atau memiliki tingkat kesalahan yang cukup besar. Namun pada nilai perpindahan yang relatif sedang, menghasilkan tingkat kesalahan cukup kecil atau mendekati nilai yang sebenarnya (nilai target). Hasil perbandingan antara target dan prediksi yang dilakukan JST untuk nilai percepatan ditampilkan pada Gambar 4.5 untuk nilai prediksi percepatan arah X dan Gambar 4.6 untuk nilai prediksi percepatan arah Y.



Gambar 4. 5 Hasil prediksi percepatan arah X

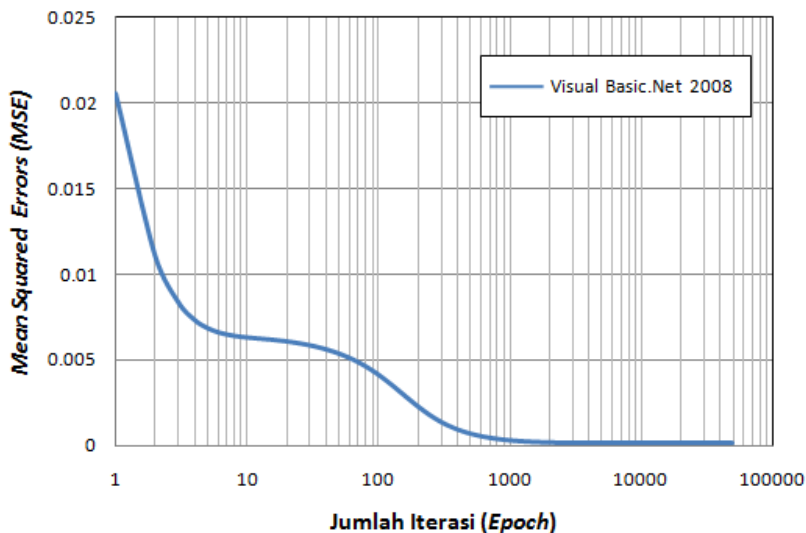


Gambar 4. 6 Hasil prediksi percepatan arah Y

Proses *training* JST yang dilakukan dengan cara mengubah koefisien *learning rate* dan rentang normalisasi variabel, rata-rata menghasilkan nilai *MSE* sebesar 0,00019. 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 4.6 menunjukkan pola penurunan *MSE* seiring dengan berjalannya proses *training*.

Perhitungan nilai rata-rata *MSE* akhir untuk proses *training* dan *testing* secara berurutan adalah 0,00019 dan 0,00023. Dengan demikian dapat dinyatakan bahwa *MSE* untuk parameter perpindahan, kecepatan, dan percepatan adalah relatif kecil. Hal tersebut menunjukkan bahwa JST sudah sangat baik dalam

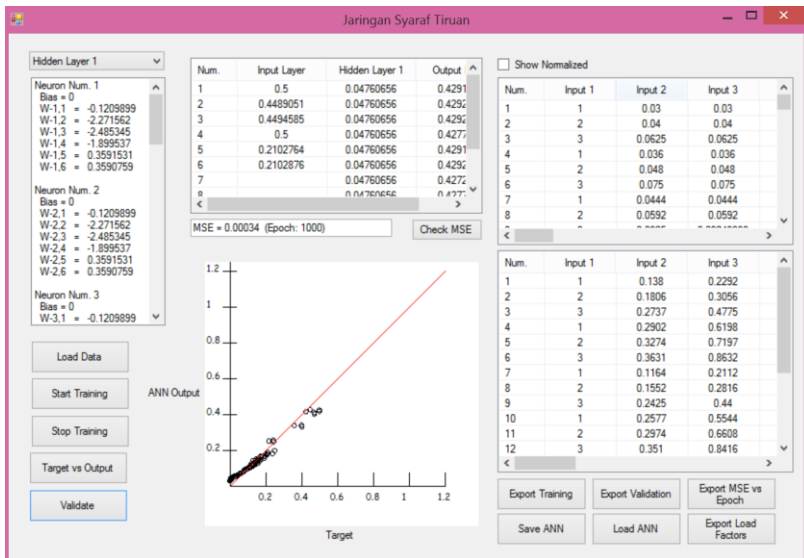
memprediksi perpindahan, kecepatan, dan percepatan pada struktur jembatan yang dianalisis.



Gambar 4. 7 Grafik Jumlah Iterasi vs. *MSE*

Pada saat proses *training*, JST memperoleh informasi tentang nilai target sebelum diuji, sedangkan pada proses *testing* tidak diperoleh nilai target sebelum diuji, hal ini menyebabkan nilai *MSE training* lebih kecil dari *MSE testing*. Meskipun begitu, kedua nilai *MSE* tersebut sudah cukup kecil dan memenuhi syarat. Proses *training* JST sampai iterasi ke-50000 membutuhkan waktu selama 100 detik. Hal tersebut menunjukkan bahwa JST sangat efisien, karena hanya membutuhkan waktu yang tergolong cukup singkat dalam melakukan proses *training*.

Perangkat lunak JST dibuat dengan menggunakan *coding* Visual Basic seperti terlihat pada Gambar 4.8 berikut ini.

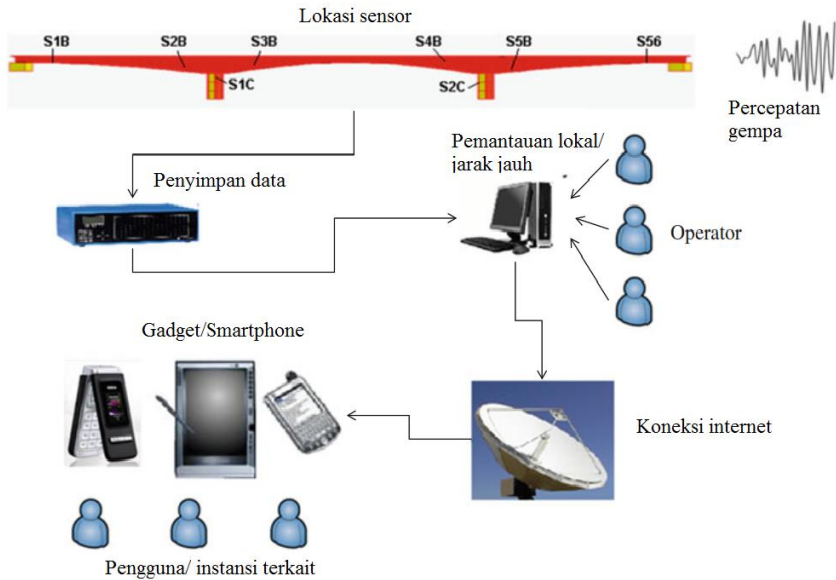


Gambar 4. 8 Screenshot perangkat lunak JST Visual Basic coding.

Hasil prediksi *Mean Squared Error* (MSE), metode Jaringan Saraf Tiruan (JST) dengan domain waktu sebagai input menghasilkan prediksi lebih akurat dibandingkan dengan tanpa menggunakan input waktu. MSE optimal untuk hasil prediksi dalam penelitian ini adalah 0,0078 sedangkan MSE optimal untuk hasil tanpa domain waktu sebagai input adalah 0,0189 pada saat iterasi 50000 perulangan. Dengan demikian, metode prediksi JST dengan domain waktu dapat digunakan untuk memprediksi kerusakan struktur jembatan disaat menerima pembebanan gempa bumi.

4.2. Pemantauan Jembatan Menggunakan Sensor

Sistem pemantauan jembatan dalam penelitian ini memiliki beberapa komponen untuk mendukung fungsi utama yang meliputi modul akuisisi data yang berguna untuk menyimpan data, modul mesin cerdas, modul sistem peringatan, dan modul pemantauan. Modul ini dibuat menggunakan VB.NET yang disediakan dalam dua versi yang melibatkan pemantauan lokal dan jarak jauh dari server. Pemantauan lokal berlokasi di jembatan sedangkan pemantauan jarak jauh dapat diakses melalui internet menggunakan server *Hypertext Transfer Protocol* (HTTP). HTTP digunakan untuk menyediakan data yang diakses dari jarak jauh yang memiliki skrip untuk mengkonversi data akselerasi ke format *Hypertext Markup Language* (HTML). Selanjutnya HTML berfungsi untuk menampilkan halaman web yang dapat diakses oleh pengguna.. Pengujian JST sebelumnya telah menggunakan data dummy menunjukkan bahwa pemantauan cerdas yang dikembangkan dapat menghasilkan prediksi terbaik dengan tingkat kesalahan yang relatif kecil. Pengembangan sistem pemantauan menggunakan peralatan sensor seperti terlihat pada Gambar 4.9. Struktur jembatan yang menerima beban dinamik seperti gempa bumi direkam oleh sensor accelerometer. Data tersebut disimpan dalam data akuisisi untuk selanjutnya dipantau dalam jarak dekat maupun jarak jauh menggunakan koneksi internet. Pengguna atau *user* dapat melihat hasil rekaman dan analisis kinerja jembatan melalui telpon genggam pintar.

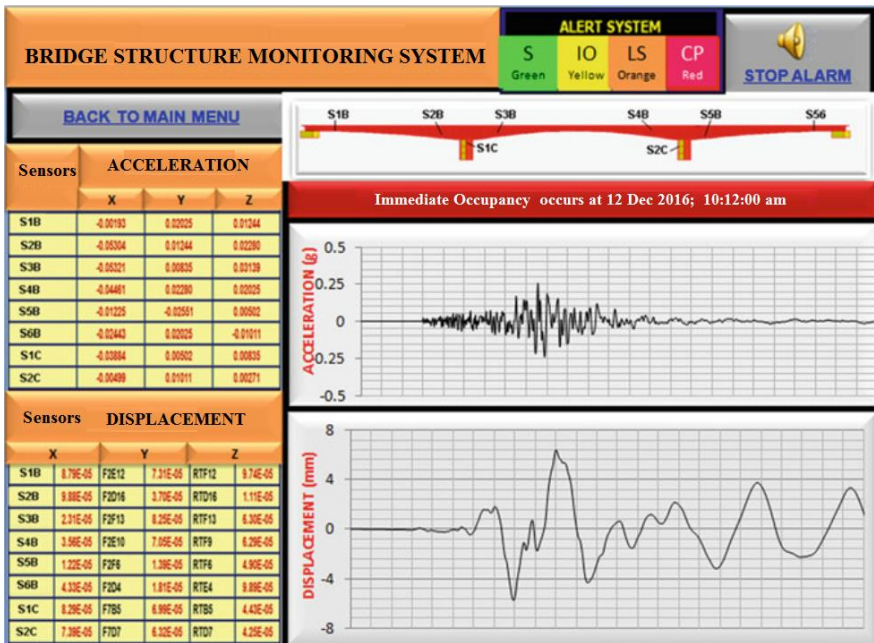


Gambar 4. 9 Susunan perangkat pemantauan jembatan

4.3. Perangkat Lunak Pemantauan Jembatan

Produk dari sistem pemantauan ini adalah perangkat lunak cerdas yaitu alat pemantauan kesehatan struktur jembatan. Perangkat lunak ini dapat dinyatakan sebagai perangkat lunak cerdas karena dapat memprediksi dan menganalisis tingkat kerusakan jembatan akibat beban dinamis dan beban statisnya. Prediksi berdasarkan standar FEMA 356 dan analisis berdasarkan hasil prediksi yang menggambarkan warna hijau, kuning, oranye, dan merah. Warna hijau menggambarkan keadaan struktur jembatan dalam keadaan aman, warna kuning menyatakan struktur jembatan dalam keadaan terjadi kerusakan kecil namun bisa

diperbaiki. Sedangkan warna oranye mengindikasikan bahwa telah terjadi kerusakan sedang dan memerlukan perbaikan segera. Warna merah menunjukkan jembatan berada dalam keadaan waspada karena telah terjadi kerusakan besar yang kemungkinan sulit diperbaiki karena rusak berat. Perangkat lunak sistem pemantauan kesehatan struktur jembatan dapat pada Gambar 4.10.



Gambar 4. 10 Sistem pemantauan dan pendeteksi kesehatan jembatan

Perangkat lunak disimpan dalam sistem server dengan bahasa program Visual Basic. Pengujian menggunakan data dummy menunjukkan bahwa pemantauan cerdas yang dikembangkan dapat menjalankan fungsinya, termasuk memantau, memprediksi hasil, dan peringatan dini (*early warning*).

BAB 5. KESIMPULAN DAN REKOMENDASI

5.1. Kesimpulan

Berdasarkan *Mean Squared Error* (MSE), metode Jaringan Saraf Tiruan (JST) dengan domain waktu sebagai input menghasilkan prediksi lebih akurat dibandingkan dengan tanpa menggunakan input waktu. MSE optimal untuk hasil prediksi dengan domain waktu adalah 0,0078 sedangkan MSE optimal untuk hasil tanpa domain waktu sebagai input adalah 0,0189 pada saat iterasi 50000 perulangan. Oleh karena itu, metode prediksi JST dengan domain waktu dapat digunakan untuk memprediksi kerusakan struktur jembatan disaat menerima pembebanan gempa bumi.

Arsitektur jaringan JST dalam penelitian ini menggunakan satu dan dua lapisan tersembunyi. Hasil ANN menunjukkan bahwa model dengan satu lapisan tersembunyi untuk domain data percepatan memiliki ketidaksesuaian validasi MSE. Masalahnya menunjukkan bahwa arsitektur model tidak sesuai untuk percepatan domain data dengan satu lapisan tersembunyi. Sementara itu, model JST berdasarkan perpindahan dengan lapisan tersembunyi memiliki garis tren yang sama dan seragam sejak zaman 50000. Kesalahan pada semua proses menurun sepanjang iterasi.

Model Jaringan Saraf Tiruan yang didasarkan pada domain data percepatan dengan dua lapisan tersembunyi menunjukkan bahwa semua model MSE memiliki tren yang sama setelah 50000

iterasi. Nilai-nilai MSE dari proses pengujian lebih tinggi daripada nilai-nilai MSE lainnya. Sedangkan validasi MSE dari JST berdasarkan domain data perpindahan dengan dua lapisan tersembunyi memiliki fluktuasi sepanjang iterasi sebelum 25000 zaman. Fluktuasi menggambarkan jaringan belum mencapai konvergensi.

Rata-rata Regresi (R-mean) untuk domain data perpindahan dengan satu dan dua lapisan tersembunyi di atas 80%. Nilai R-mean menunjukkan nilai kerusakan dari domain data perpindahan telah diprediksi 80% mendekati nilai kerusakan sebenarnya. Sebaliknya, waktu proses untuk dua lapisan tersembunyi membutuhkan waktu yang lebih lama daripada domain data percepatan. Oleh karena itu, prediksi kesehatan jembatan berdasarkan data domain perpindahan untuk satu lapisan tersembunyi lebih akurat daripada domain percepatan data dengan satu dan dua lapisan tersembunyi.

Metode JST berdasarkan data perpindahan menggunakan satu lapisan tersembunyi dalam sistem menghasilkan kinerja terbaik. Ini karena percepatan adalah derivasi orde kedua dari perpindahan. Perpindahan memiliki kuantitas fisik yang lebih sederhana daripada akselerasi, sehingga konvergen didekati lebih cepat.

Dalam sistem pemantauan kesehatan jembatan, beberapa sensor digunakan untuk mendeteksi perilaku jembatan seperti

deformasi jembatan dan kerusakan. Sensor, yang terhubung ke pencatat data, mengirim data informasi seperti perpindahan dan percepatan berdasarkan domain waktu ke server lokal. Dalam simulasi numerik, domain data dapat diperoleh melalui analisis Elemen Hingga menggunakan program komputer SAP 2000. Data ini digunakan sebagai input oleh Neuro-Genetic Hybrids. Penelitian ini menggunakan Back Propagation Neural Network (BPNN) dan Genetic Algorithms (GA) untuk prediksi tingkat berat dan kerusakan optimal. Oleh karena itu, metode ini dikenal sebagai Neuro-Genetic Hybrids (NGH). Kinerja terbaik NGH bergantung pada pemilihan bobot awal yang sesuai, tingkat pembelajaran, momentum, model arsitektur jaringan, dan fungsi aktivasi. Neuron NGH untuk lapisan input terdiri dari waktu, percepatan dan perpindahan yang diperoleh dari sensor. Lapisan output adalah tingkat kerusakan jembatan yang dikategorikan ke dalam 4 indeks. Indeks adalah 0 (nol) untuk tingkat keamanan (S), 1 (satu) untuk tingkat IO, 2 (dua) untuk tingkat LS dan 3 (tiga) untuk tingkat CP.

Nilai MSE dan R-mean terbaik untuk satu layer tersembunyi menggunakan sistem JST adalah 0,0531 dan 0,82937 pada 50000 epochs untuk domain data perpindahan. Nilai 3,89% lebih kecil dari MSE domain data percepatan dan 1,37% lebih tinggi dari rata-rata R percepatan domain data. Waktu pemrosesan (waktu CPU) untuk domain data perpindahan 2,46% lebih pendek dari domain data percepatan. Sedangkan untuk dua layer tersembunyi, nilai MSE dan R-mean terbaik adalah 0,0512 dan

0,83001 pada 50000 epochs untuk domain data perpindahan. Nilai-nilai ini 4,12% lebih kecil dari MSE domain data percepatan dan 0,94% lebih tinggi dari R-mean dari domain data percepatan. Namun, waktu CPU 2.39% lebih lama dari domain data percepatan.

5.2. Rekomendasi

Implementasi sistem peringatan dini dalam metode Jaringan Saraf Tiruan ini untuk sistem pemantauan seismik jembatan dapat mempermudah otoritas jembatan untuk memprediksi stabilitas dan kondisi kesehatan struktur jembatan pada waktu tertentu. Perangkat lunak diperlukan untuk menyebarkan informasi kesehatan jembatan ke publik karena memiliki prediksi fungsi utama tingkat kerusakan ketika gempa bumi terjadi. Oleh karena itu, sangat dianjurkan kepada otoritas/pemilik jembatan untuk menggunakan Perangkat Lunak Pemantauan Cerdas ini.

Untuk penelitian lebih lanjut, bentuk digital sistem seismik cerdas untuk jembatan, pemantauan, dan analisis yang berjalan di perangkat seluler dapat dikembangkan. Oleh karena itu, sistem ini dapat memberikan manfaat bagi kelompok pengguna yang luas mulai dari pengawas lapangan hingga insinyur struktural. Hal ini disebabkan karena perangkat lunak ini tidak hanya sebagai alat penyimpanan data, tetapi pada saat yang sama dapat mempunyai kemampuan untuk mengontrol prosedur dan fase konstruksi sambil menganalisis dan meramalkan perilaku jembatan di masa depan pada durasi yang diberikan.

DAFTAR PUSTAKA

- Aldiamar, F. (2007). Analisa Risiko Gempa dan Pembuatan Respon Spektra Desain Untuk Jembatan Suramadu dengan Pemodelan Sumber Gempa 3D. *Institut Teknologi Bandung*.
- Álvarez, J. J., Aparicio, A. C., Jara, J. M., & Jara, M. (2012). Seismic Assessment of a Long-Span Arch Bridge Considering the Variation in Axial Forces Induced by Earthquakes. *Engineering Structures*, 34, 69–80.
- Arifi, E., Suseno, H., Hidayat, M. T., & Grahadika, H. E. (2017). Pengaruh Konfigurasi Rangka Dan Optimasi Profil Terhadap Kinerja Pada Struktur Jembatan Rangka Baja. *Rekayasa Sipil*, 10(3), 187–193.
- Ates, S., & Constantinou, M. C. (2011). Example of application of response spectrum analysis for seismically isolated curved bridges including soil-foundation effects. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 31(4), 648–661.
- Behnamfar, F., & Afshari, M. (2013). Collapse Analysis and Strengthening of Stone Arch Bridges Against Earthquake. *International Journal of Architectural Heritage*, 7(1), 1–25.
- Bisadi, V., & Head, M. (2011). Evaluation of Combination Rules For Orthogonal Seismic Demands in Nonlinear Time History Analysis of Bridges. *Journal of Bridge Engineering*. American Society of Civil Engineers.
- BMS. (1992). Peraturan Perencanaan Teknik Jembatan. *Bridge Design Code*, (May).
- BSN. (2016). *Perencanaan Jembatan Terhadap Beban Gempa SNI 2833*. Jakarta: Badan Standarisasi Nasional.
- Cheng, J., & Li, Q. S. (2012). Artificial Neural Network-based Response Surface Methods for Reliability Analysis of Pre-stressed Concrete Bridges. *Structure and Infrastructure*

- Engineering*, 8(2), 171–184.
- Chopra, A. K. (1997). *Dynamics of Structures*. <http://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Duan, L., & Chen, W. F. (2003). *Bridge Engineering: Seismic Design*. CRC Press.
- FEMA356. (2000). *Commentary for The Seismic Rehabilitation of Buildings (FEMA 356)*. Washington, DC: Federal Emergency Management Agency (Vol. 7).
- Gonzalez-Perez, C., & Valdes-Gonzalez, J. (2011). Identification of Structural Damage in a Vehicular Bridge using Artificial Neural Networks. *Structural Health Monitoring*, 10(1), 33–48.
- Guo, X., Wu, Y., & Guo, Y. (2016). Time-dependent Seismic Fragility Analysis of Bridge Systems under Scour Hazard and Earthquake Loads. *Engineering Structures*, 121, 52–60.
- Hao, S. (2009). I-35W bridge collapse. *Journal of Bridge Engineering*, 15(5), 608–614.
- Kerh, T., Huang, C., & Gunaratnam, D. (2011). Neural Network Approach for Analyzing Seismic Data to Identify Potentially Hazardous Bridges. *Mathematical Problems in Engineering*, 2011.
- Konakli, K., & Kiureghian, A. Der. (2011). Extended MSRS Rule for Seismic Analysis of Bridges Subjected to Differential Support Motions. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 40(12), 1315–1335.
- Kong, L. J., Chen, Y. B., Li, P., & Jiang, Q. Bin. (2012). The Anti-Seismic Analysis of the Lock-up Device on the Arch Bridge. *Advanced Materials Research*, 368, 1047–1050.
- Lin, N., & Qun, C. (2013). Structural health monitoring and damage detection using neural networks. In *2013 Third International Conference on Intelligent System Design and Engineering Applications* (pp. 1302–1304). IEEE.

- Ma, H.-B., Zhuo, W.-D., Lavorato, D., Fiorentino, G., Nuti, C., & Sabetta, F. (2017). Seismic Response Analysis of Continuous Highway Bridges under Near-Fault Ground Motions. *COMPDYN*.
- Meidiansyah, A. F., Purwanto, M. Y. J., & Fauzan, M. (2016). Analisis Struktur Box Girder Jembatan Fly Over Rawa Buaya Sisi Barat Terhadap Gempa. *Jurnal Teknik Sipil Dan Lingkungan*, 1(1), 42–56.
- Ni Choine, M., Kashani, M. M., Lowes, L. N., O'Connor, A., Crewe, A. J., Alexander, N. A., & Padgett, J. E. (2016). Nonlinear Dynamic Analysis and Seismic Fragility Assessment of a Corrosion Damaged Integral Bridge. *International Journal of Structural Integrity*, 7(2), 227–239.
- Ning, X. J., & Zhou, Y. T. (2011). Analysis for Seismic Response of Long Span Rigid Frame Bridge. In *Advanced Materials Research* (Vol. 194, pp. 1962–1966). Trans Tech Publ.
- Ok, S., Son, W., & Lim, Y. M. (2012). A Study of The Use of Artificial Neural Networks to Estimate Dynamic Displacements Due to Dynamic Loads in Bridges. In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 382, p. 12032). IOP Publishing.
- PEER. (2015). Pacific Earthquake Engineering Research Ground Motion Database. Retrieved from <http://www.peer.berkeley.edu/>
- Setiati, N. R., & Aprianto, I. K. (2017). Perbandingan Model Analisis Beban Gempa Antara Peraturan Gempa Tahun 2005 dengan Peta Gempa 2010 terhadap Jembatan Eksisting. In *Prosiding SNaPP: Sains, Teknologi* (Vol. 2, pp. 459–472).
- Shu, J., Zhang, Z., Gonzalez, I., & Karoumi, R. (2013). The Application of a Damage Detection Method using Artificial Neural Network and Train-induced Vibrations on a Simplified Railway Bridge Model. *Engineering Structures*, 52, 408–421.
- SNI-1726-2012. (2012). Standar Perencanaan Ketahanan Gempa

Untuk Struktur Bangunan Gedung. Badan Standarisasi Nasional.

Supriyadi, D., Adi, K., & Sarwoko, E. A. (2012). Sistem Informasi Penyebaran Penyakit Demam Berdarah Menggunakan Metode Jaringan Syaraf Tiruan Backpropagation. Universitas Diponegoro.

Suryanita, R. (2015). Evaluasi Kinerja Struktur Jembatan akibat Beban Gempa dengan Analisis Riwayat Waktu. In *Seminar Nasional "Inovasi Green Technology & Infrastruktur Menyongsong Masyarakat Ekonomi ASEAN."* Institut Teknologi Padang. <http://doi.org/10.13140/RG.2.1.2835.4401>

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. Lecture Notes in Electrical Engineering* (Vol. 275 LNEE). http://doi.org/10.1007/978-94-007-7684-5_12

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. http://doi.org/10.1007/978-94-007-7684-5_12

Suryanita, R., Djauhari, Z., & Wijaya, A. (2016). Respons Struktur Jembatan Beton Prategang Berdasarkan Spektrum Gempa Wilayah Sumatera, *15(1)*, 18–24.

Suryanita, R., & Jingga, H. (2017). Application of Backpropagation Neural Networks in Predicting Story Drift of Building. In *Proceedings of the International MultiConference of*

Engineers and Computer Scientists, IMECS 2017, March 15 - 17, 2017, Hong Kong (Vol. I, pp. 15–18).

- Suryanita, R., Maizir, H., & Jingga, H. (2017). Prediction of Structural Response Based on Ground Acceleration Using Artificial Neural Networks. *International Journal of Technology and Engineering Studies*, 3(2), 74–83. <http://doi.org/10.20469/ijtes.3.40005-2>
- Suryanita, R., Maizir, H., Yuniorto, E., & Jingga, H. (2018). Intelligent seismic risk mitigation system on structure building. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 106(1). <http://doi.org/10.1088/1755-1315/106/1/012003>
- Suryanita, R., Mardiyono, & Adnan, A. (2017). Intelligent bridge seismic monitoring system based on Neuro Genetic hybrid. *Telkomnika (Telecommunication Computing Electronics and Control)*, 15(4). <http://doi.org/10.12928/TELKOMNIKA.v15i4.6006>
- Suryanita, R., Mardiyono, & Adnan, A. (2017). Intelligent Bridge Seismic Monitoring System Based on Neuro Genetic Hybrid. *TELKOMNIKA Indonesian Journal of Electrical Engineering (Telecommunication Computing Electronics and Control)*, 15(4), 1830–1840. <http://doi.org/10.12928/TELKOMNIKA.v15i4.6006>
- Suryanita, R., Mardiyono, & Maizir, H. (2018). Damage Level Prediction of Pier using Neuro-Genetic Hybrid. *Internasional Journal on Advanced Science Engineering Information and Technology*, 8(6), 2393–2399.
- Wenzel, H. (2008). *Health Monitoring of Bridges*. John Wiley & Sons.
- Zeng, Q., & Dimitrakopoulos, E. G. (2016). Seismic Response Analysis of An Interacting Curved Bridge–Train System under Frequent Earthquakes. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 45(7), 1129–1148.

- Zhang, C. H., & Dai, J. W. (2012). Analysis on Long-Span Bridge Seismic Response in Multi-Dimensional and Multi-Point Mode. In *Applied Mechanics and Materials* (Vol. 117, pp. 58–61). Trans Tech Publ.
- Zhang, Y., Harries, K. A., & Yuan, W. (2013). Experimental and Numerical Investigation of The Seismic Performance of Hollow Rectangular Bridge Piers Constructed With and Without Steel Fiber Reinforced Concrete. *Engineering Structures*, 48, 255–265.

GLOSARIUM

Analisis statis adalah solusi metode elemen hingga tidak terikat fungsi waktu (t) atau fungsi beban tidak terikat waktu (t).

Analisis dinamis adalah solusi metode elemen hingga yang terikat dengan fungsi waktu (t).

bobot (*weight*) adalah faktor pemberat yang menentukan hasil perkiraan berdasarkan indeks input secara random.

Bridge health monitoring system adalah sistem pemantauan kesehatan jembatan yang menjadi indikator jembatan masih layak digunakan.

Masa layan adalah masa umur jembatan selama masih bisa menahan dan mendukung beban yang bekerja di atas nya.

Kinerja jembatan adalah performa jembatan berdasarkan hasil analisis elemen hingga nonlinier yang menunjukkan kekuatan jembatan setelah melewati masa elastisnya.

jaringan saraf tiruan adalah metode prediksi menggunakan jaringan sel yang meniru jaringan saraf manusia dan cara kerja otak dalam menentukan hasil prediksinya berdasarkan neuron-neuron input data .

neuron-neuron adalah sel-sel (data) dan luaran yang digunakan dalam perhitungan prediksi.

lapisan-lapisan (*layer*) neuron adalah kelompok data input, kelompok data proses atau kelompok data target output

learning rate pembelajaran adalah parameter angka koefisien yang digunakan dalam perhitungan hasil prediksi.

INDEX

Analisis dinamis, 11, 13, 18

Backpropagation, 33, 57, 62, 65, 67, 69

Beban Gempa, 3, 10, 13, 17, 18, 19, 46, 49, 57, 58, 65, 69

Bobot, 31, 32, 33, 34, 35, 38, 40, 59, 60, 63, 64, 65, 67, 69, 82

Input, 9, 11, 31, 32, 33, 34, 39, 40, 41, 49, 57, 58, 59, 60, 61, 68, 69, 75, 80, 82

Jaringan saraf tiruan, 3, 4, 9, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 38, 39, 57, 58, 59, 60, 65, 66, 67, 69, 70, 71, 72, 73, 74, 75, 76, 80, 83

Kecepatan, 19, 25, 27, 28, 29, 57, 58, 57, 70, 71, 72, 73, 74

Layer, 31, 32, 33, 35, 58, 60, 61, 62, 63, 64, 66, 82

Neuron, 31, 32, 33, 59, 60, 61, 62, 63, 64, 66, 67, 68, 82

Output, 9, 31, 32, 33, 34, 35, 38, 39, 40, 41, 57, 58, 60, 61, 62, 63, 64, 65, 66, 67, 69, 82

Percepatan, 10, 11, 17, 19, 21, 22, 23, 25, 27, 28, 29, 37, 50, 51, 52, 57, 58, 67, 72, 73, 74, 80, 81, 82, 83

Perpindahan, 10, 17, 18, 19, 25, 26, 27, 28, 29, 40, 57, 58, 67, 69, 70, 72, 73, 74, 80, 81, 82, 83

Respons Spektrum, 4, 17, 20, 21, 22, 25, 50, 51, 53, 54, 56, 57, 65

Respons Struktur, 4, 10, 19, 21, 27, 28, 41, 50, 57, 58, 67, 69

Training, 59, 60, 62, 65, 66, 67, 69, 73, 74

Testing, 41, 65, 66, 67, 69, 73, 74

Aplikasi Jaringan Saraf Tiruan dalam Pemantauan Kesehatan Struktur Jembatan Beton Bertulang

Buku ini merupakan monograf penelitian sistem pemantauan struktur jembatan beton bertulang pada daerah mikrozonasi gempa Indonesia. Gambaran isi buku meliputi:

- Metode prediksi hasil respons struktur jembatan berupa perpindahan, kecepatan, dan percepatan berdasarkan Spektra Gempa Indonesia adalah dengan metode Jaringan Saraf Tiruan (JST).
- Analisis respons spektra model jembatan menggunakan *software* elemen hingga SAP2000 dan data percepatan tanah dari 34 ibu kota provinsi dan 5 kota besar di Indonesia dengan 3 kondisi jenis tanah
- Hasil analisis menampilkan potensi JST dalam memprediksi respons struktur jembatan dengan proses *training* terhadap 102 set data dan proses *testing* terhadap 15 set data, diperoleh potensi JST dalam memprediksi respons struktur jembatan dengan tingkat akurasi lebih dari 82%, serta nilai *Mean-Squared Errors (MSE)* sebesar 0,053.
- Sistem pemantauan berbasis kecerdasan buatan membantu praktisi di lapangan dalam mengeluarkan rekomendasi hasil pengamatan yang lebih akurat.

Tentang Penulis

Reni Suryanita, ST., MT., Ph.D, merupakan dosen pada Jurusan Teknik Sipil Universitas Riau. Bidang kepakaran penulis dalam monitoring struktur menggunakan metode Kecerdasan Buatan (*Artificial Intelligence*). Sekarang penulis aktif di bidang penelitian Dinamika Struktur dengan menerapkan metode kecerdasan buatan dalam memprediksi respons struktur dan kerusakan bangunan maupun jembatan. Karya ilmiah berupa buku yang telah dihasilkan penulis adalah buku ajar Pemrograman Komputer (2007) dan buku ajar Dinamika Struktur, Teori dan Aplikasi (2016). Sedangkan buku monograf ini merupakan buku ketiga penulis yang membahas hasil penelitian sejak tahun 2013 hingga 2018 dengan menerapkan metode Jaringan Saraf Tiruan dalam monitoring struktur jembatan beton bertulang.

Penerbit
Universitas Riau Press
ISBN : 978-979-792-887-2

