

# POTENSI JARINGAN SARAF TIRUAN *BACKPROPAGATION* DALAM MEMPREDIKSI RESPON SISTEM *MULTI DEGREE OF FREEDOM* AKIBAT PEMBEBANAN DINAMIK

Puri Awanda Cantikawati<sup>1)</sup>, Reni Suryanita<sup>2)</sup>, Enno Yuniarto<sup>3)</sup>

<sup>1)</sup> Jurusan Teknik Sipil, Universitas Riau, Jl. Subrantas KM 12.5 Pekanbaru 28293

Email: puriawanda@gmail.com

<sup>2)</sup> Jurusan Teknik Sipil, Universitas Riau, Jl. Subrantas KM 12.5 Pekanbaru 28293

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

<sup>3)</sup> Jurusan Teknik Sipil, Universitas Riau, Jl. Subrantas KM 12.5 Pekanbaru 28293

Email: enno\_yuniarto@yahoo.com

## **Abstract**

*One of the simplification model of structure in the structural dynamic engineering was converting the model of a structure into the system that has mass, stiffness, damping percentage and number of Degree of Freedom (DOF) whether in single number (Single Degree of Freedom) or multi number (Multi Degree of Freedom) as its components. Yet the application of model SDOF system was used as fundamental analysis and had to be developed for MDOF system. The research of MDOF system had become necessity to be continuously done in order to improve the previous existing analysis method. One of the method that potentially can be used was with Artificial Neural Network (ANN). Thus why this research was aimed to identify the capability of ANN in predicting the system responses. The analysis of system with 4, 6 and 8 DOFs that was subjected to dynamic excitation such as sinusoidal, triangular, rectangular and ramp load was done with Newmark- $\beta$  method listing program of FORTRAN. Then analysis continued with Backpropagation Neural Network (BP-NN) using MATLAB program. The input data for BP-NN were heights (H), mass, stiffness, damping value, natural period (Tn) and dynamic load factor (DLF) with system responses as target data. The result had shown that variation of dynamic loads and system parameter had affected the value of system responses. While BP-NN training result showed its ability in predicting the system responses was decreasing from displacement to velocity and acceleration. It could be seen within the degradation value of regression (R) from 0.99-0.84, the increase of Mean Squared Error (MSE) from  $1.19 \times 10^{-7}$ -0.7654 and error percentage from 5%-41%. Therefore ANN method was not capable to be used in predicting the responses of MDOF system under dynamic loads.*

Keywords: *MDOF system, dynamic load, Backpropagation Neural Network, Newmark- $\beta$ , displacement, velocity, acceleration*

## **A. PENDAHULUAN**

Berdasarkan penelitian sebelumnya terhadap analisis respon spektrum dari sistem *Single Degree of Freedom* (SDOF) akibat beban dinamik yang dilakukan oleh Hendra Sarfika (2005), dapat dilihat bagaimana perubahan yang terjadi terhadap perpindahan, kecepatan dan percepatan suatu sistem karena memikul beban dinamik. Sementara pada hakikatnya seluruh sistem yang digunakan merupakan sistem yang memiliki derajat kebebasan tak terhingga atau *Multi Degree of Freedom* (MDOF),

namun untuk mendapat suatu penyederhanaan dari analisis dan hitungan, maka suatu sistem dianggap memiliki derajat kebebasan terbatas.

Studi yang dilakukan sejauh ini terhadap sistem dengan beban dinamik sangat sulit dijabarkan dalam suatu bentuk matematis yang sederhana. Oleh karena itu, analisa respon sistem akibat beban dinamik dilakukan menggunakan pendekatan numeris dengan perhitungan terhadap variasi beban yang dilakukan secara berulang-ulang. Beban dinamik yang umumnya

diperhitungkan dapat menerpa sistem sewaktu-waktu walaupun tidak akan terjadi dalam jangka waktu panjang. Namun, akibat yang ditimbulkan oleh beban dinamik terhadap kegagalan sistem tidak dapat diabaikan begitu saja. Penelitian yang dilakukan Conal & Sidabutar (2014) terhadap pengaruh beban dinamik seperti beban sinusoidal yang ditimbulkan akibat getaran mesin pada pelat dan balok membuktikan bahwa elemen struktur tersebut mengalami lendutan. Beban yang digunakan sebagai simulasi berasal dari getaran mesin Mitsubishi S6K-T.

Selama ini, respon sistem akibat beban dinamik akan dikeluarkan dalam 3 parameter yaitu: perpindahan, kecepatan dan percepatan yang dialami suatu sistem. Simulasi respon sistem derajat banyak akibat variasi beban dinamik dianalisis menggunakan bantuan komputer dengan *listing program* pada aplikasi diantaranya FORTRAN, MATLAB, Visual Basic yang bertujuan untuk memperoleh *output* berupa respon sistem. Namun belum ditemukan penelitian mengenai kemampuan Jaringan Saraf Tiruan (JST) khususnya tipe *Backpropagation* (*Neural Network Backpropagation*) dalam memprediksi respon sistem MDOF akibat pembebanan dinamik. Jaringan saraf tiruan merupakan model penyederhanaan dari sistem saraf biologis manusia yang saling terhubung dan memiliki kemampuan untuk belajar mengenai perilaku suatu sistem dari data – data yang ada. Jaringan saraf tiruan belajar dan ‘dilatih’ dari contoh data yang ada sehingga dapat membuat kesimpulan dan memprediksi *output* terbaru dari kecenderungan perilaku pada data input.

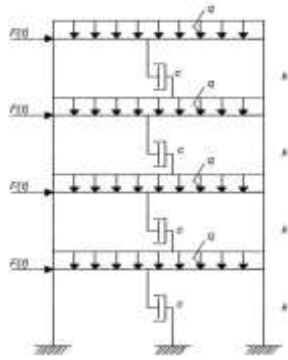
Proses latihan data dengan JST membutuhkan variasi data yang tidak sedikit. Oleh karena itu sebelum proses pembelajaran JST dimulai, maka perlu dilakukan perhitungan respons sistem akibat variasi nilai massa ( $m$ ), kekakuan ( $k$ ) dan redaman ( $c$ ) serta variasi beban dinamik yang diterima sistem. Metode yang digunakan dalam perhitungan respons sistem akibat beban dinamik juga berbeda-

beda diantaranya adalah metode integrasi langsung (*Direct Integration*) dan superposisi moda (*Mode Superposition*). Tiap metode menggunakan parameter data *input* berbeda, termasuk nilai konstanta yang telah ditetapkan. Namun seluruh metode membutuhkan data massa, kekakuan dan redaman sistem serta data beban dinamik yang diterima pada masing-masing derajat kebebasan. Analisis terhadap respon sistem dalam penelitian ini dilakukan dengan metode integrasi langsung *Newmark- $\beta$*  dimana akurasi hasil perhitungan dipengaruhi oleh *time step* ( $\Delta t$ ), alpha ( $\alpha$ ), delta ( $\delta$ ) dan perioda natural ( $T_n$ ) sistem (Chopra, 2012).

Berdasarkan nilai alpha ( $\alpha$ ) dan delta ( $\delta$ ), metode *Newmark- $\beta$*  terbagi lagi atas dua prinsip yaitu prinsip percepatan linier dimana  $\alpha = 1/2$  dan  $\delta = 1/6$  serta prinsip percepatan rata-rata dimana  $\alpha = 1/2$  dan  $\delta = 1/4$ . Rompas et al (2015) membuktikan kestabilan dan akurasi simulasi numerik menggunakan metode *Newmark- $\beta$*  dengan prinsip percepatan linier sangat baik apabila nilai  $\Delta t$  yang digunakan kecil dari  $0.551 T$  ( $\Delta t < 0.551 T$ ) sedangkan untuk prinsip percepatan rata-rata tetap stabil untuk berapapun nilai  $\Delta t$  yang digunakan.

Tulisan ini bertujuan untuk mengidentifikasi dan membandingkan hasil JST *Backpropagation* dalam memprediksi respon sistem akibat adanya beban dinamik dengan simulasi numerik manual yang dilakukan menggunakan metode *Newmark- $\beta$*  dengan prinsip percepatan linier. Analisis dilakukan dengan asumsi sebagai berikut:

1. Model yang digunakan dalam analisis sistem derajat banyak adalah model *frame* (portal) dengan jumlah derajat kebebasan yaitu 4, 6 dan 8 DOF.



Gambar 1. Model Sistem Portal 4 DOF

2. Respon yang akan dianalisa hanya dilakukan pada sistem yang memiliki nilai redaman (*damped sistem*).
3. Beban dinamik yang digunakan dibatasi pada beban sinusoidal (harmonik – periodik) dan beban acak terpola (segitiga, segiempat, *ramp*).
4. Variabel yang divariasikan yaitu kekakuan dan massa sedangkan persentase redaman struktural yang digunakan dalam penelitian adalah 5%.
5. Data sistem yang digunakan yaitu:
  - a. Material yang digunakan adalah beton bertulang dengan lebar 4.1 m dan tinggi 3.4 m.
  - b. Dimensi elemen balok,  $(b \times h) = 25 \text{ cm} \times 40 \text{ cm}$
  - c. Dimensi elemen kolom,  $(b \times h) = 30 \text{ cm} \times 40 \text{ cm}$
  - d. Kuat tekan beton,  $f'_c = 29.05 \text{ MPa}$
  - e. Modulus Elastisitas,  $E = 25332,08 \text{ MPa}$  ( $2.533 \times 10^{10} \text{ N/m}^2$ )
  - f. *Weight Density*,  $\gamma_b = 24 \text{ kN/m}$
  - g. Asumsi beban lantai ( $q$ ) yang digunakan untuk gedung dengan fungsi asrama diambil dari PPIUG (1983) sebesar  $250 \text{ kg/m}^2$ . Nilai percepatan gravitasi ( $g$ ) yang digunakan adalah  $9,81 \text{ m/dt}^2$ .

## B. TINJAUAN PUSTAKA

Secara garis besar analisis dinamik terhadap suatu sistem dapat dilakukan melalui tiga tahap; pertama yaitu identifikasi dari suatu kasus; kedua mendefinisikan model mekanis; dan ketiga adalah menetapkan solusi dari model mekanis yang telah dibuat. Tahap pertama mencakup

identifikasi dan penjabaran dari karakteristik fisik struktur maupun komponen struktur dan penetapan beban dinamik yang bekerja. Tahap kedua merupakan interpretasi dari suatu kasus atau masalah yang ada menjadi suatu bentuk yang dapat diselesaikan secara analitis. Penetapan model mekanik yang dilakukan pada tahap ini harus secara akurat menggambarkan perilaku dinamik dari suatu struktur. Tahap terakhir adalah menentukan persamaan yang digunakan agar respon dinamik dapat dihasilkan.

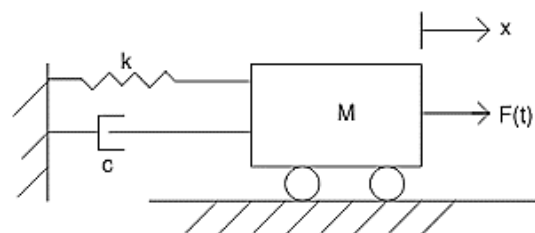
### Derajat Kebebasan (*Degree of Freedom*)

Derajat kebebasan merupakan gambaran dari jumlah koordinat bebas yang diperlukan untuk menetapkan susunan atau posisi sistem pada setiap saat (Mario, 1996).

Sistem dengan suatu derajat kebebasan tertentu memiliki elemen – elemen berupa; massa ( $m$ ) yang menyatakan massa dan inersia dari sistem tersebut; elemen pegas ( $k$ ) menyatakan kapasitas energi potensial yang dimiliki suatu sistem; elemen redaman ( $c$ ) menyatakan persentase kehilangan energi yang dimiliki suatu sistem; terakhir adalah elemen gaya pengaruh  $F(t)$ , merupakan gaya luar yang bekerja pada sistem.

#### 1. Sistem Derajat Kebebasan Tunggal (SDOF)

Sistem getaran SDOF terdiri dari massa sistem yang disimbolkan dalam huruf  $m$ , kekakuan sistem dengan symbol  $k$ , redaman yang disimbolkan dengan abjad  $c$ ,  $x$  sebagai perpindahan horisontal digambarkan searah dengan gaya luar  $F(t)$  yang diterima sistem seperti yang dapat dilihat pada Gambar 2.



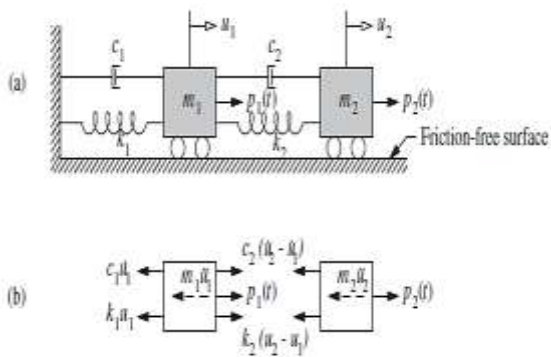
Gambar 2. Model Mekanis SDOF

Secara matematis model SDOF pada Gambar 2 dapat dijabarkan melalui Persamaan berikut dimana  $\ddot{x}$  adalah percepatan sistem dan  $\dot{x}$  adalah kecepatan sistem:

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = F(t)$$

## 2. Sistem Derajat Kebebasan Banyak (MDOF)

Menurut Budio (2013) dalam sistem MDOF elemen balok dan lantai memiliki jumlah lebih dari satu serta dianggap kaku dan distribusi massa seluruh gedung terpusat pada bidang lantai (*lumped mass*). Selain dimodelkan dalam bentuk sistem portal seperti Gambar 1, MDOF juga dapat digambarkan dalam bentuk massa – pegas – redaman yang dapat dilihat pada Gambar 3 (Chopra, 2012).



Gambar 3. (a) massa – pegas – redaman derajat dua; (b) *Free body diagram* (Chopra, 2012)

Persamaan gerak suatu sistem disesuaikan dengan *free body diagram* Gambar 3 dapat diuraikan menjadi seperti persamaan berikut (Budio, 2013):

$$\begin{bmatrix} m_1 & 0 \\ 0 & m_2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{u}_1 \\ \ddot{u}_2 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} c_1 + c_2 & -c_2 \\ -c_2 & c_2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{u}_1 \\ \dot{u}_2 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} k_1 + k_2 & -k_2 \\ -k_2 & k_2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} p_1(t) \\ p_2(t) \end{Bmatrix}$$

Perioda natural untuk sistem MDOF dapat dihitung dengan persamaan berikut

$$T_n \approx \frac{\sqrt{\delta_{st}}}{5.5}$$

Dimana nilai  $\delta_{st}$  berbanding lurus terhadap massa sistem tiap lantai dan berbanding

terbalik dengan kekakuan yang dapat dihitung dengan persamaan berikut

$$\delta_{st} = \frac{W}{k_n} + \dots + \frac{nW}{k_1}$$

## Beban Dinamik

Selain berat sendiri, pada dasarnya tidak ada beban lain yang dapat dikatakan statik karena pada dasarnya beban akan berubah sesuai dengan fungsi waktu atau biasa dikenal dengan beban dinamik (Hendra Sarfika, 2005). Respons sistem juga akan menjadi dinamik apabila menerima beban dinamik, bentuk respons tersebut tidak hanya berupa simpangan (defleksi), tetapi juga percepatan dan kecepatan (Natana, 2007).

### 1. Beban Acak

Beban ini memiliki grafik yang tidak beraturan, terjadi dalam waktu yang singkat seperti beban ledakan dan dalam waktu yang panjang seperti beban akibat gempa bumi.

#### a. Beban Segitiga

Beban segitiga secara dapat dirumuskan dengan persamaan berikut:

$$F(t) = \begin{cases} F_0 \left(1 - \frac{t}{t_d}\right) & \text{untuk } 0 \leq t \leq t_d \\ 0 & \text{untuk } t > t_d \end{cases}$$

#### b. Beban Segiempat

Beban segitiga secara matematis dapat dirumuskan dengan persamaan berikut:

$$F(t) = \begin{cases} F_0 & \text{untuk } 0 \leq t \leq t_d \\ 0 & \text{untuk } t > t_d \end{cases}$$

#### c. Beban Ramp

Grafik beban *ramp* dapat digambarkan sebagai gabungan dari beban segitiga dan beban konstan (Toriello, 1976) dengan fungsi pada persamaan berikut:

$$F(t) = \begin{cases} F_0 \left(\frac{t}{t_o}\right) & \text{untuk } 0 \leq t \leq t_o \\ F_0 & \text{untuk } t > t_o \end{cases}$$

## 2. Beban Harmonik

Beban harmonik pada umumnya terjadi dalam struktur yang memiliki fungsi sebagai bangunan industri ataupun bangunan yang memiliki fungsi sebagai pembangkit tenaga listrik. Beban ini berasal dari ketidakseimbangan gaya yang terjadi pada suatu mesin seperti perputaran kipas, getaran pada mesin generator dan kompresor (Conal & Sidabutar, 2014). Beban akibat getaran mesin ini disederhanakan dalam bentuk beban sinusoidal yang dijabarkan dalam persamaan berikut:

$$F(t) = F_0 \sin \Omega t$$

### Faktor Beban Dinamik

Toriello (1976) mendefinisikan faktor Beban Dinamik (*Dynamic Load Factor*) atau disingkat menjadi DLF, merupakan faktor non-dimensional yang didapat dari hasil perbandingan perpindahan akibat beban dinamik ( $x_m$ ) terhadap perpindahan akibat beban static struktur ( $x_s$ ). Secara sederhana DLF dapat dijabarkan dengan Persamaan berikut:

$$D_{LF} = \frac{x_m}{x_s}$$

$$x_s = \frac{P_0}{k}$$

### Prosedur Perhitungan Respon Sistem dengan Metode Newmark – $\beta$

Metode *Newmark* –  $\beta$  membutuhkan input berupa karakteristik dari suatu sistem MDOF yang akan dianalisis, yaitu matriks kekakuan  $[k]$ , matriks massa  $[m]$  dan matriks redaman  $[c]$  dari tiap – tiap tingkat derajat kebebasan. Tahapan prosedur perhitungan dalam mendapatkan parameter-parameter *output* berupa perpindahan, kecepatan dan percepatan terhadap variasi sistem yang akan dianalisis adalah sebagai berikut:

1. Menghitung besarnya nilai percepatan awal dengan persamaan:

$$\{\ddot{x}\}_0 = [m]^{-1}(\{F_{(0)}\} - [c]\{\dot{x}\}_0 + [k]\{x\}_0)$$

2. Menentukan parameter alpha ( $\alpha$ ) dan delta ( $\delta$ ) dengan nilai delta  $\geq 0.50$  sedangkan nilai alpha dihitung menggunakan persamaan berikut:

$$\alpha \geq 0.25(0.5 + \delta)^2$$

3. Setelah nilai alpha ( $\alpha$ ) dan delta ( $\delta$ ) didapat, maka perhitungan konstanta integrasi dari  $a_0$  hingga  $a_8$  dengan persamaan berikut:

$$a_0 = \frac{1}{\alpha(\Delta t)^2}$$

$$a_1 = \frac{\delta}{\alpha \Delta t}$$

$$a_2 = \frac{1}{\alpha \Delta t}$$

$$a_3 = \frac{1}{2\alpha} - 1$$

$$a_4 = \frac{\delta}{\alpha} - 1$$

$$a_5 = \frac{\Delta t}{2} \left( \frac{\delta}{\alpha} - 2 \right)$$

$$a_6 = \Delta t (1 - \delta)$$

$$a_7 = \delta \Delta t$$

4. Selanjutnya adalah pembentukan matriks kekakuan efektif  $[\hat{k}]$  dengan Persamaan berikut:

$$[\hat{k}] = [k] + a_0[m] + a_1[c]$$

5. Perhitungan terhadap respon dinamik sistem dilanjutkan ke tiap-tiap *time step*, dimulai dari mengitung nilai efektif fungsi dari beban yang diterima oleh sistem  $F_{(t)}$ , perpindahan, percepatan dan kecepatan saat *time step*  $t+\Delta t$  dengan persamaan berikut:

$$\{\hat{F}\}_{t+\Delta t} = \{\hat{F}\}_{t+\Delta t} + [m] \left( \begin{array}{l} a_0\{x\}_t + \\ a_2\{\dot{x}\}_t + a_3\{\ddot{x}\}_t \end{array} \right) +$$

$$[c] \left( \begin{array}{l} a_1\{x\}_t + \\ a_4\{\dot{x}\}_t + a_5\{\ddot{x}\}_t \end{array} \right)$$

$$\{x\}_{t+\Delta t} = [\hat{k}]^{-1} \{\hat{F}\}_{t+\Delta t}$$

$$\{\ddot{x}\}_{t+\Delta t} = a_0(\{x\}_{t+\Delta t} - \{x\}_t) - a_2\{\dot{x}\}_t - a_3\{\ddot{x}\}_t$$

$$\{\dot{x}\}_{t+\Delta t} = \{\dot{x}\}_t + a_6\{\dot{x}\}_t + a_3\{\ddot{x}\}_{t+\Delta t}$$

Menurut Chopra (2012), secara singkat besar nilai *time step* ( $\Delta t$ ) dapat dihitung dengan persamaan berikut:

$$\frac{\Delta t}{T_n} \leq \frac{1}{\pi\sqrt{2}} \frac{1}{\sqrt{\alpha-2\delta}}$$

### Jaringan Saraf Tiruan (JST)

Jaringan Saraf Tiruan (JST) adalah model penyederhanaan dari sistem neuron biologis makhluk hidup yang kompleks dan

saling terhubung sehingga memiliki kemampuan untuk belajar terhadap suatu hal baru sehingga nantinya dapat digunakan dalam perhitungan kompleks (Rajasekaran & Pai, 2007). Menurut Sutojo et al (2010), kelebihan JST adalah sebagai berikut:

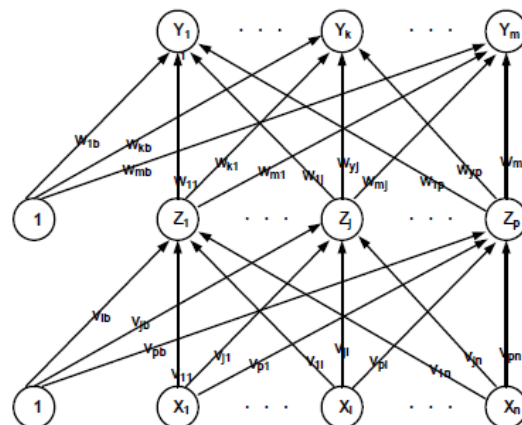
1. Belajar *adaptive*, yaitu melakukan pekerjaan berdasarkan data yang diberikan.
2. *Self-organisation*, yaitu dapat membuat representasi dari informasi yang diterima.
3. *Real time operation*, yaitu perhitungan dapat dilakukan secara paralel.

JST juga mempunyai kelemahan-kelemahan sebagai berikut menurut Sutojo et al (2010):

1. Tidak efektif untuk operasi numerik dengan presisi tinggi.
2. Tidak efisien untuk operasi algoritma aritmatik, logika, dan simbolis.
3. Dalam proses sehingga bila jumlah datanya besar, waktu yang digunakan untuk proses pelatihan sangat lama

### Jaringan Saraf Tiruan *Backpropagation*

Tipe Jaringan Saraf Tiruan (JST) *Backpropagation* (BP) merupakan salah satu jenis JST yang paling umum digunakan. Supriyadi (2013) menggambarkan arsitektur JST BP dalam Gambar 4 dimana terdapat  $n$  buah masukan dengan  $1 < i < n$  ditambah sebuah bias, jumlah unit *hidden layer* disimbolkan dengan  $p$  unit dimana  $1 < j < p$  ditambah sebuah bias dan unit keluaran (*output*) disimbolkan dengan  $m$  buah dimana  $1 < k < m$ .  $v$  merupakan bobot garis dari unit masukan  $x$  ke *hidden layer* (lapis tersembunyi)  $z$  sedangkan  $w$  merupakan bobot garis dari *hidden layer* ke unit *output* (keluaran)  $y$ . JST *Backpropagation* sendiri memiliki 3 fase yaitu fase propagasi maju (*feed forward*), fase propagasi mundur (*backpropagation*) dan fase perubahan bobot (Antara et al., 2013)



Gambar 4. Arsitektur JST *Backpropagation*

### Kriteria Tingkat Kesalahan

Menurut Goel (2011) ada 2 kriteria tingkat kesalahan, yaitu:

#### 1. *Correlation Coefficient* (R)

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

$$R = \frac{\sum xy}{\sqrt{\sum x^2 \sum y^2}}$$

dengan

- $x$  =  $X - X^{\wedge}$ ,  $y = Y - Y^{\wedge}$
- $X$  = Nilai pengamatan
- $X^{\wedge}$  = Rata-rata nilai  $X$
- $Y$  = Nilai Prediksi
- $Y^{\wedge}$  = Rata-rata nilai  $Y$

#### 2. *Root Mean Squared Error* (RMSE)

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

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

## C. ANALISIS DAN PEMBAHASAN

### Perhitungan Data Sistem MDOF

Hasil perhitungan data sistem MDOF berdasarkan data dimensi dan material yang digunakan disajikan seperti Tabel 1. Data-data tersebut digunakan pada

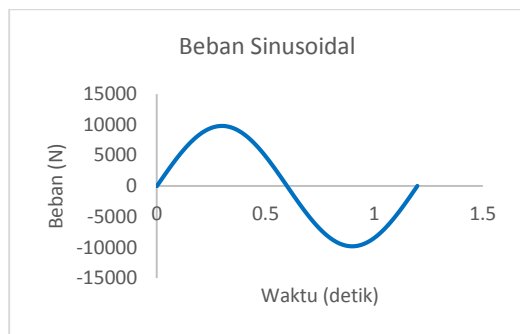
setiap variasi DOF sistem yaitu 4, 6 dan 8 DOF.

Tabel 1. Variasi Data Sistem MDOF

Var	Massa (kg)	Kekakuan (N/m)	Redaman (%)
1.	4202.5	12374718.5	5
2.	4202.5	6187359.25	5
3.	2101.25	12374718.5	5
4.	8405	24749437	5

### Perhitungan Data Beban Dinamik

Grafik beban sinusoidal dapat dilihat pada Gambar 5.



Gambar 5. Grafik Beban Sinusoidal  
Simulasi Respon Sistem dengan Metode Newmark-β

#### 1. Menentukan periode natural sistem

Sebelumnya dilakukan perhitungan perpindahan sistem searah sumbu X ( $\delta_{st}$ ).

$$\delta_{st} = \frac{W}{k_n} + \dots + \frac{nW}{k_1}$$

$$\delta_{st} = \frac{41226.5}{12374719} + \frac{2(41226.5)}{3(41226.5)} + \frac{12374719}{4(41226.5)} + \frac{12374719}{12374719}$$

$$\delta_{st} = 0.03332 \text{ m}$$

$$T_n \approx \frac{\sqrt{\delta_{st}}}{5.5}$$

$$T_n \approx \frac{\sqrt{0.03332}}{5.5}$$

$$T_n = 0.03319 \text{ detik}$$

#### 2. Menghitung nilai percepatan awal

$$\{\ddot{x}\}_0 = [m]^{-1}(\{F_0\} - [c]\{\dot{x}\}_0 + [k]\{x\}_0)$$

Dengan nilai perpindahan dan kecepatan awal adalah 0 serta nilai F pada t=0 adalah 0, maka

$$\{\ddot{x}\}_0 = [m]^{-1}[F_0]$$

$$\{\ddot{x}\}_0 = \begin{bmatrix} 4202.5 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 4202.5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 4202.5 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 4202.5 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$\{\ddot{x}\}_0 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} m/dt^2$$

#### 3. Menentukan konstanta integrasi

$$a_0 = \frac{1}{0.5(0.01)^2} = 20000$$

$$a_1 = \frac{1/6}{0.5(0.01)} = 33.333$$

$$a_2 = \frac{1}{0.5(0.01)} = 200$$

$$a_3 = \frac{1}{(2 \times 0.5)} - 1 = 0$$

$$a_4 = \frac{1/6}{0.5} - 1 = 0.333$$

$$a_5 = \frac{0.01}{2} \left( \frac{1}{0.5} - 2 \right) = -0.00833$$

$$a_6 = 0.00833$$

$$a_7 = 0.00167$$

#### 4. Menentukan kekakuan efektif

$$[\hat{k}] = [k] + a_0[m] + a_1[c]$$

Dimana;

[k]

$$= \begin{bmatrix} 2.48 \times 10^7 & -1.24 \times 10^7 & 0 & 0 \\ -1.24 \times 10^7 & 2.48 \times 10^7 & -1.24 \times 10^7 & 0 \\ 0 & -1.24 \times 10^7 & 2.48 \times 10^7 & -1.24 \times 10^7 \\ 0 & 0 & -1.24 \times 10^7 & 1.24 \times 10^7 \end{bmatrix}$$

$$a_0[m] = 20000 \begin{bmatrix} 4202.5 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 4202.5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 4202.5 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 4202.5 \end{bmatrix}$$

$a_1[c]$

$$= 33.333 \begin{bmatrix} 16490.61 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 16490.61 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 16490.61 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 8245.305 \end{bmatrix}$$

Maka didapat matriks kekakuan efektif;

$$[\hat{k}] = \begin{bmatrix} 84143000 & -44999.91 & 0 & 0 \\ -44999.91 & 84143000 & -23999.94 & 0 \\ 0 & -23999.94 & 84143000 & -20999.97 \\ 0 & 0 & -20999.97 & 84071000 \end{bmatrix}$$

#### 5. Menghitung nilai efektif fungsi dari beban yang diterima oleh sistem $F(t)$ dengan Rumus 29

$$\{\hat{F}\}_{t+\Delta t} = \{\hat{F}\}_{t+\Delta t} + [m](a_0\{x\}_t + a_2\{\dot{x}\}_t + a_3\{\ddot{x}\}_t) + [c](a_1\{x\}_t + a_4\{\dot{x}\}_t + a_5\{\ddot{x}\}_t)$$

Dimana

$$\{\hat{F}\}_{t+\Delta t} = \begin{bmatrix} 513.099 \\ 513.099 \\ 513.099 \\ 513.099 \end{bmatrix} N$$

Dengan nilai  $\{x\}_t$ ,  $\{\dot{x}\}_t$  dan  $\{\ddot{x}\}_t$  adalah 0, maka nilai  $[m](a_0\{x\}_t + a_2\{\dot{x}\}_t + a_3\{\ddot{x}\}_t)$  juga sama dengan 0. Begitu pula dengan nilai  $[c](a_1\{x\}_t + a_4\{\dot{x}\}_t + a_5\{\ddot{x}\}_t)$  yang bernilai 0, maka nilai gaya efektif yang diterima sistem saat *time step* 0 + 0.01 adalah sebesar:

$$\{\hat{F}\}_{t+\Delta t} = \begin{bmatrix} 513.099 \\ 513.099 \\ 513.099 \\ 513.099 \end{bmatrix} N$$

6. Menghitung besar perpindahan pada saat *time step* 0+0.01

$$\{x\}_{t+\Delta t} = [\hat{k}]^{-1} \{\hat{F}\}_{t+\Delta t}$$

$$\{x\}_{t+\Delta t} = \begin{bmatrix} 84143000 & -44999.91 & 0 & 0 \\ -44999.91 & 84143000 & -23999.94 & 0 \\ 0 & -23999.94 & 84143000 & -20999.97 \\ 0 & 0 & -20999.97 & 84071000 \end{bmatrix}^{-1} \times \begin{bmatrix} 9604 \\ 9604 \\ 9604 \\ 9604 \end{bmatrix}$$

$$\{x\}_{t+\Delta t} = \begin{bmatrix} 0.0000061 \\ 0.0000061 \\ 0.0000061 \\ 0.0000061 \end{bmatrix} m$$

7. Menghitung besar percepatan pada saat *time step* 0+0.01

$$\{\ddot{x}\}_{t+\Delta t} = a_0(\{x\}_{t+\Delta t} - \{x\}_t) - a_2\{\dot{x}\}_t - a_3\{\ddot{x}\}_t$$

$$\{\ddot{x}\}_{t+\Delta t} = 20000 \left( \begin{bmatrix} 0.0000061 \\ 0.0000061 \\ 0.0000061 \\ 0.0000061 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \right)$$

$$-200 \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} - 0 \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$\{\ddot{x}\}_{t+\Delta t} = \begin{bmatrix} 0.122 \\ 0.122 \\ 0.122 \\ 0.122 \end{bmatrix} m/dt^2$$

8. Menghitung besar kecepatan pada saat *time step* 0+0.01

$$\{\dot{x}\}_{t+\Delta t} = \{\dot{x}\}_t + a_6\{\dot{x}\}_t + a_3\{\ddot{x}\}_{t+\Delta t}$$

$$\{\dot{x}\}_{t+\Delta t} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + 0.00833 \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + 0 \begin{bmatrix} 0.122 \\ 0.122 \\ 0.122 \\ 0.122 \end{bmatrix}$$

$$\{\dot{x}\}_{t+\Delta t} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} m/dt$$

9. Perhitungan dilanjutkan ke *time step* selanjutnya hingga total waktu tercapai dengan bantuan *listing program software FORTRAN* yang ditulis oleh Sanjoy Chakraborty dapat dilihat pada Gambar 6.

Gambar 6. Penggalan Listing Program

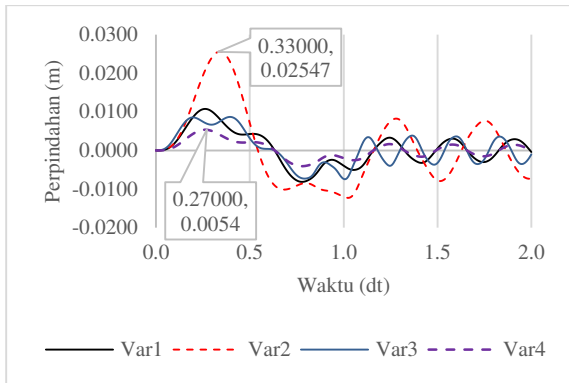
### Hasil Simulasi Respon Sistem dengan Metode Newmark-β

Analisis perhitungan program terhadap respon sistem yang diberi beban sinusoidal seperti pada Gambar 5 dilakukan selama 2 detik dengan *time step* sebesar 0.01 detik.

1. Perpindahan

Berdasarkan Gambar 7, nilai perpindahan maksimum tertinggi dihasilkan oleh sistem 4 DOF variasi 2 sebesar 0.02547 m pada waktu 0.33000 detik dengan nilai massa dan redaman tetap seperti acuan dan nilai kekakuan setengah dari acuan.



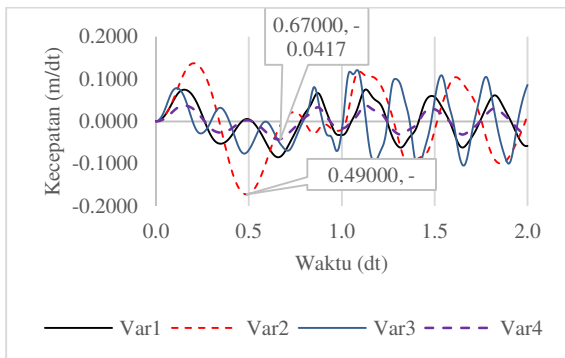


Gambar 7. Riwayat Waktu vs Perpindahan pada Variasi Sistem 4 DOF Akibat Beban Sinusoidal

Sedangkan variasi 4 dimana nilai massa dan kekakuan ditingkatkan menjadi dua kali acuan, menghasilkan perpindahan maksimum terendah pada waktu 0.27000 detik sebesar 0.0054 m.

## 2. Kecepatan

Kecepatan sistem berderajat 4 DOF dapat dilihat pada Gambar 8.



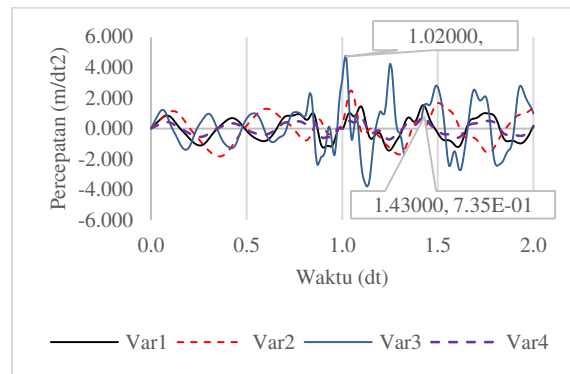
Gambar 8. Riwayat Waktu vs Kecepatan pada Variasi Sistem 4DOF Akibat Beban Sinusoidal

Berdasarkan Gambar 8 variasi 2 menghasilkan kecepatan maksimum tertinggi pada waktu 0.49000 detik dengan nilai 0.17319 m/dt sedangkan variasi 4 menghasilkan kecepatan maksimum terendah pada waktu 0.67 detik dengan nilai 0.0417 m/dt.

## 3. Percepatan

Seperti yang dapat dilihat pada Gambar 9 sistem 4 DOF variasi 3 percepatan

mencapai nilai maksimum sebesar 4.7200 m/dt<sup>2</sup> pada waktu 1.0200 detik.



Gambar 9. Riwayat Waktu vs Percepatan pada Variasi Sistem 4 DOF Akibat Beban Sinusoidal

Sedangkan nilai percepatan maksimum terendah sebesar 0.735 m/dt<sup>2</sup> pada waktu 1.4300 detik dihasilkan dari sistem 4 DOF variasi 4 dimana nilai massa dan kekakuan sebesar dua kali acuan.

## Rekapitulasi Respon Sistem

Secara ringkas respon maksimum sistem akibat beban dinamik dapat dilihat pada Tabel 2. Berdasarkan data perpindahan dan kecepatan dapat dilihat bahwa semakin banyak jumlah derajat kebebasan (DOF) dari suatu sistem, maka nilai respon perpindahan dan kecepatan akan meningkat baik pada sistem dengan beban luar berupa sinusoidal, segitiga, segiempat maupun ramp.

Apabila respon sistem ditinjau dari parameter yang mempengaruhi nilainya, maka data masing-masing respon akibat beban dinamik memiliki hasil berbeda sesuai dengan data riwayat waktu respon. Respon berupa perpindahan 100% data dipengaruhi oleh kekakuan sistem, respon berupa kecepatan 50% data dipengaruhi oleh massa dan 50% dipengaruhi oleh kekakuan sedangkan respon percepatan 83% data dipengaruhi oleh massa dan 17% oleh kekakuan sistem. Berdasarkan data, parameter redaman tidak mempengaruhi respon sistem dikarenakan satu – satunya nilai yang tidak divariasikan adalah persentase redaman sistem.

Tabel 2. Rekapitulasi Respon Maksimum Sistem

Respon Maks	D O F	Beban			
		Sinu soidal	Segi tiga	Segi empat	Ramp
Perpindahan (m)	4	0.0255	0.0249	0.0311	0.0161
	6	0.0599	0.0457	0.0626	0.0320
	8	0.1120	0.0670	0.1120	0.0673
	4	0.1732	0.2939	0.3157	0.1240
Kecepatan (m/dt)	6	0.5164	0.4760	0.4730	0.1840
	8	0.7830	0.6450	0.7800	0.4640
	4	4.7200	6.2309	8.6203	4.0972
Percepatan (m/dt <sup>2</sup> )	6	6.0919	10.000	10.900	4.1300
	8	4.6800	8.3100	9.1300	8.2700
	4	4.7200	6.2309	8.6203	4.0972

### Hasil Prediksi Respon Sistem dengan Menggunakan Metode Jaringan Saraf Tiruan

Secara singkat hasil *training* Jaringan Saraf Tiruan untuk respon perpindahan, kecepatan dan perpindahan pada sistem 4, 6 dan 8 DOF dapat dilihat pada Tabel 3. Berdasarkan tabel tersebut, dapat diketahui bahwa nilai R terbesar dan nilai MSE terkecil terdapat pada JST yang dilatih terhadap data respon perpindahan.

Nilai *error* terkecil hasil perbandingan antara nilai respon dengan perhitungan analitis dan simulasi JST juga terdapat pada respon perpindahan. Hal ini berarti, pada keseluruhan variasi sistem, hasil prediksi untuk respon perpindahan merupakan yang paling mendekati nilai perhitungan analitis. Sedangkan potensi JST dalam memprediksi respon kecepatan dan percepatan pada seluruh variasi sistem semakin menurun apabila dilihat dari nilai R, MSE dan persentase *error*.

Apabila nilai R, MSE dan persentase keseluruhan respon diperhatikan, maka JST memiliki potensi paling baik untuk memprediksi respon perpindahan, kecepatan dan percepatan pada sistem 6 DOF.

Tabel 3. Rekapitulasi Data Hasil *Training* & Simulasi JST

Respon	DOF	Parameter		
		R	MSE	<i>Error</i>
Perpindahan	4	0.9971	$1.19 \times 10^{-7}$	5%
	6	0.9959	$1.17 \times 10^{-6}$	5%
	8	0.9980	$2.25 \times 10^{-6}$	6%
Kecepatan	4	0.9701	0.0004	26%
	6	0.9748	0.0001	16%
	8	0.9499	0.0027	23%
Percepatan	4	0.9537	0.3849	36%
	6	0.9670	0.5066	25%
	8	0.8405	0.7654	41%

### D. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil dan analisis respon sistem yang dilakukan dalam tugas akhir ini, maka dapat diambil kesimpulan sebagai berikut:

1. Semakin tinggi nilai derajat kebebasan suatu sistem, maka akan semakin besar nilai respon perpindahan, kecepatan dan percepatan yang dihasilkan, hal ini terjadi pada seluruh variasi sistem dan beban dinamik.
2. Berdasarkan hasil yang didapat pada perhitungan, data respon perpindahan 100% dipengaruhi oleh parameter kekakuan sistem, data respon kecepatan 50% dipengaruhi oleh parameter massa dan 50% dipengaruhi oleh kekakuan sistem, serta data respon percepatan 83% dipengaruhi oleh parameter massa dan 17% dipengaruhi oleh parameter kekakuan sistem.

Berdasarkan hasil *training* data JST dengan *input* berupa massa (m), kekakuan (k), redaman (c), elevasi (H), perioda natural (Tn) dan faktor beban dinamik (DLF) serta target berupa perpindahan, kecepatan dan percepatan yang dilakukan dalam tugas akhir ini, maka dapat diambil kesimpulan:

1. Kemampuan JST dalam memprediksi respon sistem MDOF menurun secara

berturut-turut dari perpindahan, kecepatan dan percepatan diikuti dengan menurunnya nilai parameter kesalahan R dan meningkatnya nilai MSE serta persentase *error*.

2. Berdasarkan rekapitulasi hasil data *training* JST dan prediksi yang dilakukan pada seluruh respon sistem berupa perpindahan, kecepatan dan percepatan, metode JST paling baik dalam memprediksi respon sistem 6 DOF.

## E. SARAN

1. Agar diperoleh hasil yang lebih akurat maka dapat digunakan nilai  $\Delta t$  yang lebih kecil, lalu memperbanyak variasi nilai massa, kekakuan dan persentase redaman sistem serta analisis terhadap sistem yang tidak teredam (*undamped*).
2. Agar medapat gambaran jelas mengenai respon yang dihasilkan sistem akibat adanya beban dinamik maka waktu pengamatan respon sistem dapat ditambah lebih lama lagi.
3. Parameter yang digunakan dalam *input* data proses *training* Jaringan Saraf Tiruan dapat ditambah maupun diganti dengan parameter lainnya dan dianalisis pengaruh data *input* pada potensi JST dalam memprediksi respon sistem.

## F. DAFTAR PUSTAKA

- Antara, I., Sumarminingsih, E., & Handoyo, S. (2013). Model Jaringan Syaraf Tiruan Backpropagation dengan Input Berdasarkan Model Regresi Terbaik. *Jurnal Mahasiswa Statistik*, 1(1), pp–9.
- Budio, S. P. (2013). *Dinamika Struktur*. Malang: Universitas Brawijaya.
- Chopra, A. K. (2012). *Dynamics of Structures Theory and Applications to Earthquake Engineering*. (M. J. Horton, Ed.) (Fourth Edi). Boston: Prentice Hall.
- Conal, R., & Sidabutar, J. T. H. (2014). Analisa Pengaruh Beban Dinamis pada Pelat dan Balok dengan Metode Elemen Hingga, (43).
- Goel, A. (2011). ANN-Based Approach for Predicting Rating Curve of an Indian River. *ISRN Civil Engineering*, 2011.
- Hendra Sarfika. (2005). *Simulasi numerik respon spektrum sistem derajat kebebasan tunggal di bawah beban dinamis*.
- Mario, P. (1996). *Dinamika Struktur Teori & Perhitungan*. (H. Manahar, Ed.) (Kedua). Jakarta: Erlangga.
- Natana, J. (2007). *Respon Struktur Terhadap Pembebanan Dinamik*.
- Rajasekaran, S., & Pai, G. . V. (2007). *Neural Networks, Fuzzy Logic and Genetic Algorithms* (Seventh). New Delhi: Prentice-Hall of India Private Limited.
- Rompas, G. H., Wallah, S. E., Windah, R. S., & Dapas, S. O. (2015). Kestabilan Solusi Numerik Sistem Berderajat Kebebasan Tunggal Akibat Gempa dengan Metode Newmark, 3(1), 1–7.
- Supriyadi, D. (2013). Sistem Informasi Penyebaran Penyakit Demam Berdarah Menggunakan Metode Jaringan Syaraf Tiruan Backpropagation, 6–11.
- Sutojo, T., Mulyanto, E., & Suhartono, V. (2010). *Kecerdasan Buatan*. Yogyakarta: CV. Andi Offset.
- Toriello, M. R. (1976). *Dynamic Load Factors With Damping*. The University of Arizona.