

KEANDALAN BALOK STATIS TERTENTU DENGAN *ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS*

Martinus S.P. Abednego^[1], Yosafat Aji Pranata^[2]
Jurusan Teknik Sipil, Universitas Kristen Maranatha
Jln. Prof. drg. Suria Sumantri, MPH., No. 65 Bandung 40164
E-mail : martinus.abednego@eng.maranatha.edu

ABSTRAK

Perencanaan bangunan gedung pada umumnya mengacu pada kriteria persyaratan keamanan dan kenyamanan. Pada elemen struktur balok, salah satu kriteria tersebut adalah defleksi. Artificial Neural Networks (ANN) merupakan suatu model komputasi yang bekerja seperti sel saraf biologis pada otak. ANN dapat digunakan untuk menyelesaikan berbagai masalah dengan adanya proses pembelajaran. Penulisan ini bertujuan memprediksi keandalan defleksi balok dengan metode ANN melalui proses pembelajaran Feed-Forward Back-propagation yang memiliki struktur 1 hidden-layer dengan 3 neuron di dalamnya. Asumsi yang digunakan adalah berat sendiri balok dan deformasi geser diabaikan, model tumpuan balok berupa jepit-bebas pada ujung-ujungnya, beban yang bekerja adalah beban terpusat pada ujung bebas. Hasil analisis sejumlah data sintetik beban terpusat berupa bilangan acak dengan distribusi seragam akan diverifikasi dengan penyelesaian menggunakan metode analitis. Hasil analisis menunjukkan bahwa metode ANN dengan data berturut-turut 10, 100, 1000, dan 10000 data menghasilkan galat sebesar $6,9074 \times 10^{-03}$ %, $6,0933 \times 10^{-04}$ %, $2,8078 \times 10^{-04}$ %, dan $1,1066 \times 10^{-04}$ % terhadap metode analitis.

Kata kunci : *Artificial Neural Networks, Balok, Statis Tertentu, Defleksi.*

1. PENDAHULUAN

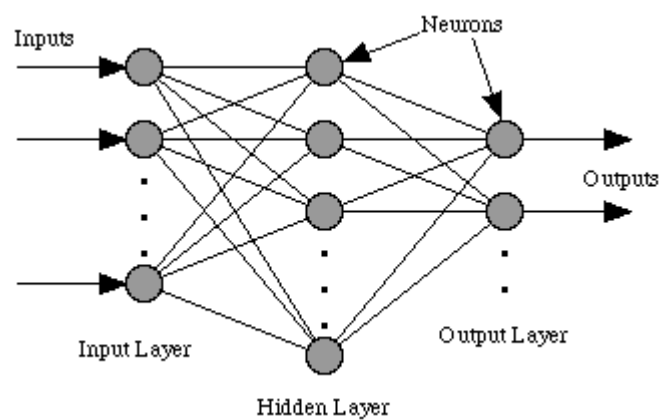
Perencanaan bangunan gedung pada umumnya mengacu pada kriteria persyaratan keamanan dan kenyamanan. Salah satu komponen struktur pada suatu bangunan gedung adalah elemen balok. Balok kantilever banyak digunakan dalam konstruksi bangunan, sebagai contoh pada suatu balkon gedung bertingkat, konstruksi atap penutup *carport*, tempat / dudukan *Air Conditioning (AC)* pada suatu gedung perkantoran, atau atap *canopy* halte bis.

Salah satu permasalahan yang terjadi pada balok, adalah terjadinya defleksi akibat adanya beban yang bekerja pada balok tersebut. Pada taraf tertentu, hal ini tidak mempengaruhi konstruksi secara keseluruhan, namun apabila defleksi yang terjadi cukup besar, maka hal ini menimbulkan ketidaknyamanan dan struktur menjadi tidak aman.

Metode *Artificial Neural Networks (ANN)* dapat digunakan dalam perencanaan struktur bangunan gedung, di mana *ANN* merupakan salah satu pemodelan komputasi

yang ada dari sekian pemodelan komputasi yang berkembang pesat seiring dengan perkembangan ilmu pengetahuan.

ANN memiliki sifat yang adaptif dan swa-atur (*self-organization*). Dengan demikian, *ANN* dapat mengubah parameter dan struktur jaringannya berdasarkan masukan data yang diberikan. Masukan data akan diproses untuk dapat mengenali data masukan lainnya yang belum pernah dikenali sebelumnya. Pemrosesan pada *ANN* dilakukan menggunakan fungsi aktivasi yang bersifat non-linier. Berbeda dengan metode komputasi konvensional yang umumnya bersifat non-adaptif, linier dan sekuensial, sifat-sifat yang dimiliki *ANN* ini menjadi dasar sebagai sebuah sistem yang mampu menyelesaikan berbagai macam persoalan secara fleksibel.



Gambar 1. *ANN Feed-Forward*.

Tujuan penulisan ini adalah memprediksi keandalan defleksi balok dengan metode *Artificial Neural Networks*.

Ruang lingkup penulisan meliputi :

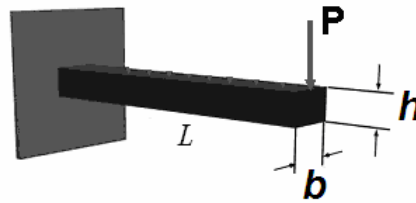
1. Balok kantilever statis tertentu, dengan tumpuan jepit-bebas pada ujung-ujungnya.
2. Beban yang bekerja adalah beban terpusat pada ujung bebas.
3. Asumsi berat sendiri balok dan deformasi geser diabaikan.
4. Metode *ANN* menggunakan proses pembelajaran *Feed-Forward Back-propagation* yang memiliki struktur *1 hidden-layer* dengan *3 neuron* di dalamnya.

2. METODOLOGI

Metodologi penulisan yang digunakan dalam penulisan ini yaitu mempelajari struktur balok kantilever statis tertentu, defleksi, dan *Artificial Neural Networks*.

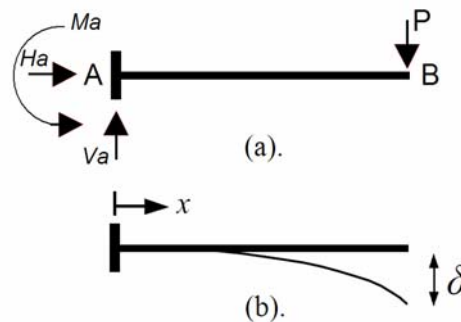
2.1 Struktur Balok Statis Tertentu

Elemen struktur balok merupakan komponen struktur yang berfungsi menahan gaya geser dan momen lentur akibat adanya beban yang bekerja pada balok tersebut.



Gambar 2. Balok kantilever dengan beban terpusat.

Apabila model balok (Gambar 2) diuraikan lebih lanjut (Gambar 3), maka akan timbul gaya-gaya dalam (*internal force*) balok. Gaya-gaya dalam berfungsi menahan adanya beban luar, agar struktur tetap berada dalam kondisi seimbang. Apabila terjadi ketidakseimbangan, maka struktur dapat dikatakan gagal. Gaya-gaya dalam dapat digambarkan dalam suatu diagram benda bebas / *free body diagrams* (Gambar 3.a).



Gambar 3. Ilustrasi diagram benda bebas dan defleksi pada balok.

Struktur statis tertentu adalah struktur di mana jumlah gaya-gaya yang belum diketahui adalah sama dengan jumlah persamaan keseimbangannya. Persamaan keseimbangan meliputi keseimbangan momen, keseimbangan gaya-gaya arah horisontal vertikal.

$$\sum M = 0 \quad (1)$$

$$\sum H = 0 \quad (2)$$

$$\sum V = 0 \quad (3)$$

2.2 Defleksi Balok

Akibat adanya beban yang bekerja pada balok maka pada sumbu longitudinal (sumbu- x) akan terdeformasi menjadi suatu lengkungan, yang disebut kurva defleksi balok, atau dengan kata lain, balok mengalami defleksi sebesar δ (Gambar 3.b).

Defleksi yang terjadi, untuk taraf nilai tertentu tidak akan memberi pengaruh besar pada konstruksi secara keseluruhan, namun apabila melebihi suatu persyaratan ijin, hal ini akan berbahaya, karena konstruksi bangunan menjadi tidak aman dan nyaman.

Gambar 2 memperlihatkan suatu model 3D balok kantilever dengan panjang bentang (L) dan terdapat beban terpusat (P) bekerja pada ujungnya. Balok mempunyai penampang *uniform* dengan ukuran dan dimensi penampang $b \times h$.

Parameter-parameter L , P , b , dan h diperlukan sebagai langkah penyederhanaan dari kondisi sebenarnya. Namun pada kenyataannya, ketelitian besar beban atau ukuran penampang bisa saja tidak akurat. Hal ini menyebabkan adanya suatu ketidakpastian. Pada formulasi suatu persamaan implisit dengan memasukkan suatu parameter ketidakpastian, maka diperlukan perhitungan keandalan.

2.3 Metode Analitis

Metode analitis untuk menyelesaikan persamaan defleksi balok dapat ditentukan dengan metode integrasi bertahap momen lentur (*double intregation*). Secara umum, persamaan defleksi untuk balok kantilever statis tertentu dapat diselesaikan dengan Persamaan 4, Persamaan 5, dan Persamaan 6.

Persamaan momen lentur,

$$M = E.I. \frac{d^2v}{dx^2} \quad (4)$$

Persamaan umum kemiringan balok,

$$V'_{(x)} = \frac{P.x^2}{2.E.I} - \frac{P.L.x}{E.I} \quad (5)$$

Persamaan umum defleksi balok,

$$V_{(x)} = \frac{P.x^3}{6.E.I} - \frac{P.L.x^2}{2.E.I} \quad (6)$$

dimana I adalah momen inersia penampang dihitung dengan Persamaan 7.

$$I = \frac{1}{12}.b.h^3 \quad (7)$$

2.4 Artificial Neural Networks (ANN)

ANN merupakan model komputasi berupa *graph* yang terdiri dari beberapa *neuron* yang saling terhubung melalui *ark*. Pada setiap *neuron*, terdapat suatu bilangan yang berhubungan dengan pengaktifan dari *neuron* itu sendiri. Demikian juga dengan setiap *ark* yang bekerja sebagai koneksi jaringan, memiliki bilangan yang dikenal dengan bobot. Sistem ini bekerja layaknya sel saraf biologis pada otak, yang bekerja dengan terjadinya aktivasi sesuai dengan fungsi kekuatan dari koneksi antar sel saraf. Beberapa *neuron* khusus dengan set pengaktifan secara eksternal dikenal dengan *input neuron* dan *output neuron*.

Proses pembelajaran pada ANN bekerja dengan cara penyesuaian bobot-bobotnya, mengikuti suatu aturan pembelajaran (*learning rule*). Pembelajaran pada ANN diawali dengan nilai bobot yang semuanya “tidak tepat”. Dengan demikian ANN akan bekerja dengan buruk. Namun penyesuaian bobot akan terjadi dengan berlangsungnya proses pembelajaran, sehingga ANN tersebut dapat bekerja dengan baik. Proses pembelajaran ANN tersebut menggunakan aturan pembelajaran terbimbing, di mana set data pembelajaran diberikan beserta dengan set data keluaran yang diharapkan.

Keluaran yang diperoleh dari ANN dibandingkan dengan data keluaran yang diharapkan. Jika terdapat perbedaan, maka bobot koneksi antar *neuron* disesuaikan kembali agar diperoleh galat yang semakin kecil. Dalam meminimalkan galat antara keluaran ANN dengan data keluaran yang diharapkan, digunakan suatu algoritma iterasi yaitu algoritma pembelajaran *Back-Propagation*.

Metode penurunan gradien merupakan dasar dari algoritma *Back Propagation*, sehingga dibutuhkan suatu fungsi aktivasi dengan nilai harga turunan, untuk kemudian mencari nilai fungsi harga yang ditujukan pada koreksi galat. *Squared error* dari masukan-keluaran ke-*p* merupakan fungsi harga yang paling sering digunakan pada ANN. Fungsi harga tersebut dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$E_p = \sum_k (d_k - x_k)^2 \quad (8)$$

dengan d_k sebagai keluaran yang diharapkan untuk *neuron-k*, dan x_k sebagai keluaran ANN untuk *neuron-k* dari masukan pasangan data ke-*p* yang telah diberikan.

Fungsi galat δ_i untuk *neuron-i* dalam mencari vektor gradien dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$\delta_i = \frac{\partial E_p}{\partial x_i} \quad (9)$$

Algoritma rekursif δ_i dapat ditulis sebagai berikut:

$$\delta_i = \begin{cases} -2(d_i - x_i) \frac{\partial x_i}{\partial \bar{x}_i} = -2(d_i - x_i) x_i (1 - x_i), & \text{bila } i \text{ output neuron} \\ \frac{\partial x_i}{\partial \bar{x}_i} = \sum_{j,i < j} \frac{\partial E_p}{\partial \bar{x}_j} \frac{\partial \bar{x}_j}{\partial x_i} = x_i (1 - x_i) \sum_{j,i > j} \delta_j w_{ij}, & \text{bila } i \text{ bukan output neuron} \end{cases} \quad (10)$$

dengan w_{ij} sebagai bobot koneksi *neuron-i* ke *neuron-j*. Bila tidak terdapat koneksi langsung antar *neuron* maka w_{ij} akan bernilai nol. Perubahan dari bobot w_{ij} dapat ditulis sebagai berikut:

$$\Delta w_{ij} = -\eta \frac{\partial E_p}{\partial w_{ij}} = -\eta \frac{\partial E_p}{\partial \bar{x}_j} \frac{\partial \bar{x}_j}{\partial w_{ij}} = -\eta \delta_j x_i \quad (11)$$

dengan η sebagai laju pembelajaran yang mempengaruhi konvergensi kecepatan dan stabilitas bobot pada proses pembelajaran. Bobot dapat diperbaharui menjadi:

$$\begin{aligned} w_{ij}(t+1) &= w_{ij}(t) - \Delta w_{ij} \\ &= w_{ij}(t) + \eta \delta_j x_i \end{aligned} \quad (12)$$

dengan $w_{ij}(t)$ sebagai bobot dari *neuron-i* ke *neuron-j* pada iterasi ke- t .

Supaya konvergensi dapat diperoleh lebih cepat, pada Persamaan 12 ditambahkan fungsi momentum, sehingga perubahan bobot dapat ditulis sebagai berikut:

$$w_{ij}(t+1) = w_{ij}(t) + \eta \delta_j x_i + \alpha (w_{ij}(t) - w_{ij}(t-1)), \text{ dimana } 0 < \alpha < 1 \quad (13)$$

3. STUDI KASUS DAN PEMBAHASAN

3.1 Asumsi Balok

Studi kasus menggunakan asumsi balok dengan bentuk penampang segiempat, ukuran dan dimensi penampang (b) 300 mm dan (h) 600 mm, panjang bentang balok (L) 4 meter. Beban terpusat (P) yang bekerja sebesar 15000 N. Asumsi modulus elastisitas (E) sebesar 200000 MPa.

3.2 Data Sintetik

Studi kasus menggunakan asumsi data bilangan acak untuk beban (P) sebanyak 10, 100, 1000, dan 10000 data. Bilangan acak merupakan data sintetik dengan distribusi seragam, dengan *range* antara 10000 N sampai 20000 N.

3.3 Penyelesaian dengan Metode Analitis

Penyelesaian defleksi balok dengan metode analitis dapat diselesaikan dengan Persamaan 6. Defleksi maksimum terjadi pada titik B (ujung bebas), atau pada jarak $x = 4000$ mm.

Langkah pertama adalah menghitung momen inersia penampang dengan Persamaan 7.

$$I = \frac{1}{12} \cdot b \cdot h^3 = \frac{1}{12} \cdot 300 \cdot 600^3 = 5400000000 \text{ mm}^4$$

Defleksi balok di titik B, untuk $x = L$ maka Persamaan 6 dapat disederhanakan menjadi sebagai berikut,

$$V_{(L)} = \frac{P \cdot L^3}{6 \cdot E \cdot I} - \frac{P \cdot L \cdot L^2}{2 \cdot E \cdot I} = -\frac{P \cdot L^3}{3 \cdot E \cdot I}$$

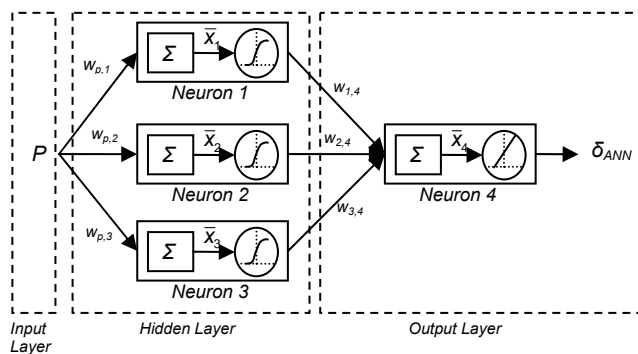
$$\delta_B = -V_{(2000)} = -\frac{15000 \cdot 4000^3}{3 \cdot 200000 \cdot 5400000000} = -0,2963 \text{ mm}$$

3.4 Penyelesaian dengan ANN

Pada penulisan ini, digunakan nilai beban (P) sebanyak 10, 100, 1000 dan 10000 data. Penggunaan jumlah data yang semakin banyak pada penelitian ini bermaksud untuk melihat tingkat ketelitian dari metode ANN.

Data masukan bagi proses pembelajaran ANN akan menggunakan set data beban (P). Pada aturan pembelajaran terbimbing, set data keluaran yang diharapkan berupa set data defleksi akan disertakan juga.

ANN yang digunakan memiliki struktur 1 *hidden-layer* dengan 3 *neuron* di dalamnya. Pada *hidden-layer* digunakan fungsi tansigmoid sebagai fungsi aktivasinya. Sedangkan pada *output layer* menggunakan fungsi aktivasi *pure linear*. Setelah melalui proses pembelajaran dengan iterasi sebanyak 1000 kali (*epochs*), ANN tersebut digunakan untuk menghitung defleksi (δ_{ANN}) menggunakan nilai beban $P = 15000$ N.



Gambar 4. Struktur ANN 1 *hidden-layer* dengan 3 *neuron*.

3.4.1 10 Data

Defleksi (δ_{ANN}) dihitung dengan memasukkan nilai beban $P = 15000$ N pada *ANN* yang telah melalui proses pembelajaran, menggunakan pasangan data beban (P) dan data defleksi (δ) yang masing-masing berjumlah 10 data (Tabel 1).

Tabel 1. Set data beban (P) dan data defleksi (δ).

| No. | Beban (P) (N) | Defleksi (δ) (mm) |
|-----|----------------------|-------------------------------|
| 1 | 16133 | 0,3186708 |
| 2 | 17829 | 0,3521833 |
| 3 | 10032 | 0,1981538 |
| 4 | 17970 | 0,3549546 |
| 5 | 16418 | 0,3243095 |
| 6 | 11785 | 0,2327859 |
| 7 | 15294 | 0,3021038 |
| 8 | 12187 | 0,2407395 |
| 9 | 15481 | 0,3057881 |
| 10 | 10582 | 0,2090345 |

Setelah *ANN* melalui proses pembelajaran menggunakan 10 data tersebut, menghasilkan defleksi $\delta_{ANN} = - 0,2962758$ mm.

3.4.2 100 Data

Dengan menggunakan 100 pasang data beban (P) dan data defleksi (δ) sebagai set data pembelajaran pada *ANN*, nilai beban $P = 15000$ N dimasukkan ke dalam *ANN* sehingga menghasilkan nilai defleksi $\delta_{ANN} = - 0,2962945$ mm.

3.4.3 1000 Data

Proses pembelajaran *ANN* yang menggunakan 1000 data pasangan data beban (P) dan defleksi (δ), telah menghasilkan *ANN* yang mampu menghitung defleksi (δ_{ANN}). Dengan memasukkan nilai beban $P = 15000$ N pada *ANN* tersebut diperoleh nilai defleksi $\delta_{ANN} = - 0,2962955$ mm.

3.4.4 10000 Data

Nilai beban $P = 15000$ N dimasukkan pada *ANN* yang telah mengalami proses pembelajaran menggunakan 10000 pasang data beban (P) dan defleksi (δ) sehingga diperoleh nilai defleksi $\delta_{ANN} = - 0,2962960$ mm.

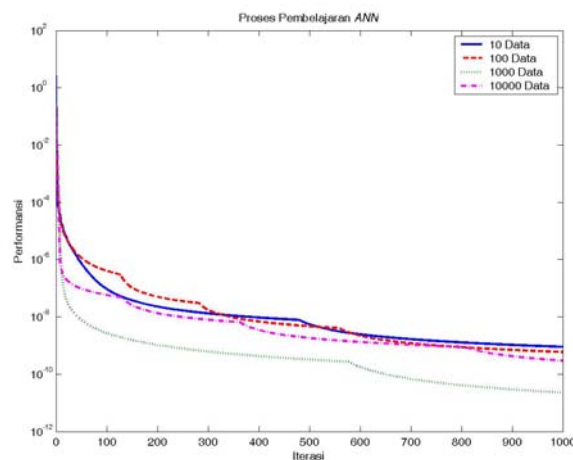
3.5 Pembahasan

Setelah melalui proses pembelajaran, *ANN* memiliki struktur dengan bobot dan bias tertentu yang akan digunakan untuk menyelesaikan perhitungan nilai defleksi (δ_{ANN}). Besaran nilai-nilai bobot dan bias masing-masing *neuron* untuk setiap *ANN* yang berbeda dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 2. Bobot dan bias tiap *neuron* untuk masing-masing *ANN*.

| Struktur <i>ANN</i> | | | Jumlah Data | | | |
|---------------------|----------|---------------------|-------------|------------|------------|-------------|
| | | | 10 | 100 | 1000 | 10000 |
| Hidden Layer | Neuron 1 | Bobot dari Input | 7,2937085 | 9,6041794 | -3,3139276 | -15,1261222 |
| | | Bias | -7,2943319 | -8,8427354 | 3,9022183 | 13,6582893 |
| | Neuron 2 | Bobot dari Input | -3,6140451 | -0,1689783 | 0,7261019 | -0,1070772 |
| | | Bias | 2,7375809 | 0,0858514 | -0,7202119 | 0,0542222 |
| | Neuron 3 | Bobot dari Input | -0,3969502 | -8,7842420 | 0,9766886 | -13,8952449 |
| | | Bias | 0,0351629 | 0,6759408 | 0,5201324 | 1,3767721 |
| Output Layer | Neuron 4 | Bobot dari Neuron 1 | 0,0121692 | 0,0005520 | -0,0203030 | -0,0001577 |
| | | Bobot dari Neuron 2 | -0,0160643 | -5,9200866 | 1,1530157 | -9,3411715 |
| | | Bobot dari Neuron 3 | -2,5149725 | -0,0006256 | 0,6377359 | -0,0001760 |
| | | Bias | 0,1165214 | 0,5079829 | 0,4270477 | 0,5063659 |

Pada proses pembelajaran terbimbing, fungsi galat akan dihitung agar konvergensi kecepatan dan stabilitas bobot tercapai. Semakin kecil galat yang diperoleh dari proses pembelajaran tercapai, maka semakin tinggi pula performansi dari *ANN* tersebut (Gambar 5).



Gambar 5. Performansi proses pembelajaran *ANN*.

Hasil perhitungan defleksi (δ_{ANN}) menggunakan *ANN* dibandingkan dengan nilai defleksi (δ_B) yang didapat dari penyelesaian dengan metode analitis.

Dalam menghitung defleksi (δ_{ANN}) dengan metode *ANN* terlihat bahwa dengan jumlah data beturut-turut 10, 100, 1000, dan 10000 data memiliki galat sebesar $6,9074 \times 10^{-03}$ %, $6,0933 \times 10^{-04}$ %, $2,8078 \times 10^{-04}$ %, dan $1,1066 \times 10^{-04}$ % dibandingkan dengan perhitungan menggunakan metode analitis.

4. KESIMPULAN

Kesimpulan yang dapat diambil dari penulisan ini adalah sebagai berikut :

1. Semakin banyak jumlah data beban (*P*), maka semakin tinggi juga ketelitian hasil dari penyelesaian dengan *ANN* terhadap penyelesaian dengan metode analitis. Terlihat dari semakin kecilnya galat (% *error*) yang dihasilkan.
2. Metode penyelesaian dengan *ANN* dapat digunakan dengan baik untuk menyelesaikan masalah perencanaan struktur bangunan gedung khususnya memprediksi keandalan defleksi balok.

REFERENSI

1. Gere, J.M. (2001), "Mechanics of Materials – 5th Edition", Brooks/Cole.
2. Hibbeler, R.C. (1997), "Mechanics of Materials – 3rd Edition", Prentice Hall, Inc.
3. Jang, J.-S.R., Sun, C.-T., Mitzutani, E. (1997), "Neuro-Fuzzy and Soft Computing", Prentice-Hall, Inc.
4. Mau, S.T. (2003), "Fundamental of Structural Analysis", CSUN.
5. Zeidenberg, M. (1991), "Neural Networks In Artificial Intelligence", Ellis Horwood.

RIWAYAT PENULIS

- [1] **Martinus S.P. Abednego, ST.**, dosen tetap Jurusan Teknik Sipil, Universitas Kristen Maranatha, Bandung. E-mail : martinus.abednego@eng.maranatha.edu
- [2] **Yosafat Aji Pranata, ST., MT.**, dosen tetap Jurusan Teknik Sipil, Universitas Kristen Maranatha, Bandung. E-mail : yosafat.ap@eng.maranatha.edu