

Pendekatan Artificial Neural Network untuk Mengestimasi Dimensi Optimum dan Rasio Tulangan Gedung

Kinanti Faradiba Harahap^a, Akhmad Aminullah^b, dan Henricus Priyosulistyo^b

^aProgram Pascasarjana, Departemen Teknik Sipil dan Lingkungan, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta, 565223, Indonesia

^bDepartemen Teknik Sipil dan Lingkungan, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta, 565223, Indonesia

keywords:
estimation
Neural Network
optimum Dimension
reinforcement ratio
conceptual design

kata kunci:
estimasi
Neural Network
dimensi optimum
rasio tulangan
desain konseptual

ABSTRACT

The conceptual design stage is necessary because it is considered as a fundamental input in decision making for maximizing the performance of a building. On the other hand, to maximize the performance of the building, there are many things that need to be considered. Therefore, an estimation of the optimum dimensions and the reinforcement ratios of beam and column was carried out at the conceptual design stage using the artificial neural network (ANN). ANN is a network based method that allows to get an accurate approach even with the limited information provided. This study aims to help engineers shorten the time for trial at the conceptual design stage. A total of 36 building variations modelling were prepared as the training data for the set up ANN model. Eight parameters used which consist of earthquake accelerations, soil sites class, joint types, beam spans, number of storey, high of storey, concrete strengths and diameters of the reinforcement. There are 16 empirical formulas for estimating the optimum dimensions and the reinforcement ratios of beam and column. The results showed that the dimensional regression values and the reinforcement ratio were 98.53% and 96.06% respectively. This value indicates that ANN can estimate well.

ABSTRAK

Tahap desain konseptual sangat diperlukan karena dianggap sebagai masukan dasar pengambilan keputusan dalam memaksimalkan performa suatu bangunan. Di sisi lain untuk memaksimalkan performa bangunan tersebut banyak hal yang perlu diperhatikan. Oleh karena itu, dilakukan estimasi dimensi optimum serta rasio tulangan balok dan kolom pada tahap desain konseptual menggunakan metode *artificial neural network (ANN)*. ANN adalah metode berbasis jaringan yang memungkinkan untuk mendapatkan pendekatan akurat meskipun dengan keterbatasan informasi yang diberikan. Penelitian ini bertujuan untuk membantu perencana mempersingkat waktu proses uji coba pada tahap desain konseptual. Sejumlah 36 variasi pemodelan gedung disiapkan sebagai data pelatihan untuk ANN. Delapan parameter digunakan yang terdiri dari percepatan gempa, jenis tanah, jenis tumpuan, bentang balok, jumlah lantai, tinggi antar lantai, kekuatan beton dan diameter tulangan. Diperoleh 16 rumus empiris untuk mengestimasi dimensi optimum serta rasio tulangan balok dan kolom. Hasil penelitian didapatkan nilai regresi dimensi serta rasio tulangan masing-masing sebesar 98.53 % dan 96.06%. Nilai tersebut menunjukkan bahwa ANN dapat melakukan estimasi dengan baik.



This is an open access article under the [CC-BY](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/) license.

1. Pendahuluan

Merancang suatu struktur dengan performa yang andal perlu memperhatikan aspek *safety*, *serviceability*, *durability* dan juga *affordability*. Syarat-syarat tersebut dapat terpenuhi apabila pemilihan konfigurasi struktur tepat. Konfigurasi tersebut antara lain sistem struktur, dimensi dan mutu material. Nyatanya, implemmentasi dalam proses perwujudannya cukup sulit terlebih ketika berhadapan dengan dinamik, beban seismik, bangunan berskala besar, *overload* dan inelastik [1]. Penggunaan

parameter desain dari beban seismik yang berbeda-beda saat merancang dapat meningkatkan kinerja dari suatu struktur untuk mencapai tingkat keamanan yang memadai dengan kemungkinan gempa yang akan terjadi selama masa efektif struktur [2]. Selain performa yang andal, suatu struktur juga diharapkan bersifat ekonomis. Diketahui bahwa sistem struktural bangunan bertingkat beton bertulang termasuk pondasi mencakup sekitar 25% dari total biaya konstruksi. Selain itu bahan yang dipilih juga memiliki dampak yang signifikan pada biaya struktur bangunan.

^{*}Corresponding author.

E-mail: kinantifaradiba@mail.ugm.ac.id

Struktur beton bertulang terdiri dari 3 elemen utama yakni balok, kolom dan pelat lantai. Saat ini metode langsung dalam perancangan dimensi balok dan kolom belum tersedia [3]. Secara umum dimensi balok pada awalnya diasumsikan dan kemudian interaksinya digunakan untuk memverifikasi kesesuaian dimensi yang dipilih. Pendekatan ini membutuhkan waktu untuk melakukan uji coba guna menghasilkan desain yang ekonomis dan aman [4].

Salah satu metode yang dapat membantu dan mempercepat pemecahan masalah tersebut adalah dengan menggunakan *artificial neural network* (ANN). ANN memungkinkan untuk mendapatkan pendekatan dengan kemungkinan hubungan multi dan nonlinier yang akurat dan lebih realistis.

Penelitian ini bertujuan untuk membantu perencana mempersingkat waktu proses uji coba dimensi optimum serta rasio tulangan balok dan kolom pada tahap desain konseptual sehingga dari pendekatan ini bisa didapatkan gambaran keperluan biaya struktur utama suatu konstruksi.

1.1 Desain Konseptual

Secara konvensional dalam disiplin desain konstruksi, proses desain dibagi menjadi dua tahap yaitu desain konseptual dan desain detail [5]. Desain konseptual merupakan proses iteratif dalam mencari ruang masalah desain sekaligus ruang solusinya [6]. Estimasi pada tahap desain konseptual dapat digunakan untuk meninjau alternatif-alternatif yang dibuat perihal konstruksi proyek pada tahap awal sehingga dapat memberikan gambaran keperluan biaya konstruksi proyek secara umum yang dapat dijadikan salah satu masukan bagi studi kelayakan [7]. Tahap desain konseptual adalah peluang terbesar untuk memaksimalkan kinerja dari suatu bangunan. Selain itu, keputusan-keputusan desain yang diambil dapat mempengaruhi berbagai aspek kinerja bangunan yang sering kontras satu sama lain. Dalam hal ini, teknik *building performance optimization* (BPO) dapat berguna bagi perencana guna mempertimbangkan berbagai variabel desain secara bersamaan. BPO menggabungkan simulasi kinerja bangunan dengan optimasi dan bergantung pada algoritma optimasi untuk menghasilkan desain baru berdasarkan hasil simulasi dan tujuan optimasi yang telah ditentukan [8]. Desain struktural yang optimum adalah desain yang meminimalkan atau memaksimalkan fungsi tertentu namun masih memenuhi persyaratan desain yang ada [9].

Desain diatur oleh banyak kriteria objektif yang bertentangan, dalam arti bahwa peningkatan salah satu kriteria terjadi dengan mengorbankan satu atau lebih kriteria lainnya. Misalnya, penurunan biaya modal gedung perkantoran dapat mengakibatkan penurunan potensi pendapatan. Hal ini menunjukkan perlunya mencari desain konseptual yang mewakili keseimbangan terbaik antara kriteria objektif. Kepentingan relatif dari kriteria yang bersaing sering tidak diketahui, yang selanjutnya menyarankan penggunaan optimasi untuk mengidentifikasi solusi desain konseptual yang dapat sama-sama optimal [6].

1.2 Artificial Neural Network

Artificial Neural Network (ANN) adalah salah satu metode berbasis jaringan. Penggunaan ANN dalam dunia teknik sekarang ini sangat meningkat. Metode ini terdiri dari beberapa komponen yaitu serangkaian *input*, *layer* dan juga *output*. *Input* hanya bisa memproses data numerik, sehingga apabila data terdiri dari grafik, gambar ataupun signal maka harus terlebih dahulu diubah ke data numerik. *Layer* terdiri dari kumpulan neuron yang terhubung dan dikelompokkan dalam lapisan. Lapisan tersebut antara lain *input layer*, *hidden layer* dan *output layer*. *Layer* bisa berupa *single* ataupun *multi layer*. Sedangkan *output* adalah solusi dari masalah yang berbentuk data numerik [10].

ANN dianggap teknik yang tepat untuk digunakan dalam menyederhanakan masalah kompleks dan memakan waktu. Hal tersebut ditunjukkan dari kemampuannya untuk memproses dan memetakan data dan informasi eksternal berdasarkan pengalaman masa lalu [11]. Tingkat akurasi perkiraan ANN tergantung dari tingkat korelasi antara parameter *input* dan *output*. Dengan kata lain, kinerja ANN sangat tergantung pada pemilihan parameter *inputnya*. Selain itu hal yang dapat mempengaruhi kinerja ANN adalah dari bentuk arsitektur dan parameter konfigurasi ANN itu sendiri seperti fungsi aktivasi neuron, algoritma pelatihan serta metode yang digunakan untuk klasifikasi [12]. ANN belajar berdasarkan contoh dan performanya sangat dipengaruhi oleh kualitas dan kuantitas dari contoh. Semakin banyak jumlah contoh maka nilai kesalahannya akan semakin rendah [13].

2. Metode

Parameter yang akan digunakan pada penelitian ini dapat dilihat pada Tabel 1 di bawah ini.

Tabel 1. Parameter penelitian

Parameter	Definisi	Rentang
x ₁	S _s	0.4 g, 0.8 g, 1.2 g dan 1.6 g
x ₂	Jenis tanah	SC, SD dan SE
x ₃	Jenis tumpuan	Sendi dan jepit
x ₄	Bentang balok	4 m, 6 m dan 8 m
x ₅	Jumlah lantai	2, 4 dan 6
x ₆	Tinggi lantai	3.5 m, 4 m dan 5m
x ₇	Mutu beton	25, 30 dan 35 MPa
x ₈	Diameter tulangan	D16 - D25
y _i	Dimensi balok	1.25 m ² - 2.45 m ²
y _j	Dimensi kolom	1.6 m ² - 4.8 m ²
y _k	Rasio tulangan balok	0.68 % - 2.5 %
y _l	Rasio tulangan kolom	1.2 % - 4 %

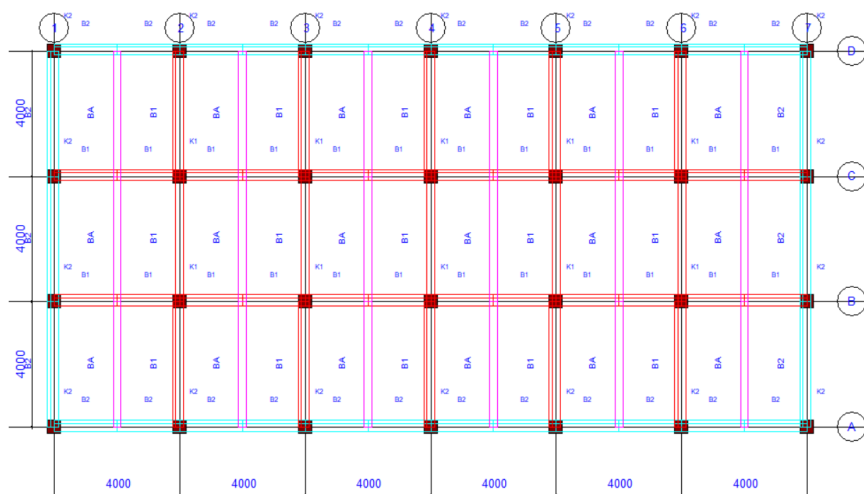
Terdapat 3 langkah metodologi penelitian yakni tahap pemodelan, pelatihan dan pengujian. Tahap pemodelan melibatkan analisis data, identifikasi parameter dan pemilihan arsitektur jaringan. Tahap pelatihan membutuhkan persiapan data dan konfigurasi untuk pelatihan. Tahap pengujian adalah memvalidasi akurasi dari estimasi. Nilai aktual dibandingkan dengan hasil estimasi dan persentase kesalahannya dihitung.

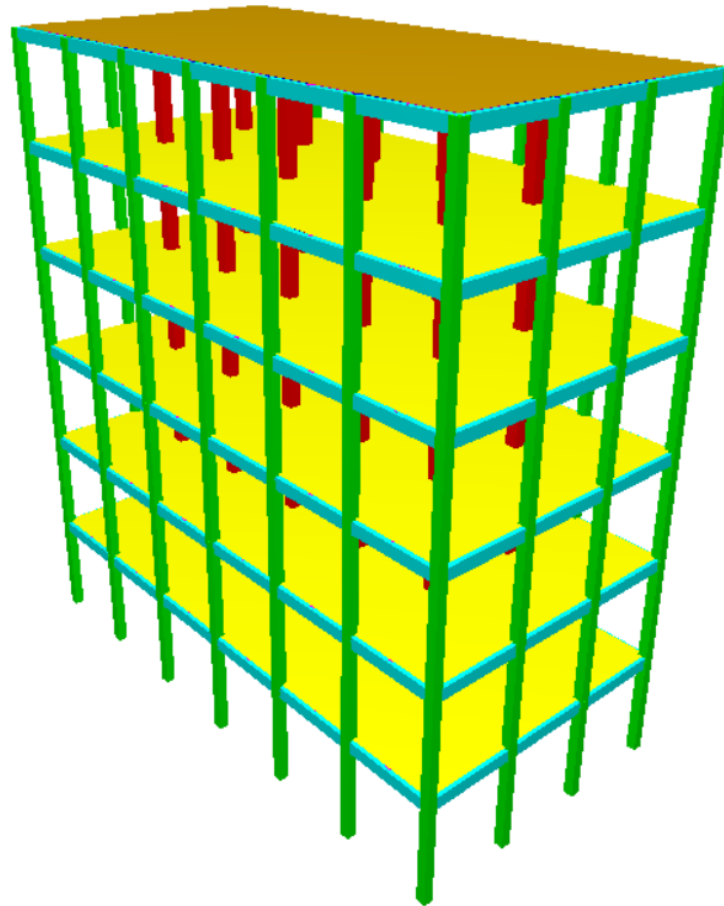
Pada penelitian ini, struktur diperuntukkan untuk gedung dengan faktor resiko I atau II. Pemodelan dibuat secara tipikal dengan menggunakan 2 jenis kolom dan 3 jenis balok. Kolom terdiri dari kolom interior (K₁) dan eksterior (K₂), sedangkan balok terdiri dari balok interior (B₁), eksterior (B₂) dan anak (B_A). Pemodelan struktur menggunakan *software* SANSPRO. Pembebanan serta analisisnya mengacu terhadap peraturan SNI 1727:2018 [14], SNI 1726:2019 [15] dan SNI 2847:2019 [16]. Sistem struktur menggunakan Sistem Rangka Pemikul Momen Khusus (SRPMK). Pada *software* SANSPRO terdapat indikator yang menunjukkan bahwa dimensi yang digunakan optimum

atau tidak, oleh karena itu penulis memodelkan gedung berdasarkan uji coba dimensi hingga mendapatkan dimensi yang optimum. Penampang dapat dikatakan memiliki dimensi optimum apabila tulangan tidak *under reinforced* ataupun *over reinforced*. Sehingga dengan hal tersebut diharapkan dapat mengestimasi dimensi optimum pada variasi pemodelan lainnya. Berikut salah satu variasi pemodelan gedung yang dapat dilihat pada Gambar 1.

Perhitungan dinamik menggunakan analisis respon spektrum dan juga mempertimbangkan inersia efektif saat retak. Setelah dilakukan *running* perlu dilakukan kontrol terhadap periode fundamental, arah getaran, partisipasi massa, gaya geser dasar dan *drift ratio*. Hal tersebut dilakukan agar terpenuhinya beberapa persyaratan yang sudah ditetapkan di SNI. Setelah semua sesuai maka dapat dilakukan desain. Dari hasil desain ini didapatkan rasio tulangan balok dan kolom. Hasil rasio tulangan di kontrol ulang terhadap persyaratan SRPMK yang mana mensyaratkan maksimal untuk rasio tulangan balok sebesar 2.5% sedangkan rasio tulangan kolom 6%. Bila tidak terpenuhi maka dilakukan desain ulang dengan cara antara lain merubah dimensi ataupun f_c ' nya.

Data variasi pemodelan untuk pelatihan dan pengujian adalah 36 dan 10 data. Tidak ada aturan umum untuk menentukan ukuran data pelatihan untuk pelatihan yang sesuai. Namun untuk hasil yang baik sampel pelatihan harus mencakup semua spektrum data tersedia. Saat sudah dilakukan pelatihan namun didapatkan hasil yang tidak sesuai harapan maka sampel pelatihan sebaiknya di tambah.





Gambar 1. Denah dan tampak pemodelan gedung variasi 3

Algoritma pelatihan yang digunakan adalah *backpropagation*. Sebelum memasukkan data-data kedalam MATLAB, Data *input* dan *output* dalam ANN perlu dinormalisasi agar memberikan homogenitas. Ada banyak teknik normalisasi data dalam literatur. Beberapa di antaranya adalah Z-Score, Min-Max, Pareto dan Max [17]. Pada penelitian ini normalisasi dilakukan dengan teknik Max.

$$x_i' = \frac{x_i}{\max_i |x|} \tag{1}$$

dengan x_i' adalah data setelah normalisasi, x_i adalah data sebelum normalisasi dan $\max_i |x|$ adalah data maksimum dari data x_i tersebut.

Evaluasi keakuratan dari pendekatan ANN digunakan persamaan *Mean Absolute Percentage Error* (MAPE) dan *Mean Square Error* (MSE) [18].

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n (target - estimasi)^2 \tag{2}$$

$$MAPE = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n \frac{target - estimasi}{target} \tag{3}$$

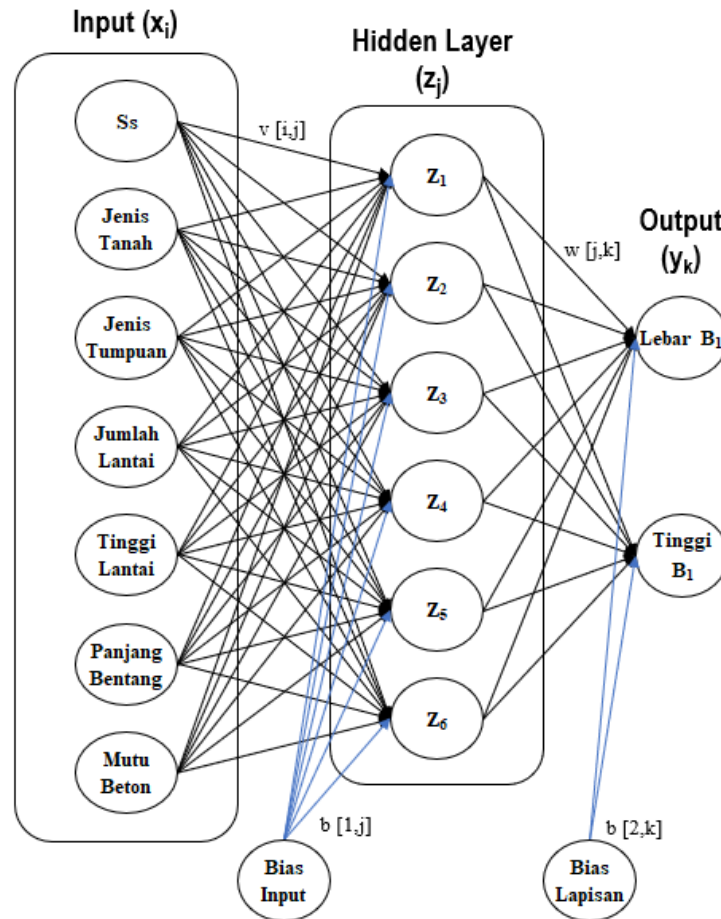
Setelah uji coba konfigurasi maka ditentukan tahap pelatihan pada ANN dilakukan secara bertahap dan menerus. Pelatihan pertama yang dilakukan adalah mengestimasi dimensi balok. Setelah didapatkan estimasi dimensi balok, maka dilanjutkan untuk mencari dimensi kolom. Pada pelatihan pertama, dimensi balok merupakan *output*, namun pada pelatihan kedua menjadi *input* dan begitu seterusnya. Hal tersebut dilakukan untuk menyederhanakan bentuk arsitektur, konfigurasi ANN serta untuk meminimalisir kesalahan yang terjadi. Diketahui bahwa semakin banyak *layer*, maupun neuron maka pelatihan dan pengolahan data akan lebih kompleks. Selain itu fungsi aktivasi pada *input* menggunakan *sigmoid biner* (*logsig*) dan *sigmoid tangent* (*tansig*) pada *output*, metode pelatihan yang digunakan adalah *Levenberg-Marquardt* (*trainlm*), bentuk arsitektur *single hidden layer* dengan jumlah neuron 6 yang dapat dilihat pada Gambar 2. Berdasarkan arsitektur pemodelan maka dapat digunakan persamaan ANN sebagai berikut.

$$Z_{inj} = f(x_i' \cdot v [i,j] + b [1,j]) \tag{4}$$

$$Z_j = \frac{1}{1 + e^{(Z_{inj})}} \tag{5}$$

$$y_k = Z_j \cdot W [j,k] + b [2,k] \tag{6}$$

dengan Z_{inj} adalah neuron pada *hidden layer*, x_i' adalah data *input* yang sudah di normalisasi, $v_{[i,j]}$ adalah bobot *input*, $b_{[1,j]}$ adalah bobot bias *input*, Z_j adalah neuron pada *hidden layer* yang sudah dihitung menggunakan fungsi aktivasi, y_k adalah data *output*, $W_{[j,k]}$ adalah bobot lapisan dan $b_{[2,k]}$ adalah bobot bias lapisan.



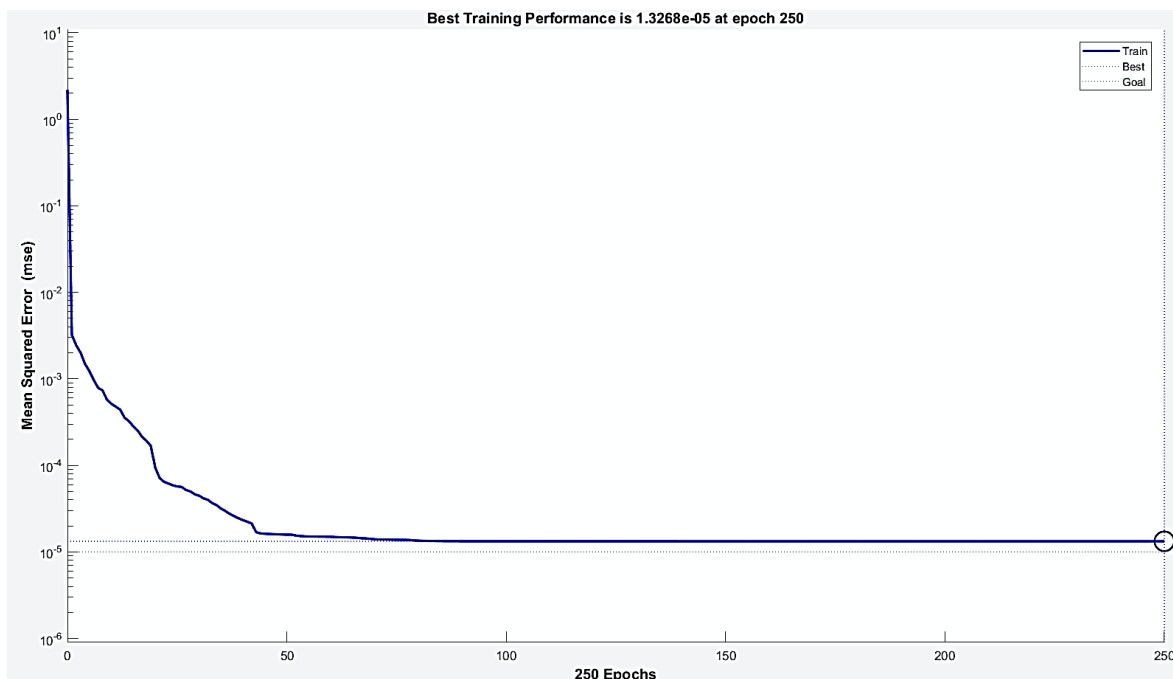
Gambar 2. Arsitektur pemodelan ANN

3. Hasil

Kurva performa pelatihan estimasi dimensi balok di ANN dapat dilihat pada Gambar 3. Pada kurva tersebut terlihat penurunan yang signifikan di tahap awal. Hal tersebut dikarenakan pengaturan dari *initial weights* dan aktivasi fungsi ANN yang sesuai. Selanjutnya pada kurva performa pelatihan perlahan menunjukkan MSE relatif rendah dan juga kurva terlihat stabil pada epoch 100 hingga 350.

Hasil pengujian estimasi dimensi B_1 dan rasio tulangan (ρ) lantai 1 ditunjukkan pada Tabel 3. *Error* maksimum

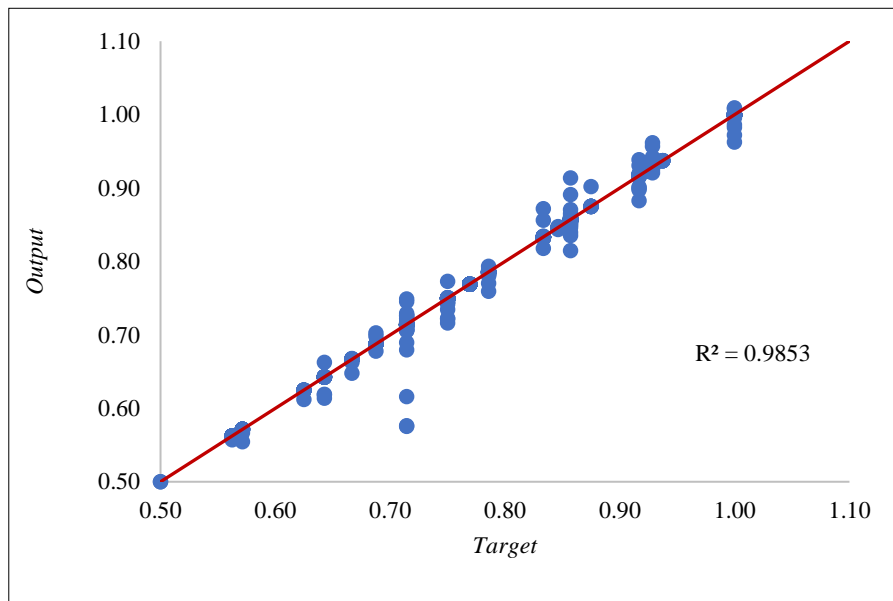
pada lebar dan tinggi serta ρ lantai 1 diperoleh masing-masing sebesar 6.60%, 4.86% dan 1.69%. Setelah dilakukan pembulatan terdekat terhadap dimensi B_1 *output* ANN tidak ditemukan adanya perubahan dimensi sedangkan untuk ρ balok lantai 1 setelah dikonversi ke jumlah tulangan ditemukan beberapa perubahan jumlah tulangan. Secara keseluruhan hasil pemodelan dengan metode ANN baik pada tahap pelatihan maupun pengujian dapat dilihat pada Gambar 4. Grafik regresi dimensi balok dan kolom memperoleh nilai sebesar 98.53% sedangkan pada rasio tulangan sebesar 96.06 %.



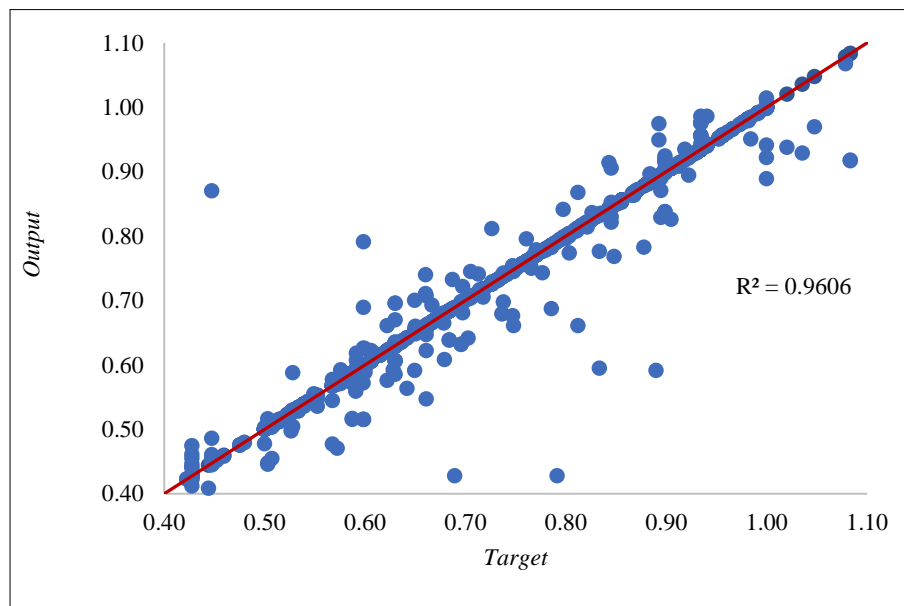
Gambar 3. Kurva performa pelatihan ANN

Tabel 2. Hasil estimasi dimensi dan rasio tulangan B₁ pada data pengujian

Data	Input								Target			Output			Error (%)		
	x ₁	x ₂	x ₃	x ₄	x ₅	x ₆	x ₇	x ₈	t ₁	t ₂	t ₃	y ₁	y ₂	y ₃	e ₁	e ₂	e ₃
1	0.6	SE	Sendi	3	25	3.6	4	16	25	50	0.8	25.00	50.00	0.67	0.00	0.00	1.69
2	1	SD	Jepit	2	30	3.8	5	16	25	50	0.8	25.00	50.00	0.67	0.00	0.00	1.69
3	1.3	SC	Jepit	3	30	4	6	19	30	50	0.76	31.98	52.20	0.75	6.60	4.39	0.01
4	0.8	SD	Sendi	2	25	4.2	4	16	25	50	0.8	25.00	50.00	0.85	0.00	0.00	0.26
5	0.85	SD	Jepit	6	35	3.6	8	19	35	65	1.25	34.51	67.33	1.21	1.39	3.59	0.18
6	0.5	SE	Jepit	6	30	4	5.5	19	30	50	1.13	29.23	52.43	1.12	2.56	4.86	0.01
7	0.5	SC	Jepit	4	25	4.5	5	16	25	50	0.8	25.00	50.00	0.69	0.00	0.00	1.31
8	1.6	SC	Jepit	5	30	4	4.5	19	30	50	0.76	30.11	50.03	0.67	0.37	0.07	0.81
9	1.2	SE	Jepit	4	35	4.3	6.5	19	30	60	0.79	28.52	62.39	0.67	4.93	3.99	1.44
10	1.2	SD	Jepit	3	35	3.5	5.5	19	30	50	0.76	29.63	50.00	0.81	1.25	0.00	0.24



(a)



(b)

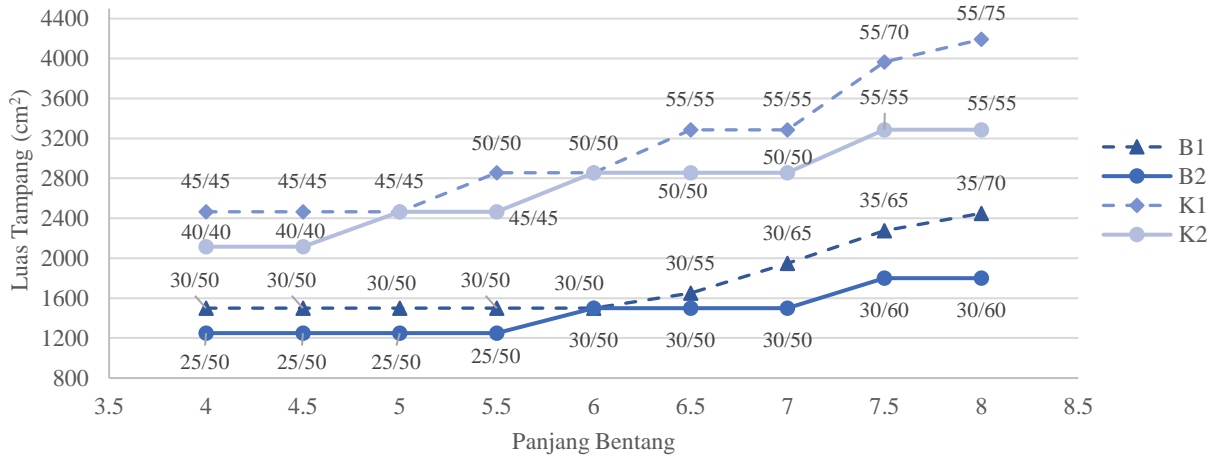
Gambar 4. Grafik regresi pada pemodelan ANN (a) dimensi balok dan kolom (b) Grafik regresi rasio tulangan balok dan kolom

Penelitian ini bertujuan untuk membantu perencana mempersingkat waktu proses uji coba dimensi optimum serta rasio tulangan balok dan kolom pada tahap desain konseptual. Dari 9 parameter yang ditentukan, apabila menggunakan cara manual maka perlu memodelkan gedung mencapai ratusan. Namun dengan ANN dapat mempermudah hal tersebut. Awalnya panjang bentang yang digunakan pada pemodelan hanya 4 m, 6 m dan 8 m, namun setelah dilakukan pelatihan dan pengujian,

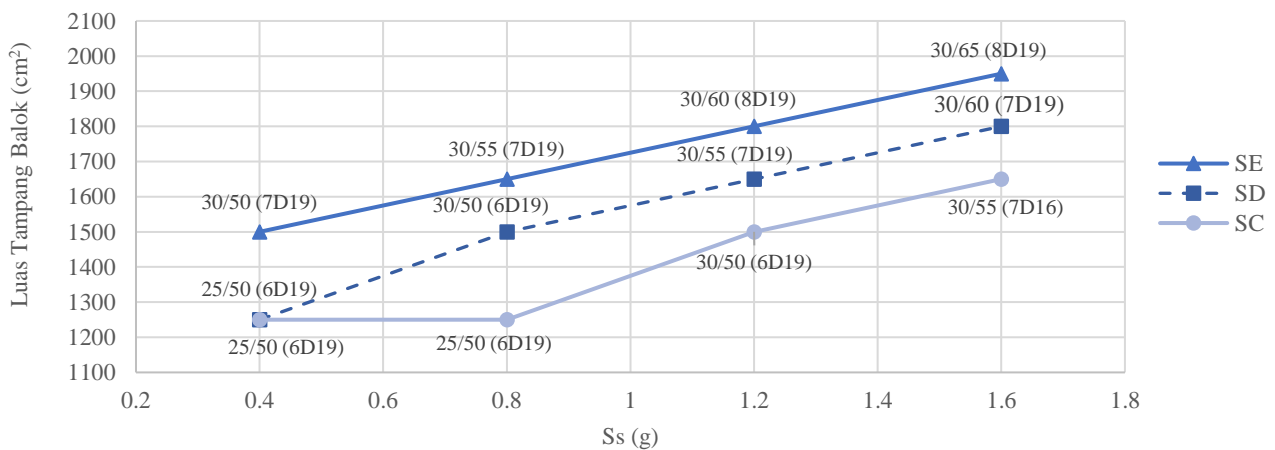
rumus empiris yang didapatkan dari ANN juga dapat mencari bentang lainnya namun bentang tersebut masih di dalam lingkup parameter yang sudah ditentukan. Dari sana dapat dibuat beberapa grafik hubungan antar parameter. Pada Gambar 5 terlihat hubungan antara panjang bentang dan kebutuhan luas tampang balok dan kolom pada gedung 5 lantai dan S_s 0.8 g. Semakin panjang bentang maka kebutuhan dimensi balok dan kolom semakin besar. Hubungan antara S_s dan jenis

tanah terhadap kebutuhan dimensi serta tulangan balok pada bentang 6 m juga dapat dilihat pada Gambar 6.. Semakin besar S_s dan semakin lunak tanah maka kebutuhan dimensi serta tulangan balok dan kolom akan

semakin membesar. Hubungan antar parameter dengan variasi parameter lainnya juga dapat dicari dengan menggunakan rumus empiris yang sudah di dapatkan dengan metode pendekatan ANN.



Gambar 5. Hubungan antara panjang bentang terhadap kebutuhan dimensi balok dan kolom pada gedung 5 lantai dan $S_s = 0.8 g$



Gambar 6. Hubungan S_s dan jenis tanah terhadap kebutuhan dimensi serta tulangan balok pada bentang 6 m

4. Simpulan

Berdasarkan hasil pada penelitian ini didapatkan 16 rumus empiris yang dapat digunakan untuk mengestimasi dimensi optimum serta rasio tulangan balok dan kolom dengan variasi parameter percepatan gempa (S_s), jenis tanah, jenis tumpuan, bentang balok, jumlah lantai, tinggi antar lantai, mutu beton dan diameter tulangan. Dari nilai regresi sebesar 98.53 % dan 96.06% dapat dilihat bahwa nilai-nilai yang diestimasi dari data pelatihan dan pengujian dalam model ANN sangat dekat dengan nilai target. Hal tersebut menunjukkan bahwa model-model ini berhasil mempelajari hubungan antara parameter *input* dan

output. Oleh karena itu rumus empiris menunjukkan potensi yang baik untuk mengestimasi dimensi optimum serta rasio tulangan balok dan kolom. Persentase *error* maksimum rumus empiris dari data pelatihan terjadi pada *output* dimensi B_1 sebesar 3.33% dan pada *output* rasio tulangan minimum B_1 lantai 2 sebesar 0.46%. Persentase *error* maksimum rumus empiris dari data pengujian terjadi pada *output* dimensi B_1 sebesar 6.60% dan pada *output* rasio tulangan K_2 lantai 2 sebesar 7.80%. Semakin banyak jumlah neuron pada *hidden layer* maka pelatihan akan cepat mencapai konvergen dan *error* yang didapatkan akan semakin kecil. Namun dilain hal, pelatihan dan pengolahan data akan lebih kompleks.

Daftar Rujukan

- [1] Gudipati, V.K. dan Cha, E.J., A framework for optimization of target reliability index for a building class based on aggregated cost, *Structural Safety*, vol. 81, no. July, hal. 101873, 2019.
- [2] Asadi, P. dan Hajirasouliha, I., A practical methodology for optimum seismic design of RC frames for minimum damage and life-cycle cost, *Engineering Structures*, vol. 202, no. October 2019, hal. 109896, 2020.
- [3] Setiawan, J., Optimasi Dimensi Balok Dan Kolom Struktur Portal Beton 3D Bangunan Kantor 3 Lantai Dengan Metode Artificial Neural Network, *Avesina*, vol. 13, no. 1, 2019.
- [4] Babu Bandi, R. dan Rao Hanchate, S., Hybrid neural network model for the design of beam subjected to bending and shear, *International Journal of Engineering Research and Development*, vol. 4, no. 2, hal. 35–43, 2013.
- [5] Gomes, C., Parente, M., Azenha, M. dan Lino, J.C., An integrated framework for multi-criteria optimization of thin concrete shells at early design stages, *Advanced Engineering Informatics*, vol. 38, no. September 2017, hal. 330–342, 2018.
- [6] Castro Pena, M.L., Carballal, A., Rodríguez-Fernández, N., Santos, I. dan Romero, J., Artificial intelligence applied to conceptual design. A review of its use in architecture, *Automation in Construction*, vol. 124, 2021.
- [7] Kesturi, L., Konstruksi Gedung Perkantoran Dengan Metode Artificial Neural Network Konstruksi Gedung Perkantoran Dengan Metode Artificial Neural Network, *Jurnal Sipil Statik*, vol. 1, no. 2, hal. 13, 2013.
- [8] Si, B., Wang, J., Yao, X., Shi, X., Jin, X. dan Zhou, X., Multi-objective optimization design of a complex building based on an artificial neural network and performance evaluation of algorithms, *Advanced Engineering Informatics*, vol. 40, no. March, hal. 93–109, 2019.
- [9] Meon, M.S., Anuar, M.A., Ramli, M.H.M., Kuntjoro, W. dan Muhammad, Z., Frame Optimization using Neural Network, *International Journal on Advanced Science, Engineering and Information Technology*, vol. 2, no. 1, hal. 28, 2012.
- [10] Fachrurrazi, Husin, S., Tripoli dan Mubarak, Neural Network for the Standard Unit Price of the Building Area, *Procedia Engineering*, vol. 171, hal. 282–293, 2017.
- [11] Moghadas, K.R., Choong, K.K. dan Bin Mohd, S., Prediction of optimal design and deflection of space structures using neural networks, *Mathematical Problems in Engineering*, vol. 2012, 2012.
- [12] Morfidis, K. dan Kostinakis, K., Seismic parameters' combinations for the optimum prediction of the damage state of R/C buildings using neural networks, *Advances in Engineering Software*, vol. 106, hal. 1–16, 2017.
- [13] Günaydin, H.M. dan Doğan, S.Z., A neural network approach for early cost estimation of structural systems of buildings, *International Journal of Project Management*, vol. 22, no. 7, hal. 595–602, 2004.
- [14] Badan Standarisasi Nasional, RSN12 1727:2018 Beban minimum untuk perancangan bangunan gedung dan struktur lain, *Badan Standarisasi Nasional*, hal. 196, 2018.
- [15] Badan Standarisasi Nasional, RSN13 1726:201X Tata Cara Perencanaan Ketahanan Gempa Untuk Struktur Bangunan Gedung dan Nongedung.
- [16] Badan Standarisasi Nasional, SNI 03-2847:2019 Persyaratan Beton Struktural Untuk Bangunan Gedung Dan Penjelasan, *Badan Standarisasi Nasional*, no. 8, hal. 1–695, 2019.
- [17] Singh, D. dan Singh, B., Feature wise normalization: An effective way of normalizing data, *Pattern Recognition*, vol. 122, hal. 108307, 2022.
- [18] Zhou, Q., Wang, F. dan Zhu, F., Estimation of compressive strength of hollow concrete masonry prisms using artificial neural networks and adaptive neuro-fuzzy inference systems, *Construction and Building Materials*, vol. 125, hal. 417–426, 2016.