



FREKUENSI NATURAL GETARAN BEBAS STRUKTUR RANGKA BANGUNAN TINGGI TANPA BEBAN LUAR DENGAN METODE ZALKA DAN SAP2000

Adi Rizaldi^{*1}, Adwan Bahar², Safrudin³, Rahmat Natsir⁴

^{1,2,3} Politeknik Bombana, Jl. Poros Poea-Kendari, Sulawesi Tenggara

⁴ Program Studi Teknologi Rekayasa Konstruksi Bangunan Gedung, Politeknik Bombana

e-mail: * adirizaldi384@gmail.com , adwan.bahar@gmail.com , safrudinpolina@gmail.com , rahmat.sipil.rn@gmail.com

ABSTRACT: A simple analytical calculation method, named Zalka's method, was developed to determine the natural frequencies of tall building frame structures without external load. The tall building frame structure model can be represented by an idealization of cantilever beam structures with fixed-free end support conditions, which illustrate the overall characteristics of tall building frame structures. This paper aims to investigate the accuracy and efficiency of Zalka's method in determining the natural frequency of a 30-story reinforced concrete building frame structure without external load and compare it with the SAP 2000 output. The results of this research will provide a better understanding of the effectiveness and readiness of Zalka's method in determining the natural frequency of tall building frame structures without external load. The research found that the natural frequency of a 30-story reinforced concrete building frame structure using Zalka's method has an error value of 4,884% compared to the SAP 2000 output. However, this error value is within the acceptable range of 7%, which indicates that Zalka's method has an acceptable level of accuracy.

Keywords: Free Vibration, Natural Frequency, Tall Building, Frame Structure, Without External Load

ABSTRAK: Metode perhitungan analitis sederhana, yang disebut metode Zalka, dikembangkan untuk menentukan frekuensi alami struktur rangka bangunan tinggi tanpa gaya luar. Model struktur rangka bangunan tinggi dapat diwakili oleh idealisasi struktur balok kantilever dengan kondisi perletakan ujung jepit bebas, yang menggambarkan karakteristik keseluruhan struktur rangka bangunan tinggi. Dokumen ini bertujuan untuk menyelidiki akurasi dan efisiensi metode Zalka dalam menentukan frekuensi alami struktur rangka bangunan beton 30 lantai tanpa gaya luar dan membandingkannya dengan output SAP 2000. Hasil penelitian ini akan memberikan pemahaman yang lebih baik tentang efektivitas dan ketersediaan metode Zalka dalam menentukan frekuensi alami struktur rangka bangunan tinggi tanpa gaya luar. Penelitian ini menemukan bahwa frekuensi alami dari struktur rangka bangunan beton 30 lantai menggunakan metode Zalka memiliki nilai kesalahan 4.884% dibandingkan dengan output SAP 2000. Namun, nilai kesalahan ini berada dalam kisaran dapat diterima 7%, yang menunjukkan bahwa metode Zalka memiliki tingkat akurasi yang dapat diterima.

Kata kunci: Getaran Bebas, Frekuensi Natural, Struktur Bangunan Tinggi, Struktur Rangka, Tanpa Gaya Luar

1. PENDAHULUAN

Salah satu faktor penting diperhatikan dalam merancang struktur bangunan tinggi adalah analisis dinamika struktur berkaitan dengan fleksibilitas struktur dan besarnya amplitudo getaran. Pada kenyataannya, dinamika struktur bangunan tinggi utamanya ditentukan oleh frekuensi natural struktur

(Alavi et. al, 2018), dan (Alavi et. al, 2017). Parameter dinamika struktur seperti frekuensi getaran dan moda getaran dapat dihitung dengan menggunakan metode numerik. Metode numerik ini digunakan nanti pada saat tahap akhir perancangan struktur bangunan tinggi, metode-metode pendekatan sangat efektif digunakan pada tahap awal perancangan struktur bangunan tinggi.

Salah satu metode pendekatan yang paling dikenal untuk menghitung parameter dinamika struktur adalah “metode kontinu (*continuum method*)” dimana struktur bangunan tinggi digantikan oleh balok kontinu (*continuum beam*), yang diadopsi dari teori balok *Euler–Bernoulli* dan *Timoshenko* (Davari et. al, 2019). Dengan mempertimbangkan berbagai parameter dinamika struktur pada balok kontinu dapat membantu perancang struktur bangunan tinggi mendapatkan nilai frekuensi natural dan moda ragam getar yang lebih akurat.

Sebagian besar studi mengenai struktur bangunan tinggi diarahkan ke analisis dinamika struktur. (Alavi et. al, 2018) mengusulkan metode pendekatan sederhana yang cocok untuk perancangan awal dari struktur bangunan tinggi. Dalam tulisan ini, berdasarkan metode pendekatan yang telah dikembangkan oleh *Zalka et. al* (1999, 2013), disajikan metode perhitungan analitik yang sederhana untuk menghitung frekuensi natural struktur rangka bangunan tinggi.

Secara khusus, Mohammadnejad and Haji Kazemi telah melakukan beberapa penelitian untuk menyelidiki masalah frekuensi natural pada struktur bangunan tinggi lebih detail dengan mempertimbangkan pengaruh fenomena *shear lag* (Mohammadnejad et. al, 2020, 2018, 2017) dan dalam penelitian lain ditemukan bahwa distribusi tegangan aksial lebih seragam pada pelat sayap dan pelat badan pada rangka struktur bangunan tinggi, dan terdapat penurunan nilai defleksi pada lantai tertinggi struktur bangunan tinggi menggunakan sistem pengaku yang besar (Kamgar et. Al, 2017), serta ditemukan hasil yang sama pada dinding geser, dinding inti geser, dan struktur rangka batang menggunakan *outrigger-belt* pada sistem struktur bangunan tinggi dengan tipe rangka tabung (Kamgar et. al, 2017), (Tavakoli et. al, 2018).

Struktur bangunan tinggi dapat mengalami getaran lateral (*lateral vibration*) pada dua arah sumbu globalnya dan getaran torsional (*torsional vibration*) disekitar sumbu pusat geser vertikalnya (*vertical shear center*). Frekuensi natural struktur bangunan tinggi ditentukan pada saat kondisinya mengalami getaran bebas (*free vibration*) pada mode ragam getar pertama. Metode-metode untuk menentukan frekuensi natural struktur dengan pendekatan analitik telah banyak dikembangkan, antara lain: metode *Jacobi*, metode *Rayleigh* (1877), metode *Holzer*, metode *Stodola* (1920-an), metode *Stodola-Vianello*, metoda *Chopra* (1995).

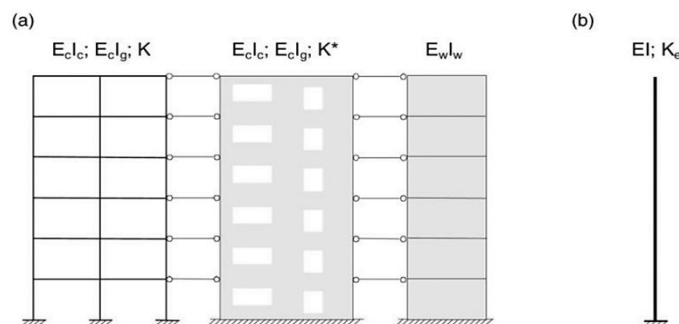
Zalka et. al (2001) mengemukakan bahwa analisis frekuensi natural bangunan gedung dapat menggunakan analisis *exact* (metode elemen hingga), mengandalkan metode pendekatan kolom ekuivalen, menggunakan moda ragam bentuk dan fungsi bentuk (sistem derajat kebebasan satu yang digeneralisasi) dan metode empiris (metode statistik). Dalam perkembangan selanjutnya telah dikembangkan bebrbagai metode-metode pendekatan secara analitik, salah satunya seperti yang dilakukan oleh Kamgar dan Rahgozar (2019) dalam penelitiannya menggunakan metode energi untuk menghitung perpindahan struktur pada lantai atap dan gaya aksial kolom pada struktur bangunan tinggi yang diperkuat dengan sistem rangka tabung dan sistem pengaku *outrigger* (Kamgar et. al, 2019).

Walaupun analisis getaran bebas struktur bangunan tinggi dengan sistem struktur rangka-tabung (*framed tube system*) dan sistem struktur rangka-dinding geser (*shear-walled frame*) telah banyak diteliti oleh banyak peneliti pada dasawarsa ini, tetapi masih sedikit jumlah penelitian yang berkaitan dengan penentuan karakteristik getaran bebas struktur bangunan tinggi dengan gabungan sistem struktur rangka-tabung (*framed tube system*) dan sistem struktur rangka-dinding geser (*shear-walled frame*) (Kamgar et. Al, 2019).

Namun, untuk mengisi gap penelitian ini, penelitian dalam penulisan ini menyajikan metode pendekatan analitik sederhana, yaitu: metode prosedur manual yang diusulkan *Zalka et. al* (2001) yang digunakan untuk menghitung frekuensi natural struktur rangka bangunan tinggi. Metode prosedur manual yang diusulkan *Zalka et. al* (2001) ini digunakan untuk menghitung frekuensi natural struktur rangka

bangunan tinggi menggunakan persamaan-persamaan yang melibatkan keseluruhan sistem pengaku (*whole bracing system*) struktur rangka bangunan tinggi yang mempunyai karakteristik faktor kekakuan geser (*shear stiffness*) dari sistem rangka (*frameworks system*) bangunan tinggi, faktor kekakuan lentur global (*global bending stiffness*) dari sistem rangka (*frameworks system*) bangunan tinggi, dan faktor kekakuan lentur lokal (*local bending stiffness*) dari penampang kolom struktur rangka bangunan tinggi.

Melalui penggabungan elemen pengaku tunggal (*individual bracing element*) yang dihubungkan dengan pelat lantai untuk membentuk sistem balok kantilever tunggal, sehingga tercipta sistem kolom ekuivalen tunggal dengan faktor kekakuan geser (*shear stiffness*) (K), faktor kekakuan lentur global (*global bending stiffness*) (EI_g), dan faktor kekakuan lentur lokal (*local bending stiffness*) (EI). faktor kekakuan geser (*shear stiffness*) (K) dan faktor kekakuan lentur global (*global bending stiffness*) (EI_g) tidak bebas satu sama lain, sehingga pada sistem kolom ekuivalen tunggal dapat digabungkan menjadi faktor kekakuan geser efektif (*effective shear stiffness*) (K_e) dan faktor kekakuan lentur (EI) seperti pada gambar di bawah ini:



Gambar 1. Model Struktur Untuk Analisis Getaran Bebas: a) Sistem Pengaku, b) Sistem Kolom Ekuivalen (Zalka, 2013)

Dalam hal ini, metode prosedur manual yang diusulkan Zalka et. al (2001) sebagai pendekatan analisis manual yang akurat, cepat, efisien, dan ekonomis dari segi biaya telah menjadi pilihan utama untuk mengevaluasi frekuensi natural struktur. Namun, seiring dengan perkembangan pesat di bidang teknologi perangkat lunak (software) seperti SAP 2000 muncul sebagai solusi canggih untuk analisis struktur yang menyediakan hasil yang lebih cepat, akurat, rinci, dan efisien, namun berbiaya mahal. Sehubungan dengan hal ini, penelitian ini bertujuan untuk menyelidiki sejauh mana perbedaan hasil frekuensi natural struktur gedung beton bertulang 30 lantai yang dianalisis dengan metode prosedur manual yang diusulkan Zalka et. al (2001) dan perangkat lunak (software) SAP 2000. Pemahaman lebih lanjut tentang perbandingan hasil analisis ini diharapkan memberikan pengetahuan yang berharga dalam pemilihan metode analisis yang tepat, cepat, akurat, efisien, dan ekonomis dari segi biaya.

2. METODE PENELITIAN

2.1. Prosedur Penelitian

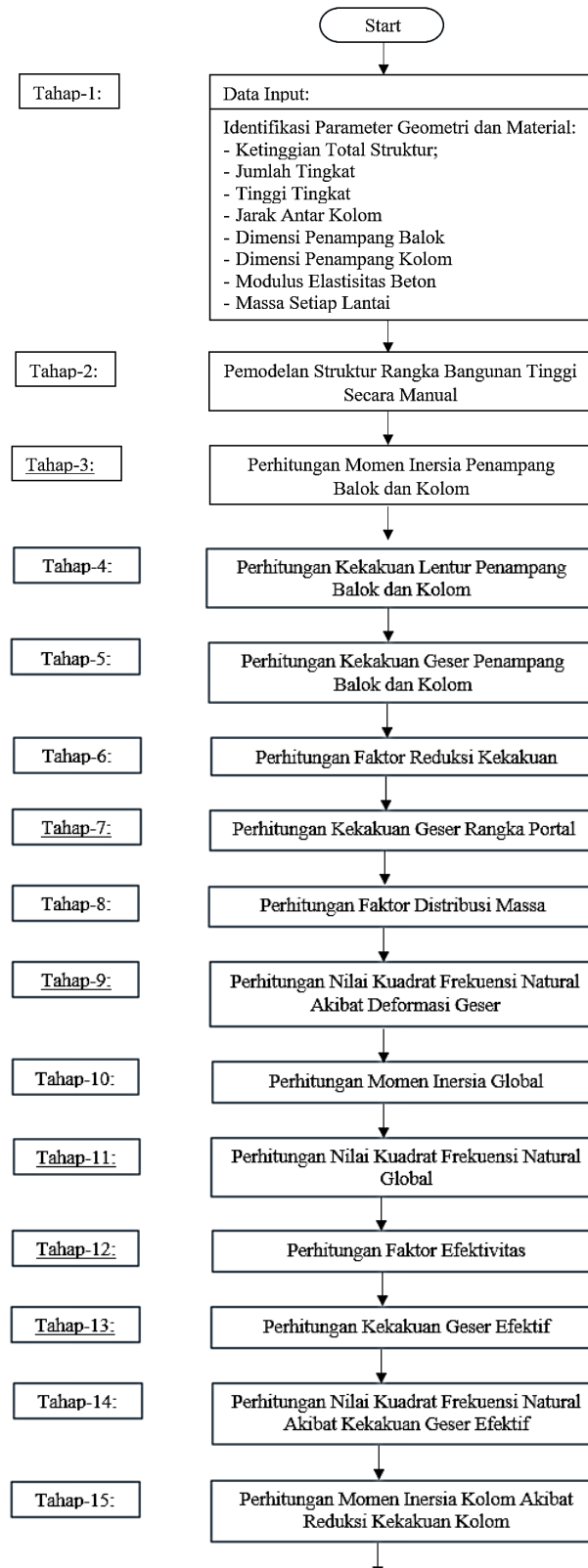
Penelitian ini mengadopsi pendekatan campuran (*mixed methods*) yang menggabungkan pendekatan kualitatif metode yang dikembangkan oleh Zalka et. al (2001) secara analitik dan pendekatan kuantitatif menggunakan perangkat lunak (*software*) SAP 2000 untuk menentukan frekuensi natural struktur gedung beton bertulang 30 lantai.

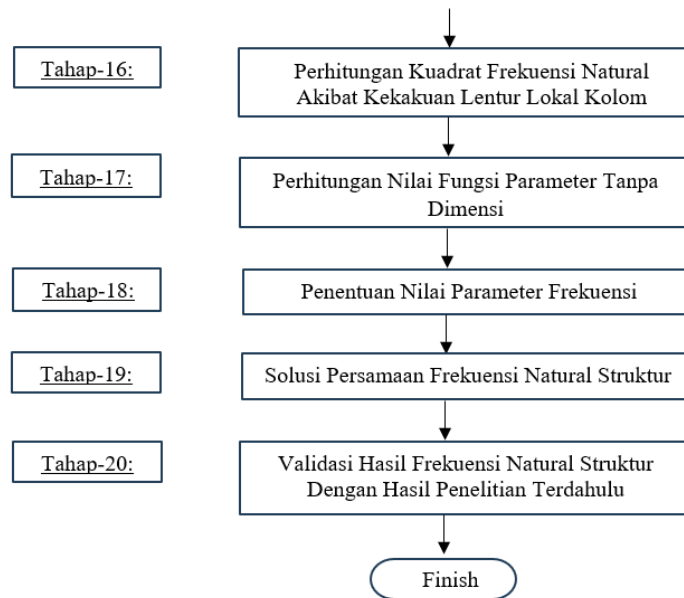
2.1.1. Pendekatan Kualitatif

Pendekatan kualitatif dalam penelitian ini memanfaatkan metode yang dikembangkan oleh Zalka et. al (2001), sebuah metode analisis struktur secara analitik sederhana yang melibatkan perhitungan frekuensi

natural struktur (f_s) akibat nilai kekakuan geser efektif (K_e) dan frekuensi natural struktur (f_b) akibat kekakuan lentur lokal kolom (EI) untuk menentukan frekuensi natural struktur secara keseluruhan (f_n).

Langkah-langkah pendekatan kualitatif ini dibuat dalam bentuk bagan alir sebagai berikut:





Gambar 1 Bagan Alir Pendekatan Kualitatif

2.1.2. Pendekatan Kuantitatif

Pendekatan kuantitatif dalam penelitian ini menggunakan menggunakan perangkat lunak (*software*) SAP 2000 untuk melakukan analisis dinamika struktur dan menentukan frekuensi natural struktur gedung beton bertulang 30 lantai.

Langkah-langkah rinci dari pendekatan kuantitatif ini mencakup:

1. Pemodelan Struktur dengan *Software* SAP 2000

Pemodelan struktur gedung menggunakan perangkat lunak (*software*) SAP 2000. Hal ini, mencakup memasukkan parameter geometrik dan properti material, pemilihan jenis elemen struktur, dan konfigurasi model struktur secara keseluruhan.

2. Analisis Dinamika Struktur

Menggunakan fitur analisis dinamika struktur pada perangkat lunak (*software*) SAP 2000 untuk menghitung frekuensi natural struktur. Proses ini memanfaatkan metode elemen hingga dan metode numerik yang terdapat dalam perangkat lunak (*software*) SAP 2000.

3. Ekstraksi Hasil dan Validasi

Ekstraksi hasil frekuensi natural dari luaran (output) analisis perangkat lunak (*software*) SAP 2000. Hasil ini kemudian divalidasi dengan membandingkannya dengan studi kasus, referensi literatur, atau penelitian terdahulu yang relevan.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Hasil Analisis Pendekatan Kualitatif

3.3.1 Identifikasi Parameter Geometrik dan Material

Seperti disebutkan di bagian 3.1.1 di atas, *Zalka et. al* (2001) mengusulkan suatu prosedur analitis untuk menghitung frekuensi natural struktur rangka portal yang memiliki lantai majemuk (*multi-storey frames structure*). Langkah pertama dalam prosedur analitis yang diusulkan oleh *Zalka et. al* (2001) adalah mengidentifikasi parameter geometrik dan material. Pada tabel 1 telah dilakukan identifikasi parameter-

parameter geometrik dan material pada struktur gedung beton bertulang 30 lantai yang menjadi objek penelitian seperti terlihat di bawah ini:

Tabel 1 Parameter-Parameter Geometrik dan Material Bangunan Gedung

No	Deskripsi	Simbol	Nilai	Satuan
1.	Tinggi Total Bangunan	h_{tot}	90	meter
2.	Jumlah Tingkat	n	30	-
3.	Tinggi Tingkat	h_i	3	meter
4.	Jarak Antar Kolom	l_i	5	meter
5.	Lebar Penampang Balok	l_b	0,4	meter
6.	Tinggi Penampang Balok	h_b	0,6	meter
7.	Lebar Penampang Kolom	l_k	0,5	meter
8.	Tinggi Penampang Kolom	h_k	0,5	meter
9.	Modulus Elastisitas	E	28×10^6	kN/m^2
10.	Massa Tiap Lantai	m_i	2100	kg/m^1

3.3.2 Perhitungan Momen Inersia Balok (I_b) dan Momen Inersia Kolom (I_k)

Langkah kedua dalam prosedur analitis yang diusulkan oleh Zalka et. al (2001) adalah melakukan perhitungan momen inersia balok dan kolom berdasarkan data penampang balok dan kolom pada tabel 1 di bagian 3.1.1.1. Berdasarkan hasil perhitungan manual dan hasil *output* SAP 2000 didapatkan hasil yang sama yaitu: momen inersia balok (I_b) = 0,0072 m⁴ dan momen inersia kolom (I_k) = 0,005208 m⁴.

3.3.3 Perhitungan Kekakuan Lentur Balok (EI_b) dan Kekakuan Lentur Kolom (EI_k)

Langkah ketiga dalam prosedur analitis yang diusulkan oleh Zalka et. al (2001) adalah melakukan perhitungan kekakuan lentur balok dan kolom berdasarkan data modulus elastisitas dan penampang balok dan kolom pada tabel 1 di bagian 3.1.1.1. Berdasarkan hasil perhitungan manual didapatkan hasil: kekakuan lentur balok (EI_b) = 201.600 kN.m² dan kekakuan lentur kolom (EI_k) = 145.833,33 kN.m². Sedangkan, pada SAP 2000 nilai modulus elastisitas pada tabel 1 di-*input* manual pada bagian *define > materials > concrete*.

3.3.4 Perhitungan Kekakuan Geser Balok (K_b) dan Kekakuan Geser Kolom (K_k)

Langkah keempat dalam prosedur analitis yang diusulkan oleh Zalka et. al (2001) adalah melakukan perhitungan kekakuan geser balok dan kolom berdasarkan data modulus elastisitas dan penampang balok dan kolom pada tabel 1 di bagian 3.1.1.1. Berdasarkan hasil perhitungan manual didapatkan hasil: kekakuan geser balok (K_b) = 322.560 kN dan kekakuan geser kolom (K_k) = 583.333,32 kN. Sedangkan, pada SAP 2000 nilai modulus geser otomatis terhitung saat kita meng-*input* secara manual nilai modulus elastisitas pada bagian *define > materials > concrete*.

3.3.5 Perhitungan Faktor Reduksi Kekakuan (r)

Langkah kelima dalam prosedur analitis yang diusulkan oleh Zalka et. al (2001) adalah melakukan perhitungan faktor reduksi kekakuan (r) berdasarkan hasil perhitungan kekakuan geser balok dan kolom yang didapatkan dari bagian 3.1.1.4. Rumus untuk menghitung faktor reduksi kekakuan (r) adalah:

$$r = K_k / (K_b + K_k) \quad (1)$$

Berdasarkan hasil perhitungan manual didapatkan hasil: faktor reduksi kekakuan (r) = 0,6439. Pada langkah kelima ini, SAP 2000 tidak memperhitungkan faktor reduksi kekakuan (r).

3.3.6 Perhitungan Kekakuan Geser Rangka Portal (K)

Langkah keenam dalam prosedur analitis yang diusulkan oleh *Zalka et. al (2001)* adalah melakukan perhitungan kekakuan geser rangka portal (K) berdasarkan hasil perhitungan faktor reduksi kekakuan (r) yang didapatkan dari bagian 3.1.1.5 dan kekakuan geser balok (K_b) yang didapatkan dari bagian 3.1.1.4. Rumus untuk menghitung kekakuan geser rangka portal (K) adalah:

$$K = r \cdot K_b \quad (2)$$

Berdasarkan hasil perhitungan manual didapatkan hasil: kekakuan geser rangka portal (K) = 207.696,384 kN. Pada langkah keenam ini, SAP 2000 tidak memperhitungkan kekakuan geser rangka portal (K).

3.3.7 Perhitungan Faktor Distribusi Massa (r_f)

Langkah ketujuh dalam prosedur analitis yang diusulkan oleh *Zalka et. al (2001)* adalah melakukan perhitungan faktor distribusi massa (r_f) berdasarkan data jumlah lantai pada tabel 1. Rumus untuk menghitung faktor distribusi massa (r_f) adalah:

$$r_f = \sqrt{\frac{n}{(n+2,06)}} \quad (3)$$

Berdasarkan hasil perhitungan manual didapatkan hasil: faktor distribusi massa (r_f) = 0,967. Pada langkah ketujuh ini, SAP 2000 tidak memperhitungkan faktor distribusi massa (r_f).

3.3.8 Perhitungan Nilai Kuadrat Frekuensi Natural Akibat Deformasi Geser ($[f_s]^2$)

Langkah kedelapan dalam prosedur analitis yang diusulkan oleh *Zalka et. al (2001)* adalah melakukan perhitungan nilai kuadrat frekuensi natural akibat deformasi geser (f_s)² berdasarkan data tinggi total struktur dan massa tiap lantai pada tabel 1, serta hasil perhitungan kekakuan geser rangka portal (K) yang didapatkan dari bagian 3.1.1.6, dan faktor distribusi massa (r_f) yang didapatkan dari bagian 3.1.1.7. Rumus untuk menghitung nilai kuadrat frekuensi natural akibat deformasi geser (f_s)² adalah:

$$(f_s)^2 = \frac{1}{(16H^2)} \left[(r_f)^2 \frac{K}{m} \right] \quad (4)$$

Berdasarkan hasil perhitungan manual didapatkan hasil: nilai kuadrat frekuensi natural akibat deformasi geser (f_s)² = 7,136.10⁻⁴ Hz². Pada langkah kedelapan ini, SAP 2000 tidak memperhitungkan nilai kuadrat frekuensi natural akibat deformasi geser (f_s)².

3.3.9 Perhitungan Momen Inersia Kolom Global (I_g)

Langkah kesembilan dalam prosedur analitis yang diusulkan oleh *Zalka et. al (2001)* adalah melakukan perhitungan momen inersia kolom global (I_g) berdasarkan data luas penampang kolom dan jarak antar kolom pada tabel 1. Rumus untuk menghitung momen inersia kolom global (I_g) adalah:

$$I_g = \sum (A_{k,i}) \cdot t_i^2 \quad (5)$$

Berdasarkan hasil perhitungan manual didapatkan hasil: momen inersia kolom global (I_g) = 12,50 m⁴. Pada langkah kesembilan ini, SAP 2000 tidak memperhitungkan nilai momen inersia kolom global (I_g).

3.3.10 Perhitungan Nilai Kuadrat Frekuensi Natural Global ($[f_g]^2$)

Langkah kesepuluh dalam prosedur analitis yang diusulkan oleh *Zalka et. al (2001)* adalah melakukan perhitungan nilai kuadrat frekuensi natural global (f_g)² berdasarkan data tinggi total struktur, modulus elastisitas dan massa setiap lantai pada tabel 1, serta hasil perhitungan faktor distribusi massa (r_f) pada

bagian 3.1.1.7, dan hasil perhitungan momen inersia kolom global (I_g) pada bagian 3.1.1.9. Rumus untuk menghitung nilai kuadrat frekuensi natural global (f_g)² adalah:

$$(f_g)^2 = (0,313 \cdot r_f^2 \cdot EI_g) / (H^4 \cdot m) \quad (6)$$

Berdasarkan hasil perhitungan manual didapatkan hasil: nilai kuadrat frekuensi natural global (f_g)² = 7,435.10⁻⁴ Hz². Pada langkah kesepuluh ini, SAP 2000 tidak memperhitungkan nilai kuadrat frekuensi natural global (f_g)².

3.3.11 Perhitungan Faktor Efektivitas (S_f)

Langkah kesebelas dalam prosedur analitis yang diusulkan oleh Zalka et. al (2001) adalah melakukan perhitungan nilai faktor efektivitas (S_f) berdasarkan hasil perhitungan nilai kuadrat frekuensi natural akibat deformasi geser (f_s)² pada bagian 3.1.1.8, dan hasil perhitungan nilai kuadrat frekuensi natural global (f_g)² pada bagian 3.1.1.10. Rumus untuk menghitung nilai faktor efektivitas (S_f) adalah:

$$S_f = \sqrt{\frac{(f_g^2)}{(f_s^2 + f_g^2)}} \quad (7)$$

Berdasarkan hasil perhitungan manual didapatkan hasil: nilai faktor efektivitas (S_f) = 0,714. Pada langkah kesebelas ini, SAP 2000 tidak memperhitungkan nilai faktor efektivitas (S_f).

3.3.12 Perhitungan Kekakuan Geser Efektif (K_e)

Langkah duabelas dalam prosedur analitis yang diusulkan oleh Zalka et. al (2001) adalah melakukan perhitungan nilai kekakuan geser efektif (K_e) berdasarkan hasil perhitungan kekakuan geser rangka portal (K) yang didapatkan dari bagian 3.1.1.6, dan hasil perhitungan nilai faktor efektivitas (S_f) pada bagian 3.1.1.11. Rumus untuk menghitung nilai kekakuan geser efektif (K_e) adalah:

$$K_e = S_f^2 \cdot K \quad (8)$$

Berdasarkan hasil perhitungan manual didapatkan hasil: nilai kekakuan geser efektif (K_e) = 105.882,7858 kN. Pada langkah duabelas ini, SAP 2000 tidak memperhitungkan nilai kekakuan geser efektif (K_e).

3.3.13 Perhitungan Nilai Kuadrat Frekuensi Natural Akibat Kekakuan Geser Efektif ($[f_s]^2$)

Langkah ketigabelas dalam prosedur analitis yang diusulkan oleh Zalka et. al (2001) adalah melakukan perhitungan nilai kuadrat frekuensi natural akibat kekakuan geser efektif (f_s)² berdasarkan data tinggi total struktur dan massa setiap lantai pada tabel 1, serta hasil perhitungan faktor distribusi massa (r_f) pada bagian 3.1.1.7, dan hasil perhitungan nilai kekakuan geser efektif (K_e) pada bagian 3.1.1.12. Rumus untuk menghitung nilai kuadrat frekuensi natural akibat kekakuan geser efektif (f_s)² adalah:

$$(f_s)^2 = \frac{1}{(16H^2)} \left[(r_f)^2 \frac{K_e}{m} \right] \quad (9)$$

Berdasarkan hasil perhitungan manual didapatkan hasil: nilai kuadrat frekuensi natural akibat kekakuan geser efektif (f_s)² = 3,638.10⁻⁴ Hz². Pada langkah ketigabelas ini, SAP 2000 tidak memperhitungkan nilai kuadrat frekuensi natural akibat kekakuan geser efektif (f_s)².

3.3.14 Perhitungan Momen Inersia Kolom Akibat Reduksi Kekakuan Kolom (I_k')

Langkah keempatbelas dalam prosedur analitis yang diusulkan oleh Zalka et. al (2001) adalah melakukan perhitungan momen inersia kolom akibat reduksi kekakuan kolom (I_k') berdasarkan hasil perhitungan momen inersia kolom pada bagian 3.1.1.2 dan hasil perhitungan faktor reduksi kekakuan

kolom (r) pada bagian 3.1.1.5. Rumus untuk menghitung nilai momen inersia kolom akibat reduksi kekakuan kolom (I_k') adalah:

$$I_k' = r \cdot \sum I_k \quad (10)$$

Berdasarkan hasil perhitungan manual didapatkan hasil: nilai momen inersia kolom akibat reduksi kekakuan kolom (I_k') = 0,010 m⁴. Pada langkah keempat belas ini, SAP 2000 tidak memperhitungkan nilai momen inersia kolom akibat reduksi kekakuan kolom (I_k').

3.3.15 Perhitungan Nilai Kuadrat Frekuensi Natural Akibat Kekakuan Lentur Lokal Kolom (f_b)²

Langkah kelimabelas dalam prosedur analitis yang diusulkan oleh Zalka et. al (2001) adalah melakukan perhitungan nilai kuadrat frekuensi natural akibat kekakuan lentur lokal kolom (f_b)² berdasarkan data tinggi total struktur, modulus elastisitas, dan massa setiap lantai pada tabel 1, serta berdasarkan hasil perhitungan momen inersia kolom akibat reduksi kekakuan kolom (I_k') pada bagian 3.1.1.14 dan hasil perhitungan faktor distribusi massa (r_f) pada bagian 3.1.1.7. Rumus untuk menghitung nilai kuadrat frekuensi natural akibat kekakuan lentur lokal kolom (f_b)² adalah:

$$(f_b)^2 = (0,313 \cdot r_f^2 \cdot EI_k') / (H^4 \cdot m) \quad (11)$$

Berdasarkan hasil perhitungan manual didapatkan hasil: nilai kuadrat frekuensi natural akibat kekakuan lentur lokal kolom (f_b)² = 5,948.10⁻⁷ Hz². Pada langkah kelimabelas ini, SAP 2000 tidak memperhitungkan nilai kuadrat frekuensi natural akibat kekakuan lentur lokal kolom (f_b)².

3.3.16 Perhitungan Nilai Parameter Tanpa Dimensi (k)

Langkah keenambelas dalam prosedur analitis yang diusulkan oleh Zalka et. al (2001) adalah melakukan perhitungan nilai parameter tanpa dimensi (k) berdasarkan data tinggi total struktur dan modulus elastisitas pada tabel 1, serta berdasarkan hasil perhitungan kekakuan geser efektif (K_e) pada bagian 3.1.1.12 dan hasil perhitungan momen inersia kolom akibat reduksi kekakuan kolom (I_k') pada bagian 3.1.1.14. Rumus untuk menghitung nilai parameter tanpa dimensi (k) adalah:

$$k = H \cdot \sqrt{\frac{K_e}{E \cdot I_k'}} \quad (12)$$

Berdasarkan hasil perhitungan manual didapatkan hasil: nilai parameter tanpa dimensi (k) = 55,345. Pada langkah keenambelas ini, SAP 2000 tidak memperhitungkan nilai parameter tanpa dimensi (k).

3.3.17 Penentuan Nilai Parameter Frekuensi (η) Sebagai Fungsi dari k ($\eta=f(k)$) dengan Tabel

Langkah ketujuhbelas dalam prosedur analitis yang diusulkan oleh Zalka et. al (2001) adalah menentukan nilai parameter frekuensi (η) sebagai fungsi dari nilai parameter tanpa dimensi (k). Dalam tabel 2 diperlihatkan hubungan antara parameter tanpa dimensi (k) dan parameter frekuensi (η). Berdasarkan hasil perhitungan parameter tanpa dimensi (k) pada bagian 3.1.1.16 didapatkan hasil k = 55,345. Nilai k = 55,345 ini berada diantara nilai k = 50 dan nilai k = 60 pada tabel 2. Oleh karena itu, perlu kita lakukan interpolasi linier sebagai berikut:

$$\eta = (12,760) + \left\{ \frac{[(55,345)-(50)]}{[(60)-(50)]} \right\} \cdot [(15,260) - (12,760)] = 14,096$$

Tabel 2 Parameter Frekuensi (η) Sebagai Fungsi dari Parameter Tanpa Dimensi (k)

k	η	k	η	k	η	k	η	k	η
0,00	0,5596	4,50	1,465	9,50	2,680	14,50	3,913	20,00	5,278
0,10	0,5606	5,00	1,586	10,00	2,803	15,00	4,036	30,00	7,769

k	η	k	η	k	η	k	η	k	η
0,50	0,5851	5,50	1,706	10,50	2,926	15,50	4,160	40,00	10,260
1,00	0,6542	6,00	1,827	11,00	3,049	16,00	4,284	50,00	12,760
1,50	0,7511	6,50	1,949	11,50	3,172	16,50	4,408	60,00	15,260
2,00	0,8628	7,00	2,070	12,00	3,295	17,00	4,532	70,00	17,760
2,50	0,9809	7,50	2,192	12,50	3,418	17,50	4,656	80,00	20,260
3,00	1,1014	8,00	2,313	13,00	3,542	18,00	4,781	90,00	22,760
3,50	1,2226	8,50	2,435	13,50	3,665	18,50	4,905	100,00	25,260
4,00	1,3437	9,00	2,558	14,00	3,789	19,00	5,029	>100	k/4

Sumber: Zalka et. al, 2001

3.3.18 Solusi Persamaan Frekuensi Natural Struktur (f_n)

Langkah kedelapanbelas dalam prosedur analitis yang diusulkan oleh Zalka et. al (2001) adalah melakukan mencari solusi persamaan frekuensi natural struktur (f_n). Rumus untuk menghitung frekuensi natural struktur (f_n) berdasarkan prosedur analitis yang diusulkan oleh Zalka et. al (2013) adalah:

$$f_n = \sqrt{(f_b)^2 + (f_s)^2 + \left(\left(\frac{\eta^2}{0,313} \right) - \left(\frac{k^2}{5} \right) - 1 \right) \cdot S_f \cdot (f_b)^2} \quad (13)$$

Berdasarkan hasil perhitungan manual didapatkan hasil: frekuensi natural struktur (f_n) = 0,019 Hz. Zalka et. al (2013) menghitung frekuensi natural struktur (f_n) menggunakan persamaan (13), sedangkan pada SAP 2000 menggunakan analisis modal untuk mendapatkan frekuensi natural struktur (f_n).

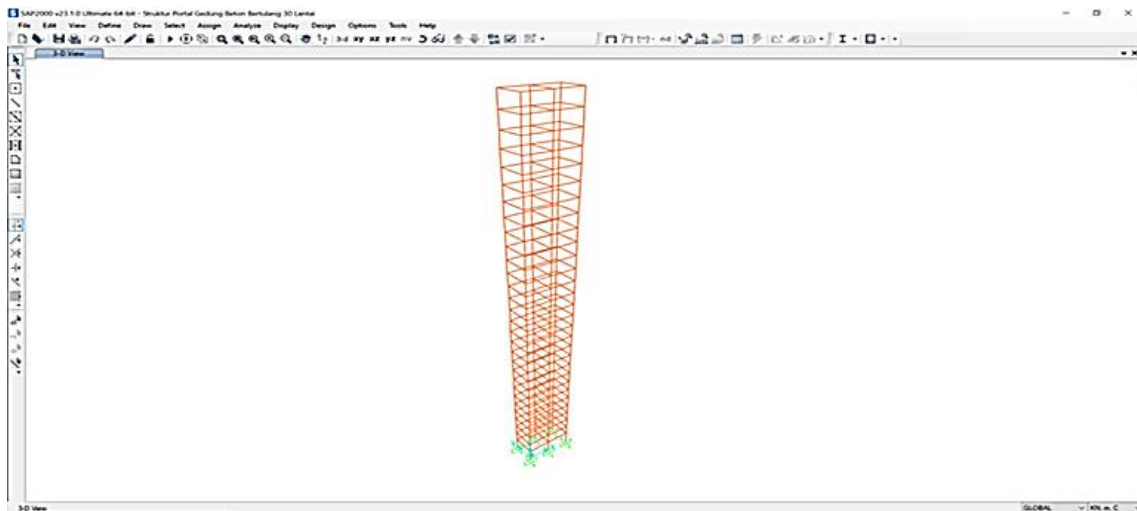
3.3.19 Validasi Hasil Perhitungan

Langkah kesembilan belas dalam prosedur analitis yang diusulkan oleh Zalka et. al (2001) adalah melakukan perbandingan hasil perhitungan frekuensi natural (f_n) antara metode yang diusulkan oleh Zalka et. al (2013) dan Chopra (1995). Berdasarkan hasil perhitungan manual didapatkan hasil: f_n = 0,019 Hz (Zalka et. al (2013)) dan f_n = 0,177 Hz (Chopra (1995)). Hasil ini menunjukkan hasil perhitungan frekuensi natural (f_n) menggunakan metode yang diusulkan oleh Zalka et. al (2013) memiliki hasil perhitungan 10,735 % lebih akurat dibandingkan hasil perhitungan frekuensi natural (f_n) oleh Chopra (1995).

3.2. Hasil Analisis Pendekatan Kuantitatif

3.2.1 Pemodelan Struktur

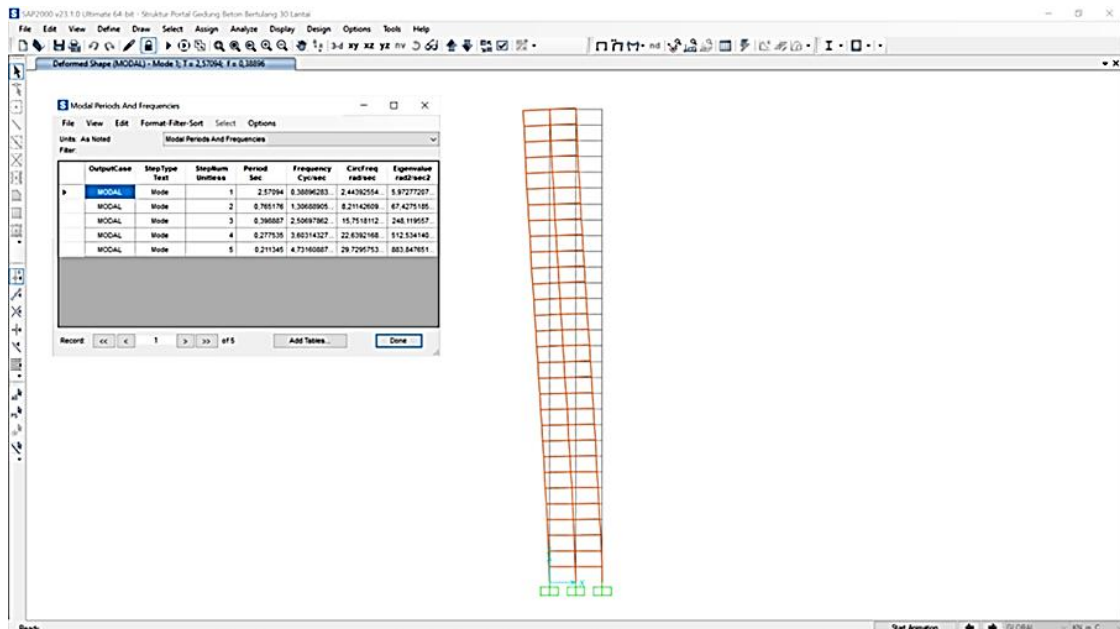
Pada penelitian ini dilakukan validasi hasil perhitungan frekuensi natural (f_n) secara analitis oleh Zalka et. al (2001) dengan perangkat lunak (*software*) SAP 2000 untuk membandingkan hasil perhitungan secara numerik menggunakan metode elemen hingga dan metode analitis untuk menentukan frekuensi natural struktur gedung beton bertulang 30 lantai. Oleh sebab itu sebelumnya perlu dilakukan pemodelan struktur gedung beton bertulang 30 lantai sesuai dengan parameter-parameter geometrik dan material yang tertera pada tabel 1. Hasil pemodelan struktur rangka portal gedung beton bertulang 30 lantai terlihat pada gambar 2 di bawah ini:



Gambar 2. Model Struktur Rangka Portal Gedung Beton Bertulang 30 Lantai Pada Perangkat Lunak SAP 2000

3.2.2 Analisis Struktur

Pada penelitian ini dilakukan perhitungan frekuensi natural (f_n) secara numerik pada *software* SAP 2000 menggunakan metode elemen hingga. *Software* SAP 2000 menggunakan metode analisis modal untuk mencari *eigen value* atau frekuensi natural struktur pada *mode shape* pertama. Dari hasil running *software* SAP 2000 didapatkan frekuensi natural struktur pada *mode shape* pertama sebesar 0,389 Hz dan *mode shape* pertama yang memiliki perilaku dominasi geser seperti diperlihatkan pada gambar 3 di bawah ini:



Gambar 3. Pola Deformasi Geser Pada Struktur Rangka Portal Gedung Beton Bertulang 30 Lantai Pada SAP 2000

Berdasarkan hasil *running software* SAP 2000 didapatkan nilai frekuensi natural (f_n) sebesar 0,389 Hz. Hasil ini menunjukkan hasil perhitungan frekuensi natural (f_n) menggunakan metode yang diusulkan oleh Zalka et. al (2001) memiliki hasil galat perhitungan 4,884 % dibandingkan hasil *output* perhitungan frekuensi natural (f_n) menggunakan *software* SAP 2000.

Perilaku deformasi geser pada struktur struktur rangka portal gedung beton bertulang 30 lantai seperti terlihat pada gambar 3 di atas, sejalan dengan hasil penelitian oleh (Zalka, K. A., 2001) mengenai hubungan bentuk defleksi struktur rangka portal gedung bertingkat dengan pola deformasi struktur: pertama, struktur rangka portal gedung yang memiliki jumlah tingkat (n) = 4-33 tingkat pola deformasi struktur yang dominan adalah pola deformasi geser.

4. KESIMPULAN

Frekuensi natural yang dihasilkan oleh metode Zalka et. al (2001) adalah sekitar 0,019 Hz, sedangkan frekuensi natural yang dihasilkan oleh perangkat lunak SAP 2000 adalah sekitar 0,389 Hz, sehingga frekuensi natural (f_n) menggunakan metode yang diusulkan oleh Zalka et. al (2001) memiliki hasil galat perhitungan 4,884 % dibandingkan hasil *output* perhitungan frekuensi natural (f_n) menggunakan *software* SAP 2000.

5. SARAN

Implikasi hasil penelitian ini adalah sebagai berikut: pertama, pemilihan metode analisis: keputusan untuk menggunakan metode Zalka atau SAP 2000 dalam menganalisis struktur gedung bertulang 30 lantai harus didasarkan pada pertimbangan yang matang terkait dengan tujuan analisis, kompleksitas struktur, dan kebutuhan akurasi perhitungan. Kedua, validasi metode: langkah-langkah validasi harus dilakukan untuk menguji reliabilitas dan akurasi metode Zalka et. al (2001) dan SAP 2000 dalam konteks struktur gedung beton bertulang. Validasi dapat dilakukan dengan membandingkan hasil analisis dengan data lapangan atau hasil uji laboratorium. Ketiga, perbaikan metode analisis: berdasarkan perbandingan hasil penelitian ini dapat dilakukan upaya untuk memperbaiki atau memperbaharui metode Zalka et. al (2001) atau meningkatkan pemodelan dan analisis dalam SAP 2000 untuk meningkatkan keakuratan hasil perhitungan frekuensi natural. Penelitian ini diharapkan memberikan wawasan yang berharga mengenai perbedaan hasil perhitungan frekuensi natural struktur antara metode Zalka et. al (2001) dan SAP 2000. Hasil penelitian ini dapat digunakan sebagai dasar untuk pemilihan metode analisis yang sesuai dalam rekayasa struktur dan dunia industri konstruksi.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Program Studi Teknik Sipil Universitas Borneo Tarakan yang telah memfasilitasi pengujian ini dan terima kasih kepada laboran Lab. Jalan Raya Teknik Sipil Universitas Borneo Tarakan.

DAFTAR PUSTAKA

- Alavi, Arsalan, Peyman Rahgozar, and Reza Rahgozar. 2018. *Minimum-Weight Design of High-Rise Structures Subjected to Flexural Vibration at a Desired Natural Frequency. The Structural Design of Tall and Special Buildings*, Volume 27, Nomor 15 (Oktober 2018): hal. 1515. doi:10.1002/tal.1515.
- Alavi, Arsalan, and Reza Rahgozar. 2018. *Optimal Stiffness Distribution in Preliminary Design of Tubed-System Tall Buildings. Structural Engineering and Mechanics*. Volume 65, Nomor 6 (Maret 2018): hal. 731-739. doi:10.12989/sem.2018.65.6.731.

- Alavi, Arsalan, and Reza Rahgozar. 2018. *A Simple Mathematical Method for Optimal Preliminary Design of Tall Buildings with Peak Lateral Deflection Constraint*. *International Journal of Civil Engineering*. Volume 17. (Juli 2018): hal. 999–1006. doi:10.1007/s40999-018-0349-1.
- Alavi, Arsalan, Reza Rahgozar, Peyman Torkzadeh, and Mohamad Ali Hajabasi. 2017. *Optimal Design of High-Rise Buildings with Respect to Fundamental Eigenfrequency*. *International Journal of Advanced Structural Engineering*, Volume 9, Nomor 4 (25 September 2017): hal. 365–374. doi:10.1007/s40091-017-0172-y.
- Davari, Seyed Mozafar, Mohsen Malekinejad, and Reza Rahgozar. 2019. *Static Analysis of Tall Buildings based on Timoshenko Beam Theory*. *International Journal of Advanced Structural Engineering*, Volume 11, (September 2019): hal. 455–461.
- Kamgar, Reza, and Peyman Rahgozar. 2019. *Reducing Static Roof Displacement and Axial Forces of Columns in Tall Buildings Based on Obtaining the Best Locations for Multi-Rigid Belt Truss Outrigger Systems*. *Asian Journal of Civil Engineering*. Volume 20. Nomor 6 (30 April 2019): hal. 759–768. doi:10.1007/s42107-019-00142-0.
- Kamgar, Reza, and Reza Rahgozar. 2017. *Determination of Optimum Location for Flexible Outrigger System in Tall Buildings with Constant Cross-Section Consisting of Framed Tube, Shear Core, Belt Truss and Outrigger System using Energy Method*. *International Journal of Steel Structures*. Volume 17. Nomor 1 (2017): hal. 1-8. doi:10.1007/s13296-014-0172-8.
- Kamgar, Reza, and Reza Rahgozar. 2017. *Critical Excitation Method for Determining the Best Location of Belt Truss System in Tall Buildings*. *Iranian Journal of Structures Engineering*. Volume 4. Nomor 2 (2017): hal. 76-88.
- Zalka, K.A. 2001. *A Simplified Method For Calculation of Natural Frequencies of Wall-Frame Buildings*. *Engineering Structures*. Volume 23. Nomor 12 (18 Mei 2001): hal. 1544-1555.
- Tavakoli, Reihaneh, Reza Kamgar, and Reza Rahgozar. 2018. *The Best Location of Belt Truss System in Tall Buildings Using Multiple Criteria Subjected to Blast Loading*. *Civil Engineering Journal*. Volume 4. Nomor 6 (4 Juli 2018): hal. 1338. doi:10.28991/cej0309177.
- Mohammadnejad, Mehrdad, Hasan Haji Kazemi. 2020. *Dynamic Response Analysis of Tall Buildings under Axial Force Effects*. *Journal of Civil Engineering (Journal of School of Engineering)*. Volume 31. Nomor 2 (2018): hal. 39-53. *Civil Engineering Journal* Volume 6. Nomor 5 (Mei 2020): hal. 953.
- Mohammadnejad, Mehrdad, and Hasan Haji Kazemi. 2018. *A New and Simple Analytical Approach to Determining the Natural Frequencies of Framed Tube Structures*. *Structural Engineering and Mechanics*. Volume 65. Nomor 1 (Januari 2018): hal. 111-120. doi:10.12989/sem.2018.65.1.111.
- Mohammadnejad, Mehrdad, and Hasan Haji Kazemi. 2017. *Dynamic Response Analysis of a Combined System of Framed Tubed, Shear Core and Outrigger-Belt Truss*. *Asian Journal of Civil Engineering (BHRC)*. Volume 18. Nomor 8 (Desember 2017): hal. 1211-1228.