

Uji Respon Struktur Bangunan Bertingkat Terhadap Gempa Bumi Menggunakan Metode Elemen Hingga

Budiman Nasution^{1,a)} dan Acep Purqon^{2,b)}

¹Magister Sains Komputasi
Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Institut Teknologi Bandung,
Jl. Ganesha no. 10 Bandung, Indonesia, 40132

²Laboratorium Fisika Bumi
Kelompok Keilmuan Fisika Bumi dan Sistem Kompleks,
Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Institut Teknologi Bandung,
Jl. Ganesha no. 10 Bandung, Indonesia, 40132

^{a)} budimannasution9@gmail.com (corresponding author)

^{b)} acep@fi.itb.ac.id

Abstrak

Beban lateral dinamis akibat gempa bumi akan mempengaruhi struktur bangunan yang terletak di sekitar pusat gempa. Dalam beberapa kasus, gempa bumi menyebabkan kerusakan yang sangat fatal pada struktur bangunan. Studi untuk memprediksi respon struktur terhadap gempa bumi memiliki peran penting untuk menentukan kontrol struktur untuk ketahanan gempa. Ada banyak metode yang dikembangkan untuk memprediksi respon dari struktur bangunan. Salah satu metode yang ditawarkan adalah metode elemen hingga (MEH). Metode elemen hingga adalah metode numerik untuk menentukan solusi perkiraan dari sistem kontinu. Pada penelitian ini metode elemen hingga dengan mengadopsi konsep beam elemen diterapkan pada getaran mekanis. Dengan konsep ini akan dilihat respon struktur bangunan dengan empat tingkat. Pada masing-masing tingkat dilakukan variasi parameter massa. Sehingga dapat ditunjukkan respon struktur akibat massa yang bervariasi dalam bentuk mode shape, perpindahan dan gaya geser struktur bangunan.

Kata-kata kunci: Gempa Bumi, Beam Elemen, Getaran Mekanis, Metode Elemen Hingga

PENDAHULUAN

Indonesia merupakan salah satu daerah rawan gempa bumi. Hal tersebut terjadi karena Indonesia dilalui oleh tiga jalur pertemuan lempeng tektonik. Tiga lempeng tersebut adalah lempeng Indo-Australia, lempeng Eurasia dan lempeng Pasifik. Selain itu posisi Indonesia berada di jalur gunung api (*ring of fire*) yang merupakan bagian dari Cincin Api Pasifik juga mempengaruhi intensitas gempa bumi di Indonesia. Pergerakan relatif antara lempeng tektonik dan aktivitas sesar-sesar region maupun lokal mengakibatkan ribuan gempa yang terdeteksi *seismograph* terjadi di Indonesia setiap tahun. Sedangkan gempa bumi dengan magnitudo 5,0 *SR* ke atas yang dapat dirasakan rata-rata terjadi 70 - 100 kali per tahun. Beberapa diantara gempa bumi tersebut memiliki dampak terhadap alam, dampak liquifaksi terhadap bangunan, dampak skunder, dampak terhadap struktur bangunan dan dampak berupa tsunami. Keadaan tersebut menjadi salah satu tantangan bagi Indonesia sebagai negara berkembang yang sedang melakukan pembangunan infrastruktur. Dimana banyak bangunan bertingkat yang bertujuan untuk efisiensi lahan.

Analisa struktur merupakan teknik yang umum dipergunakan untuk analisa dan prediksi ketahanan struktur bangunan. Konsep kontrol struktur untuk teknik sipil berkembang pada tahun 70-an [1]. Diawali oleh

riset yang dilakukan oleh J.T.P Yao mengenai konsep kontrol struktur pada tahun 1972. Selanjutnya pada tahun 1979 diikuti riset yang dilakukan oleh D.I Blockley mengenai peran fuzzy sets pada teknik sipil [2]. Dua dekade terakhir banyak kemajuan konsep analisa struktur yang ditawarkan untuk kontrol struktur, khususnya dalam perlindungan terhadap gempa bumi dan angin kencang. Salah satu konsep analisa yang ditawarkan adalah pendekatan dengan prinsip getaran mekanik.

Bangunan bertingkat seharusnya dirancang untuk dapat menahan beban lateral seperti gempa bumi. Saat ada beban lateral dinamis dari gempa bumi, bangunan bertingkat akan bergoyang. Untuk mengetahui pengaruh tersebut, dilakukanlah pemodelan dinamika struktur menggunakan metode elemen hingga. Teori getaran mekanik yang menjelaskan model matematika struktur dipergunakan untuk analisis perilaku dari struktur [3]. Sifat dinamis bangunan bertingkat dengan dinding geser dapat didekati menggunakan model getaran paksa dan pengukuran respon gempa. Pada penelitian ini, menggunakan metode elemen hingga dengan mengadopsi elemen balok (*beam element*) dihitung matriks massa (M), matriks kekakuan (K) dan frekuensi (f) dari sistem. Sehingga, respon dari struktur bangunan dalam bentuk pola goyangan (*mode shape*), perpindahan dan gaya geser akan dapat ditentukan.

RESPON STRUKTUR BANGUNAN

Gempa bumi adalah peristiwa pelepasan energi di dalam bumi secara tiba-tiba yang mengakibatkan getaran pada bumi dan ditandai dengan patahnya lapisan batuan kerak bumi. Gempa bumi sering terjadi di sepanjang zona dimana kerak bumi mengalami deformasi. Keadaan ini menyebabkan getaran yang dikirim melalui media tanah di daerah dekat sumber gempa dan mengirimkan gelombang energi elastis (gelombang seismik). Tanah yang bergetar mengakibatkan struktur yang berada di atas tanah ikut bergetar. Getaran inilah yang mengakibatkan perubahan struktur tersebut dan menyebabkan kerusakan parah.

Dinamika Struktur

Terdapat dua pendekatan untuk menganalisa respon struktur terhadap beban gempa. Pendekatan tersebut adalah pendekatan dengan analisa statistik dan analisa dinamik. Pendekatan dengan analisa dinamik lebih dikenal dengan konsep dinamika struktur. Salah satu prinsip dinamika struktur adalah konsep kontrol struktur. Konsep kontrol struktur untuk teknik sipil berkembang pada awal 70-an [1]. Konsep ini ditawarkan untuk kontrol bangunan (gedung bertingkat, jembatan dan lain-lain) terhadap pengaruh lingkungan seperti angin dan gempa. Dinamika struktur kompleks umumnya dideskripsikan secara mekanika, baik dalam hal perpindahan, regangan dan distribusi beban [4, 5].

Untuk meninjau respon struktur bangunan terhadap gaya luar akibat gempa dapat dipergunakan pendekatan getaran paksa. Getaran paksa merupakan getaran yang timbul sebagai hasil dari adanya eksitasi. Eksitasi tersebut dapat berupa gaya atau simpangan. Resonansi akan timbul apabila input frekuensi yang diberikan sama dengan frekuensi naturalnya. Sistem derajat kebebasan tunggal mewakili sifat seismik dari struktur sebagai mode awal [6]. Model awal dari derajat kebebasan tunggal adalah sistem pegas - massa - peredam. Akan tetapi dalam bidang kebumiharian, kontrol gerak dan lain-lain sering diaplikasikan derajat kebebasan banyak [7, 8]. Sistem derajat kebebasan banyak juga diaplikasikan dalam dinamika struktur, penerapannya dalam struktur bangunan bertingkat n . Pada pemodelan dinamika struktur, sebuah bangunan gedung jumlah derajat kebebasannya sama dengan jumlah lantai bangunan tersebut. Maka semakin banyak jumlah lantainya semakin banyak pula derajat kebebasannya. Sehingga, dimulai dengan Hukum Newton II [3] dan dihubungkan dengan prinsip D'Alembert dipergunakan untuk menentukan persamaan gerak sistem struktural [9]. Persamaan gerak dari sistem dapat dinyatakan dengan

$$M\ddot{x} + C\dot{x} + Kx = F(t) \quad (1)$$

Struktur bangunan dipengaruhi oleh gaya inersia selama terjadi gempa. Gaya inersia disebabkan oleh adanya gerak tanah $x_g(t)$ [10]. Dimana distribusi gaya pada n derajat kebebasan dipengaruhi oleh vektor I dan eksitasi eksternal. Keadaan ini dapat dituliskan dalam bentuk matematis

$$F(t) = -MI\ddot{x}_g(t) \quad (2)$$

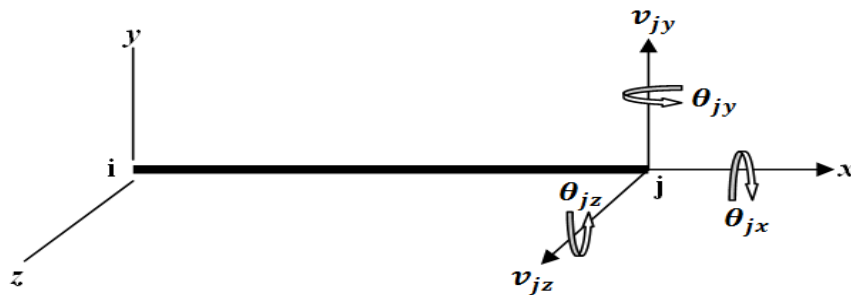
Sehingga dengan hubungan distribusi gaya lateral yang dipengaruhi vektor I dan eksitasi eksternal, dapat diperoleh persamaan gerak akibat percepatan gempa. Persamaan gerak untuk struktur bangunan n tingkat di bawah pengaruh gempa bumi dapat dinyatakan dengan [11, 12]

$$M\ddot{x}(t) + C\dot{x}(t) + Kx(t) = -M\ddot{x}_g(t) \tag{3}$$

Dengan M , C dan K merupakan matriks massa, redaman dan kekakuan. Selanjutnya $\ddot{x}(t)$, $\dot{x}(t)$, $x(t)$ dan $\ddot{x}_g(t)$ merupakan vektor percepatan, vektor kecepatan, vektor perpindahan dan vektor percepatan akibat gerak tanah.

Elemen Balok (Beam Element)

Elemen balok (*beam element*) merupakan suatu struktur ramping yang memiliki penampang seragam. Elemen balok (*beam element*) merupakan jenis yang paling umum dari komponen struktural, khususnya di Sipil dan Teknik Mesin. Sehingga *beam element* sering digunakan dalam proses analisis dinamika struktur. *Beam element* secara umum memiliki enam derajat kebebasan pada setiap nodenya, yang meliputi perpindahan serta rotasi di sepanjang arah x , y , dan arah z . Keadaan tersebut seperti ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Elemen balok (*beam element*) dengan 6 derajat kebebasan pada masing-masing node.

Beam element dapat digunakan sebagai pendekatan untuk analisis struktur. Prilaku global struktur dapat diwakili dengan mengadopsi model *beam element* [13]. Dalam penerapannya untuk analisis struktur, massa terpusat di bagian atas setiap elemen. Jika *beam element* dianggap sebagai bangunan bertingkat, maka kekakuan tingkat bangunan dapat dihitung dengan

$$K = \frac{12EI}{L^3} \tag{4}$$

Metode Elemen Hingga

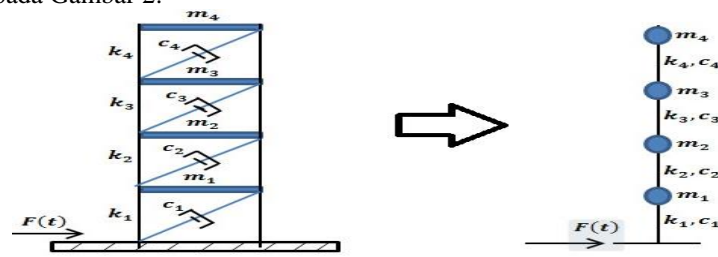
Metode elemen hingga adalah metode numerik untuk memecahkan masalah teknik fisika, rekayasa dan matematika fisis. Banyak masalah di bidang teknik dan fisis yang sangat sulit diselesaikan dengan metode analisis konvensional. Metode elemen hingga dijadikan solusi untuk memecahkan masalah tersebut. Metode elemen hingga merupakan teknik perhitungan numerik untuk aproksimasi solusi dari sistem kontinu. Bila sistem kontinu dibagi-bagi menjadi beberapa bagian yang lebih kecil, maka bagian-bagian ini disebut elemen hingga [14]. Proses pembagian suatu sistem kontinu menjadi elemen-elemen hingga dikenal dengan istilah proses diskritisasi. Metode elemen hingga juga digunakan sebagai metode untuk analisis linear, nonlinear, statis dan dinamis dari struktur dengan konfigurasi yang rumit [15].

Metode elemen hingga dapat dijadikan pendekatan untuk permasalahan yang kompleks seperti dinamika struktur. Pemodelan elemen hingga digunakan untuk memprediksi dan menganalisis kinerja struktur [16]. Metode elemen hingga memiliki beberapa prinsip tahapan penyelesaian. Tiga tahapan umum metode elemen hingga adalah pra-proses, proses dan pasca-proses [17]. Pada tahapan pra-proses dibangun model elemen hingga dari sistem. Selanjutnya pada tahapan proses dilakukan perhitungan numerik dengan bantuan software komputer seperti program Matlab, C++ dan lain-lain. Dan pada tahapan pasca-proses diperoleh hasil yang akan dianalisis untuk mengetahui adanya bagian yang harus diperbaiki pada tahapan sebelumnya.

METODE

Pada penelitian ini, bangunan bertingkat empat dimodelkan untuk melihat respon struktur bangunan selama terjadi gempa bumi. Masing-masing tingkat memiliki nilai kekakuan struktur dan rasio redaman yang

sama. Struktur bangunan diasumsikan sebagai elemen balok (*beam element*), yang selanjutnya didiskritisasi seperti ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 2. Model bangunan bertingkat empat.

Setelah dilakukan diskritisasi dapat ditentukan syarat batas yang memenuhi keadaan fisis sistem yang dimodelkan. Dimana pada sistem berlaku fungsi sinusoidal untuk getaran teredam, sehingga syarat batas yang dipergunakan adalah

$$y(t) = \frac{A(t)\sin(\omega t) - B(t)\cos(\omega t)}{m\omega} \tag{5}$$

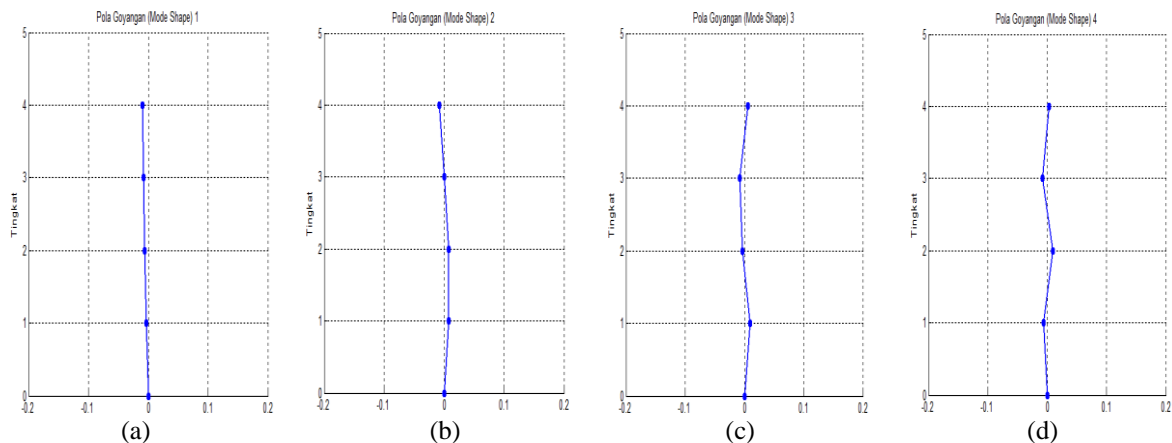
Selanjutnya dilakukan perhitungan numerik menggunakan program Matlab. Tahapan pertama yang dilakukan adalah menginput parameter-parameter yang diperlukan. Selanjutnya akan dihitung besar gaya eksternal yang bekerja pada struktur. Kemudian matriks massa, matriks redaman dan matriks kekakuannya dihitung, sehingga diperoleh nilai eigen dan vektor eigennya. Selanjutnya dihitung frekuensi, perpindahan dan gaya geser dari struktur bangunan. Dari hasil perhitungan tersebut dapat dilakukan plot untuk pola goyangan (*mode shape*) struktur, perpindahan masing-masing tingkat dan gaya geser masing-masing tingkat.

Perhitungan dilakukan sebanyak tiga kali dengan menggunakan data parameter yang berbeda. Dimana pada perhitungan pertama dipergunakan data kontrol dengan massa yang sama pada masing-masing tingkat yaitu $m_1 = m_2 = m_3 = m_4 = 5000 \text{ kg}$. Pada perhitungan kedua dipergunakan data uji I dengan penambahan nilai parameter massa pada tingkat ke-2 dan ke-4 yaitu $m_1 = m_3 = 5000 \text{ kg}$ dan $m_2 = m_4 = 10000 \text{ kg}$. Sedangkan pada perhitungan ketiga dipergunakan data uji II dengan penambahan nilai parameter massa pada tingkat ke-2 dan ke-4 yaitu $m_1 = m_3 = 5000 \text{ kg}$ dan $m_2 = m_4 = 15000 \text{ kg}$. Selanjutnya akan dilakukan analisis hasil dari ketiga perhitungan tersebut.

HASIL DAN PEMBAHASAN

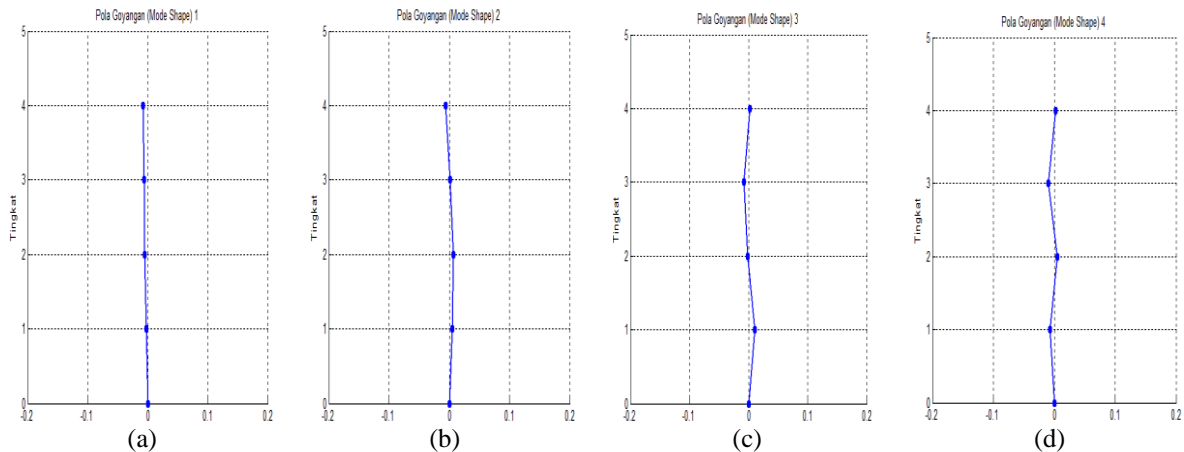
Pola Goyangan (*Mode Shape*)

Pola goyangan (*mode shape*) menunjukkan pola tertentu akibat getaran pada sistem mekanik dengan frekuensi (f) tertentu. Pola yang berbeda berhubungan dengan frekuensi (f) yang mempengaruhinya. Dari pola goyangan (*mode shape*) dapat diselidiki pengaruh penambahan nilai parameter massa terhadap frekuensi dari struktur bangunan. Berdasarkan perhitungan numerik yang dilakukan menggunakan data kontrol dengan $m_1 = m_2 = m_3 = m_4 = 5000 \text{ kg}$ diperoleh pola goyangan (*mode shape*) sebagai berikut:



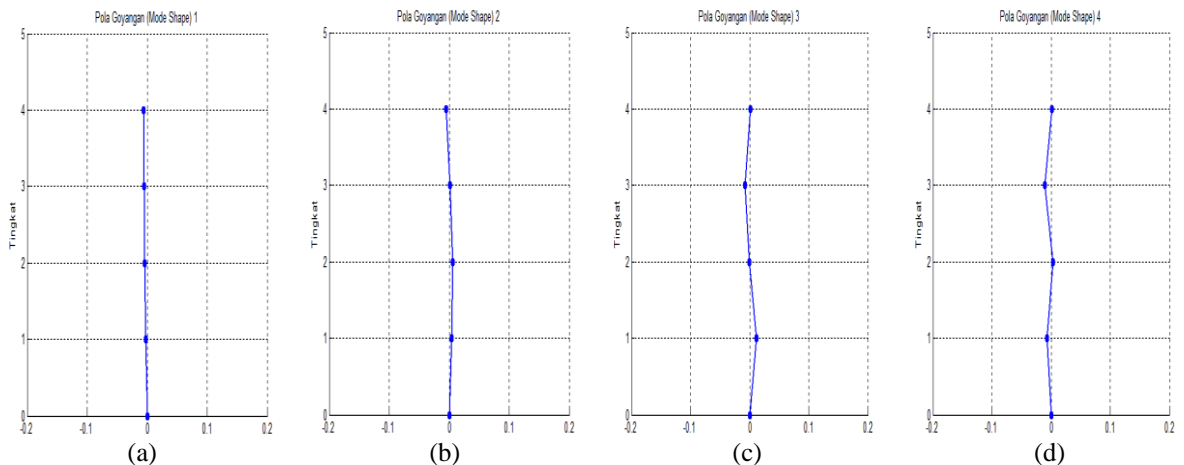
Gambar 3. (a) Pola goyangan (*mode shape*) 1, (b) pola goyangan (*mode shape*) 2, (c) pola goyangan (*mode shape*) 3 dan (d) pola goyangan (*mode shape*) 4 menggunakan data kontrol.

Dari hasil perhitungan numerik juga diperoleh frekuensi masing-masing pola goyangan. Dimana frekuensi untuk pola goyangan (*mode shape*) 1 = 4,2815 Hz, pola goyangan (*mode shape*) 2 = 12,3281 Hz, pola goyangan (*mode shape*) 3 = 18,8877 Hz dan pola goyangan (*mode shape*) 4 = 23,1692 Hz. Selanjutnya dilakukan perhitungan numerik menggunakan data uji I dengan $m_1 = m_3 = 5000$ kg dan $m_2 = m_4 = 10000$ kg. Dari hasil perhitungan diperoleh pola goyangan (*mode shape*) seperti ditunjukkan pada Gambar 4.



Gambar 4. (a) Pola goyangan (*mode shape*) 1, (b) pola goyangan (*mode shape*) 2, (c) pola goyangan (*mode shape*) 3 dan (d) pola goyangan (*mode shape*) 4 menggunakan data uji I.

Frekuensi untuk pola goyangan (*mode shape*) 1 = 3,36252 Hz, pola goyangan (*mode shape*) 2 = 9,40017 Hz, pola goyangan (*mode shape*) 3 = 17,9827 Hz dan pola goyangan (*mode shape*) 4 = 20,3188 Hz. Selanjutnya dilakukan perhitungan numerik menggunakan data uji II dengan $m_1 = m_3 = 5000$ kg dan $m_2 = m_4 = 15000$ kg dan diperoleh pola goyangan (*mode shape*) seperti ditunjukkan pada Gambar 5.



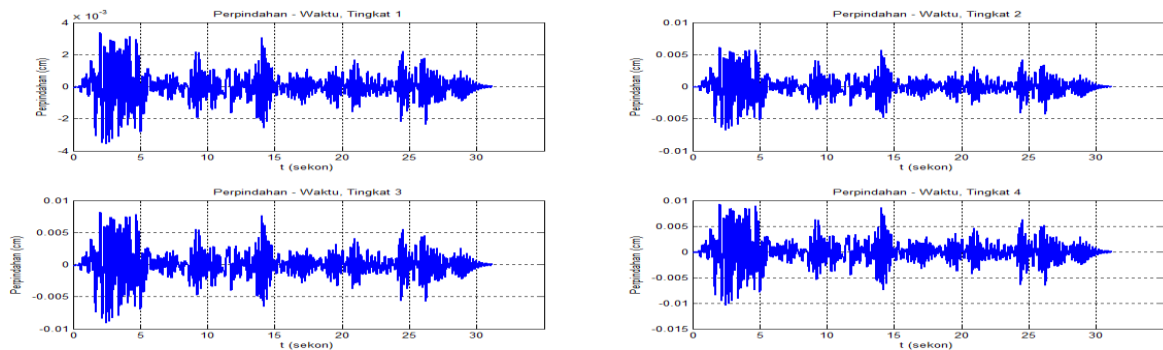
Gambar 5. (a) Pola goyangan (*mode shape*) 1, (b) pola goyangan (*mode shape*) 2, (c) pola goyangan (*mode shape*) 3 dan (d) pola goyangan (*mode shape*) 4 menggunakan data uji II.

Dengan frekuensi pola goyangan (*mode shape*) 1 = 2,85535 Hz, pola goyangan (*mode shape*) 2 = 7,84163 Hz, pola goyangan (*mode shape*) 3 = 17,7669 Hz dan pola goyangan (*mode shape*) 4 = 19,3546 Hz.

Dari ketiga hasil perhitungan dapat dilihat bahwa penambahan nilai parameter massa (variasi massa) pada beberapa tingkat bangunan mempengaruhi frekuensi struktur bangunan tersebut. Dengan penambahan nilai parameter massa mengakibatkan frekuensi dari struktur bangunan menjadi lebih kecil. Semakin besar penambahan nilai parameter massa, maka frekuensi dari struktur akan semakin kecil.

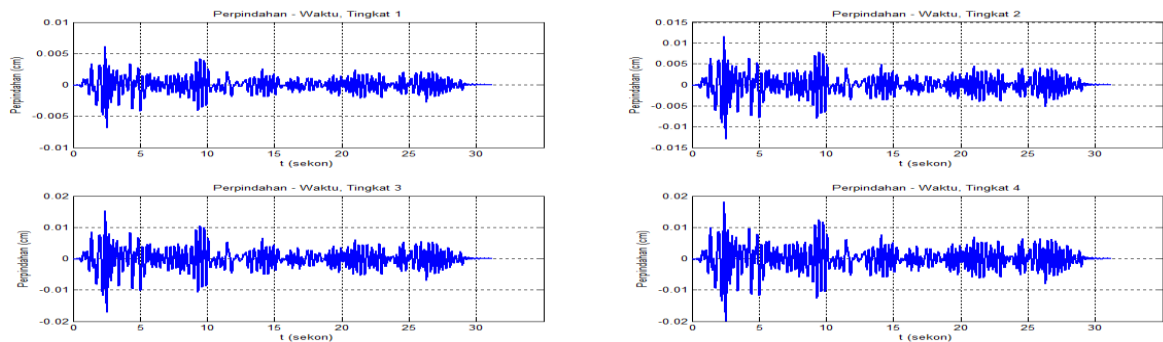
Perpindahan Masing-masing Tingkat

Perpindahan masing-masing tingkat menunjukkan nilai perpindahan maksimum masing-masing tingkat bangunan selama gempa bumi terjadi. Dari perhitungan numerik menggunakan data kontrol dengan $m_1 = m_2 = m_3 = m_4 = 5000 \text{ kg}$ diperoleh grafik perpindahan masing-masing tingkat sebagai berikut:



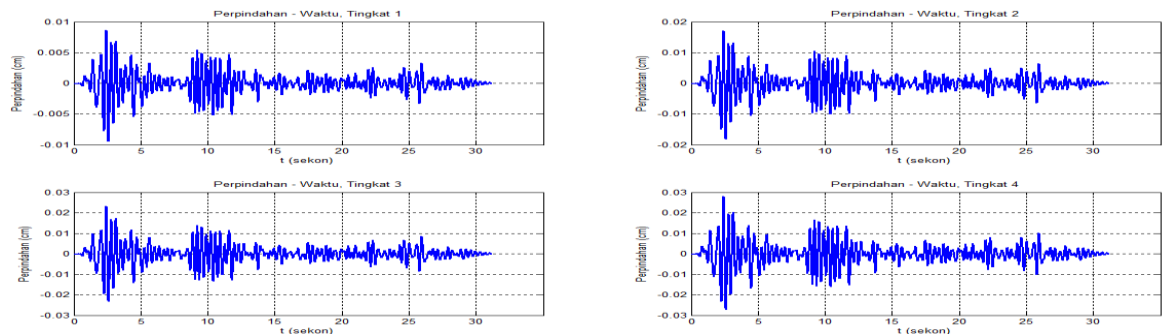
Gambar 6. Perpindahan masing-masing tingkat pada setiap waktu (t) menggunakan data kontrol.

Dari grafik dapat dilihat pada saat t beberapa perpindahan maksimum masing-masing tingkat terjadi. Dimana perpindahan maksimum tingkat 1 sejauh $0,33619 \text{ cm}$ pada $t = 2,04 \text{ s}$, perpindahan maksimum tingkat 2 sejauh $0,61692 \text{ cm}$ pada $t = 2,06 \text{ s}$, perpindahan maksimum tingkat 3 sejauh $0,81846 \text{ cm}$ pada $t = 2,06 \text{ s}$ dan perpindahan maksimum tingkat 4 sejauh $0,92319 \text{ cm}$ pada $t = 2,06 \text{ s}$. Selanjutnya dilakukan perhitungan untuk melihat perpindahan maksimum masing-masing tingkat menggunakan data uji I dengan $m_1 = m_3 = 5000 \text{ kg}$ dan $m_2 = m_4 = 10000 \text{ kg}$. Dari hasil perhitungan diperoleh grafik perpindahan masing-masing tingkat seperti ditunjukkan pada Gambar 7.



Gambar 7. Perpindahan masing-masing tingkat pada setiap waktu (t) menggunakan data uji I.

Perpindahan maksimum tingkat 1 sejauh $0,61103 \text{ cm}$ pada $t = 2,4 \text{ s}$, perpindahan maksimum tingkat 2 sejauh $1,1583 \text{ cm}$ pada $t = 2,4 \text{ s}$, perpindahan maksimum tingkat 3 sejauh $1,5362 \text{ cm}$ pada $t = 2,42 \text{ s}$ dan perpindahan maksimum tingkat 4 sejauh $1,8075 \text{ cm}$ pada $t = 2,42 \text{ s}$. Selanjutnya dilakukan perhitungan untuk melihat perpindahan maksimum masing-masing tingkat menggunakan data uji II dengan $m_1 = m_3 = 5000 \text{ kg}$ dan $m_2 = m_4 = 15000 \text{ kg}$ dan diperoleh grafik perpindahan masing-masing tingkat seperti ditunjukkan pada Gambar 8.

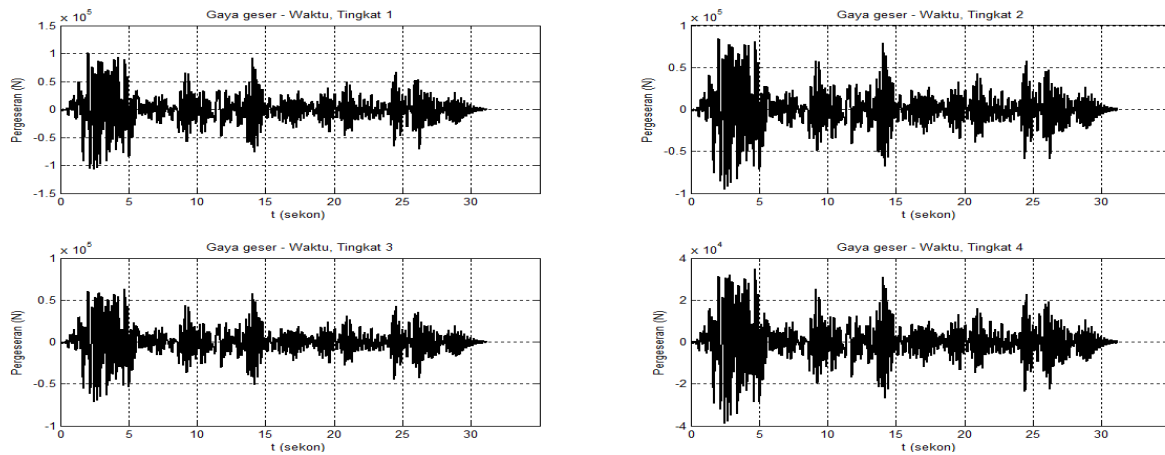


Gambar 8. Perpindahan masing-masing tingkat pada setiap waktu (t) menggunakan data uji II.

Dengan perpindahan maksimum tingkat 1 sejauh 0,86618 cm pada $t = 2,44$ s, perpindahan maksimum tingkat 2 sejauh 1,7146 cm pada $t = 2,44$ s, perpindahan maksimum tingkat 3 sejauh 2,3185 cm pada $t = 2,44$ s dan perpindahan maksimum tingkat 4 sejauh 2,7945 cm pada $t = 2,44$ s.

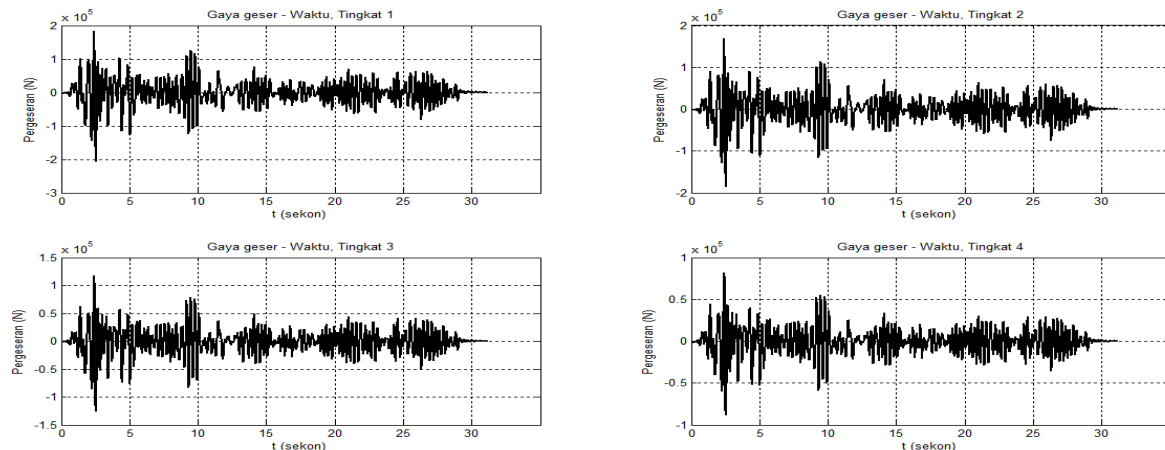
Gaya Geser Masing-masing Tingkat

Gaya geser masing-masing tingkat menunjukkan besarnya gaya geser yang terjadi pada masing-masing tingkat struktur bangunan pada saat terjadi gempa bumi. Berdasarkan perhitungan numerik yang dilakukan menggunakan data kontrol dengan $m_1 = m_2 = m_3 = m_4 = 5000$ kg diperoleh grafik gaya geser masing-masing tingkat sebagai berikut:



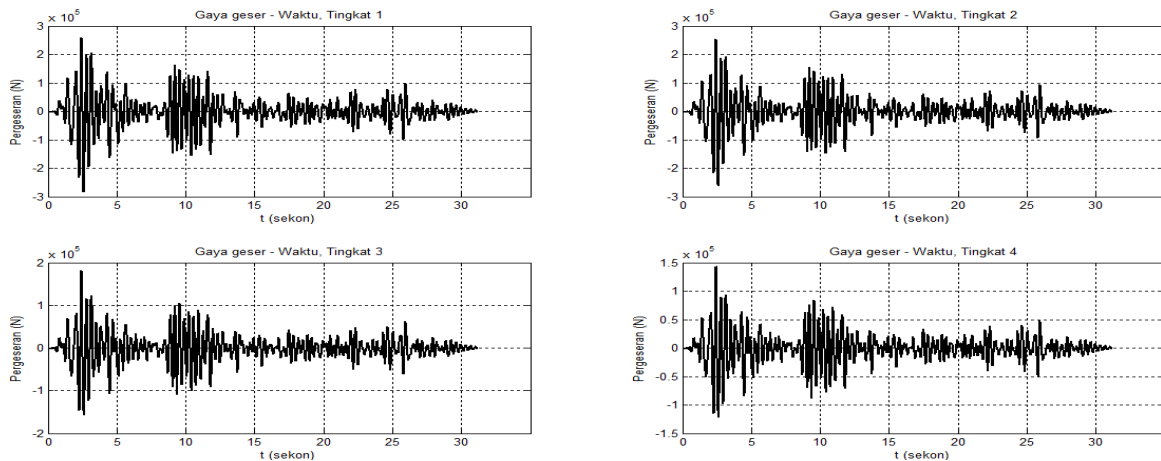
Gambar 9. Gaya geser masing-masing tingkat pada setiap waktu (t) menggunakan data kontrol.

Dari grafik dapat diperoleh gaya geser maksimum tingkat 1 sebesar 10648472,447 N, gaya geser maksimum tingkat 2 sebesar 9492742,857 N, gaya geser maksimum tingkat 3 sebesar 7138693,317 N dan gaya geser maksimum tingkat 4 sebesar 3873779,228 N. Selanjutnya dilakukan perhitungan untuk melihat gaya geser maksimum masing-masing tingkat menggunakan data uji I dengan $m_1 = m_3 = 5000$ kg dan $m_2 = m_4 = 10000$ kg dan diperoleh grafik gaya geser masing-masing tingkat seperti ditunjukkan pada Gambar 10.



Gambar 10. Gaya geser masing-masing tingkat pada setiap waktu (t) menggunakan data uji I.

Gaya geser maksimum tingkat 1 sebesar 20494872,091 N, gaya geser maksimum tingkat 2 sebesar 18490871,146 N, gaya geser maksimum tingkat 3 sebesar 12489173,928 N dan gaya geser maksimum tingkat 4 sebesar 8771402,247 N. Selanjutnya dilakukan perhitungan untuk melihat gaya geser maksimum masing-masing tingkat menggunakan data uji II dengan $m_1 = m_3 = 5000$ kg dan $m_2 = m_4 = 15000$ kg. Dari hasil perhitungan diperoleh grafik gaya geser masing-masing tingkat seperti ditunjukkan pada Gambar 11.



Gambar 11. Gaya geser masing-masing tingkat pada setiap waktu (t) menggunakan data uji II.

Dengan gaya geser maksimum tingkat 1 sebesar $28384314,907\text{ N}$, gaya geser maksimum tingkat 2 sebesar $26032102,797\text{ N}$, gaya geser maksimum tingkat 3 sebesar $18116947,961\text{ N}$ dan gaya geser maksimum tingkat 4 sebesar $14287229,525\text{ N}$.

KESIMPULAN

Pertambahan nilai parameter massa (variasi massa) pada beberapa tingkat mempengaruhi respon struktur bangunan bertingkat selama terjadi gempa bumi. Pengaruh tersebut dapat dilihat pada frekuensi struktur bangunan, perpindahan masing-masing tingkat dan besar gaya geser pada masing-masing tingkat bangunan. Frekuensi struktur bangunan akan semakin kecil karena pertambahan nilai parameter massa pada beberapa tingkat bangunan. Pertambahan nilai parameter massa pada tingkat 2 dan 4 menjadi 1000 kg mengakibatkan frekuensi masing-masing pola goyangan berkurang sebesar $0,91898\text{ Hz}$, $2,92793\text{ Hz}$, $0,905\text{ Hz}$ dan $2,8504\text{ Hz}$. Sedangkan untuk massa 15000 kg pada tingkat 2 dan 4, frekuensi masing-masing pola goyangan berkurang sebesar $1,42615\text{ Hz}$, $4,48647\text{ Hz}$, $1,1208\text{ Hz}$ dan $3,8146\text{ Hz}$.

Perpindahan masing-masing tingkat bangunan akan semakin besar karena pertambahan nilai parameter massa pada beberapa tingkat bangunan. Nilai parameter massa pada tingkat 2 dan 4 bertambah menjadi 10000 kg mengakibatkan perpindahan masing-masing tingkat bertambah sebesar $0,27484\text{ cm}$, $0,54138\text{ cm}$, $0,71174\text{ cm}$ dan $0,88431\text{ cm}$. Sedangkan massa 15000 kg pada tingkat 2 dan 4 mengakibatkan nilai perpindahan masing-masing tingkat bertambah sebesar $0,52999\text{ cm}$, $1,09768\text{ cm}$, $1,50004\text{ cm}$ dan $1,87131\text{ cm}$.

Gaya geser masing-masing tingkat bangunan akan semakin besar karena pertambahan nilai parameter massa pada beberapa tingkat bangunan. Dimana pertambahan nilai parameter massa pada tingkat 2 dan 4 menjadi 10000 kg mengakibatkan gaya geser pada masing-masing tingkat bertambah sebesar $9846399,644\text{ N}$, $8998128,289\text{ N}$, $5350480,611\text{ N}$ dan $4897623,019\text{ N}$. Sedangkan jika massa pada tingkat 2 dan 4 menjadi 15000 kg mengakibatkan gaya geser bertambah sebesar $17735842,460\text{ N}$, $16539359,940\text{ N}$, $10978254,644\text{ N}$ dan $10413450,297\text{ N}$. Sehingga semakin besar perbedaan (variasi) nilai parameter masing-masing tingkat bangunan, maka semakin besar perpindahan dan gaya geser masing-masing tingkat yang terjadi pada struktur bangunan tersebut. Keadaan tersebut menunjukkan bahwa pada daerah rawan gempa, untuk membangun gedung bertingkat tinggi akan lebih aman apabila massa masing-masing tingkat (lantai) hampir seragam.

REFERENSI

1. Dyke, S.J., Jr, B.F. Spencer., Quast, P, and Sain, M.K, *Role of Control-Structure Interaction in Protective System Design*, Journal of Engineering Mechanics, **121** (2): 322-338 (1995)
2. Vulpe, A. and Carausu, A, *Fuzzy Logic Models for Seismic Damage Analysis and Prediction*, World Conference on Earthquake Engineering, (2008)
3. Kerschen, G., Worden, K., Vakakis, A.F, and Golinval, Jean-Claude, *Past, Present and Future of Nonlinear System Identification in Structural Dynamics*, Mechanical Systems and Signal Processing, **20**: 505-592 (2006)

4. Eddanguir, A., Beidouri, Z, and Benamar, R, *Geometrically Nonlinear Transverse Steady-state Periodic Forced Vibration of Multi-degree-of-freedom Discrete Systems with a Distributed Nonlinearity*, Ain Shams Engineering Journal, **3**: 191-207 (2012)
5. Jr, B.F. Spencer. and Nagarajaiah, S, *State of The Art of Structural Control*, Journal of Structural Engineering © ASCE, **846** (2003)
6. Amadio, C., Fragiacomio, M, and Rajgelj, S, *The Effects of Repeated Earthquake Ground Motions on The Non-linear Response of SDOF Systems*, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, **32**: 291-308 (2003)
7. Flint, E. and Anderson, E, *Multi-degree of Freedom Parallel Actuation System Architectures for Motion Control*, AIAA, **4750** (2001)
8. Housner, G.W. And Masri, S.F, *Developments in The USA in The Field of Structural Control and Monitoring of Civil Infrastructure Systems*, 12WCEE, **2217** (2000)
9. Araki, Y. and Hjelmstad, K.D, *Criteria for Assessing Dynamic Collapse of Elastoplastic Structural Systems*, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, **29**: 1177-1198 (2000)
10. Yu, E., Whang, D.H., Conte, J.P., Stewart, J.P, and Wallace, J.W, *Forced Vibration Testing of Buildings using The Linear Shaker Seismic Simulation (LSSS) Testing Method*, Earthquake Engng Struct. Dyn, **453** (2005)
11. Kasimzade, A.A., Tuhta, S, and Atmaca, G, *Modeling, Computing and Application Particularities of No Restoring Mechanism Aseismic Control Device*, IERI Procedia, **7**: 77-83 (2014)
12. Tan, K.T. and Razak, H.A, *Assessment of Risk to School Buildings Resulting from Distant Earthquakes*, Procedia Engineering, **14**: 2196-2204 (2011)
13. Mazars, J., Kotronis, P., Ragueneau, F. and Casaux, G, *Using Multifiber Beams to Account for Shear and Torsion Applications to Concrete Structural Elements*, Comput. Methods Appl. Mech. Engrg, **195**: 7264-7281 (2006)
14. Logan , D. L, *A First Course in the Finite Element Method 4st edition*, A Division of Thomson Canada, Canada (2007)
15. Senjanovic, I, Vladimir, N, and Cho, D.S, *A New Finite Element Formulation for Vibration Analysis of Thick Plates*, Int. J. Nav. Archit. Ocean Eng, **7**: 324-345 (2015)
16. Li, B., Duffield, C.F, and Hutchinson, G.L, *Simplified Finite Element Modelling of Multi-storey Buildings: The Use of Equivalent Cubes*, Electronic Journal of Structural Engineering, **8** (2008).
17. Roylance, D, *Finite Element Analysis*, Department of Materials Science and Engineering, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge (2001)