



ANALISIS PENGARUH MASSA PADA STRUKTUR BANGUNAN BERTINGKAT PADA SAAT GEMPA BUMI MENGGUNAKAN METODE ELEMEN HINGGA

Budiman Nasution

Jurusan Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Negeri Medan
budimannasution@unimed.ac.id

Diterima: Desember 2020. Disetujui: Januari 2021. Dipublikasikan: Februari 2021

ABSTRAK

Beban lateral dinamis yang disebabkan oleh gempa bumi dapat mempengaruhi struktur bangunan yang berada di daerah sekitar pusat gempa. Sangat banyak kasus gempa bumi yang menyebabkan kerusakan pada struktur bangunan. Untuk ketahanan gempa perlu dilihat bagaimana pengaruh massa terhadap respon struktur bangunan pada saat terjadi gempa. Berbagai pendekatan telah banyak dilakukan untuk melihat respon struktur bangunan. Salah satu pendekatan yang dilakukan dengan menggunakan metode elemen hingga (MEH). Pada penelitian ini akan dilihat bagaimana pengaruh massa terhadap struktur bangunan bertingkat pada saat terjadi gempa bumi. Dengan menerapkan metode elemen hingga dan pendekatan getaran mekanis sehingga dapat dilihat pola goyangan, perpindahan dan gaya geser dari struktur bangunan.

Kata Kunci: Struktur, Beban Lateral, Gempa Bumi, Kekakuan, Redaman, Elemen Hingga

ABSTRACT

Dynamic lateral loads caused by earthquakes can affect building structures in the area around the epicenter. There are very many cases of earthquakes that cause damage to building structures. For earthquake resistance, it is necessary to see how the mass influences the response of the building structure when an earthquake occurs. Various approaches have been carried out to see the response of the building structure. One approach is to use the finite element method (FEM). In this study, it will be seen how the influence of mass on multi-storey building structures when an earthquake occurs. By applying the finite element method and the mechanical vibration approach, it can be seen the pattern of shaking, displacement and shear forces of the building structure.

Keywords: Structure, Lateral Load, Earthquake, Stiffness, Damping, Finite Element

PENDAHULUAN

Indonesia merupakan salah satu negara dari banyak negara yang sedang berkembang. Keadaan ini menjadikan pemerintah Indonesia melakukan pembangunan di berbagai aspek. Salah satunya adalah pembangunan gedung-gedung pendukung untuk mempercepat laju menuju negara berkembang yang mapan. Akan tetapi semakin berkurangnya lahan untuk

pembangunan memaksa dilakukannya efisiensi lahan dengan membangun gedung-gedung bertingkat. Gedung-gedung bertingkat ini terdiri dari gedung perkantoran, hotel, apartemen, pusat perbelanjaan dan lain-lain. Bangunan-bangunan ini di rancang agar tidak rusak pada saat terjadi gempa bumi.

Indonesia salah satu negara dengan intensitas gempa bumi yang sangat tinggi. Dalam satu tahun bisa terjadi lebih dari 4.000

gempa bumi dengan magnitude kecil maupun magnitude besar. Posisi geografis Indonesia yang terletak di antara lempeng Indo-Australia, Eurasia dan Pasifik. Selain itu, Indonesia terletak di jalur gunung api (ring of fire) bagian dari cincin api Pasifik (Nasution, 2016). Kedua hal tersebut menjadi faktor utama penyebab tingginya intensitas gempa di Indonesia.

Gempa bumi merupakan salah satu fenomena alam yang terjadi secara tiba-tiba. Gempa bumi terjadi karena faktor alam, antropogenik atau kedua faktor (Dube, 2016). Gempa bumi dapat menyebabkan korban jiwa dan kerugian ekonomi [link]. Tidak sedikit korban jiwa yang disebabkan terjadinya gempa bumi. Salah satu gempa terbesar di Indonesia terjadi pada tahun 2004 di provinsi Nangroe Aceh Darussalam (Gaillard et al., 2008). Selain korban jiwa, banyaknya bangunan-bangunan yang hancur pada saat terjadi gempa menyebabkan kerugian ekonomi yang sangat besar (Boen, 2006). Bangunan-bangunan tersebut terdiri dari rumah-rumah masyarakat, gedung-gedung pemerintahan dan gedung-gedung bertingkat.

Untuk mengurangi kerugian materi dan korban jiwa perlu dibuat bangunan yang lebih kuat menahan beban gempa. Dalam hal ini telah banyak dilakukan analisa yang berhubungan dengan kekuatan struktur bangunan terhadap beban gempa. Penggunaan data gempa bumi El Centro yang terjadi di Imperial Valley (tenggara California selatan) pada tahun 1940 telah banyak membantu untuk mengetahui faktor-faktor yang mempengaruhi kekuatan struktur bangunan. Sebagai contoh faktor material (dinding batu) sangat sensitif terhadap gempa bumi (H. Saeed, n.d.). Penggunaan elemen polimer pada struktur baja dapat mengurangi getaran pada saat gempa bumi (Sołtysik, Falborski, & Jankowski, 2017). Bangunan batu mempengaruhi respon struktur pada saat gempa bumi (Shariq, Haseeb, & Arif, 2017). Masih banyak penelitian-penelitian yang telah dilakukan yang mengkaji dan melihat respon struktur bangunan pada saat gempa bumi.

Penelitian ini bertujuan untuk melihat pengaruh massa pada masing-masing lantai terhadap struktur bangunan bertingkat pada saat

terjadi gempa bumi. Untuk memperkirakan respon struktur bangunan secara akurat, kami memvariasikan massa pada setiap lantai gedung. Pendekatan numerik menggunakan metode elemen hingga diterapkan untuk membantu perhitungan. Dengan pendekatan numerik yang dilakukan dapat dilihat pola goyangan (mode shape) struktur bangunan. Selain itu, dapat ditentukan nilai perpindahan masing-masing tingkat dan gaya gesernya.

Gempa bumi dan struktur bangunan bertingkat

Gempa bumi salah satu bencana alam yang paling sering terjadi. Salah satu negara yang sering terjadi gempa bumi adalah Indonesia. Hampir 90% wilayah Indonesia yang terbentang dari ujung barat (pulau Sumatera) sampai ujung timur (pulau Papua) merupakan daerah yang tergolong ke dalam daerah rawan gempa. Tidak jarang gempa bumi yang terjadi menyebabkan kerugian yang sangat besar. Adanya bangunan yang hancur pada saat terjadi gempa bumi menyebabkan kerugian secara ekonomi. Selain itu, tidak jarang orang-orang yang berada di sekitar bangunan menjadi korban karena tertimpa reruntuhan bangunan yang hancur akibat gempa bumi. Sebagai contoh, gempa bumi yang terjadi di Lombok (Nusa Tenggara Barat) pada Agustus 2018 korban jiwa mencapai 560 orang dan bangunan rusak sekitar 140.000 unit (Badan Nasional Penanggulangan Bencana, 2018). Sementara gempa bumi yang terjadi di Palu (Pulau Sulawesi) pada September 2018 korban jiwa mencapai 2000 orang (Kementerian Kesehatan RI, 2018).

Gempa bumi menghasilkan getaran pada permukaan bumi. Ini disebabkan adanya pelepasan energi dari dalam bumi karena terjadi pergerakan kerak bumi. Keadaan ini menghasilkan gelombang yang dikenal dengan gelombang seismik (Suárez et al., 2019). Body waves terdiri dari gelombang primer (P-waves) dan shear (S-waves) (Hitchman., et al, 2016), (Drossaert., et al, 2018). Sedangkan surface wave terdiri dari love dan Rayleigh waves (Hu., et al, 2018). Secara umum jenis gelombang gempa bumi yang terjadi di Indonesia adalah gelombang primer (P-waves). Gelombang ini merupakan gelombang yang paling awal

direkam oleh seismometer karena tingginya kecepatan gelombang tersebut.

Adanya gelombang yang disebabkan gempa bumi mempengaruhi lingkungan sekitarnya. Hal ini juga mempengaruhi struktur bangunan-bangunan yang ada di sekitar pusat gempa. Untuk melihat pengaruh dari beban lateral yang disebabkan oleh gempa bumi dapat ditinjau dengan dua pendekatan. Kedua pendekatan tersebut adalah pendekatan dengan menggunakan analisis statistik dan analisis dinamik. Dimana pendekatan dengan analisis dinamik lebih dikenal dengan konsep dinamika struktur.

Dalam menerapkan konsep dinamika struktur dapat dipergunakan pendekatan getaran paksa. Dinama sistem derajat kebebasan tunggal dapat dijadikan sebagai model awal struktur bangunan (C. Amadio, M. Fragiacomio, 2003). Sistem derajat kebebasan tunggal digambarkan sebagai sistem pegas-massa-peredam. Namun untuk melihat respon struktur bangunan lebih teliti dipergunakan sistem kebebasan banyak (Housner & Masri, 2000). Dengan sistem ini dapat dilihat respon struktur bangunan bertingkat n.

Hukum Newton II menjadi dasar untuk meninjau dinamika struktur bangunan. Dengan menghubungkan hukum Newton II dengan prinsip D'Alembert dapat diperoleh persamaan gerak sistem struktural (Araki & Hjelmstad, 2000). Persamaan gerak tersebut dinyatakan dengan:

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

$F(t)$ merupakan gaya lateral yang mempengaruhi struktur bangunan. Pada gaya lateral tersebut terdapat gaya inersia karna adanya adanya gerak tanah ($x_g(t)$) (Yu, et al, 2004). Sehingga gaya luar yang mempengaruhi struktur bangunan dapat dituliskan menjadi

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

Dari persamaan gaya lateral yang dipengaruhi vektor I dan eksitasi eksternal dapat diperoleh persamaan gerak akibar percepatan gempa. Persamaan tersebut dapat dituliskan menjadi

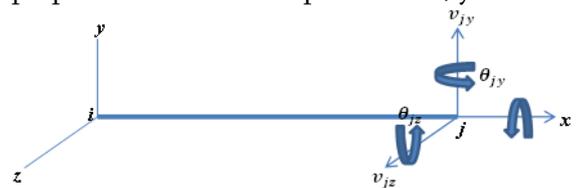
$$M\ddot{x} + C\dot{x} + Kx = -MI\ddot{x}_g(t)$$

Dengan M matriks massa, C matriks redaman, K matriks kekakuan, I, \ddot{x}_g vektor percepatan, \dot{x} vektor kecepatan, x vektor perpindahan dan \ddot{x}_g vektor percepatan tanah. Kondisi tersebut memungkinkan didekati dengan metode elemen hingga.

Metode elemen hingga (MEH)

Metode elemen hingga (MEH) merupakan salah satu metode numerik yang sering dimanfaatkan di dunia rekayasa (engineering), fisika dan ilmu-ilmu terapan lainnya. Metode ini sering dipergunakan dalam kasus-kasus yang kompleks. Dalam penerapannya MEH menjadikan suatu sistem kontinu menjadi bagian-bagian yang sangat kecil (Norrie, 1987). Proses tersebutlah yang sering dikenal dengan istilah diskritisasi. MEH memiliki tingkat akurasi dan ketelitian yang baik. Karena hal tersebut MEH dapat dipergunakan untuk mengkaji struktur bangunan. Prediksi dan analisis kinerja struktur dapat diprediksi dengan MEH (Li, et al, 2008).

Dalam penerapannya dalam menganalisis struktur bangunan melalui tiga tahapan utama. Tahapan tersebut adalah pra-proses, proses dan pasca-proses (Royslance, 2016). Pada tahap pra-proses dilakukan pemodelan fisis berdasarkan sistem yang diteliti. Pada sistem struktur bangunan pemodelan fisis dapat dilakukan dengan pendekatan elemen balok (beam element). Beam element memiliki enam derajat kebebasan. Derejat kebebasan tersebut meliputi perpindahan dan rotasi pada arah x, y dan z.



Gambar 1. Beam element 6 derajat kebebasan

Beam element dapat mewakili perilaku umum struktur bangunan (Mazars, et al, 2006) Dengan asumsi beam element merupakan bangunan bertingkat maka kekakuan setiap tingkat bangunan dirumuskan menjadi.

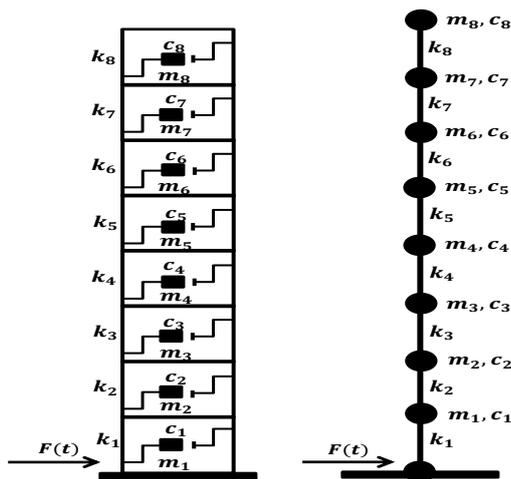
$$K = \frac{12IE}{L^3}$$

Selanjutnya pada tahap proses dilakukan perhitungan numerik. Pada proses ini algoritma

atau flowchart disusun yang akan dituangkan dalam bahasa pemrograman. Tahapan terakhir adalah pasca-proses. Pada tahapan ini dilakukan analisis terhadap hasil perhitungan numerik yang telah dilakukan. Sehingga dapat diperoleh kesimpulan dan masukan-masukan untuk penelitian selanjutnya.

METODE PENELITIAN

Pada penelitian ini dimodelkan bangunan bertingkat delapan. Setiap tingkat bangunan dimodelkan memiliki massa, kekakuan dan redaman. Struktur bangunan akan diberi beban lateral $F(t)$. Data beban lateral yang dipergunakan merupakan data gempa *El-Centro*. Struktur bangunan diasumsikan sebagai *beam element*. *Beam element* tersebut didiskritisasi menjadi delapan bagian. Keadaan ini seperti ditunjukkan pada gambar di bawah ini.



Gambar 2. Model fisis struktur bangunan

Berdasarkan model tersebut ditentukan syarat batas. Fungsi sinusoidal dengan redaman berlaku pada model yang dibangun. Sehingga dipergunakan syarat batas sebagai berikut.

$$y(t) = \frac{i(t) \sin(\omega t) - j(t) \cos(\omega t)}{m\omega}$$

Selanjutnya dilakukan perhitungan numerik. Perhitungan numerik dilakukan sebanyak dua kali dengan menggunakan nilai parameter massa yang berbeda. Beberapa nilai parameter utama seperti ditunjukkan pada tabel di bawah ini.

Tabel 1. Parameter utama 1

Tingkat	Massa (kg)	Kekakuan	Rasio redaman
1	5000	10000	5%
2	5000	10000	5%
3	5000	10000	5%
4	5000	10000	5%
5	5000	10000	5%
6	5000	10000	5%
7	5000	10000	5%
8	5000	10000	5%

Tabel 2. Parameter utama 2

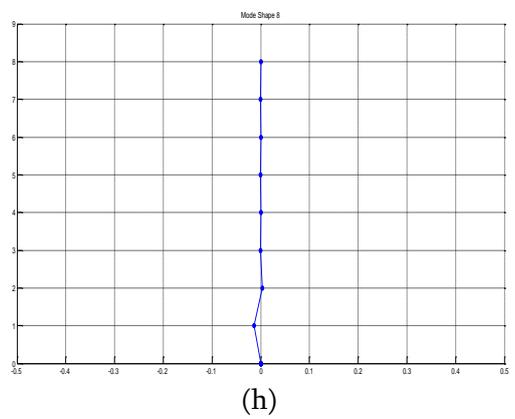
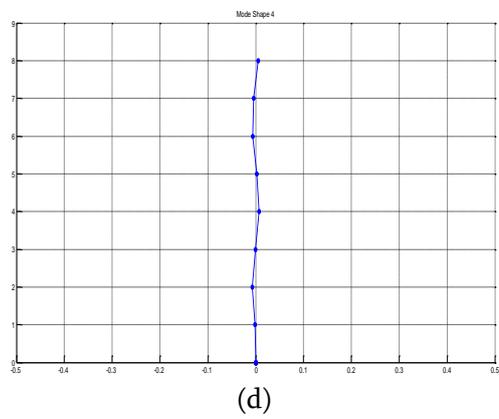
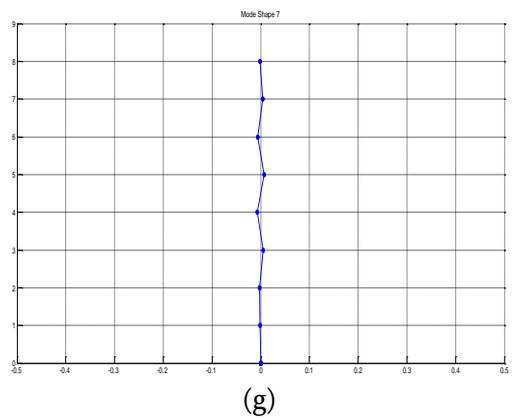
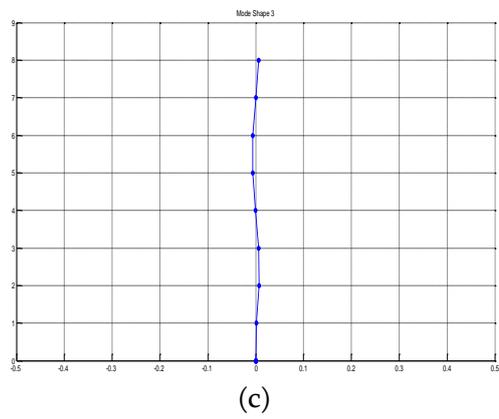
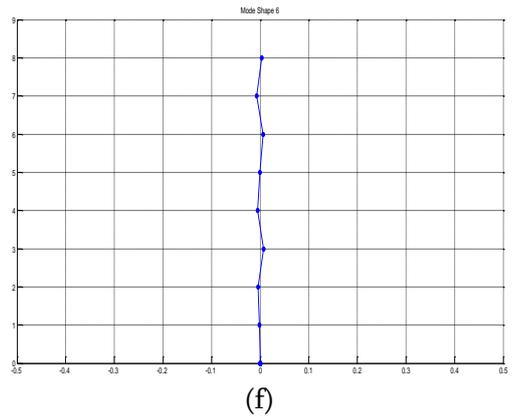
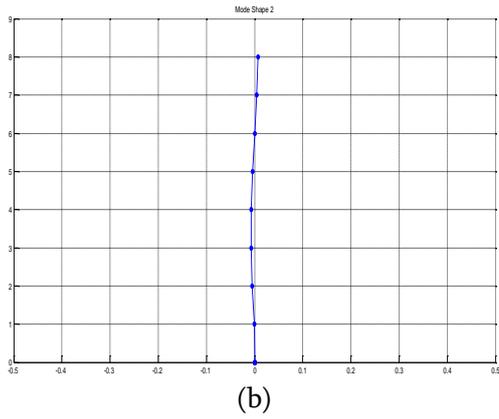
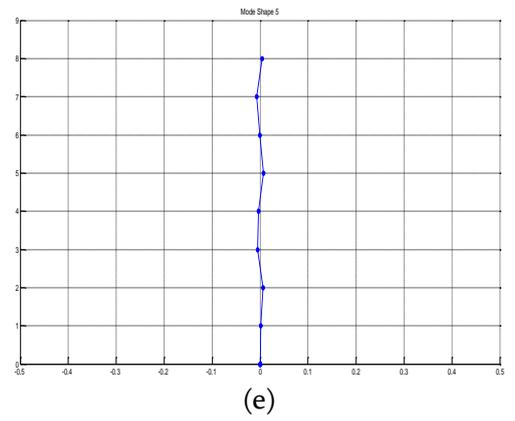
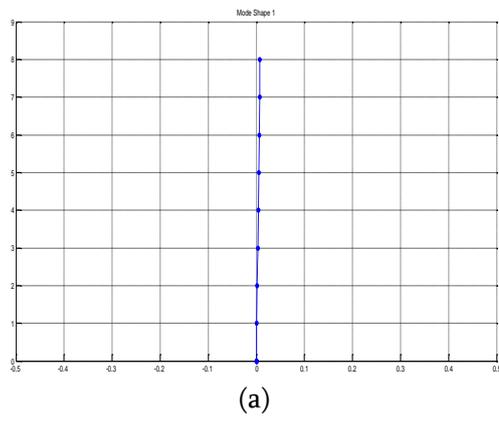
Tingkat	Massa (kg)	Kekakuan	Rasio redaman
1	5000	50000	5%
2	5000	10000	5%
3	4500	10000	5%
4	4500	10000	5%
5	4000	10000	5%
6	4000	10000	5%
7	3500	10000	5%
8	3500	10000	5%

Parameter-parameter yang dibutuhkan selanjutnya diinput ke dalam bahasa pemrograman. Pada perhitungan numerik dihitung besar gaya eksternal struktur bangunan. Selain itu matriks kekakuan dan redaman dihitung untuk memperoleh nilai eigen dan vektor eigennya. Pada tahap akhir frekuensi, perpindahan struktur dan gaya geser yang dialami struktur dihitung. Sehingga dapat diplot mode shape, perpindahan dan gaya geser yang bekerja pada struktur bangunan.

HASIL DAN PEMBAHASAN

1. Mode Shape (Pola Penggoyangan)

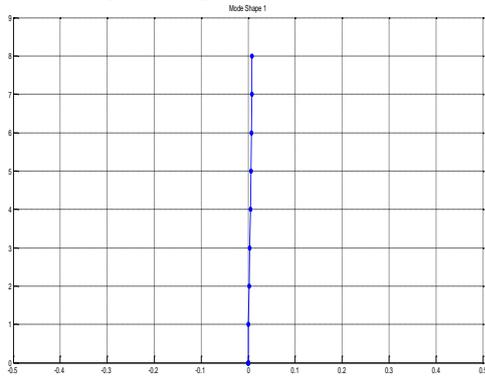
Beban lateral yang diakibatkan oleh gempa bumi menjadikan struktur bangunan bertingkat bergerak. Gerakan ini menghasilkan mode shape (pola goyangan). Pada setiap simulasi menghasilkan masing-masing delapan pola goyangan. Jumlah pola goyangan sama dengan jumlah tingkat struktur bangunan. Pola goyangan untuk simulasi pertama ditunjukkan pada Gambar 3.



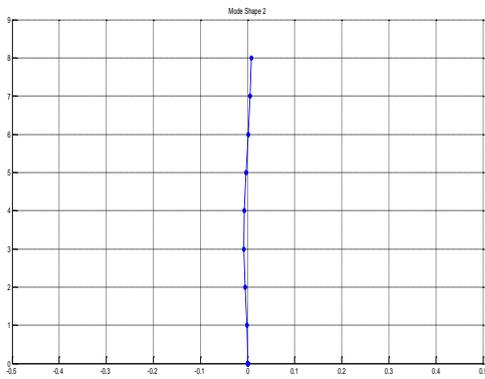
Gambar 3. (a) Pola goyangan 1, (b) Pola goyangan 2, (c) Pola goyangan 3, (d) Pola goyangan 4, (e) Pola goyangan 5, (f) Pola

goyangan 6, (g) Pola goyangan 7 dan (h) Pola goyangan 8.

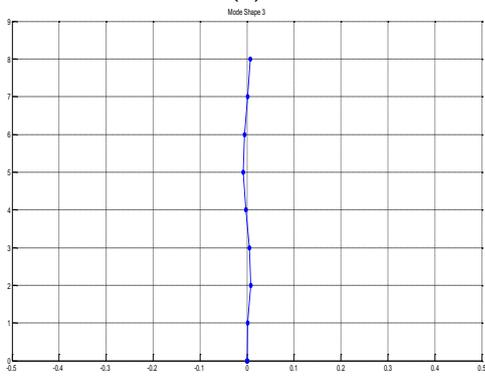
Sedangkan pola goyangan untuk simulasi ke-dua ditunjukkan pada Gambar 4.



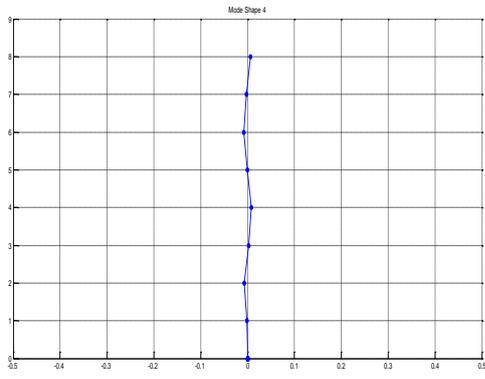
(a)



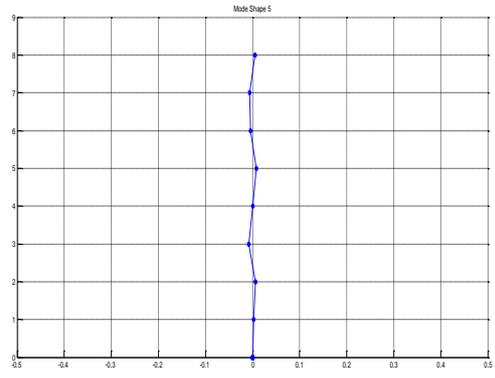
(b)



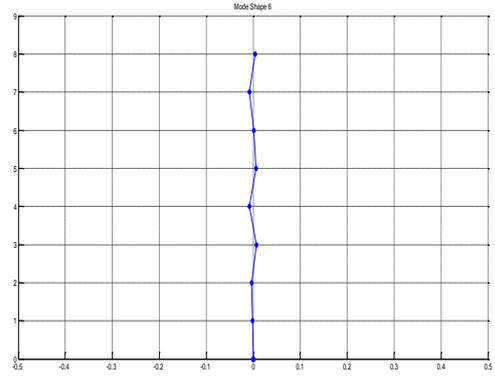
(c)



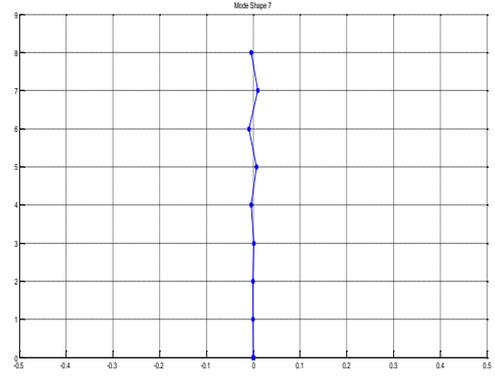
(d)



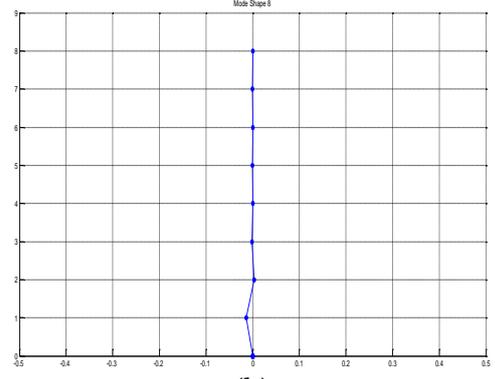
(e)



(f)



(g)



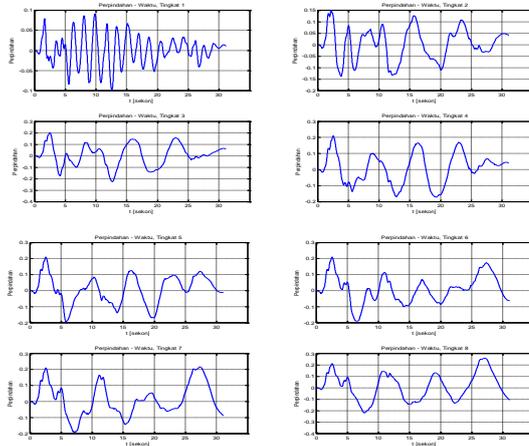
(h)

Gambar 4. (a) Pola goyangan 1, (b) Pola goyangan 2, (c) Pola goyangan 3, (d) Pola goyangan 4, (e) Pola goyangan 5, (f) Pola goyangan 6, (g) Pola goyangan 7 dan (h) Pola goyangan 8.

Dari kedua simulasi tersebut dapat dilihat tidak ada pola goyangan yang ekstrim. Hal ini dapat menunjukkan bahwa tidak ada kemungkinan kerusakan atau patahnya struktur bangunan.

2. Perpindahan Struktur

Gerakan yang ditimbulkan oleh beban lateral gempa bumi mengakibatkan perpindahan struktur bangunan. Dari hasil perhitungan numerik diperoleh grafik perpindahan dan perpindahan maksimum masing-masing tingkat bangunan. Pada simulasi pertama nilai massa pada masing-masing tingkat sama. Grafik perpindahan untuk simulasi pertama ditunjukkan pada Gambar 5.



Gambar 5. Grafik perpindahan masing-masing tingkat untuk simulasi pertama.

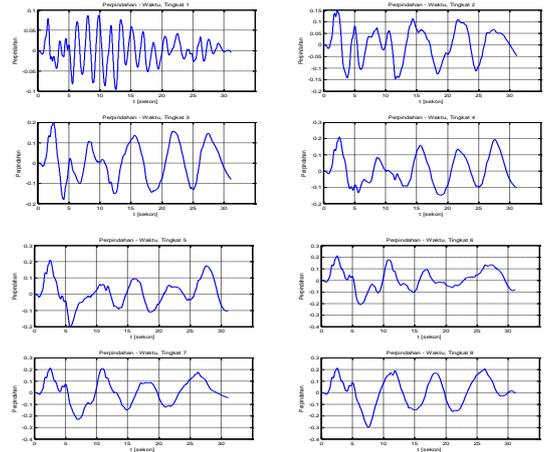
Sedangkan untuk nilai perpindahan maksimum masing-masing tingkat pada simulasi pertama ditunjukkan pada Tabel 3.

Tabel 3. Perpindahan maksimum masing-masing tingkat

Tingkat ke-	Perpindahan Maksimum (cm)	t (sekon)
1	0.090749	9.84
2	0.14975	2.22
3	0.20047	2.56
4	0.20967	2.6
5	0.20967	2.6
6	0.20995	2.6
7	0.21615	27.38
8	0.25806	27.14

Dari Tabel 3 dapat dilihat perpindahan terbesar terjadi pada tingkat ke-8. Dimana nilai perpindahannya adalah 0.25806 cm yang terjadi pada saat $t = 27.14$ sekon.

Pada perhitungan numerik ke-dua nilai massa diubah dan lebih divariasikan. Seperti pada simulasi pertama, diperoleh juga grafik perpindahan dan perpindahan maksimum masing-masing tingkat bangunan pada simulasi ke-dua. Grafik perpindahan untuk simulasi ke-dua ditunjukkan pada Gambar 6.



Gambar 6. Grafik perpindahan masing-masing tingkat untuk simulasi ke-dua

Sedangkan untuk nilai perpindahan maksimum masing-masing tingkat pada simulasi yang ke-dua ini ditunjukkan pada Tabel 4.

Tabel 3. Perpindahan maksimum masing-masing tingkat

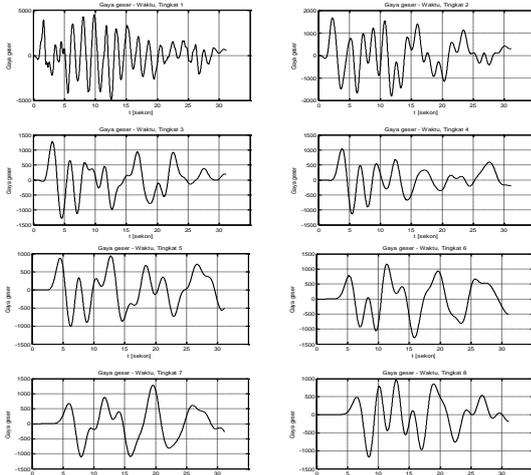
Tingkat ke-	Perpindahan Maksimum (cm)	t (sekon)
1	0.086804	9.84
2	0.14976	2.22
3	0.19944	2.56
4	0.20928	2.6
5	0.20944	2.6
6	0.20961	2.6
7	0.20985	2.6
8	0.20998	2.6

Dari Tabel 3 dapat dilihat terjadi perbedaan perpindahan maksimum antara simulasi pertama dan ke-dua. Pada simulasi pertama perpindahan terbesar terjadi hanya pada satu tingkat saja. Akan tetapi pada simulasi ke-dua perpindahan terbesar terjadi

pada lima tingkat bangunan. kelima tingkat tersebut adalah tingkat ke-4, ke-5, ke-6, ke-7 dan ke-8. Dimana rata-rata nilai perpindahannya adalah 0.20963 cm yang terjadi pada waktu yang sama yaitu saat $t = 2.6$ sekon.

3. Gaya Geser

Perpindahan yang terjadi pada masing-masing tingkat bangunan disebabkan adanya gaya yang mempengaruhinya. Gaya tersebut adalah gaya geser yang terjadi pada masing-masing tingkat. Dari hasil perhitungan numerik diperoleh grafik gaya geser dan besar gaya masing-masing tingkat bangunan. Pada simulasi pertama nilai massa pada masing-masing tingkat sama. Grafik gaya geser untuk simulasi pertama ditunjukkan pada Gambar 7.



Sedangkan untuk besar gaya geser pada masing-masing tingkat pada simulasi pertama ini ditunjukkan pada Tabel 5.

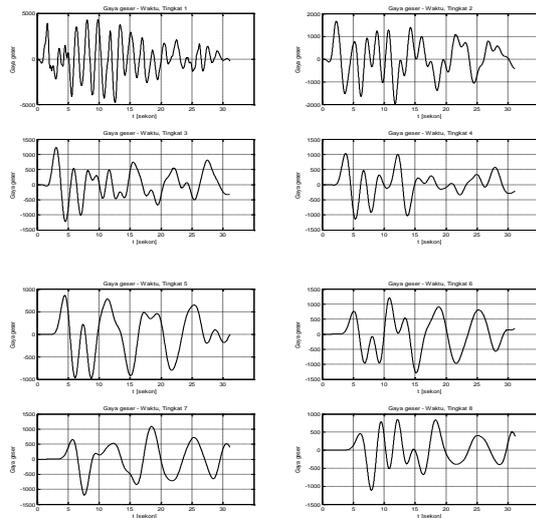
Tabel 5. Gaya geser pada masing-masing tingkat

Tingkat ke-	Gaya Geser (N)
1	4940.8951
2	1812.2756
3	1284.7753
4	1134.4161
5	1010.6403
6	1288.0119
7	1284.7193
8	1174.5441

Dari Tabel 5 dapat dilihat gaya geser terbesar terjadi pada tingkat paling bawah

yaitu tingkat pertama. Dimana besar nilai gaya gesernya adalah 4940.8951 N. Sedangkan gaya geser terkecil terjadi pada tingkat ke-5 yaitu sebesar 1010.6403 N.

Pada perhitungan numerik ke-dua nilai massa diubah dan lebih divariasikan. Seperti pada simulasi pertama, diperoleh juga grafik gaya geser dan besarnya gaya geser pada masing-masing tingkat bangunan untuk simulasi ke-dua. Grafik gaya geser masing-masing tingkat bangunan untuk simulasi ke-dua ditunjukkan pada Gambar 8.



Gambar 8. Grafik gaya geser masing-masing tingkat untuk simulasi ke-dua.

Sedangkan untuk nilai gaya geser pada masing-masing tingkat pada simulasi yang ke-dua ini ditunjukkan pada Tabel 6.

Tabel 6. Gaya geser pada masing-masing tingkat

Tingkat ke-	Gaya Geser (N)
1	4781.3698
2	1984.6008
3	1230.958
4	1143.8438
5	979.4314
6	1288.6258
7	1187.5364
8	1116.9304

Dari Tabel 6 dapat dilihat gaya geser terbesar tetap terjadi pada tingkat pertama. Akan tetapi terjadi penurunan besar nilai gaya gesernya. Terjadi penurunan sebesar 159.5253N, dimana besar nilai gaya gesernya

adalah 4781.3698 N. Sedangkan gaya geser terkecil juga tetap terjadi pada tingkat ke-5 yaitu sebesar 979.4314 N. Terjadi penurunan besar nilai gaya geser sebesar 31.2089 N.

KESIMPULAN DAN SARAN

Setiap parameter mempunyai peranan tersendiri pada struktur bangunan. Parameter-parameter tersebut mempengaruhi kinerja struktur bangunan pada saat ada beban lateral yang ditimbulkan oleh gempa bumi. Salah satu parameter yang berperan adalah massa. Massa pada masing-masing tingkat bangunan bertingkat sangat mempengaruhi respon struktur bangunan pada saat terjadi gempa bumi. Hal ini dapat dilihat dari nilai perpindahan dan besarnya gaya geser pada masing-masing tingkat bangunan.

Perpindahan terjadi karena adanya gaya lateral gempa bumi. Bangunan dengan nilai massa yang sama masing-masing tingkat cenderung mengalami perpindahan yang lebih stabil. Kondisi ini dapat dilihat nilai perpindahan maksimum masing-masing tingkat bangunan. Dimana nilai perpindahan terbesar hanya terdapat pada satu tingkat saja yaitu pada tingkat ke-8 dengan nilai perpindahannya sebesar 0.25806 cm yang terjadi pada saat $t = 27.14$ sekon. Sedangkan bangunan dengan nilai massa yang bervariasi pada beberapa tingkat cenderung kurang stabil. Kondisi ini ditunjukkan oleh perpindahan maksimum yang terjadi pada lima tingkat bangunan. Kelima tingkat tersebut yaitu tingkat ke-4, ke-5, ke-6, ke-7 dan ke-8. Dimana rata-rata nilai perpindahannya adalah 0.20963 cm yang terjadi pada waktu yang sama yaitu saat $t = 2.6$ sekon.

Adanya gaya lateral gempa bumi juga menyebabkan adanya gaya pada masing-masing tingkat bangunan. Gaya pada masing-masing tingkat tersebut dikenal dengan gaya geser. Gaya geser pada bangunan dengan massa yang sama pada masing-masing tingkat terjadi pada tingkat pertama. Besar gaya geser pada tingkat pertama yaitu 4940.8951 N. Sedangkan gaya geser terkecil terjadi pada tingkat ke-5 yaitu sebesar 1010.6403 N.

Begitu juga gaya geser pada bangun dengan massa bervariasi pada beberapa tingkatnya. Gaya geser terbesar terjadi pada tingkat pertama dan gaya geser terkecil terjadi pada tingkat ke-5. Akan tetapi terjadi penurunan besar nilai gaya gesernya. Terjadi penurunan gaya geser sebesar 159.5253 N pada tingkat pertama. Sedangkan pada tingkat ke-5 terjadi penurunan gaya geser sebesar 31.2089 N. Dari kondisi ini dapat dilihat bahwa gaya geser terbesar selalu terjadi pada tingkat pertama. Hal ini disebabkan oleh hubungan langsung antara tingkat pertama dengan gaya lateral yang datang akibat gempa bumi. Untuk melihat pengaruh parameter struktur bangunan bertingkat selanjutnya dapat diteliti bagaimana pengaruh nilai kekakuan struktur bangunan.

DAFTAR PUSTAKA

- Araki, Y., & Hjelmstad, K. D. (2000). Criteria for assessing dynamic collapse of elastoplastic structural systems. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 29(8), 1177–1198.
- Badan Nasional Penanggulangan Bencana. (2018). *Info Bencana Lombok*. 1-2.
- Boen, T. (2006). Observed Reconstruction of Houses in Aceh Seven Months After the Great Sumatra Earthquake and Indian Ocean Tsunami of December 2004. *Earthquake Spectra*, 22(SUPPL. 3), 803–818.
- C. Amadio, M., & Fragiaco, S. R. (2003). The Effects of Repeated Earthquake Ground Motions on The Non-linear Response of SDOF Systems. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 32(2), 291–308.
- Drossaert, F. H., Giannopoulos, A., & Forde, M. C. (2018). The Detection of Abandoned Mineshafts by Railway Track Bed Using Transmitted Seismic Waves Using Broadside Shot Gathers. *Construction and Building Materials*, 183, 88–94.
- Dube, S. K. (2016). Earthquake in Nepal: A Miserable Environmental Hazard Visited by Nature. *Academic Voices: A Multidisciplinary Journal*, 5, 56–66.

- Gaillard, J. C., Clavé, E., Vibert, O., Azhari, D., Denain, J. C., Efendi, Y., Grancher D., Liamzon, C. C., Sari D. R., & Setiawan, R. (2008). Ethnic Groups' Response to The 26 December 2004 Earthquake And Tsunami in Aceh, Indonesia. *Natural Hazards*, 47(1), 17–38.
- H. Saeed, M. (2019). Simulation Two Storey House Of Masonry Wall Under The Earthquake Load. *Djes*, 12(2), 1–12.
- Hitchman, S., van Wijk, K., & Davidson, Z. (2016). Monitoring Attenuation and The Elastic Properties of An Apple With Laser Ultrasound. *Postharvest Biology and Technology*, 121, 71–77.
- Housner, G. W., & Masri, S. F. (2000). Developments in the Usa in the Field of Structural Control and Monitoring of Civil Infrastructure Systems. 12th World Conference on Earthquake Engineering, 1–7.
- Hu, Y., Xia, J., Mi, B., Cheng, F., & Shen, C. (2018). A Pitfall of Muting and Removing Bad Traces in Surface-Wave Analysis. *Journal of Applied Geophysics*, 153(2017), 136–142.
- Kementerian Kesehatan RI. (2018). Update Bencana Sulawesi Tengah. Depkes.Go.Id, November. Retrieved from [https://www.depkes.go.id/resources/download/info-terkini/Gempa Tsunami Sulteng/Update Data Bencana Sulawesi Tengah-7 Nov 2018.pdf](https://www.depkes.go.id/resources/download/info-terkini/Gempa_Tsunami_Sulteng/Update_Data_Bencana_Sulawesi_Tengah-7_Nov_2018.pdf)
- Li, B., Duffield, C. F., & Hutchinson, G. L. (2008). Simplified Finite Element Modelling Of Multi-Storey Buildings: The Use Of Equivalent Cubes. *Electronic Journal of Structural Engineering*, 8(January), 40–45.
- Mazars, J., Kotronis, P., Ragueneau, F., & Casaux, G. (2006). Using Multifiber Beams to Account For Shear and Torsion. Applications to Concrete Structural Elements. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 195(52), 7264–7281.
- Nasution, B. (2016). Uji Respon Struktur Bangunan Bertingkat Terhadap Gempa Bumi Menggunakan Metode Elemen Hingga. *Prosiding SNIPS 2016*, 150–158.
- Norrie, D. H. (1987). A First Course in The Finite Element Method. *Finite Elements in Analysis and Design*, 3(2).
- Roylance, D. (2016). Finite Element Analysis. *Musculoskeletal Research and Basic Science*, 51–59.
- Shariq, M., Haseeb, S., & Arif, M. (2017). Analysis of Existing Masonry Heritage Building Subjected to Earthquake Loading. *Procedia Engineering*, 173, 1833–1840.
- Sołtysik, B., Falborski, T., & Jankowski, R. (2017). Preventing of Earthquake-Induced Pounding Between Steel Structures by Using Polymer Elements-Experimental Study. *Procedia Engineering*, 199, 278–283.
- Suárez, G., Santoyo, M. A., Hjorleifsdottir, V., Iglesias, A., Villafuerte, C., & Cruz-Atienza, V. M. (2019). Large Scale Lithospheric Detachment of The Downgoing Cocos Plate: The 8 September 2017 Earthquake (M W 8.2). *Earth and Planetary Science Letters*, 509, 9–14.
- Yu, E., Whang, D. H., Venugopal, R., Stewart, J. P., & Wallace, J. W. (2004). Force-Vibration Testing Of Buildings Using The Linear Shaker Seismic Simulation (LSS) Testing Method. *Building*, 2206.