

Model Matematika Pengaruh Gempabumi Terhadap Bangunan Bertingkat

Latifah Hanum^{#1}, Muhammad Subhan^{*2}

*#Jurusan Matematika, Universitas Negeri Padang
Jl.Prof.Hamka,Padang,Sumatera Barat, Indonesia 25131*

¹latiifahhanum@gmail.com

²13subhan@fmipa.unp.ac.id

Abstract — Earthquakes have an impact on building damage. Buildings with low-rise floors are often found to be damaged more than multi-storey buildings. The aim of the research is to investigate the movement of the building floor to see the structure response of building to the earthquake. Research on mathematical models of the effect of earthquakes on multi-storey buildings involves a system of differential equation which is solved by applying the eigenvalue method and eigenvector. The effect of coulomb damping is also incorporated in this study. The results of the study will show the history of displacement time, velocity, and acceleration of each building floor to earthquake loads and the relationship between natural frequency and earthquake time period.

Keywords — Mathematical Modelling, Earthquake, Coulomb Damping.

Abstrak — Gempa bumi berdampak pada kerusakan bangunan. Bangunan yang memiliki lantai bertingkat rendah sering ditemukan mengalami kerusakan dibanding bangunan bertingkat banyak. Maka dari itu tujuan dibentuk model matematika adalah untuk menyelidiki pergerakan lantai bangunan untuk melihat respon struktur bangunan terhadap gempa. Penelitian model matematika pengaruh gempabumi terhadap bangunan tinggi berbentuk sistem persamaan diferensial yang diselesaikan dengan mengaplikasikan metode nilai eigen dan vektor eigen. Pengaruh dari redaman *coulomb* juga diperhatikan dalam penelitian ini. Hasil dari penelitian akan memperlihatkan riwayat waktu perpindahan, kecepatan, dan percepatan tiap lantai bangunan terhadap beban gempa serta keterkaitan antara frekuensi natural dan periode waktu gempa.

Kata Kunci — Pemodelan Matematika, Gempa, Redaman *Coulomb*.

PENDAHULUAN

Gelombang getaran akibat pelepasan energi dari pusat gempa yang sampai ke permukaan bumi disebut gempabumi. Gelombang tersebut merambat ke permukaan tanah sehingga membuat bangunan di atasnya ikut bergetar [1]. Tanah yang bergetar akibat gempa bumi akan bergerak di sekitar frekuensi alaminya. Frekuensi alami adalah frekuensi yang secara alami cenderung untuk bergetar jika struktur bangunan tersebut terkena gangguan. Apabila frekuensi alami dari tanah mendekati atau sama dengan frekuensi alami bangunan dapat dikatakan tanah dan bangunan tersebut berada pada resonansi yang sama [2].

Resonansi yang terjadi akan memperkuat respon bangunan. Maka bangunan dengan frekuensi yang dekat atau sama dengan frekuensi tanah akan cenderung mendapat kerusakan yang lebih parah. Gerakan permukaan bumi akibat pergeseran lempeng akan menciptakan gaya inersia pada struktur bangunan karena terdapat kecenderungan massa bangunan (struktur) untuk mempertahankan dirinya. Besarnya gaya inersia horizontal (F) tergantung dari massa bangunan (m), percepatan permukaan (a) dan sifat dari struktur.

Dalam dunia nyata semua struktur tidaklah benar-benar sebagai massa yang kaku tetapi fleksibel. Suatu bangunan bertingkat banyak dapat bergetar dengan berbagai bentuk karena gaya gempa yang dapat menyebabkan lantai pada berbagai tingkat mempunyai percepatan dalam arah yang berbeda-beda [3]. Sangat mungkin keruntuhan bangunan akibat gempa bumi yang datang secara tiba-tiba memakan korban jiwa. Untuk meminimalisir tingkat kerusakan akibat gempa bumi arsitek perlu membuat bangunan yang telah memenuhi syarat perancangan struktur bangunan tahan gempa.

Kesalahpahaman konsep umum dalam masyarakat adalah menganggap bangunan yang lebih tinggi akan mengalami kerusakan lebih parah dari bangunan yang lebih pendek. Dikutip dari Kompas.com pada Rabu, 2 September 2019 gempa di Tasikmalaya memberikan gambaran mencolok yang bertentangan dengan konsep ini. Persentase bangunan yang runtuh selama gempa ini berada sekitar sepuluh tingkat ke bawah. Gedung-gedung bertingkat lainnya, dari ketinggian yang berbeda (beberapa lebih besar dari dua puluh lantai) dan dengan karakteristik getaran yang berbeda, sering ditemukan tidak rusak meskipun mereka terletak tepat di sebelah dua puluh gedung-gedung bertingkat yang rusak.

Bangunan bertingkat adalah bangunan yang mempunyai lantai lebih dari satu secara vertikal. Bangunan dengan ketinggian di atas 40 meter digolongkan ke dalam bangunan bertingkat dikarenakan perhitungan strukturnya lebih kompleks. Berdasarkan jumlah lantai, bangunan bertingkat digolongkan menjadi bangunan bertingkat rendah (2 – 4 lantai) dan bangunan bertingkat banyak (5 – 10 lantai) dan bangunan pencakar langit. Pembagian ini disamping didasarkan pada sistem struktur juga persyaratan sistem lain yang harus dipenuhi dalam bangunan [4].

Dalam kenyataannya bangunan memiliki lantai yang berbeda. Maka semakin banyak jumlah lantainya semakin banyak pula derajat kebebasannya. Sehingga untuk menganalisa pergerakan bangunan bertingkat dengan n -lantai disederhanakan dengan cara mengidealisasikan bangunan dengan derajat kebebasan banyak atau MDOF (*Multi Degree of Freedom*) [5]. Untuk menyelidiki gerakan berbagai lantai bangunan bertingkat tersebut dengan memasukkan efek gempa sebagai getaran paksa periodik dan redaman *coulomb* sebagai peredam yang bekerja pada bangunan. Persamaan yang digunakan untuk menggambarkan getaran gempa pada bangunan bertingkat tinggi adalah persamaan diferensial [6]. Persamaan ini memperlihatkan bagaimana getaran gempa mempengaruhi tiap-tiap lantai di gedung bertingkat tinggi dengan adanya efek redaman.

Model matematika yang didapat akan dianalisis kestabilannya dan diinterpretasikan. Simulasi juga digunakan untuk memperlihatkan perubahan perpindahan, kecepatan dan percepatan tiap lantai bangunan. Dalam penelitian ini model matematika diharapkan dapat membantu menyelidiki respon bangunan terhadap getaran gempa dan membuktikan bagaimana bangunan dengan tingkat berbeda memberikan respon yang berbeda. Pengaruh redaman *coulomb* [7] juga diperhatikan dalam penelitian ini.

METODE

Penelitian ini merupakan penelitian dasar. Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah metode deskriptif dengan melihat teori-teori yang relevan. Studi kepustakaan dilakukan dengan mengkaji dan mempelajari buku-buku dan sumber-sumber lainnya yang berkaitan dengan upaya penanggulangan kerusakan bangunan akibat gempa. Cara peninjau permasalahan yang dihadapi yaitu dengan mempelajari fenomena pengaruh bencana gempa terhadap bangunan bertingkat. Kemudian ditelaah faktor-faktor untuk membuat asumsi-asumsi variabel dan parameter untuk membantu membentuk model matematika pengaruh gempa terhadap bangunan bertingkat. Berdasarkan asumsi, variabel, dan parameter

dibentuk model matematika. Model kemudian dianalisis dan hasil dari analisis diinterpretasikan sehingga didapat kesimpulan.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Dalam pembentukan model matematika untuk menentukan gaya yang bekerja pada bangunan bertingkat digunakan asumsi sebagai berikut:

1. Massa total struktur dipusatkan pada bidang lantai $m_1, m_2, m_3, \dots, m_n$ dari masing-masing tingkat (*lumped mass*).
2. Gaya pemulih linear terjadi di tiap lantai yang digabungkan oleh faktor kekakuan $k_1, k_2, k_3, \dots, k_n$.
3. Terdapat kekuatan redaman yang berbanding lurus dengan redaman konstan $c_1, c_2, c_3, \dots, c_n$ antara lantai-lantai.
4. Sebuah osilasi gempa horizontal sebesar $A \cos \omega t$ dari tanah dengan amplitudo A dan percepatan $a = -A\omega^2 \cos \omega t$ menghasilkan sebuah gaya $F = ma = -mA\omega^2 \cos \omega t$ di tiap lantai bangunan.

Untuk membantu analisis perlu adanya variabel dan parameter. Untuk membentuk model fenomena gempa dalam arah horizontal, variabel-variabel yang digunakan adalah sebagai berikut

TABEL I
VARIABEL

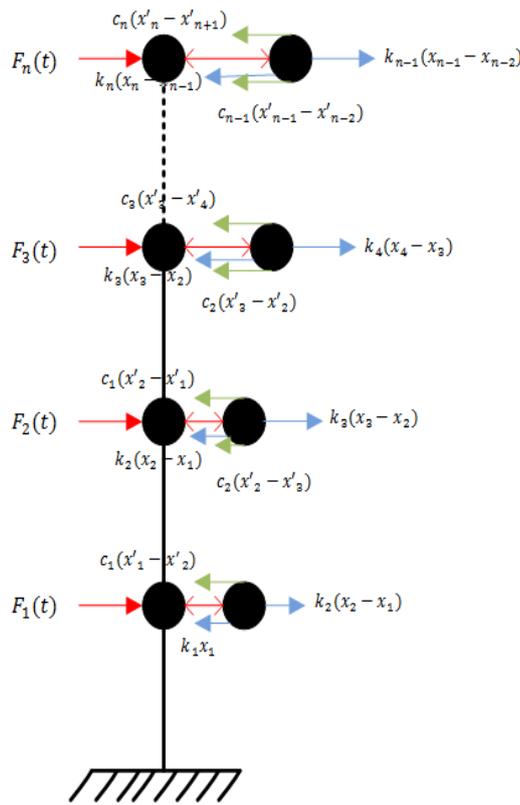
Simbol	Uraian	Satuan
x	Perpindahan relatif massa system	M
x'	Kecepatan relatif massa system	m/s
x''	Percepatan relatif massa system	m/s^2

Parameter-parameter yang digunakan adalah sebagai berikut

TABEL II
PARAMETER

Simbol	Uraian	Satuan
k	Konstanta kekakuan bangunan	N/m
c	Koefisien redaman	$N s/m$
m	Massa bangunan	Kg
F	Gaya eksternal yang bekerja pada tiap lantai bangunan	N

Berdasarkan asumsi yang dibangun dapat dibentuk model bangunan n -lantai dengan adanya pengaruh gempa



Gambar. 1 Model Matematika Bangunan n-lantai

Gambar 1 memperlihatkan gaya-gaya yang bekerja pada struktur bangunan dengan n -lantai. Pergerakan getaran akibat gempa bumi yang berasal dari tanah merambat ke permukaan hingga ke lantai dasar bangunan. Hanya saja gaya yang bekerja pada lantai dasar tidak menjadi perhatian karena getaran yang terjadi pada lantai dasar didistribusikan langsung oleh struktur lantai satu, sehingga dalam penelitian dimulai dengan melihat respon lantai satu terhadap gempa.

Sesuai dengan Hukum Newton II dibentuk resultan gaya dengan menjabarkan gaya-gaya yang bekerja pada lantai-lantai bangunan, sehingga menghasilkan persamaan berikut:

1. Persamaan kesetimbangan dinamis lantai 1

$$m_1 x_1'' = -k_1 x_1 + k_2(x_2 - x_1) - c_1(x'_1 - x'_2) + m_1 A \omega^2 \cos \omega t$$
2. Persamaan kesetimbangan dinamis lantai 2

$$m_2 x_2'' = -k_2(x_2 - x_1) + k_3(x_3 - x_2) - c_1(x'_2 - x'_1) - c_2(x'_2 - x'_3) + m_2 A \omega^2 \cos \omega t$$
3. Persamaan kesetimbangan dinamis lantai 3

$$m_3 x_3'' = -k_3(x_3 - x_2) + k_4(x_4 - x_3) - c_2(x'_3 - x'_2) - c_3(x'_3 - x'_4) + m_3 A \omega^2 \cos \omega t$$

Persamaan kesetimbangan dinamis tiap lantai, pada bangunan secara umum dapat ditulis dalam bentuk

$$\sum F_x = F_{K_i} + F_{C_i} + F_{I_i}$$

dengan

F_{K_i} = gaya kekakuan pada lantai ke- i

F_{C_i} = gaya redaman pada lantai ke- i

F_{I_i} = gaya luar yang bekerja pada lantai ke- i

Semua persamaan kesetimbangan dibentuk dalam matriks. Matriks massa (M) didapat dari massa tiap lantai bangunan.

$$M = \begin{bmatrix} m_1 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & m_2 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & m_3 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & m_4 & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & m_n \end{bmatrix}$$

Selanjutnya, matriks redaman (C) diperoleh dari redaman struktur tiap lantai bangunan yang saling berhubungan.

$$C = \begin{bmatrix} -c_1 & c_1 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ c_1 & -(c_1 + c_2) & c_2 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & c_2 & -(c_2 + c_3) & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \ddots & -(c_{n-1} + c_n) & c_{n-1} \\ 0 & 0 & 0 & \dots & c_{n-1} & -c_{n-1} \end{bmatrix}$$

Kemudian, matriks kekakuan (K) diperoleh dari kekakuan tingkat kolom-kolom tiap lantai bangunan.

$$K = \begin{bmatrix} -(k_1 + k_2) & k_2 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ k_2 & -(k_2 + k_3) & k_3 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & k_3 & -(k_3 + k_4) & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \ddots & -(k_{n-1} + k_n) & k_n \\ 0 & 0 & 0 & \dots & k_n & -k_n \end{bmatrix}$$

Matriks gaya luar (F) tiap lantai bangunan berasal dari luar bangunan yang berlawanan arah dengan gaya inersia bangunan.

$$F = \begin{bmatrix} m_1 A \omega^2 \cos \omega t \\ m_2 A \omega^2 \cos \omega t \\ m_3 A \omega^2 \cos \omega t \\ \vdots \\ m_n A \omega^2 \cos \omega t \end{bmatrix}$$

Vektor perpindahan, kecepatan, dan percepatan menunjukkan arah dari gerakan.

$$\text{Vektor perpindahan } x = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix}$$

$$\text{Vektor kecepatan } x' = \begin{bmatrix} x'_1 \\ x'_2 \\ x'_3 \\ \vdots \\ x'_n \end{bmatrix}$$

$$\text{Vektor percepatan } x'' = \begin{bmatrix} x''_1 \\ x''_2 \\ x''_3 \\ \vdots \\ x''_n \end{bmatrix}$$

Berdasarkan persamaan kesetimbangan tiap lantai, secara umum persamaan gerak bangunan dapat ditulis dalam bentuk notasi matriks sebagai berikut

$$Mx'' = Cx' + Kx + F \quad (1)$$

Persamaan (1) merupakan suatu sistem persamaan diferensial non-linear dimana persamaan ini adalah model matematika pengaruh gempa bumi terhadap bangunan bertingkat.

Untuk mendapatkan invers matriks (M^{-1}) dengan mengganti tiap elemen diagonal dengan kebalikannya. Perkalian dengan tiap suku menjadikan M^{-1} berorde dua dan menghasilkan persamaan berikut

$$x'' = Px + Qx' + f = 0 \quad (2)$$

dengan $P = M^{-1}K$, $Q = M^{-1}C$, $f = M^{-1}F$

Akan dicari solusi untuk persamaan differensial homogen

$$x'' - Px - Qx' = 0 \quad (3)$$

Untuk solusi homogen dari persamaan (3) dapat digunakan solusi coba-coba berikut

$$x(t) = ve^{at} \quad (4)$$

dengan v merupakan vektor konstan. Substitusi persamaan (4) ke persamaan (3), sehingga didapat solusi sebagai berikut

$$(\alpha^2 I - \alpha P - Q)ve^{at} \quad (5)$$

dengan I merupakan identitas matriks.

Kemudian untuk mendapatkan solusi non-trivial dari persamaan (2) dengan mencari determinan dari persamaan (5)

$$\det(\alpha^2 I - \alpha P - Q) = 0 \quad (6)$$

Sistem pada persamaan (3) dapat diselesaikan dengan cara mereduksi persamaan dari persamaan differensial orde-2 ke persamaan differensial orde-1.

$$x'' = px'' + qx$$

Misalkan $x' = y$ dan $x'' = y'$

$$x'' = px' + qx$$

$$y' = py + qx$$

$$y' = qx + py$$

Dari persamaan dapat dibentuk matriks blok untuk memudahkan perhitungan sebagai berikut

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & I \\ Q & P \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} \Rightarrow X = JX$$

dengan J dan X merupakan matriks blok berukuran 2×2 dan 2×1 yang mempunyai entri $n \times 1$ dan $n \times n$.

Model dianalisis saat keadaan stabil dengan cara melihat nilai eigen dari matriks J pada persamaan yang diperoleh sebagai berikut

$$J = \begin{bmatrix} \frac{\partial(y)}{\partial x} & \frac{\partial(y)}{\partial y} \\ \frac{\partial(py + qx)}{\partial x} & \frac{\partial(py + qx)}{\partial y} \end{bmatrix}$$

$$J = \begin{bmatrix} 0 & I \\ Q & P \end{bmatrix}$$

$$\det(C - \lambda I) = 0$$

$$\det\left(\begin{bmatrix} 0 & I \\ Q & P \end{bmatrix} - \lambda \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}\right) = 0$$

$$\det\begin{bmatrix} -\lambda I & I \\ Q & P - \lambda I \end{bmatrix} = 0$$

$$\det(\lambda^2 I - P\lambda - Q) = 0$$

dengan ketiadaan redaman coulomb ($C = 0$), nilai eigen dari sistem persamaan bernilai negatif.

Misalkan $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \dots, \lambda_n$ adalah nilai eigen dari matriks $A = M^{-1}K$, maka didapatkan hasil berikut

$$\begin{aligned} Tr(A) = \sum_{i=1}^n \lambda_i = & -\left(k_1 \frac{1}{m_1} + k_2 \left\{ \frac{1}{m_1} + \frac{1}{m_2} \right\} + k_3 \left\{ \frac{1}{m_2} + \frac{1}{m_3} \right\} \dots \right. \\ & \left. + k_n \left\{ \frac{1}{m_{n-1}} + \frac{1}{m_n} \right\} \right) < 0 \end{aligned}$$

$$\det(A) = \prod_{i=1}^n \lambda_i = \det(M^{-1}K) = \det(M^{-1}) \det(K)$$

$$= \prod_{i=1}^n k_i \frac{(-1)^n}{\prod_{i=1}^n m_i}$$

M^{-1} adalah matriks diagonal dan K adalah matriks tridiagonal simetris. Oleh karena itu didapatkan nilai eigen λ_i yang real dan berbeda. Berbeda dengan kasus tidak adanya redaman *coulomb* dimana hanya ada nilai eigen real negatif, pada kasus adanya redaman *coulomb* nilai eigen boleh jadi berupa real atau kompleks..

Sifat dari nilai eigen itu sendiri akan menentukan jenis redaman yang terjadi pada sistem, apakah itu redaman *over damped*, *critical damped* atau *under damped*. Dalam kasus *under damped* nilai eigen menjadi akar konjugat yang kompleks, bagian sebenarnya dari nilai eigen yang membuat amplitudo osilasi berkurang secara eksponensial terhadap waktu dan bagian imajiner menjelaskan frekuensi semu dari osilasi (Ω). Oleh karena itu, dengan adanya redaman *coulomb*, lantai bangunan bergetar dan berhenti beberapa saat sebelum semua bagian dari bangunan benar-benar berhenti.

Sehingga sistem pada persamaan (2) dapat ditulis sebagai berikut

$$x'' = Px' + Qx = (A\omega^2 \cos \omega t)B \quad (7)$$

dimana $B = [1 \ 1 \ 1 \ \dots \ 1]^T$

Untuk mendapatkan solusi khusus dari persamaan diatas, dengan menggunakan metode koefisien tak tentu didapatkan solusi

$$x_p(t) = c \cos \omega t + d \sin \omega t \quad (8)$$

Substitusikan solusi persamaan (9) yang telah didapat ke persamaan (8) dengan menyamakan koefisien sehingga diperoleh

$$-(c\omega^2 + Pd\omega - Q)\cos\omega + (-d\omega^2 + Pc\omega - Qd)\sin\omega = (A\omega^2 \cos\omega t)B$$

$$d = \omega(Q + I\omega^2)^{-1}Pc \quad (10)$$

$$c = [\omega^2 P(Q + I\omega^2)^{-1}P + (Q + I\omega^2)]^{-1}F_0 \quad (11)$$

dimana $F_0 = -A\omega^2 B$

Dalam kasus redaman tidak ada fenomena resonansi yang memiliki frekuensi alami sama dengan frekuensi gempa. Namun, dalam penelitian ini membantu untuk melihat resonansi dimana amplitudo getaran bangunan tetap terbatas untuk nilai ω (frekuensi gempa bumi) tetapi mungkin mencapai nilai maksimum. Frekuensi gempa bumi yang terjadi tidak sama persis sesuai dengan frekuensi alami bangunan tetapi hampir sama atau berdekatan.

Berdasarkan pada analisis dan pembahasan yang telah dilakukan dapat diinterpretasikan bahwa gempa bumi mempunyai pengaruh yang besar terhadap kerusakan bangunan. Variabel ω^2 adalah nilai eigen yang merupakan frekuensi natural sistem. Namun dengan adanya redaman *coulomb* dapat mengurangi dampak tersebut. Redaman akan mengurangi getaran sehingga getaran akan berhenti dengan cepat sebelum merambat ke struktur bangunan pada lantai yang lebih tinggi. Redaman berperan untuk membuat periode waktu gempa yang maksimum dengan amplitudo kecil sehingga beresonansi dengan lantai bawah.

Maka dari itu perlu perancangan struktur tahan gempa sudah harus dipertimbangkan pada bangunan-bangunan tinggi dengan desain yang berbeda-beda. Dengan melihat aspek perancangan yang memadai dan material sesuai dengan standar keamanan. Untuk melihat lebih jelas bagaimana gempabumi mempengaruhi kestabilan bangunan dengan adanya redaman dan tanpa adanya redaman akan disimulasikan bentuk bangunan bertingkat.

Simulasi dilakukan dengan memberikan nilai untuk masing-masing parameter. Pada bangunan ini akan diasumsikan tiap lantai mempunyai bentuk dan massa yang sama.



Gambar. 2 Model Bangunan Persegi Panjang

Sehingga mempunyai massa $m_1 = m_2 = m_3 = \dots = m_n$ dan nilai parameter yang digunakan adalah $m = 1000$, $k = 10000$ dan $c = 500$ untuk tiap lantai bangunan.

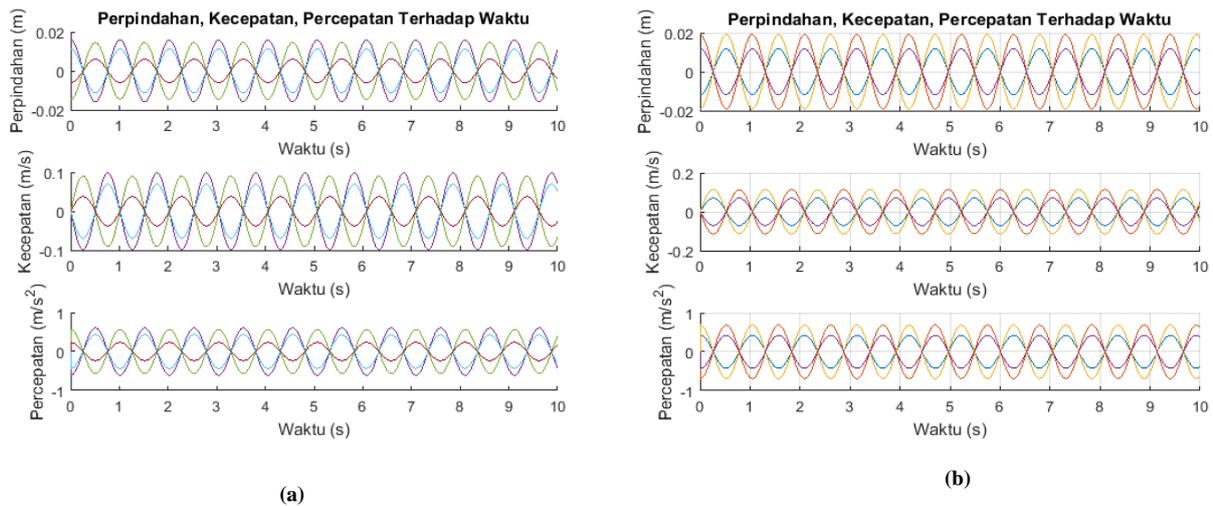
Berdasarkan nilai parameter m, k dan c akan didapat nilai frekuensi angular dan periode waktu untuk tujuh lantai dan empat lantai bangunan menggunakan persamaan (6) dan ditabulasikan ke dalam table III.

TABEL III
TABULASI DATA SIMULASI BANGUNAN PERSEGI PANJANG

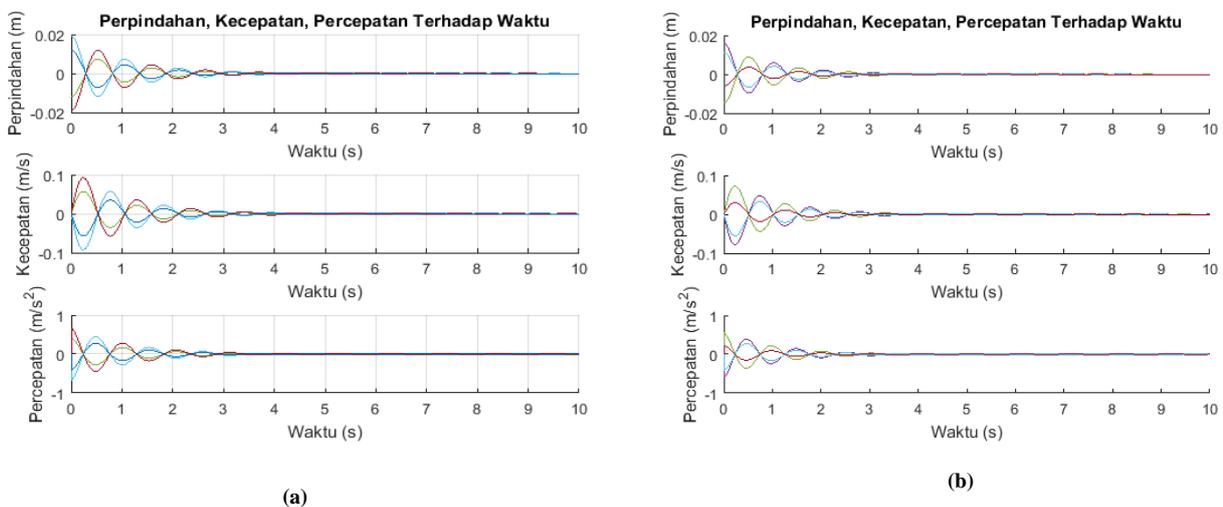
Dengan Redaman				Tanpa Redaman			
Tujuh Lantai		Empat Lantai		Tujuh Lantai		Empat Lantai	
ω	T	ω	T	ω	T	ω	T
6,11	1,03	5,87	1,07	0,66	9,50	1,10	5,72
5,71	1,10	4,81	1,31	1,95	3,21	3,16	1,99
5,07	1,24	3,15	1,99	3,16	1,99	4,84	1,30
4,20	1,49	1,10	5,72	4,23	1,48	5,94	1,06
3,15	1,99	-	-	5,12	1,23	-	-
1,95	3,22	-	-	5,78	1,09	-	-
0,66	9,51	-	-	6,19	1,02	-	-

Dari tabel III dan gambar 2 dan 3 di bawah dapat kita lihat bahwa gempa dengan periode waktu sekitar 2 detik akan beresonansi dengan bangunan berlantai tujuh dan berlantai empat. Tetapi gempa dengan periode waktu sekitar 5,7 detik akan beresonansi dengan bangunan berlantai empat yang memiliki redaman dan juga gempa dengan waktu 5,7 detik akan memberikan dampak yang lebih parah kepada bangunan berlantai empat jika dibandingkan dengan gempa dengan periode waktu 3,54 detik yang beresonansi dengan bangunan berlantai tujuh.

Bentuk fungsi terhadap waktu digambarkan pada gambar (2) dan (3) berikut



Gambar. 3 Respon Bangunan Tanpa Peredam (a) Tujuh Lantai (b) Empat Lantai



Gambar. 4 Respon Bangunan Dengan Peredam (a) Tujuh Lantai (b) Empat Lantai

SIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan diperoleh kesimpulan bahwa model matematika pengaruh gempa bumi terhadap bangunan bertingkat berbentuk persamaan diferensial non-linier yang dapat dituliskan sebagai berikut

$$Mx'' = Cx' + Kx + F$$

dengan

- x = Perpindahan relatif massa sistem (m)
- x' = Kecepatan relatif massa sistem (m/s)
- x'' = Percepatan relatif massa sistem (m/s²)
- k = Konstanta Kekakuan bangunan (N/m)
- c = Koefisien redaman (N s/m)
- m = Massa bangunan (Kg)
- F = Gaya eksternal yang bekerja pada tiap lantai bangunan (N)

Interpretasi dari model matematika pengaruh gempa bumi terhadap bangunan bertingkat yaitu massa (m), kekakuan (k), dan redaman (c) bangunan akan memberikan pengaruh yang berbeda terhadap respon struktur. Semakin besar massa bangunan, maka semakin

besar pula perpindahan maksimum yang dihasilkan. Bangunan dengan jumlah lantai yang lebih rendah tidak menjamin bahwa bangunan akan mengalami kerusakan lebih sedikit dari bangunan yang lebih tinggi Redaman *coulomb* berpengaruh terhadap stabilitas bangunan.

REFERENSI

- [1] Sunarjo, M. G. (2012). *Gempa Bumi Edisi Populer*. Jakarta: Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika. Newton
- [2] Wahyuni, E. (2012). Studi Kelakuan Dinamis Struktur Jembatan Penyeberangan Orang (JPO). *Jurnal Teoretis dan Terapan Bidang Rekayasa Sipil*.
- [3] Wibowo, E. (2016, Agustus 5). *Pengaruh Gempa Terhadap Bangunan*. Dipetik Desember 7, 2019, dari Geomedia: <https://geo-media.blogspot.com>
- [4] Cholis Idham P, Noor. (2012). *Merancang Bangunan Gedung Bertingkat Rendah*. Yogyakarta: Graha Ilmu.
- [5] Young, H., & Freedman, R. (1996). *Fisika Universitas Jilid I*. Jakarta: Erlangga.
- [6] Santosa, W., & Pamuntjak, R. (1999). *Persamaan Diferensial Biasa*. DEPDIKBUD.
- [7] Tivani, A. (2017). *Pemodelan dan Analisis Pengaruh Penambahan Tuned Mass Damper-Coulomb Damping Sebagai Peredam Getaran Pada Turbin Angin Tipe WES80*. Surabaya: Institut Teknologi Sepuluh Noverber.