

ANALISIS RESPON SIMPANGAN 2 ARAH STRUKTUR BANGUNAN BERATURAN DENGAN MEMPERHITUNGKAN ROTASI FONDASI

Vito Eryan¹, dan Widodo Pawirodikromo²

¹ Mahasiswa Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Islam Indonesia

Email: 14511266@students.uii.ac.id

² Staf Pengajar Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Islam Indonesia

Email: 785110201@uui.ac.id

Abstract: *Indonesia located in the border of 3 large tectonic plates, the Indo-Australian, Eurasian, and Pacific Plate so Indonesia is prone to earthquakes attack. Earthquake motions occur in 3 directions (3D), vertical, x direction, and y direction. Earthquake motions has a variety of frequency content and the structure response will be maximum when structure frequency resonate with earthquake frequency content. Most studies discuss about dynamic response of structures in buildings with variety frequency content. Simplification usually occurs in the analysis by assuming that a foundation perfectly fixed even though foundation can't be perfectly fixed by soil. Therefore, it is necessary to study the dynamic response of the structure to 2-direction earthquake motions and calculating the relationship between soil and foundations and earthquake frequency content. The structure in this study is 15-story building with mat foundation and the earthquake motions used in this study is an earthquake motions with a low, medium, and high frequency content. Earthquake motions occur in x direction and y direction with 2 types of load combinations. Then it will be compared the structure response with soil-foundation interaction, earthquake frequency content, and 2-directions earthquake motions. The mass, stiffness, and damping of the structure are calculated in 3 dimensions and the calculation of dynamic response is using the Time History analysis with β -Newmark method. In this study, the results show that low earthquake frequency content will generate the biggest drift in high buildings. The structure with soil-foundation interaction and fixed foundation is excited by frequency content.*

Keywords: *2-way dynamic response, earthquake frequency, foundation-soil interaction*

1. PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Gempa bumi merupakan bencana alam yang dapat menimbulkan kerusakan dan kerugian yang besar jika tidak ditangani dengan tepat. Gempa bumi terjadi akibat pergerakan lempeng-lempeng tektonik yang saling bertabrakan satu sama lain sehingga melepaskan gelombang energi yang begitu besar ke segala arah. Gelombang energi tersebut menimbulkan getaran pada

permukaan bumi dan dapat memicu terjadinya bencana alam yang lain seperti tanah longsor dan tsunami.

Indonesia adalah salah satu negara yang rawan terhadap terjadinya gempa bumi. Hal ini dikarenakan Indonesia dilalui oleh jalur pertemuan 3 (tiga) lempeng besar tektonik, yaitu lempeng: Indo-Australia, Eurasia, dan Pasifik. Oleh karena itu, bangunan yang ada di Indonesia harus di desain sedemikian rupa sehingga tahan terhadap bahaya gempa bumi.

Pada analisis dinamika struktur biasanya terjadi penyederhanaan pada fondasi bangunan agar analisis perhitungan menjadi lebih mudah. Fondasi struktur bangunan umumnya dianggap dijepit secara kaku oleh tanah. Namun, anggapan ini kurang tepat karena tanah bukanlah material yang dapat menjepit fondasi dan kolom secara kaku.

Wibowo dan Auzzami (2003) pernah meneliti tentang respon dinamik struktur bangunan dengan memperhitungkan rotasi pada fondasi, tetapi kekakuan struktur atas bangunan dihitung menggunakan metode kekakuan *shear building*, nilai kekakuan dan redaman tanah tidak diperhitungkan secara pasti, dan analisa struktur menggunakan model bangunan 2 dimensi (2D) dengan meninjau bangunan pada arah sumbu terkuatnya saja dengan gaya gempa 1 arah.

Penelitian tentang analisis dinamik struktur bangunan dengan memperhitungkan pengaruh interaksi antara tanah dengan fondasi diperlukan untuk mengatasi masalah yang diuraikan di atas terutama interaksi tanah dengan fondasi berupa rotasi fondasi dengan menggunakan parameter gerakan tanah berupa kekakuan dan redaman tanah kemudian variasi pembebanan gempa dilakukan 2 (dua) arah yaitu pembebanan dominan searah sumbu X dan pembebanan dominan searah sumbu Y.

1.2. Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian tugas akhir ini adalah sebagai berikut.

1. Mengetahui respon dinamik (simpangan) struktur bangunan beraturan bertingkat banyak terhadap beban gempa 2 (dua) arah.
2. Mengetahui respon dinamik (simpangan) struktur bangunan beraturan bertingkat banyak jika pengaruh penggunaan nilai kekakuan dan redaman interaksi antara tanah dengan fondasi diperhitungkan.
3. Mengetahui respon dinamik (simpangan) struktur bangunan beraturan bertingkat banyak terhadap pengaruh kandungan frekuensi beban gempa.

2. LANDASAN TEORI

2.1. Karakteristik Dinamik Struktur Bangunan Gedung

Pada persamaan differensial analisis dinamika struktur melibatkan 3 properti utama suatu struktur yaitu massa, kekakuan, dan redaman. Ketiga properti ini disebut sebagai karakteristik dinamik struktur.

1. Massa Struktur

Massa menggunakan sistem *lumped mass* dimana massa dianggap menggumpal pada tempat tertentu dengan matriks diagonal.

$$m = \frac{W}{g} \quad (1)$$

dengan m = massa struktur (kg dt²/cm), W = berat beban gravitasi (kg), dan g = percepatan gravitasi (cm/dt²).

2. Kekakuan Struktur

Kekakuan kolom menggunakan metode Muto. Muto (1975) dalam Pawirodikromo (2017) memperhitungkan kekakuan balok, dalam hal ini join-join dapat berotasi. Pada perhitungan kekakuan balok, inersia balok menggunakan balok tampang T. Rumus yang digunakan untuk menghitung kekakuan Muto ini adalah sebagai berikut.

$$K_m = C_m \times K_f \quad (2)$$

$$K_f = \frac{12EI}{h^3} \quad (3)$$

dengan K_m = kekakuan Muto (kg/cm), C_m = koefisien Muto, dan K_f = kekakuan *shear building* (kg/cm).

3. Redaman Struktur

Redaman adalah peristiwa pelepasan/disipasi energi oleh struktur. Untuk memodelkan redaman sebuah struktur digunakan nilai rasio redaman (*damping ratio*) ξ . Pada penelitian ini digunakan nilai rasio redaman 5 % karena merupakan struktur beton dengan matriks redaman proporsional terhadap massa dan kekakuan (*mass and stiffness proportional damping*).

$$[C] = \alpha[M] + \beta[K] \quad (4)$$

dengan α dan β = koefisien, $[C]$ = matriks redaman, $[M]$ = matriks massa, dan $[K]$ = matriks kekakuan.

2.2. Getaran Bebas pada Struktur MDOF

Struktur MDOF adalah struktur yang memiliki jumlah tingkat lebih dari 1. Suatu struktur yang bergoyang dengan sistem getaran bebas akan berguna dalam menentukan nilai frekuensi sudut. Nilai tersebut akan diselesaikan melalui persamaan yang disebut *eigenproblem*. Penyelesaian persamaan ini menganggap struktur tidak mempunyai redaman yang dapat dilihat pada persamaan di bawah ini.

$$\begin{bmatrix} k1+k2 & -k2 & 0 \\ -k2 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & kn \end{bmatrix} - \omega^2 \begin{bmatrix} m1 & 0 & 0 \\ 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & mn \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \\ \theta_3 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (5)$$

$$[[K] - \omega^2[M]] = 0 \quad (6)$$

Penyelesaian persamaan 6 berikut akan menghasilkan nilai frekuensi sudut.

2.3. Karakteristik Dinamik Tanah

Karakteristik dinamik tanah meliputi modulus geser tanah (G) dan kecepatan gelombang geser (V_s).

1. Modulus Geser Tanah (G)

Nilai modulus geser tanah dapat dicari dari nilai modulus geser maksimumnya (G_o) yaitu nilai modulus geser tanah saat kondisi elastik dengan nilai regangan geser tanah sebesar 10^{-6} . Rumus modulus geser maksimum (G_o) menurut Hardin dan Black (1969) dalam Pawirodikromo (2012) yaitu,

$$G_o = 326 \cdot OCR^k \frac{(2,973-e)^2}{(1+e)} \bar{\sigma}_0^{0,5} \quad (7)$$

dengan G_o = modulus geser maksimum (kg/cm²), OCR = derajat konsolidasi, e = void ratio, k = koefisien, dan $\bar{\sigma}_0$ = effective confining pressure (kg/cm²). Selanjutnya, modulus geser setiap lapis di ekuivalenkan menjadi satu lapis saja.

2. Kecepatan Gelombang Geser (V_s)

Kecepatan gelombang geser dapat dihitung berdasarkan data properti tanah,

$$V_s = \sqrt{\frac{G_s}{\rho_s}} \text{ dan } \rho_s = \frac{\gamma_s}{g} \quad (8)$$

dengan V_s = kecepatan gelombang geser tanah, ρ_s = rapat massa tanah, dan γ_s = berat volume tanah. Selanjutnya, nilai kecepatan

gelombang geser dan rapat massa pada setiap lapisan tanah diekuivalenkan menjadi satu lapis tanah. Hal ini dilakukan untuk memudahkan perhitungan karakteristik dinamik interaksi tanah dengan fondasi.

2.4. Karakteristik Dinamik Struktur Tanah dengan Fondasi

Interaksi antara fondasi dengan tanah dipresentasikan melalui pegas dan dashpot yang menggambarkan kekakuan dan redaman interaksi tanah dengan fondasi yang disebut dengan *spring-mass-dashpot system*.

Dalam penelitian ini, fondasi yang digunakan berupa *mat foundation* berbentuk persegi panjang sehingga metode yang paling cocok digunakan adalah metode Gazetas (1991) yang merupakan fungsi impedansi. Pada penelitian ini, getaran arah vertikal dapat diabaikan karena pengaruhnya terhadap respon struktur relatif kecil dan torsi belum diperhitungkan sehingga penelitian ini hanya menggunakan kekakuan dan redaman arah horizontal dengan pengaruh rotasi.

1. Kekakuan Horizontal

Kekakuan horizontal arah sumbu y pada fondasi yang tertanam,

$$K_{y,emb} = K_y \left[1 + 0,15 \left(\frac{D}{B} \right)^{0,5} \right] \left[1 + 0,52 \left(\frac{h A_w}{B L^2} \right)^{0,4} \right] \quad (9)$$

dengan K_y = kekakuan horizontal arah sumbu y (kg/cm) dan $K_{y,emb}$ = kekakuan horizontal fondasi tertanam arah sumbu y (kg/cm). Kekakuan horizontal arah sumbu x pada fondasi yang tertanam,

$$K_{x,emb} = K_x \left(\frac{K_{y,emb}}{K_y} \right) \quad (10)$$

Dengan K_x = kekakuan horizontal arah sumbu x (kg/cm), K_y = kekakuan horizontal arah sumbu y (kg/cm), dan $K_{x,emb}$ = kekakuan horizontal fondasi tertanam arah sumbu x (kg/cm).

2. Kekakuan Rotasi

Kekakuan rotasi searah sumbu y pada fondasi yang tertanam dengan,

$$K_{ry,emb} = K_{ry} \left\{ 1 + 1,26 \left(\frac{d}{B} \right) \left[1 + \left(\frac{d}{B} \right)^{-0,2} \left(\frac{B}{L} \right)^{0,5} \right] \right\} \quad (11)$$

dengan K_{ry} = kekakuan rotasi searah sumbu y (kg/rad) dan $K_{ry,emb}$ = kekakuan rotasi fondasi tertanam searah sumbu y (kg/rad). Kekakuan rotasi searah sumbu x pada fondasi yang tertanam dengan,

$$K_{rx,emb} = K_{rx} \left\{ 1 + 0,92 \left(\frac{d}{L} \right)^{0,6} \left[1,5 + \left(\frac{d}{L} \right)^{1,9} \left(\frac{d}{L} \right)^{-0,6} \right] \right\} \quad (12)$$

dengan K_{rx} = kekakuan rotasi searah sumbu x (kg/rad) dan $K_{rx,emb}$ = kekakuan rotasi fondasi tertanam searah sumbu x (kg/rad).

3. Redaman Horizontal

Redaman horizontal arah sumbu y pada fondasi yang tertanam dengan,

$$C_{y,emb} = C_y + 4\rho V_s B d + 4\rho V_{LA} L d \quad (13)$$

Redaman horizontal arah sumbu x pada fondasi yang tertanam dengan,

$$C_{x,emb} = C_x + 4\rho V_{LA} B d + 4\rho V_{LA} L d \quad (14)$$

dengan $C_y = C_x$ = redaman horizontal arah sumbu y dan sumbu x (kg dt/cm), $C_{y,emb}$ = redaman horizontal fondasi tertanam arah sumbu y (kg dt/cm), $C_{x,emb}$ = redaman horizontal fondasi tertanam arah sumbu x (kg.dt/cm), dan $V_{LA} = \frac{3,4}{\pi(1-\nu)} V_s$ (cm/dt).

4. Redaman Rotasi

Redaman rotasi searah sumbu y pada fondasi yang tertanam dengan,

$$C_{ry,emb} = C_{ry} + \rho I_{bx} \left(\frac{d}{B} \right) \left[V_{LA} \left(\frac{d^2}{B^2} \right) + 3V_s + V_s \left(\frac{B}{L} \right) \left(1 + \left(\frac{d^2}{B^2} \right) \right) \right] \quad (15)$$

Redaman rotasi searah sumbu x pada fondasi yang tertanam,

$$C_{rx,emb} = C_{rx} + \rho I_{by} \left(\frac{d}{L} \right) \left[V_{LA} \left(\frac{d^2}{L^2} \right) + 3V_s + V_s \left(\frac{B}{L} \right) \left(1 + \left(\frac{d^2}{L^2} \right) \right) \right] \quad (16)$$

Dengan C_{ry} = redaman rotasi searah sumbu y (kg dt/rad), C_{rx} = redaman rotasi searah sumbu x (kg dt/rad), $C_{ry,emb}$ = redaman rotasi fondasi tertanam searah sumbu y (kg dt/rad), dan $C_{rx,emb}$ = redaman rotasi fondasi tertanam searah sumbu x (kg dt/rad).

2.5. Momen Inersia Polar (I_G)

Momen inersia polar adalah reaksi untuk melawan rotasi yang dipengaruhi oleh massa dan letak titik berat struktur. Momen inersia polar dapat dicari menggunakan persamaan,

$$I_G = I_{\theta x} + I_{\theta y} \quad (17)$$

$$I_{\theta x} = \frac{1}{12} m(a^2 + B^2) \quad (18)$$

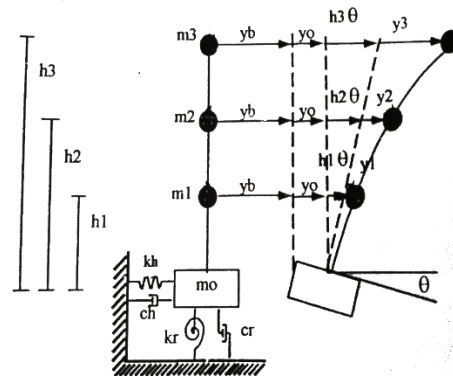
$$I_{\theta y} = \frac{1}{12} m(a^2 + L^2) \quad (19)$$

dengan I_G = momen inersia polar (kg dt² cm), $I_{\theta x} = I_{\theta y}$ = momen inersia massa terhadap sumbu x dan sumbu y (kg dt² cm), m = massa total bangunan + fondasi (kg.dt²/cm), a = tebal fondasi (cm), B = lebar fondasi (cm), dan L = panjang fondasi (cm).

2.6. Struktur dengan Rotasi Fondasi

Tanah tidak sepenuhnya bersifat kaku. Tanah akan mengalami respon dinamik ketika terjadi getaran akibat gerakan tanah. Struktur bergetar ke arah horizontal dan rotasi yang kemudian disebut dengan *rocking vibration*.

Pengaruh gerakan tanah yang mengakibatkan rotasi pada fondasi karena mengalami getaran arah horizontal dan rotasi pada struktur MDOF dapat dilihat pada Gambar 1 dengan persamaan matriks sebagai berikut.



Gambar 1 Struktur MDOF dengan Rotasi

(Sumber: Wibowo dan Auzzami, 2003)

$$\begin{bmatrix} m_1 & 0 & 0 & & & & m_1 h_1 \\ 0 & m_2 & 0 & & & & m_2 h_2 \\ 0 & 0 & m_3 & & & & m_3 h_3 \\ m_1 & m_2 & m_3 & m_o + m_1 + m_2 + m_3 & & & m_1 h_1 + m_2 h_2 + m_3 h_3 \\ m_1 h_1 & m_2 h_2 & m_3 h_3 & m_1 h_1 + m_2 h_2 + m_3 h_3 & I_G + m_1 h_1^2 + m_2 h_2^2 + m_3 h_3^2 & & \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{y}_1 \\ \ddot{y}_2 \\ \ddot{y}_3 \\ \ddot{y}_0 \\ \ddot{\theta} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} k_1 + k_2 & -k_2 & 0 & 0 & 0 \\ -k_2 & k_2 + k_3 & -k_3 & 0 & 0 \\ 0 & -k_3 & k_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & k_h & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & k_r \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \\ y_0 \\ \theta \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} c_1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & c_2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & c_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & c_h & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & c_r \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{y}_1 \\ \dot{y}_2 \\ \dot{y}_3 \\ \dot{y}_0 \\ \dot{\theta} \end{Bmatrix} = - \begin{Bmatrix} m_1 \ddot{y}_b \\ m_2 \ddot{y}_b \\ m_3 \ddot{y}_b \\ (m_o + m_1 + m_2 + m_3) \ddot{y}_b \\ (m_1 h_1 + m_2 h_2 + m_3 h_3) \ddot{y}_b \end{Bmatrix} \quad (20)$$

2.7. Metode Integrasi β -Newmark

Metode integrasi numerik β -Newmark digunakan untuk menyelesaikan persamaan dependen atau persamaan kopel. Metode ini cocok digunakan untuk menyelesaikan persamaan struktur MDOF karena memiliki persamaan differensial gerakan yang *dependent*. Apalagi penelitian ini juga memperhitungkan pengaruh interaksi tanah dengan fondasi sehingga struktur tidak memiliki standar *mode shapes* dan tidak dapat diselesaikan secara *independent*.

$$y_{i+1} = y_i + \Delta y_i \quad (21)$$

$$\dot{y}_{i+1} = \dot{y}_i + \Delta \dot{y}_i \quad (22)$$

$$\ddot{y}_{i+1} = \ddot{y}_i + \Delta \ddot{y}_i \quad (23)$$

2.8. Respon Dinamik Struktur

Respon struktur yang dihasilkan berupa simpangan netto dan simpangan rotasi yang terjadi pada 2 arah yaitu arah x dan arah y.

1. Simpangan Netto

Simpangan netto merupakan simpangan relatif terhadap lantai dasar atau fondasi yang terjadi pada semua tingkat yang pada penelitian ini nilainya didapat dari penyelesaian integrasi numerik dengan metode β -Newmark.

2. Simpangan Rotasi

Simpangan rotasi merupakan simpangan yang terjadi akibat adanya rotasi yang terjadi pada fondasi. Simpangan rotasi dihitung dengan,

$$y_{ri} = h_i \cdot \tan \theta \quad (24)$$

dengan y_{ri} = simpangan rotasi tingkat ke-i, h_i = tinggi tingkat ke-i sampai ke dasar

bangunan atau lantai dasar, dan θ = sudut rotasi (rad).

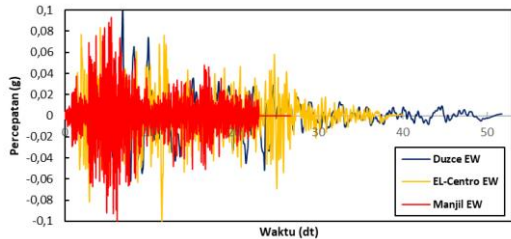
3. METODOLOGI PENELITIAN

Variabel bebas dalam penelitian ini adalah bangunan reguler dengan interaksi tanah dengan fondasi, bangunan reguler tanpa interaksi tanah dengan fondasi, dan kandungan frekuensi beban gempa, sedangkan variabel terikatnya adalah simpangan netto dan simpangan rotasi.

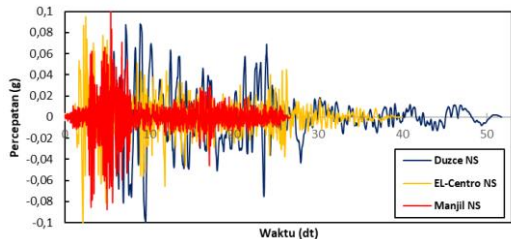
Pemodelan struktur terdiri dari struktur atas dan struktur bawah (fondasi). Struktur atas berupa bangunan reguler berbentuk pipih dengan material beton bertulang dan memiliki jumlah lantai 15 lantai, tinggi antar lantai 3,5 m, panjang bentang pendek 5 m, dan panjang bentang panjang 7 m. Struktur bawah berupa *mat foundation* dengan asumsi yang sangat kaku sehingga *displacement* yang terjadi di setiap titik pada fondasi akan sama nilainya. Fondasi menggunakan material beton bertulang dengan lebar 61,5 m, panjang 29,5 m, dan tebal 2 m. Analisis menggunakan software Microsoft Excel 2016 dan MATLAB R2013a. Pembebanan gempa dilakukan dengan kombinasi dominan arah x dan dominan arah y.

Beban gempa yang digunakan merupakan rekaman percepatan tanah arah *east-west* (EW) dan *north-south* (NS) dengan kandungan frekuensi rendah (Gempa Duzce), sedang (Gempa EL-Centro-1940), dan tinggi (Gempa Manjil). Rekaman percepatan tersebut dinormalisasi sehingga percepatan maksimumnya bernilai 0,1g (98,1 cm/dt²) agar respon struktur masih berperilaku elastik (*interstorey drift* <

0,5%). Rekaman percepatan tanah akibat gempa dapat dilihat pada Gambar 2 berikut.

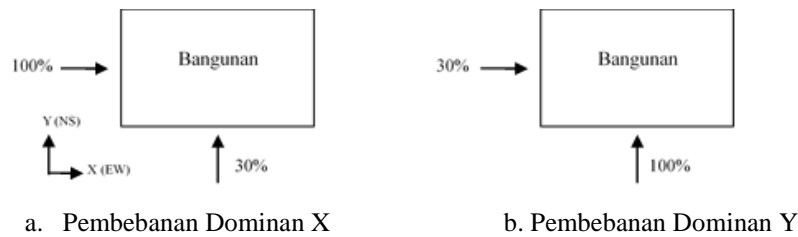


a. Percepatan Arah East-West (EW)



b. Percepatan Arah North-South (NS)

Gambar 2 Rekaman Percepatan Gempa



a. Pembebanan Dominan X

b. Pembebanan Dominan Y

Gambar 3 Kodefikasi Arah Pembebanan

Tabel 1 Nilai Kekakuan dan Redaman Interaksi Tanah dengan Fondasi

Pemodelan	Kekakuan Horizontal (kg/cm)		Kekakuan Rotasi (kg/rad)	
	Arah X	Arah Y	Arah X	Arah Y
Fondasi	18793479,6177	20731974,5904	2,1946E+14	6,4379E+13
Jepit	1,8793E+18	2,0732E+18	2,1946E+25	6,4379E+24
Pemodelan	Redaman Horizontal (kg.dt/cm)		Redaman Rotasi (kg.dt/rad)	
	Arah X	Arah Y	Arah X	Arah Y
Fondasi	858113,8620	812799,0672	4,4530E+12	1,1467E+12
Jepit	8,5811E+16	8,1280E+16	4,4530E+23	1,1467E+23

Tabel 2 Nilai Massa, Kekakuan, dan Tinggi Lantai Struktur Atas

Lantai	Massa (M) (kg.dt ² /cm)	Kekakuan Arah X (K) (kg/cm)	Kekakuan Arah Y (K) (kg/cm)	Tinggi Lantai (H) (cm)
0	9380,7360	$I_G = 1,44601E+11$		0
1	1911,2581	4471097,743	6834859,158	350
2	1911,2581	3222376,317	4170093,894	700
3	1911,2581	3222376,317	4170093,894	1050
4	1911,2581	3222376,317	4170093,894	1400
5	1911,2581	3222376,317	4170093,894	1750
6	1911,2581	3222376,317	4170093,894	2100
7	1911,2581	3222376,317	4170093,894	2450
8	1911,2581	3222376,317	4170093,894	2800
9	1911,2581	3222376,317	4170093,894	3150

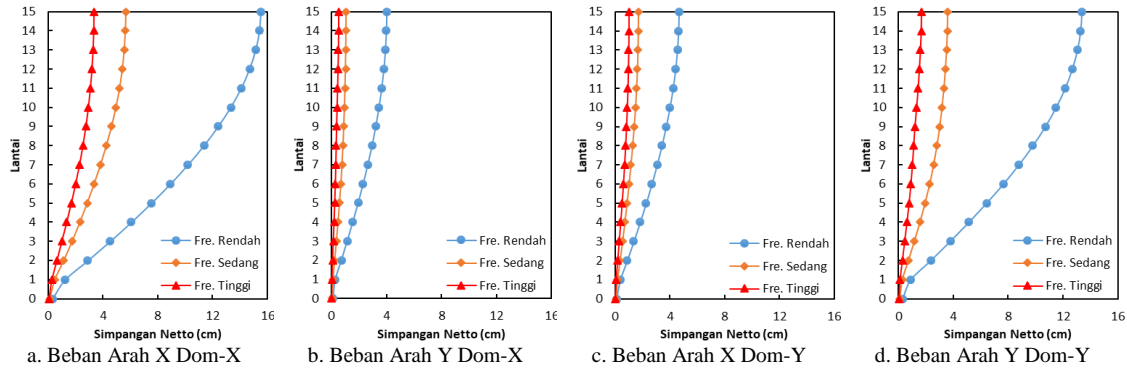
4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil analisis ditampilkan dalam bentuk grafik simpangan maksimum pada setiap kandungan frekuensi gempa, arah dominan pembebanan, dan pengaruh interaksi tanah dengan fondasi.

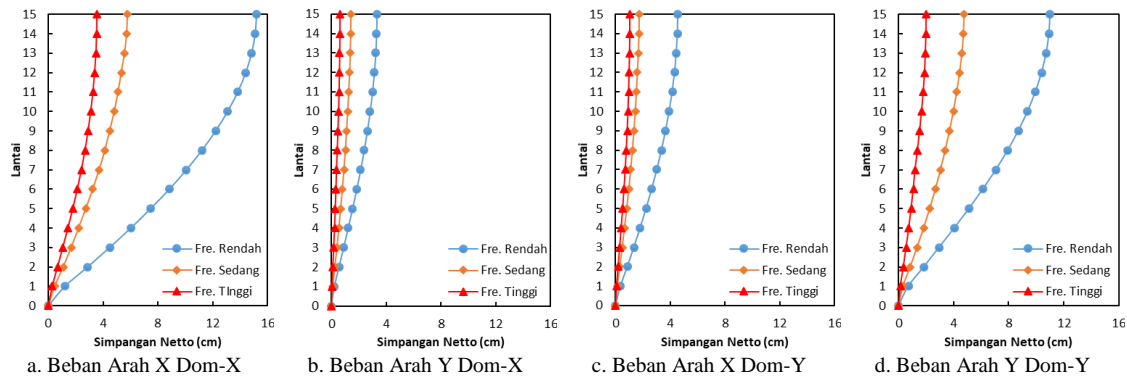
Untuk memudahkan pembahasan maka ditentukan kodefikasi pembebanan, yaitu Pembebanan dominan x dengan beban arah x 100% dan beban arah y 30% dan pembebanan dominan y dengan beban arah x 30% dan beban arah y 100% seperti yang ditunjukkan Gambar 3 berikut serta hasil perhitungan massa, kekakuan, dan momen inersia polar struktur bangunan dan fondasi dapat dilihat pada Tabel 1 dan Tabel 2 berikut.

10	1911,2581	3222376,317	4170093,894	3500
11	1911,2581	3222376,317	4170093,894	3850
12	1911,2581	3222376,317	4170093,894	4200
13	1911,2581	3222376,317	4170093,894	4550
14	1911,2581	3222376,317	4170093,894	4900
15/Atap	1067,4679	3197041,485	4124638,995	5250

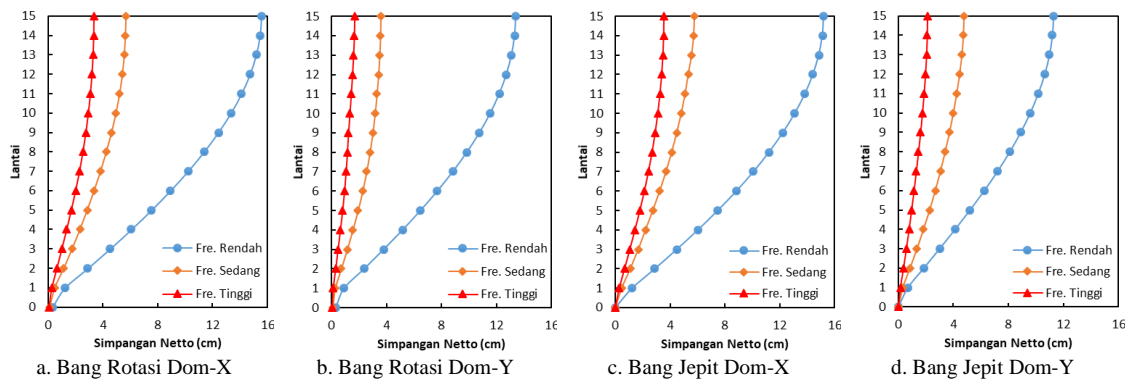
1. Simpangan Netto



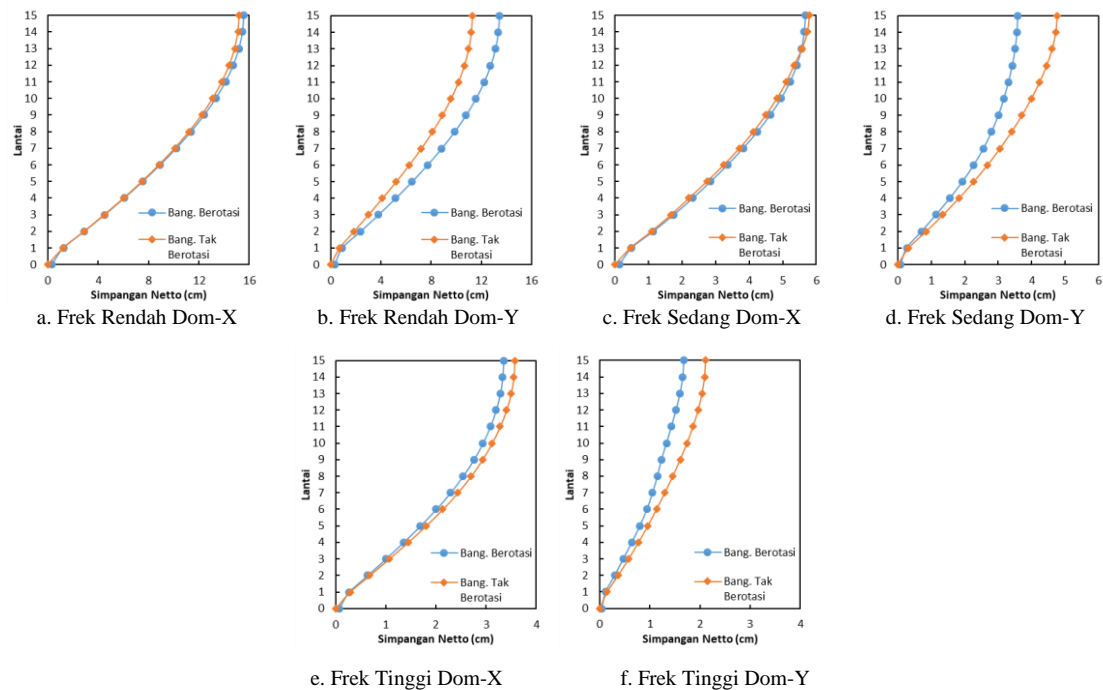
Gambar 4 Simpangan Netto Maksimum Bangunan Reguler Dengan Rotasi pada Setiap Arah Pembebanan dan Kandungan Frekuensi Gempa



Gambar 5 Simpangan Netto Maksimum Bangunan Reguler Tanpa Rotasi pada Setiap Arah Pembebanan dan Kandungan Frekuensi Gempa



Gambar 6 Resultan Simpangan Netto Maksimum Bangunan Reguler Dengan Rotasi dan Tanpa Rotasi pada Setiap Arah Pembebanan dan Kandungan Frekuensi Gempa



Gambar 7 Perbandingan Resultan Simpangan Netto Maksimum Bangunan Reguler Dengan Rotasi dan Tanpa Rotasi

Dari hasil gambar grafik di atas dapat dilihat bahwa simpangan netto maksimum akan semakin besar pada lantai yang lebih tinggi karena nilai kekakuan akan semakin kecil dan tinggi lantai akan semakin besar.

Gempa dengan frekuensi rendah (Gempa Duzce) akan menghasilkan simpangan netto yang paling besar pada struktur, sedangkan gempa dengan frekuensi tinggi (Gempa Manjil) akan menghasilkan simpangan netto yang paling kecil dan gempa dengan frekuensi sedang (Gempa EL-Centro 1940) berada diantaranya. Hal ini dikarenakan struktur bangunan tinggi bersifat fleksibel sehingga akan mempunyai frekuensi sudut (ω) dan frekuensi natural (f) yang rendah dan menyebabkan bangunan akan berasosiasi dengan baik dengan gempa frekuensi rendah.

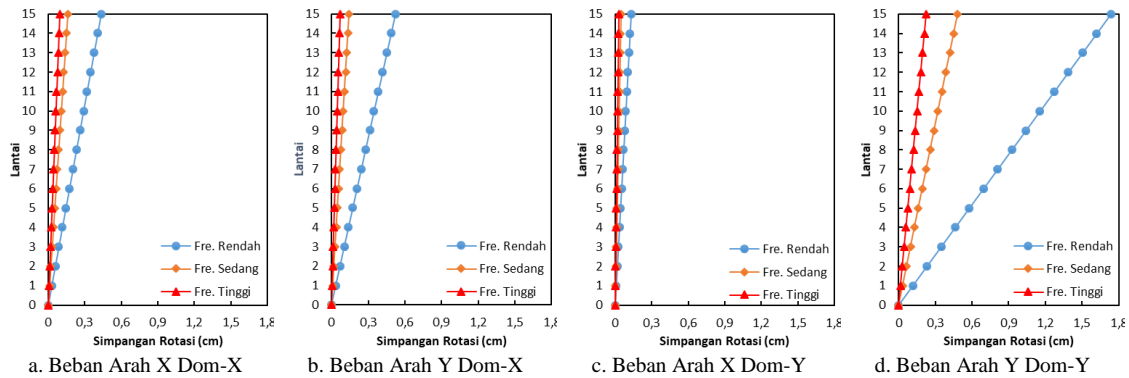
Resultan simpangan netto akibat pembebanan dominan x lebih besar dari resultan simpangan netto akibat pembebanan dominan y. Hal ini dikarenakan kekakuan struktur arah x lebih kecil dari kekakuan struktur arah y (sesuai Tabel 2) akibat inersia kolom arah x lebih kecil dibandingkan dengan inersia kolom arah y serta kekakuan

balok arah x yang mengekang kolom lebih kecil dari kekakuan balok arah y.

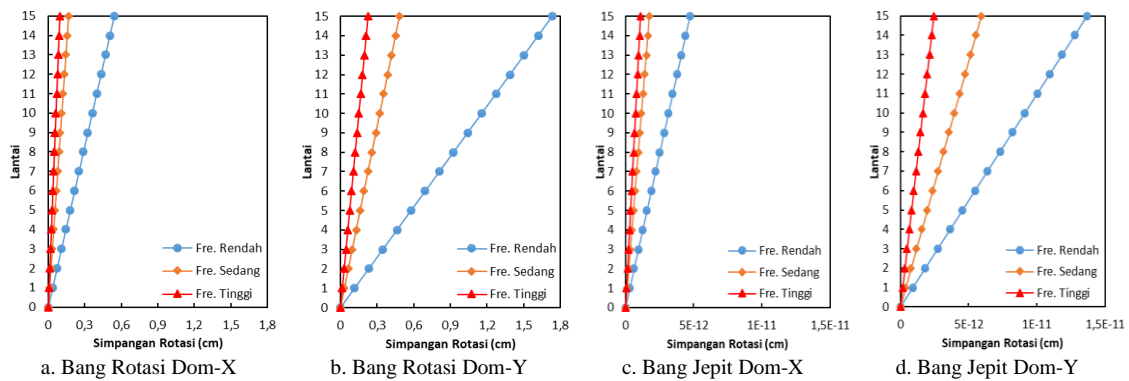
Gempa frekuensi rendah (Gempa Duzce) menghasilkan simpangan netto pada bangunan reguler dengan rotasi lebih besar daripada bangunan reguler fondasi dianggap jepit (*fixed*) baik pada pembebanan dominan x maupun pembebanan dominan y. Gempa frekuensi sedang (Gempa EL-Centro 1940) menghasilkan respon yang beragam pada pembebanan dominan x, tetapi pada pembebanan dominan y simpangan netto pada bangunan reguler tanpa rotasi (*fixed*) lebih besar daripada bangunan reguler dengan rotasi begitu juga pada gempa frekuensi tinggi (Gempa Manjil).

Hal ini terjadi karena pada sistem *soil-foundation* nilai ω dan f struktur bangunan akan semakin rendah akibat tanah tidak lagi menjepit fondasi dengan sempurna sehingga pada gempa frekuensi rendah (Gempa Duzce), bangunan reguler dengan rotasi akan berasosiasi lebih baik dengan beban gempa daripada bangunan reguler tanpa rotasi (*fixed*) dan berlaku sebaliknya pada gempa frekuensi tinggi (Gempa Manjil).

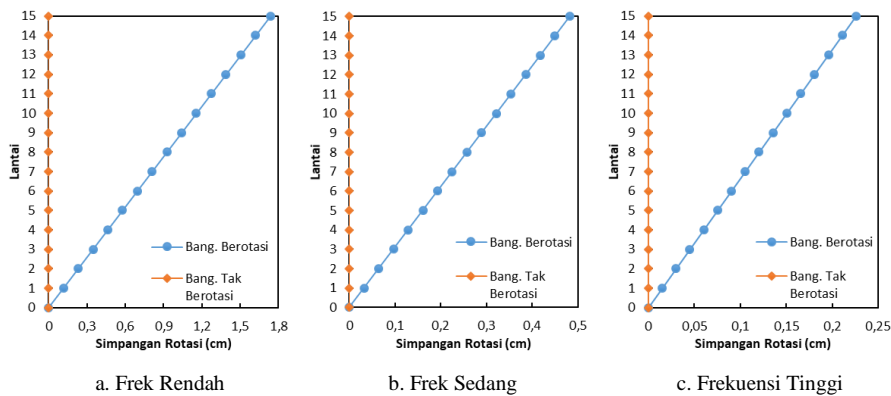
2. Simpangan Rotasi



Gambar 8 Simpangan Rotasi Maksimum Bangunan Reguler Dengan Rotasi pada Setiap Arah Pembebanan dan Kandungan Frekuensi Gempa



Gambar 9 Resultan Simpangan Rotasi Maksimum Bangunan Reguler Dengan Rotasi dan Tanpa Rotasi pada Setiap Arah Pembebanan dan Kandungan Frekuensi Gempa



Gambar 10 Perbandingan Resultan Simpangan Rotasi Maksimum Bangunan Reguler Dengan Rotasi dan Tanpa Rotasi Pembebanan Dominan Arah Y

Dari hasil gambar grafik di atas dapat dilihat bahwa simpangan rotasi maksimum semakin besar pada lantai yang lebih tinggi karena simpangan rotasi berbanding lurus dengan tinggi setiap lantai seperti yang digambarkan persamaan 24.

Resultan simpangan rotasi akibat pembebanan dominan y lebih besar dari pembebanan dominan x. Hal ini dikarenakan, fondasi dan bangunan berbentuk pipih pada arah y sehingga sudut dan simpangan rotasi

pada arah y akan lebih besar nilainya daripada arah x.

Simpangan rotasi pada bangunan fondasi dianggap jepit (*fixed*) sangat kecil nilainya bahkan mencapai 0, sedangkan pada bangunan dengan interaksi tanah dengan fondasi (rotasi) akan terjadi simpangan rotasi. Hal ini dikarenakan pada struktur bangunan fondasi dianggap jepit (*fixed*), tanah akan menjepit fondasi dengan sempurna sehingga fondasi tidak akan mengalami rotasi.

5. KESIMPULAN DAN SARAN

5.1. Kesimpulan

Kesimpulan yang dapat diambil dari penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Respon struktur berupa simpangan netto dan simpangan rotasi bangunan tingkat tinggi paling besar diakibatkan oleh gempa kandungan frekuensi rendah kemudian diikuti gempa kandungan frekuensi sedang dan gempa kandungan frekuensi tinggi.
2. Resultan simpangan netto pada pembebanan dominan x lebih besar daripada pembebanan dominan y dan sebaliknya resultan simpangan rotasi pada pembebanan dominan x lebih kecil daripada pembebanan dominan y.
3. Simpangan netto sangat dipengaruhi oleh kedekatan nilai frekuensi struktur dengan frekuensi beban gempa, dimana struktur bangunan dengan rotasi memiliki nilai frekuensi struktur yang lebih kecil dibandingkan struktur bangunan tanpa rotasi (*fixed*) sehingga pada gempa frekuensi rendah, respon struktur bangunan dengan rotasi lebih besar daripada struktur bangunan tanpa rotasi (*fixed*) dan terjadi sebaliknya pada gempa frekuensi sedang dan frekuensi tinggi.
4. Simpangan rotasi dan simpangan fondasi pada struktur bangunan tanpa rotasi (*fixed*) menghasilkan nilai yang sangat kecil bahkan mencapai 0.
5. Struktur bangunan reguler rawan terjadi rotasi pada bagian yang pipih.

5.2. Saran

Saran dari penulis untuk mengembangkan teori dan penelitian selanjutnya adalah sebagai berikut.

1. Perlu dilakukan penelitian lebih lanjut dengan menggunakan struktur yang berbeda bentuk/model, jumlah tingkat, dimensi, dan material (mutu dan jenis) terutama dapat digunakan struktur bangunan yang riil.
2. Perlu dilakukan penelitian respon dinamik struktur bangunan dengan berbagai metode perhitungan kekakuan dan redaman baik pada stuktur atas maupun struktur fondasi.
3. Perlu dilakukan penelitian terhadap bangunan dengan interaksi tanah beserta fondasi pada arah vertikal dan torsi.
4. Perlu dilakukan penelitian dengan menggunakan variasi beban gempa yang lebih banyak.

6. DAFTAR PUSTAKA

- Gazetas, G. 1991. "Formulas and Charts for Impedances of Surface and Embedded Foundations". *Journal of Geotechnical Engineering*. Vol.117 No.9. New York.
- Pawirodikromo, W. 2012. *Seismologi Teknik dan Rekayasa Kegempaan*. Pustaka Pelajar. Yogyakarta.
- Pawirodikromo, W. 2017. *Analisis Dinamik Struktur*. Pustaka Pelajar. Yogyakarta.
- Wibowo, I. dan Auzzami, H. 2003. Pengaruh Penggunaan Pengaku (*Bracing*) Terhadap Respon Elastik Struktur Baja Bertingkat Banyak Dengan Memperhitungkan Rotasi Pondasi. *Tugas Akhir*. Universitas Islam Indonesia. Yogyakarta.