

PENGARUH PENINGKATAN KEKAKUAN AKIBAT PERBAIKAN KOLOM TERBAKAR DI DAERAH RAWAN GEMPA

Diana Ningrum

Abstract: In a rehabilitation of an after-burnt concrete structure, sometime the component dimension is enlarged. One component in a structure that is usually enlarged for the rehabilitation is a column. For the economic reason, the burnt column concrete is chipped out in a small amount and the column dimension is then enlarged. The enlargement indeed increases the vertical bearing capacity of the column. However, the stiffness of the column is also increase. There can be 100 to 200% increase in the column stiffness. In this paper, the influence of stiffness increase in a column to the dynamic response of a building is investigated. The model is a three story building in which the column stiffness at the second floor is a variable. A model spectrum analysis was carried out by using El Centro 1940 earthquake response spectrum which is commonly used in seismic design. The results show that a 100% increase in column stiffness at the second floor increases the shear forces by 21%, 18% and 18% at the first, second, and third floors, respectively. Moreover, a 200% increase in column stiffness at the second floor increases the shear forces by 27%, 20%, and 21% at the first, second and third floors, respectively. The increase of shear force in a component is always avoided in a seismic design. Therefore, it is hoped that the results can be used to contributed to the development of a code for rehabilitation of an after-burnt concrete column.

Keywords: burnt, the column stiffness, the effect earthquake, the shear forces

Banyak kota-kota besar di Indonesia yang terletak di daerah rawan gempa. Kota Jakarta termasuk kota besar yang terletak di daerah rawan gempa yaitu berada di daerah dengan skala 4 dari 6 skala dengan skala 1 adalah yang terparah. Beberapa waktu lalu, banyak gedung di Jakarta yang terbakar. Kebakaran menimbulkan kerusakan pada komponen gedung, seperti kolom, balok, pelat dan sebagainya. Umumnya pemilik gedung ingin memperbaiki gedungnya sehingga dapat menggunakan kembali. Diantaranya adalah perbaikan kolom. Salah satu cara dalam perbaikan kolom adalah dengan menganggap bahwa kolom yang terbakar sudah tidak memiliki kekuatan sehingga perbaikan di lakukan dengan menambah dimensi kolom.

Jenis perbaikan dengan cara ini mungkin akan cukup aman di daerah yang tidak rawan gempa, akan tetapi untuk di daerah yang rawan gempa tentu ada pengaruh dari perubahan kekakuan kolom terhadap respons dari bangunan.

Pada makalah ini akan dibahas mengenai pengaruh peningkatan kekakuan akibat perbaikan pada kolom bangunan bertingkat tiga. Cara yang dipakai adalah sederhana yaitu metoda respons spektrum dengan menggunakan respon spectrum dari gempa El Centro 1940 arah Utara-Selatan, yaitu rekaman gempa yang paling banyak dipakai dalam perancangan bangunan tahan gempa. Hasil dari pembahasan ini diharapkan dapat digunakan sebagai bahan masukan dalam pembuatan standar perbaikan kolom di daerah rawan gempa.

KAJIAN TEORITIS

1. Menentukan bentuk pola getar sruktur

“*Vianello Stodola Iteration*” adalah metoda yang praktis untuk perhitungan pola getar dan frekuensi dinamis suatu struktur sederhana. Diperlukan syarat yaitu frekuensi natural harus berbeda dari pola getar satu terhadap pola getar yang lain. Bentuk pola getar pada satu iterasi dipakai sebagai masukan pada iterasi berikutnya.

Persamaan getaran bebas adalah sebagai berikut :

$$-w^2[M]\{u\} + [K]\{u\} = \{0\} \quad (1)$$

$$[K]\{u\} = w^2[M]\{u\} \quad (2)$$

$$\{u\} = w^2[K]^{-1}[M]\{u\} \quad (3)$$

$$\{u\} = w^2[F][M]\{u\} \quad (4)$$

di mana :

w = frekuensi natural struktur

$[M]$ = matriks massa

$\{u\}$ = matriks perpindahan nodal

$[K]$ = matriks kekakuan

$[F]$ = matriks fleksibilitas = $[K^{-1}]$

Sehingga :

$$\frac{1}{w^2} \{u\} = [F][M]\{u\} \quad (5)$$

yang merupakan skema iterasi. Misal $\{\phi_0\}$ adalah tebakan pertama dari bentuk pola getar, maka :

$$\{\Psi_0\} = [F][M]\{\phi_0\} \quad (6)$$

Jika : ϕ_i adalah komponen ke i dari vector ϕ dan Ψ_i adalah komponen i dari vector Ψ , maka w diberikan oleh :

$$w^2 = \frac{\Psi_i}{\phi_i} \quad (7)$$

$$\text{dari } \{\Psi\} = w^2 \{\phi\} \quad (8)$$

Biasanya ϕ_i dan Ψ_i diambil sama dengan perpindahan lantai teratas karena kecil kemungkinan harganya sama dengan nol.

Metoda yang lebih baik untuk menghitung w dapat diperoleh dengan menalikan kedua vektor dengan $\{\phi\}^T [M]$ atau $\{\Psi\}^T [M]$, yaitu:

$$w^2 = \frac{\{\phi_0\}^T [M] \{\Psi_0\}}{\{\phi_0\}^T [M] \{\phi_0\}} = \frac{[K^*]}{[M^*]} \quad (9)$$

dimana $[K^*]$ adalah matriks kekakuan yang di generalisasi dan $[M^*]$ adalah matriks massa yang di generalisasi. Kemudian diambil dimana $\{\phi_1\}$ adalah estimasi pola getar yang lebih baik. Sehingga pengulangan proses :

$$\{\Psi_1\} = [F][M]\{\phi_1\} \quad (10)$$

Kemudian dihitung w^2 dan $\{\phi_2\}$ dari

$$\{\phi_2\} = \frac{1}{w^2} \{\Psi_1\} \quad (11)$$

Proses ini kemudian diulang sampai harga w masuk dalam batas akurasi yang ditentukan sebelumnya. Pengulangan perhitungan akan menghasilkan w yang mendekati frekuensi natural fundamental dan $\{\phi\}$ akan cenderung pada pola getar pertama. Metoda ini hanya akan berhasil bila w_1 benar-benar berbeda dari frekuensi-frekuensi yang lebih tinggi.

2. Pola-Pola Getar yang Lebih Tinggi

Untuk pola-pola getar yang lebih tinggi dapat diperoleh dari menebak bentuk dari pola getar yang lebih tinggi dan langsung diterasi, seperti cara sebelumnya. Akan tetapi, suatu kesalahan dalam bentuk pola getar tebakan kemungkinan menagandung sedikit dari pola getar pertama sehingga kalau iterasi diteruskan akan cenderung menuju pola getar pertama dan bukan pola getar yang diinginkan.

Oleh sebab itu, sifat-sifat dari ortogonalitas akan digunakan untuk memastikan bahwa pola getar tebakan tidak mengandung pola getar yang lebih rendah. Diasumsikan bahwa matriks massa adalah matriks diagonal dala semua perhitungan ini. Walaupun bukan merupakan syarat yang penting, akan tetapi matriks massa yang tidak diagonal akan membuat perhitungan makin sulit.

2.1. Menghitung pola getar kedua

Jika $\{\phi\}$ adalah pola getar pertama yang telah diperoleh dan jika Ψ adalah pola getar tebakan pada pola getar kedua yang hendak dicari. Pola getar kedua adalah 'ortogonal' terhadap pola getar pertama jika dilihat dari matriks massanya. Jadi diperlukan:

$$\{\phi\}^T [M] \{\Psi\} = 0 \quad (12)$$

Untuk matriks massa diagonal, persamaan diatas ekivalen terhadap

$$\sum_i m_i \phi_i \Psi_i = 0 \quad (13)$$

Didapat suatu persamaan kendala (*constraint*) pada 'tebakan' untuk pola getar kedua yang mengandung pola getar pertama.

Pindahkan semua *term* pada persamaan (13) ke sebelah kanan kecuali *term* dengan $m_i \phi_i$ yang merupakan harga maksimum mutlak yaitu,

$$\begin{aligned} \hat{\Psi}_1 &= \frac{-m_1 \phi_1}{m_1 \phi_1} \Psi_1 - \frac{-m_2 \phi_2}{m_1 \phi_1} \Psi_2 - \dots \\ &- \frac{-m_{i-1} \phi_{i-1}}{m_i \phi_i} \Psi_{i-1} - \frac{-m_{i+1} \phi_{i+1}}{m_i \phi_i} \Psi_{i+1} - \dots \end{aligned} \quad (14)$$

Jadi vektor coba-coba yang terkendali atau tersapu untuk pola getar kedua di berikan oleh:

$$\{\hat{\Psi}\} = [S] \{\Psi\} \quad (15)$$

di mana [S] adalah matriks penyapu (sweeping matrix) untuk pola getar kedua yang merupakan matrik identitas untuk baris ke i.

Walaupun vektor coba-coba di atas sekarang telah di bersihkan dari pola getar pertama, ada kemungkinan pola getar pertama masuk dalam perhitungan, oleh sebab itu proses penyapuan harus di terapkan pada tiap iterasi. Hal ini dilakukan dengan memodifikasi matriks iterasi.

$$\frac{1}{w^2} \{\phi_{(i+1)}\} = [F][M][S] \{\phi_{(i)}\} \quad (16)$$

dimana $\{\phi_{(i)}\}$ adalah estimasi ke i dari pola getar kedua.

Iterasi tersebut sekarang berlaku seperti sebelumnya akan tetapi konvergensi umumnya lebih lambat.

2.2. Matriks Penyapu untuk Pola Getar Ketiga

Diasumsikan $\{\Psi\}$ adalah pola getar kedua dengan $\{\phi\}$ adalah pola getar pertama. Diperlukan pola getar ketiga tebakan adala ortogonal terhadap pola getar pertama dan pola getar kedua. Jika $\{\gamma\}$ adala pola getar ketiga tebakan, maka :

$$\begin{aligned} \{\phi\}^T [M] \{\gamma\} &= 0 \text{ dan} \\ \{\Psi\}^T [M] \{\gamma\} &= 0 \end{aligned} \quad (17)$$

atau untuk matriks massa yang diagonal

$$\sum_i^n m_i \phi_i \gamma_i = 0 \quad (18)$$

$$\sum_i^n m_i \Psi_i \gamma_i = 0 \quad (19)$$

Semua *term* (kecuali 2) dipindahkan ke sebelah kanan, diasumsikan koefisien γ_i dan γ_j dimana $m_i \phi_i$ adalah yang terbesar [ada persamaan kedua, menghasilkan dua buah persamaan simultan untuk mencari γ_1 dan γ_j pada *term* untuk semua γ_k ($k=1, \dots; k \neq i; k \neq j$). Dengan penyelesaian persamaan yang menghasilkan matriks penyapu [S] yang digunakan dalam matriks iterasi [F][M][S] seperti sebelumnya dan iterasi dapat dimulai.

3. Menentukan Respons Struktur Terhadap Beban Gempa

Persamaan gerak dari sebuah struktur berderajat kebebasan banyak yang di kenai gerakan pada fundasinya adalah sebagai berikut :

$$[M]\{\ddot{u}\} + [C]\{\dot{u}\} + [K]\{u\} = -[M]\{r\}\ddot{u}_g \quad (20)$$

dimana [M], [C], [K], $\{\ddot{u}\}$, $\{\dot{u}\}$, dan $\{u\}$ adalah berturut-turut matriks massa, redaman, kekakuan, percepatan, kecepatan, dan perpindahan dari struktur. $-[M]\{r\}\ddot{u}_g$ adalah beban gempa efektif $\{r\}$ adalah perpindahan dari struktur akibat satu unit perpindahan tanah.

Untuk tiap pola getar:

$$M_i^* \ddot{Y}_i + C_i^* \dot{Y}_i + K_i^* Y_i = -L_i^* \ddot{u}_g \quad (21)$$

$i = 1, 2, \dots, N$

dimana :

$$M_i^* = \{\phi\}_i^T [M] \{\phi\}_i \quad (22)$$

$$C_i^* = \{\phi\}_i^T [C] \{\phi\}_i = 2\lambda_i M_i^* \quad (23)$$

$$K_i^* = \{\phi\}_i^T [K] \{\phi\}_i = \omega_i^2 M_i^* \quad (24)$$

$$L_i^* = \{\phi\}_i^T [M] \{r\} \quad (25)$$

Sistem ini sekarang di wakili sebagai N sistem berderajat kebebasan tunggal tak terangkai. Dengan membagi dengan M_i^* , persamaan diferensial biasaderajat kedua diperoleh untuk tiap pola getar I sebagai:

$$\ddot{Y}_i + 2\lambda_i \omega_i \dot{Y}_i + \omega_i^2 Y_i = \frac{-L_i^*}{M_i^*} \ddot{u}_g \quad (26)$$

Term L_i^*/M_i^* dinamakan Faktor Partisipasi untuk pola getar ke i dan merupakan indikator seberapa besar pola getar ke i digetarkan oleh percepatan tanah pada arah gempa. Notasi ini dikemukakan oleh Skinner⁽³⁾.

Persamaan (26) dapat diselesaikan menggunakan integral Duharnel yaitu :

$$Y_i(t) = \frac{-L_i^*}{M_i^* \omega_i} \int_0^t \ddot{u}_g(\tau) e^{-\lambda_i \omega_i (t-\tau)} \text{Sin} \omega_D (t-\tau) d\tau \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (27)$$

atau dengan cara integrasi langkah-demi-langkah yang tepat lainnya seperti Metoda Beta Newmark dimana λ_i adalah harga presentase redaman terhadap redaman kritis.

Dengan cara spektrum respons, dari grafik spektrum gempa (misalnya gempa El Centro 1940), sudah tersedia grafik S_{vi} –nya) didefinisikan sebagai

$$S_{vi} = \left[\int_0^t \ddot{u}_g(\tau) e^{-\lambda_i \omega_i (t-\tau)} \sin \omega_i (t-\tau) d\tau \right]_{\max} \quad (28)$$

dimana S_{vi} bersatuan kecepatan. Jadi untuk pola getar ke i :

$$Y_{i \max} = \frac{L_i^* l}{M_i^* \omega_i} S_{vi} \quad (29)$$

Setelah semua Y_i ditemukan, maka perpindahan-perpindahan struktur relatif ditentukan dari :

$$\{u\} = [\phi] \{Y\} \quad (30)$$

dan gaya-gaya komponen dapat dihitung secara langsung.

4. Kombinasi Hasil Analisis Pola Getar

Adalah sangat kecil kemungkinannya bila semua pola getar memiliki respon maksimum pada waktu bersamaan

$$\{u\}_{\max} \leq [\phi] \{Y\}_{\max} \quad (31)$$

Kombinasi biasanya dilakukan dengan menggunakan metoda statistic. Misalkan R adalah kuantitas pola getar (misal, gaya geser, perpindahan nodal, gaya nodal, dsb) dan R_i telah di temukan untuk semua pola getar (atau sejumlah yang diperlukan), pada umumnya :

$$R_{\max} \leq \sum_{i=1}^N R_{i \max} \quad (32)$$

Kebanyakan standar konstruksi tidak mensyaratkan pendesain untuk menghitung semua pola getar, umumnya yang diperlukan adalah paling sedikit tiga pola getar untuk tiap arah gempa.

Ada beberapa metoda kombinasi yang dapat diterima. Akan tetapi untuk makalah ini digunakan metoda *SRSS (Square Root of Sum of Square)* yang paling banyak digunakan.

$$R_{\max} = \sqrt{\sum_{i=1}^N R_{i \max}^2} \quad (33)$$

Metoda ini berimplikasi bahwa tidak ada korelasi antara respons dari pola getar yang berbeda.

STUDI KASUS

Pada studi kasus ini akan dianalisis tiga buah gedung sederhana berlantai tiga dimana parameternya yang akan diubah-ubah adalah kekakuan kolom di lantai dua. Kekakuan kolom masing-masing di lantai dua adalah $k_2=1000, 2000,$ dan 3000 kN/m.

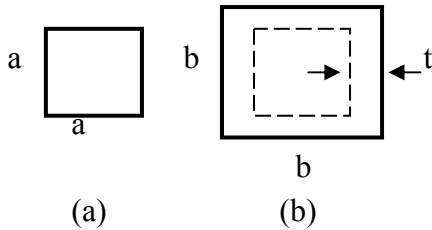
Angka-angka kekakuan tersebut dapat dari kondisi sebagai berikut :

Misal kolom sebelum terbakar berdimensi $a \times a$ (Gambar 1a). Dengan cara rehabilitasi yang menganggap bahwa kolom terbakar diabaikan kekuatannya, maka ditambah dimensi kolom menjadi $b \times b$ (Gambar 1b), sedemikian sehingga luas penampang tambahan sama dengan luas penampang asli (atau $b^2 - a^2 = a^2$). Dari perhitungan di dapat bahwa $b = a\sqrt{2}$ dan tebal beton tambahan $t = 0,207a$. Momen inersia tambahan (dengan mengabaikan momen inersia beton yang lama) :

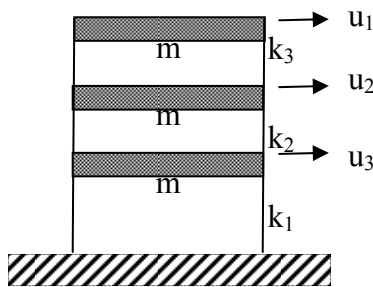
$$I_2 = I_{total} - I_1 = \frac{b^4}{12} - \frac{a^4}{12} = 3 \frac{a^4}{12} = 3I_1$$

Dengan kata lain kekakuan kolom setelah rehabilitasi adalah tiga kali kekakuan kolom sebelum terbakar.

Bentuk bangunan yang diuji tampak pada gambar 2. Pada gambar tersebut, massa tiap lantai $m = 2000$ kg dan kekakuan kolom lantai 1 dan lantai 3 berturut-turut adalah $k_1=1000$ KN/m dan $k_3=1000$ KN/m. Kekakuan kolom lantai 2, k_2 , merupakan variabel seperti tersebut diatas.



Gambar 1 Dimensi kolom (a) Sebelum dan (b) sesudah rehabilitasi



Gb. 2 Model bangunan tiga lantai

Dari model tersebut, matriks massa dan kekakuannya adalah sebagai berikut :

$$[M] = \begin{bmatrix} 2 & 0 & 0 \\ 0 & 2 & 0 \\ 0 & 0 & 2 \end{bmatrix} \times 1000 \text{kg dan}$$

$$[K_I] = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ -1 & 2 & -1 \\ 0 & -1 & 2 \end{bmatrix} \times 1000 \text{kN/m,}$$

$$[K_{II}] = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ -1 & 3 & -2 \\ 0 & -2 & 3 \end{bmatrix} \times 1000 \text{kN/m}$$

$$[K_{III}] = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ -1 & 4 & -3 \\ 0 & -3 & 4 \end{bmatrix} \times 1000 \text{kN/m}$$

Untuk kasus dimana berturut-turut $k_2=1000, 2000$, dan 3000 kN.m (kasus I, II, dan III).

Dengan cara coba-coba (prhitungan tangan) untuk mencari frekuensi dan bentuk tiap pola getar seperti diterangkan pada bagian teori diatas, maka didapat pada kasus I, II, dan III, untuk pola getar ke 1, 2, dan 3:

Kasus I : Untuk $k_2 = 1000\text{kN/m}$

$$\{\omega_I\} = \langle 9,96 \quad 28,2 \quad 39,5 \rangle$$

$$\{T_I\} = \langle 0,630 \quad 2,223 \quad 0,159 \rangle$$

$$[\phi_I] = \begin{bmatrix} 1,000 & 1,000 & 1,000 \\ 0,800 & -0,540 & -2,910 \\ 0,450 & -1,190 & 2,280 \end{bmatrix}$$

Kasus II : Untuk $K_2 = 2000\text{kN/m}$

$$\{\omega_{II}\} = \langle 10,92 \quad 28,59 \quad 50,76 \rangle$$

$$\{T_{II}\} = \langle 0,575 \quad 0,220 \quad 0,124 \rangle$$

$$[\phi_{II}] = \begin{bmatrix} 1,000 & 1,000 & 1,000 \\ 0,761 & -0,641 & -4,041 \\ 0,551 & -0,937 & 3,856 \end{bmatrix}$$

Kasus III : Untuk $K_2 = 3000\text{kN/m}$

$$\{\omega_{III}\} = \langle 11,3 \quad 28,8 \quad 59,76 \rangle$$

$$\{\tau_{III}\} = \langle 0,556 \quad 0,218 \quad 0,105 \rangle$$

$$[\phi_{III}] = \begin{bmatrix} 1,000 & 1,000 & 1,000 \\ 0,745 & -0,661 & -6,150 \\ 0,598 & -0,847 & -5,964 \end{bmatrix}$$

Dengan $\{r\} = \begin{Bmatrix} 1,0 \\ 1,0 \\ 1,0 \end{Bmatrix}$, maka didapat :

Kasus I : Untuk $k_2 = 1000 \text{ kN/m}$

$$M^* = \langle 3,685 \quad 5,415 \quad 29,333 \rangle \text{ dan}$$

$$L^* = \langle 4,50 \quad -1,46 \quad 0,74 \rangle$$

Faktor Partisipasi :

$$PF_I = \frac{L^*}{M^*} = \langle 1,221 \quad -0,270 \quad 0,025 \rangle$$

Kasus II : Untuk $k_2 = 2000 \text{ kN/m}$

$$M^* = \langle 3,765 \quad 4,580 \quad 64,400 \rangle$$

$$L^* = \langle 4,63 \quad -1,16 \quad 1,63 \rangle$$

Faktor Partisipasi :

$$PF_{II} = \frac{L^*}{M^*} = \langle 1,231 \quad -0,253 \quad 0,0253 \rangle$$

Kasus III : Untuk $k_2 = 3000 \text{ kN/m}$

$$M^* = \langle 3,825 \quad 4,309 \quad 148,800 \rangle$$

$$L^* = \langle 4,69 \quad -1,02 \quad 1,63 \rangle$$

Faktor Partisipasi :

$$PF_{III} = \frac{L^*}{M^*} = \langle 1,221 \quad -0,236 \quad 0,011 \rangle$$

Diasumsikan bahwa rasio redaman untuk pola getar 1,2, dan 3 berturut-turut adalah $\lambda_1 = \lambda_2 = \lambda_3 = 0,05$ dan untuk Gempa El Centro 1940 komponen Utara-Selatan (N-S component), didapat kecepatan spektrum responnya adalah :

Kasus I : Untuk $k_2 = 1000$ kN/m

$$S_v = \langle 0,686 \quad 0,208 \quad 0,130 \rangle \text{ m/s}$$

Kasus II : Untuk $k_2 = 2000$ kN/m

$$S_v = \langle 0,737 \quad 0,208 \quad 0,123 \rangle \text{ m/s}$$

Kasus III : Untuk $k_2 = 3000$ kN/m

$$S_v = \langle 0,739 \quad 0,208 \quad 0,119 \rangle \text{ m/s}$$

Maka amplitude pola getar dihitung dari persamaan (29) sebagai berikut :

Kasus I : Untuk $k_2 = 1000$ kN/m

$$Y_{max} = \langle 0,0841 \quad -0,00199 \quad 0,0000823 \rangle \text{ m}$$

$$Y_{max} = \langle 0,0831 \quad -0,00184 \quad 0,0000613 \rangle \text{ m}$$

$$Y_{max} = \langle 0,0801 \quad -0,00170 \quad 0,0000219 \rangle \text{ m}$$

Dari persamaan (30) didapat harga-harga perpindahan lantai untuk tiap-tiap pola getar dari tiap-tiap kasus, lihat Tabel 1.

Harga perpindahan relatif tiap-tiap lantai yaitu harga perpindahan tiap lantai di kurangi perpindahan lantai dibawahnya adalah pada Tabel 2.

Harga-harga perpindahan relative tersebut diatas, dikalikan dengan kekuatan tiap lantai, maka didapat gaya geser di tiap kolom pada tiap lantai untuk tiap-tiap pola getar, lihat Tabel 3.

Respons mungkin yang maksimum (*maximum likely response*) didapat dengan cara SRSS (Persamaan 33), lihat Tabel 4.

Tabel 1 Harga-Harga Perpindahan Tiap Lantai (unit : meter)

Kasus	Kekakuan Lantai 2	Perpindahan Lantai	Pola Getar I	Pola Getar II	Pola Getar III
I	$k_2 = 1000$ kN/m	u_1	0,0841	-0,00199	0,0000823
		u_2	0,0673	0,00107	-0,000239
		u_3	0,0378	0,00237	0,000128
II	$k_2 = 2000$ kN/m	u_1	0,0831	-0,00184	0,0000613
		u_2	0,0632	0,00118	-0,000248
		u_3	0,0458	0,00172	0,000238
III	$k_2 = 3000$ kN/m	u_1	0,0801	-0,0017	0,0000219
		u_2	0,0597	0,00112	-0,000135
		u_3	0,0479	0,00144	0,000131

Tabel 2 Harga-Harga Perpindahan Relatif Tiap Lantai (unit : meter)

Kasus	Kekakuan Lantai 2	Perpindahan relatif	Pola Getar I	Pola Getar II	Pola Getar III
I	$k_2 = 1000 \text{ kN/m}$	d1	0,0168	-0,00306	0,000321
		d2	0,0295	0,0013	-0,000427
		d3	0,0378	0,00237	0,000188
II	$k_2 = 2000 \text{ kN/m}$	d1	0,0199	-0,00302	0,000309
		d2	0,0174	0,00054	-0,000484
		d3	0,0458	0,00172	0,000236
III	$k_2 = 3000 \text{ kN/m}$	d1	0,0204	-0,00282	0,000157
		d2	0,0597	0,00032	-0,000266
		d3	0,0479	0,00144	0,000131

Tabel 3 Harga-Harga Gaya Geser Kolom Tiap Lantai (unit : kN)

Kasus	Kekakuan Lantai 2	Gaya Geser Kolom	Pola Getar I	Pola Getar II	Pola Getar III
I	$k_2 = 1000 \text{ kN/m}$	v_1	16,8	-3,06	0,321
		v_2	29,5	1,3	-0,427
		v_3	37,8	2,37	0,188
II	$k_2 = 2000 \text{ kN/m}$	v_1	19,9	-3,02	0,309
		v_2	17,4	0,54	-0,484
		v_3	45,8	1,72	0,236
III	$k_2 = 3000 \text{ kN/m}$	v_1	20,4	-2,82	0,157
		v_2	59,7	0,32	-0,266
		v_3	47,9	1,44	0,131

Tabel 4 Harga-Harga Gaya Geser Kolom dan Perpindahan Relatif Lantai

Kasus	Kekakuan Lantai 2	Gaya Geser kolom Tiap lantai (kN)	Perpindahan Relatif Lantai (m)
I	$k_2 = 1000 \text{ kN/m}$	17,08	0,01708
		29,53	0,02953
		37,87	0,03787
II	$k_2 = 2000 \text{ kN/m}$	20,13	0,02013
		34,83	0,01742
		45,83	0,04589
III	$k_2 = 3000 \text{ kN/m}$	20,59	0,02059
		35,42	0,01181
		47,92	0,04792

KESIMPULAN

1. Peningkatan kekakuan kolom di lantai 2 sebesar 100% dari kekakuan semula meningkatkan gaya geser di kolom lantai 1, 2, dan 3 sebesar masing-masing 21%, 18%, dan 18%.
2. Peningkatan kekakuan kolom di lantai 2 sebesar 200% dari kekakuan semula meningkatkan gaya geser di kolom lantai 1, 2, dan 3 sebesar masing-masing 27%, 20%, dan 21%.

3. Peningkatan kekakuan kolom di lantai 2 sebesar 100% dari kekakuan semula meningkatkan perpindahan antar-lantai (*interstory drift*) di lantai1, 2 dan 3 sebesar masing-masing 21%, -41% (penurunan), dan 18%.
4. Peningkatan kekakuan kolom di lantai 2 sebesar 200% dari kekakuan semula meningkatkan perpindahan antar-lantai (*interstory drift*) di lantai1, 2 dan 3 sebesar masing-masing 27%, -60% (penurunan), dan 21%.
5. Peningkatan gaya geser terbesar di lantai satu akibat peningkatan kekakuan kolom di lantai 2 perlu diantisipasi mengingat kolom lantai satu dirancang untuk plastis terhadap beban gempa, sehingga rawan terhadap beban geser.
6. Peningkatan perpindahan antar lantai juga perlu diantisipasi mengingat dapat terjadinya rusak instalasi-instalasi (misal: pipa air, pipa gas, dsb) pada saat terjadi gempa.
7. Hasil-hasil tersebut di atas baru di lakukan terhadap bangunan contoh berlantai tiga terhadap peningkatan kekakuan di lantai dua. Perlu dilakukan penelitian terhadap bangunan yang lebih kompleks dengan parameter yang lebih luas.

DAFTAR PUSTAKA

- Kusuma, G. dan Andriano, T., *Desain Struktur Rangka Beton Bertulang di Daerah Rawan Gempa*, Penerbit Erlangga, Jakarta, 1993.
- Departemen Pekerjaan Umum, *Tata Cara Perhitungan Struktur Beton untuk Bangunan Gedung*, SK SNI I-15-1991-03, Yayasan LPMB, Bandung, 1991.
- Skinner, R.I., *Earthquake-Generated Forces and Moments in Tall Buildings*, Bulletin 166, NZ DSIR, Wellington, New Zealand, 1966.
- Chopra, A.K., *Dynamics of Structures : Theory and Applications to Earthquake Engineering*, Prentice Hall, New Jersey, 1995.