

BAB V

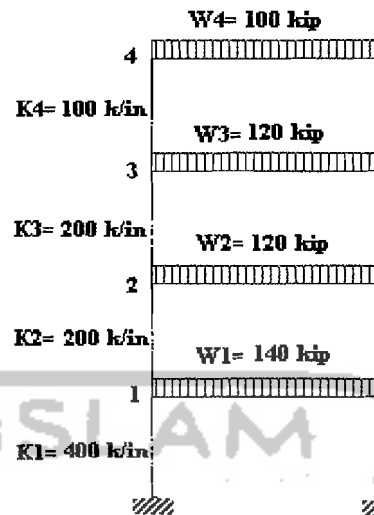
HITUNGAN DAN HASIL

Bab ini memuat perhitungan yang dipakai untuk mendapatkan hasil dari penelitian, meliputi model struktur, contoh hitungan, dan hasil. Contoh hitungan dan hasil diperlihatkan hanya perhitungan kombinasi 0 (tanpa peredam tambahan), kombinasi 15 (R1A di tingkat 4 dan R1B di tingkat 2), dan kombinasi 31 (R2A di tingkat 4 dan R2B di tingkat 2) yang mewakili 42 proses perhitungan yang dilakukan dalam penelitian. Sebagaimana yang akan diuraikan berikut ini.

5.1 Model Struktur

Analisis yang akan dilakukan menggunakan sebuah model bangunan geser struktur bertingkat 4. Model struktur tersebut merupakan modifikasi dari model yang diambil dari buku *Element of Structural Dynamic* (Berg, 1998), yang berat W (kip) dan kekakuan struktur bangunan K (k/in) dapat dilihat pada Gambar 5.1.

Massa (m) dihitung dari berat struktur (w) dibagi dengan percepatan gravitasi ($g = 981/2,54 = 386,2205 \text{ in/det}^2$), dalam bentuk matematik dapat ditulis $m = w/g$ (satuan m dalam kip dt²/in). Berat tingkat satu sebesar $w_1 = 140$ kip, sehingga nilai massa pada tingkat satu adalah $m_1 = 140/386,2205 = 0,3625$ kip dt²/in. Dengan cara yang sama, maka massa tingkat dua dan tiga $m_2 = m_3 = 120/386,2205 = 0,3107$ kip dt²/in dan massa tingkat empat $m_4 = 100/386,2205 = 0,2589$ kip dt²/in.



Gambar 5.1 Model Bangunan Geser Struktur Bertingkat 4

5.2 Contoh Hitungan dan Hasil

Dalam penelitian ini, contoh hitungan dan hasil seperti yang telah dipaparkan dimuka hanya diperlihatkan perhitungan kombinasi 0 (tanpa peredam tambahan), kombinasi 15 (R1A di tingkat 4 dan R1B di tingkat 2), dan kombinasi 31 (R2A di tingkat 4 dan R2B di tingkat 2). Penelitian ini memvariasikan 3 nilai proporsi kapasitas *MR-Damper* dan struktur tanpa peredam tambahan yang dikombinasikan menjadi 42 kombinasi, sehingga penelitian dilakukan sebanyak 42 kali proses perhitungan dengan menggunakan simulasi komputer.

5.2.1 Hitungan untuk Kombinasi 0 (tanpa redaman tambahan)

Dalam perhitungan berikut ini, dilakukan perhitungan tanpa redaman tambahan, Hasil perhitungan dari matrik massa dan kekakuan berdasarkan pada persamaan (3.7a) dan (3.7b) adalah,

$$[M] = \begin{bmatrix} 0,3625 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0,3107 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0,3107 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0,2589 \end{bmatrix} \text{ kip dt}^2/\text{in} \quad (5.1a)$$

$$[K] = \begin{bmatrix} 600 & -200 & 0 & 0 \\ -200 & 400 & -200 & 0 \\ 0 & -200 & 300 & -100 \\ 0 & 0 & -100 & 100 \end{bmatrix} \text{ kip/in} \quad (5.1b)$$

Dimana unit massa $m = 0,2589 \text{ kip det}^2/\text{in}$ dan unit kekakuan struktur $k = 100 \text{ kip/in}$, sehingga matrik massa dan kekakuan menjadi,

$$[M] = \begin{bmatrix} 1,4002m & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1,2001m & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1,2001m & 0 \\ 0 & 0 & 0 & m \end{bmatrix} \quad (5.2a)$$

$$[K] = \begin{bmatrix} 6k & -2k & 0 & 0 \\ -2k & 4k & -2k & 0 \\ 0 & -2k & 3k & -k \\ 0 & 0 & -k & k \end{bmatrix} \quad (5.2b)$$

Dengan memperhatikan persamaan (3.19), maka persamaan *eigenproblem*

dapat disusun sebagai berikut,

$$\begin{bmatrix} 6k - 1,4\omega^2 m & -2k & 0 & 0 \\ -2k & 4k - 1,2\omega^2 m & -2k & 0 \\ 0 & -2k & 3k - 1,2\omega^2 m & -k \\ 0 & 0 & -k & k - \omega^2 m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \phi_1 \\ \phi_2 \\ \phi_3 \\ \phi_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (5.3a)$$

Apabila diambil suatu notasi bahwa,

$$\lambda = \frac{\omega^2}{k/m} \quad (5.3b)$$

maka persamaan (5.3a) akan menjadi,

$$\begin{bmatrix} 6-1,4\lambda & -2 & 0 & 0 \\ -2 & 4-1,2\lambda & -2 & 0 \\ 0 & -2 & 3-1,2\lambda & -1 \\ 0 & 0 & -1 & 1-\lambda \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \phi_1 \\ \phi_2 \\ \phi_3 \\ \phi_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (5.3c)$$

Apabila persamaan (5.3c) disederhanakan, maka akan diperoleh,

$$\begin{aligned} (6 - 1,4\lambda)\phi_1 - 2\phi_2 &= 0 \\ -2\phi_1 + (4 - 1,2\lambda)\phi_2 - 2\phi_3 &= 0 \\ -2\phi_2 + (3 - 1,2\lambda)\phi_3 - \phi_4 &= 0 \\ -\phi_3 + (1 - \lambda)\phi_4 &= 0 \end{aligned} \quad (5.4)$$

Sebagaimana diketahui secara umum bahwa nilai-nilai penyelesaian persamaan simultan homogen tidak akan memberikan suatu nilai yang pasti/tetap, tetapi nilai-nilai tersebut hanya akan sebanding antara yang satu dengan yang lain. Dengan memperhatikan sifat tersebut, maka umumnya diambil nilai $\phi_1 = 1$.

Substitusi nilai $\phi_1 = 1$, ke dalam baris pertama persamaan (5.4), maka akan diperoleh,

$$\phi_2 = (3 - 0,7\lambda) \quad (5.5)$$

Selanjutnya substitusi persamaan (5.5) dan nilai $\phi_1 = 1$, ke dalam baris kedua pada persamaan (5.4), maka akan diperoleh,

$$\phi_3 = 0,42\lambda^2 - 3,2\lambda + 5 \quad (5.6)$$

Selanjutnya substitusi persamaan (5.5) dan (5.6), ke dalam baris ketiga pada persamaan (5.4), maka akan diperoleh,

$$\phi_4 = -0,504\lambda^3 + 5,1\lambda^2 - 14,2\lambda + 9 \quad (5.7)$$

Selanjutnya substitusi persamaan (5.6) dan (5.7), ke dalam baris keempat pada persamaan (5.4), maka akan diperoleh,

$$0,504 \lambda^4 - 5,604 \lambda^3 + 18,88 \lambda^2 - 20\lambda + 4 = 0 \quad (5.7a)$$

Dengan *trial and error* didapat λ dan sebagai berikut.

$$\lambda_1 = 0,2582 \text{ maka } \omega_1 = \sqrt{(0,2582 \cdot 100 / 0,2589)} = 9,9872 \text{ rad/dt} \quad (5.7b)$$

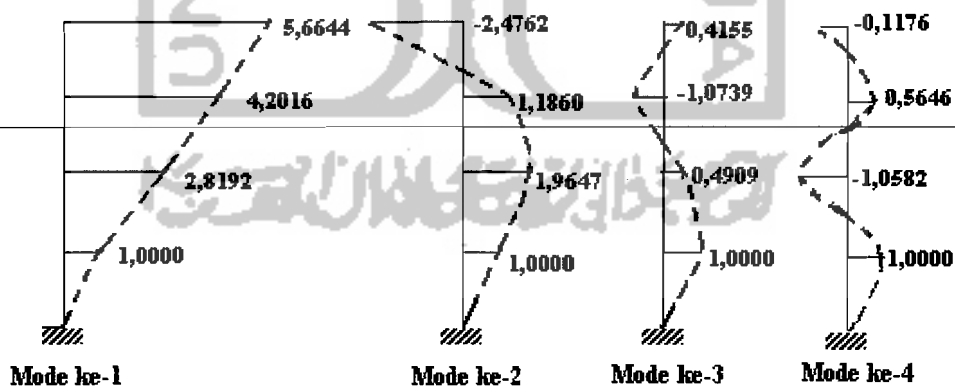
$$\lambda_2 = 1,4789 \text{ maka } \omega_2 = \sqrt{(1,4789 \cdot 100 / 0,2589)} = 23,9007 \text{ rad/dt} \quad (5.7c)$$

$$\lambda_3 = 3,5843 \text{ maka } \omega_3 = \sqrt{(3,5843 \cdot 100 / 0,2589)} = 37,2082 \text{ rad/dt} \quad (5.7d)$$

$$\lambda_4 = 5,7974 \text{ maka } \omega_4 = \sqrt{(5,7974 \cdot 100 / 0,2589)} = 47,3210 \text{ rad/dt} \quad (5.7e)$$

Sehingga didapat nilai *mode shape* dalam bentuk matrik sebagai berikut,

$$[\Phi] = \begin{bmatrix} 1,0000 & 1,0000 & 1,0000 & 1,0000 \\ 2,8192 & 1,9647 & 0,4909 & -1,0582 \\ 4,2016 & 1,1860 & -1,0739 & 0,5646 \\ 5,6644 & -2,4762 & 0,4155 & -0,1176 \end{bmatrix} \quad (5.8)$$



Gambar 5.2a Normal Modes Struktur Empat Tingkat

Dari persamaan 5.3b didapat frekuensi sudut,

$$\{\omega\} = \begin{Bmatrix} 9,9872 \\ 23,9007 \\ 37,2082 \\ 47,3210 \end{Bmatrix} \text{ rad/dt} \quad (5.9)$$

Partisipasi setiap *mode* dihitung dengan menggunakan persamaan,

$$\Gamma_j = \frac{P_j^*}{M_j^*} = \frac{\{\phi\}_j^T [M] \{1\}}{\{\phi\}_j^T [M] \{\phi\}_j} = \frac{\sum_{i=1}^m \phi_j m_i}{\sum_{i=1}^m \phi_j^2 m_i} \quad (5.10)$$

mode ke-1,

$$P_1^* = \begin{bmatrix} 1 & 2,8192 & 4,2016 & 5,6644 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0,3625 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0,3107 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0,3107 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0,2589 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \end{Bmatrix} \\ = 4,0104 \text{ kip dt}^2/\text{in} \quad (5.11a)$$

$$M_1^* = \begin{bmatrix} 1 & 2,8192 & 4,2016 & 5,6644 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0,3625 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0,3107 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0,3107 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0,2589 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} 1 \\ 2,8192 \\ 4,2016 \\ 5,6644 \end{Bmatrix} \\ = 16,623 \text{ kip dt}^2/\text{in} \quad (5.11b)$$

maka, partisipasi *mode ke-1* adalah,

$$\Gamma_1 = P_1^* / M_1^* = 0,2412 \quad (5.11c)$$

mode ke-2,

$$P_2^* = \begin{bmatrix} 1 & 1,9647 & 1,1860 & -2,4762 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0,3625 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0,3107 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0,3107 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0,2589 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \end{Bmatrix}$$

$$= 0,7003 \text{ kip dt}^2/\text{in} \quad (5.12a)$$

$$M_2^* = \begin{bmatrix} 1 & 1,9647 & 1,1860 & -2,4762 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0,3625 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0,3107 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0,3107 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0,2589 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} 1 \\ 1,9647 \\ 1,1860 \\ -2,4762 \end{Bmatrix}$$

$$= 3,5864 \text{ kip dt}^2/\text{in} \quad (5.12b)$$

maka partisipasi *mode ke-2* adalah,

$$\Gamma_2 = P_2^* / M_2^* = 0,1953 \quad (5.12c)$$

mode ke-3,

$$P_3^* = \begin{bmatrix} 1 & 0,4909 & -1,0739 & 0,4155 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0,3625 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0,3107 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0,3107 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0,2589 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \end{Bmatrix}$$

$$= 0,2889 \text{ kip dt}^2/\text{in} \quad (5.13a)$$

$$M_3^* = \begin{bmatrix} 1 & 0,4909 & -1,0739 & 0,4155 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0,3625 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0,3107 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0,3107 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0,2589 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} 1 \\ 0,4909 \\ -1,0739 \\ 0,4155 \end{Bmatrix}$$

$$= 0,8404 \text{ kip dt}^2/\text{in} \quad (5.13b)$$

maka partisipasi *mode ke-3* adalah,

$$\Gamma_3 = P_3^* / M_3^* = 0,3438 \quad (5.13c)$$

mode ke-4,

$$P_4^* = \begin{bmatrix} 1 & -1,0582 & 0,5646 & -0,1176 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0,3625 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0,3107 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0,3107 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \end{Bmatrix}$$

$$= 0,1786 \text{ kip dt}^2/\text{in} \quad (5.14a)$$

$$M_4^* = \begin{bmatrix} 1 & -1,0582 & 0,5646 & -0,1175 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0,3625 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0,3107 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0,3107 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0,2589 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} 1 \\ -1,0582 \\ 0,5646 \\ -0,1175 \end{Bmatrix}$$

$$= 0,8130 \text{ kip dt}^2/\text{in} \quad (5.14b)$$

maka partisipasi *mode* ke-4 adalah,

$$\Gamma_4 = P_4^* / M_4^* = 0,2197 \quad (5.14c)$$

Sebagai kontrol, partisipasi *mode* harus sama dengan 1, maka,

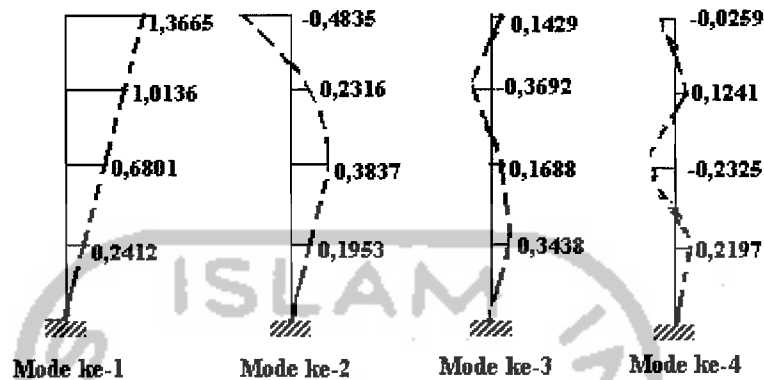
$$\Gamma_1 + \Gamma_2 + \Gamma_3 + \Gamma_4 = 0,2412 + 0,1953 + 0,3438 + 0,2197 = 1,0000 \quad (5.15a)$$

Partisipasi *mode* seperti pada persamaan (5.11c), (5.12c), (5.13c), dan (5.14c) dapat ditulis dalam persamaan matrik menjadi,

$$[\Gamma_j] = \begin{bmatrix} 0,2412 & 0,1953 & 0,3438 & 0,2197 \end{bmatrix} \quad (5.15b)$$

Persamaan (5.8) yaitu matrik *mode shape* dikalikan dengan persamaan (5.15b) akan menghasilkan modal partisipasi faktor efektif (β), yaitu,

$$[\beta] = \begin{bmatrix} 0,2412 & 0,1953 & 0,3438 & 0,2197 \\ 0,6801 & 0,3837 & 0,1688 & -0,2325 \\ 1,0136 & 0,2316 & -0,3692 & 0,1241 \\ 1,3665 & -0,4835 & 0,1429 & -0,0259 \end{bmatrix} \quad (5.15c)$$



Gambar 5.2b Modal Partisipasi Faktor Efektif Struktur Empat Tingkat

Masing-masing massa efektif pada persamaan (5.11b), (5.12b), (5.13b), dan (5.14b) dapat ditulis dalam bentuk matrik menjadi,

$$[M^*] = \begin{bmatrix} 16,6239 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 3,5864 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0,8404 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0,8130 \end{bmatrix} \text{ kip dt}^2/\text{in} \quad (5.16)$$

Menghitung nilai awal redaman (c) pada keadaan struktur tanpa peredam tambahan diperoleh dengan cara *trial and error*, yaitu menggunakan persamaan (3.39a) dan persamaan (3.36b). Jika ternyata hasil yang diperoleh belum mendekati rasio redaman pada *mode* pertama 2 %, maka harus diulang lagi dengan menggunakan persamaan (3.36b) sampai didapat matrik redaman struktur $[C]$ yang sesuai. Proses hitungan tersebut didapat nilai awal redaman struktur (c) sebesar 0,7944 kip/(in/det), sehingga matrik redaman struktur untuk kombinasi 0 menjadi,

$$[C_0] = \begin{bmatrix} 1,5888 & -0,7944 & 0 & 0 \\ -0,7944 & 1,5888 & -0,7944 & 0 \\ 0 & -0,7944 & 1,5888 & -0,7944 \\ 0 & 0 & -0,7944 & 0,7944 \end{bmatrix} \text{ kip/(in/dt)} \quad (5.17a)$$

Dengan menggunakan persamaan (3.36b), maka matrik redaman struktur efektif diperoleh, yaitu,

$$[C_0^*] = \begin{bmatrix} 6,6415 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 12,6704 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 4,7081 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 6,6218 \end{bmatrix} \text{ kip/(in/dt)} \quad (5.17b)$$

Kemudian dengan menggunakan persamaan (3.39a) dan dengan memasukkan masing-masing elemen setiap *mode* pada persamaan (5.9), (5.16), dan (5.17b), maka rasio redaman struktur untuk setiap *mode* untuk kombinasi 0 diperoleh,

mode ke-1,

$$\xi_1 = \frac{6,6415}{2.16,6239 \cdot 9,9872} = 0,0200 \quad (5.18a)$$

mode ke-2,

$$\xi_2 = \frac{12,6704}{2.3,5865 \cdot 23,9007} = 0,0739 \quad (5.18b)$$

mode ke-3,

$$\xi_3 = \frac{4,7081}{2.0,8404 \cdot 37,2083} = 0,0753 \quad (5.18c)$$

mode ke-4,

$$\xi_4 = \frac{6,6218}{2.0,8130 \cdot 47,1321} = 0,0861 \quad (5.18d)$$

Setelah nilai rasio redaman diketahui, selanjutnya nilai g_j dapat dicari dengan menggunakan metode *central difference*. Menghitung nilai a , b , dan k untuk setiap *mode* dapat dicari dengan menggunakan persamaan (3.49), (3.50), dan (3.51) sebagai berikut.

mode ke-1,

$$a_1 = \left[\omega_1^2 - \frac{2}{(\Delta t)^2} \right] = \left[9,9872^2 - \frac{2}{0,01^2} \right] = -19900,2558 \quad (5.19a)$$

$$b_1 = \left[\frac{1}{(\Delta t)^2} - \frac{2\xi_1\omega_1}{2\Delta t} \right] = \left[\frac{1}{0,01^2} - \frac{2.0,0200.9,9872}{2.0,01} \right] = 9980,0245 \quad (5.19b)$$

$$\hat{k}_1 = \left[\frac{1}{(\Delta t)^2} + \frac{2\xi_1\omega_1}{2\Delta t} \right] = \left[\frac{1}{0,01^2} + \frac{2.0,0200.9,9872}{2.0,01} \right] = 10019,9755 \quad (5.19c)$$

mode ke-2,

$$a_2 = \left[\omega_2^2 - \frac{2}{(\Delta t)^2} \right] = \left[23,9007^2 - \frac{2}{0,01^2} \right] = -19428,75654 \quad (5.20a)$$

$$b_2 = \left[\frac{1}{(\Delta t)^2} - \frac{2\xi_2\omega_2}{2\Delta t} \right] = \left[\frac{1}{0,01^2} - \frac{2.0,0739.23,9007}{2.0,01} \right] = 9823,37 \quad (5.20b)$$

$$\hat{k}_2 = \left[\frac{1}{(\Delta t)^2} + \frac{2\xi_2\omega_2}{2\Delta t} \right] = \left[\frac{1}{0,01^2} + \frac{2.0,0739.23,9007}{2.0,01} \right] = 10176,63 \quad (5.20c)$$

mode ke-3,

$$a_3 = \left[\omega_3^2 - \frac{2}{(\Delta t)^2} \right] = \left[37,2083^2 - \frac{2}{0,01^2} \right] = -18615,5424 \quad (5.21a)$$

$$b_3 = \left[\frac{1}{(\Delta t)^2} - \frac{2\xi_3\omega_3}{2\Delta t} \right] = \left[\frac{1}{0,01^2} - \frac{2.0,0752.37,2083}{2.0,01} \right] = 9719,9138 \quad (5.21b)$$

$$\hat{k}_3 = \left[\frac{1}{(\Delta t)^2} + \frac{2\xi_3 \omega_3}{2\Delta t} \right] = \left[\frac{1}{0,01^2} + \frac{2,0,0752,37,2083}{2,0,01} \right] = 10280,08621 \quad (5.21c)$$

mode ke-4,

$$a_4 = \left[\omega_4^2 - \frac{2}{(\Delta t)^2} \right] = \left[47,3210^2 - \frac{2}{0,01^2} \right] = -17760,7230 \quad (5.22a)$$

$$b_4 = \left[\frac{1}{(\Delta t)^2} - \frac{2\xi_4 \omega_4}{2\Delta t} \right] = \left[\frac{1}{0,01^2} - \frac{2,0,0860,47,3210}{2,0,01} \right] = 9592,7747 \quad (5.22b)$$

$$\hat{k}_4 = \left[\frac{1}{(\Delta t)^2} + \frac{2\xi_4 \omega_4}{2\Delta t} \right] = \left[\frac{1}{0,01^2} + \frac{2,0,0860,47,3210}{2,0,01} \right] = 10407,22528 \quad (5.22c)$$

Hasil perhitungan mencari nilai a , b , k^{\wedge} untuk setiap kombinasi dapat dilihat pada Tabel 5.1. Sedangkan perhitungan nilai g_j dapat dicari dengan menggunakan persamaan (3.48) dimana hasil perhitungannya dapat dilihat pada Tabel 5.2.a untuk respon struktur MDOF akibat beban gempa El Centro tahun 1940 untuk kombinasi 0, dimana waktu t_i diperlihatkan hanya dari 0,01 sampai dengan 0,15 detik saja. Adapun respon struktur selengkapnya dapat dilihat pada Lampiran 2.

Di dalam menyusun persamaan matrik redaman ada dua cara yang dapat dipakai, sehingga nilai rasio redaman dapat diperoleh, yaitu :

- dengan menjumlahkan persamaan matrik redaman struktur tanpa redaman tambahan, yaitu persamaan (5.16), dengan persamaan matrik redaman tambahan pada tiap-tiap kombinasi perletakan *MR-D* dengan variasi masing-masing, seperti yang tertera pada persamaan (4.1) sampai persamaan (4.43), sehingga nilai rasio redaman yang dicari, langsung didapat,
- persamaan matrik redaman masing-masing kombinasi perletakan disubstitusikan ke persamaan (3.36b), dan (3.39a) sehingga matrik redaman efektif dan rasio

redaman masing-masing diperoleh, kemudian masing-masing rasio redaman yang didapat tersebut dijumlahkan dengan rasio redaman struktur, yaitu rasio redaman tanpa *MR-D*.

Penelitian ini menggunakan cara pertama untuk menyusun persamaan matrik redaman yang dicari. Hasil perhitungan persamaan matrik redaman tiap-tiap kombinasi perletakan *MR-D* dapat dilihat pada persamaan (4.1) sampai persamaan (4.43), sehingga untuk kombinasi 15 (R1A pada tingkat 4 dan R1B pada tingkat 2), persamaan matrik redaman yang dicari adalah seperti yang tertulis pada persamaan (4.16). Sedangkan kombinasi 31 (R2A pada tingkat 4 dan R2B pada tingkat 2), pada persamaan (4.32).

5.2.2 Hitungan untuk Kombinasi 15 (R1A di tingkat 4 dan R1B di tingkat 2)

Bentuk matrik massa [*M*], matrik kekakuan [*K*], matrik *mode shape* [*Φ*], frekuensi sudut {*ω*}, dan partisipasi setiap *mode* (*T*) sama dengan hitungan pada kombinasi 0, seperti yang ditunjukkan pada persamaan (5.1a), (5.1b), (5.8), (5.9), (5.11c), (5.12c), (5.13c), dan (5.14c). Selanjutnya menyusun persamaan matrik redaman, yaitu untuk kombinasi 4 menjadi,

$$[C_{15}] = \begin{bmatrix} 27,0888 & -26,2944 & 0 & 0 \\ -26,2944 & 27,0888 & -0,7944 & 0 \\ 0 & -0,7944 & 6,0888 & -5,2944 \\ 0 & 0 & -5,2944 & 5,2944 \end{bmatrix} \text{ kip/(in/dt)} \quad (5.23)$$

Dengan menggunakan persamaan (3.36b), maka matrik redaman struktur efektif diperoleh, yaitu,

$$[C_{is}] = \begin{bmatrix} 100,662 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 96,7538 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 21,2999 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 116,739 \end{bmatrix} \quad \text{kip/(in/dt)} \quad (5.24)$$

Kemudian dengan menggunakan persamaan (3.39a) dan dengan memasukkan masing-masing elemen setiap *mode* pada persamaan (5.9), (5.16), dan (5.23), maka rasio redaman struktur untuk setiap *mode* diperoleh, sebagai berikut,

mode ke-1,

$$\xi_1 = \frac{100,662}{2.16,6239 \cdot 9,9872} = 0,3032 \quad (5.24a)$$

mode ke-2,

$$\xi_2 = \frac{96,7538}{2.3,5865 \cdot 23,9007} = 0,5644 \quad (5.24b)$$

mode ke-3,

$$\xi_3 = \frac{21,2999}{2.0,8404 \cdot 37,2083} = 0,3406 \quad (5.24c)$$

mode ke-4,

$$\xi_4 = \frac{116,739}{2.0,8130 \cdot 47,1321} = 1,5172 \quad (5.24d)$$

Setelah nilai rasio redaman diketahui untuk setiap posisi redaman pada tiap ragam goyangan, selanjutnya nilai g_j dicari dengan menggunakan metode *central difference*. Nilai a , b , dan k untuk setiap *mode* dapat dicari dengan menggunakan persamaan (3.49), (3.50), dan (3.51) sebagai berikut.

mode ke-1,

$$a_1 = \left[\omega_1^2 - \frac{2}{(\Delta t)^2} \right] = \left[9,9872^2 - \frac{2}{0,01^2} \right] = -19900,2558 \quad (5.25a)$$

$$b_1 = \left[\frac{1}{(\Delta t)^2} - \frac{2\xi_1\omega_1}{2\Delta t} \right] = \left[\frac{1}{0,01^2} - \frac{2,0,3032,9,9872}{2,0,01} \right] = 9697,2359 \quad (5.25b)$$

$$\hat{k}_1 = \left[\frac{1}{(\Delta t)^2} + \frac{2\xi_1\omega_1}{2\Delta t} \right] = \left[\frac{1}{0,01^2} + \frac{2,0,3032,9,9872}{2,0,01} \right] = 10302,7641 \quad (5.25c)$$

mode ke-2,

$$a_2 = \left[\omega_2^2 - \frac{2}{(\Delta t)^2} \right] = \left[23,9007^2 - \frac{2}{0,01^2} \right] = -19428,7565 \quad (5.26a)$$

$$b_2 = \left[\frac{1}{(\Delta t)^2} - \frac{2\xi_2\omega_2}{2\Delta t} \right] = \left[\frac{1}{0,01^2} - \frac{2,0,5644,23,9007}{2,0,01} \right] = 8651,1384 \quad (5.26b)$$

$$\hat{k}_2 = \left[\frac{1}{(\Delta t)^2} + \frac{2\xi_2\omega_2}{2\Delta t} \right] = \left[\frac{1}{0,01^2} + \frac{2,0,5644,23,9007}{2,0,01} \right] = 11348,8616 \quad (5.26c)$$

mode ke-3,

$$a_3 = \left[\omega_3^2 - \frac{2}{(\Delta t)^2} \right] = \left[37,2083^2 - \frac{2}{0,01^2} \right] = 18615,5424 \quad (5.27a)$$

$$b_3 = \left[\frac{1}{(\Delta t)^2} - \frac{2\xi_3\omega_3}{2\Delta t} \right] = \left[\frac{1}{0,01^2} - \frac{2,0,3406,37,2083}{2,0,01} \right] = 8732,7507 \quad (5.27b)$$

$$\hat{k}_3 = \left[\frac{1}{(\Delta t)^2} + \frac{2\xi_3\omega_3}{2\Delta t} \right] = \left[\frac{1}{0,01^2} + \frac{2,0,3406,37,2083}{2,0,01} \right] = 11267,2493 \quad (5.27c)$$

mode ke-4,

$$a_4 = \left[\omega_4^2 - \frac{2}{(\Delta t)^2} \right] = \left[47,3210^2 - \frac{2}{0,01^2} \right] = -17760,7230 \quad (5.28a)$$

$$b_4 = \left[\frac{1}{(\Delta t)^2} - \frac{2\xi_4\omega_4}{2\Delta t} \right] = \left[\frac{1}{0,01^2} - \frac{2,1,5172,47,3210}{2,0,01} \right] = 2820,4674 \quad (5.28b)$$

$$\hat{k}_4 = \left[\frac{1}{(\Delta t)^2} + \frac{2\xi_4\omega_4}{2\Delta t} \right] = \left[\frac{1}{0,01^2} + \frac{2,1,5172,47,3210}{2,0,01} \right] = 17179,5326 \quad (5.28c)$$

Sama halnya dengan kombinasi 0, hasil perhitungan untuk kombinasi 15 selengkapnya dapat dilihat pada Tabel 5.1 dan nilai g_j juga dapat dicari dengan menggunakan persamaan (3.48) dimana hasil perhitungannya dapat dilihat pada Tabel 5.2.b yaitu, respon struktur MDOF akibat beban gempa El Centro tahun 1940 untuk kombinasi 15, dimana waktu t_i diperlihatkan hanya dari 0,01 sampai dengan 0,15 detik.

5.2.3 Hitungan untuk Kombinasi 31 (R2A di tingkat 4 dan R2B di tingkat 2).

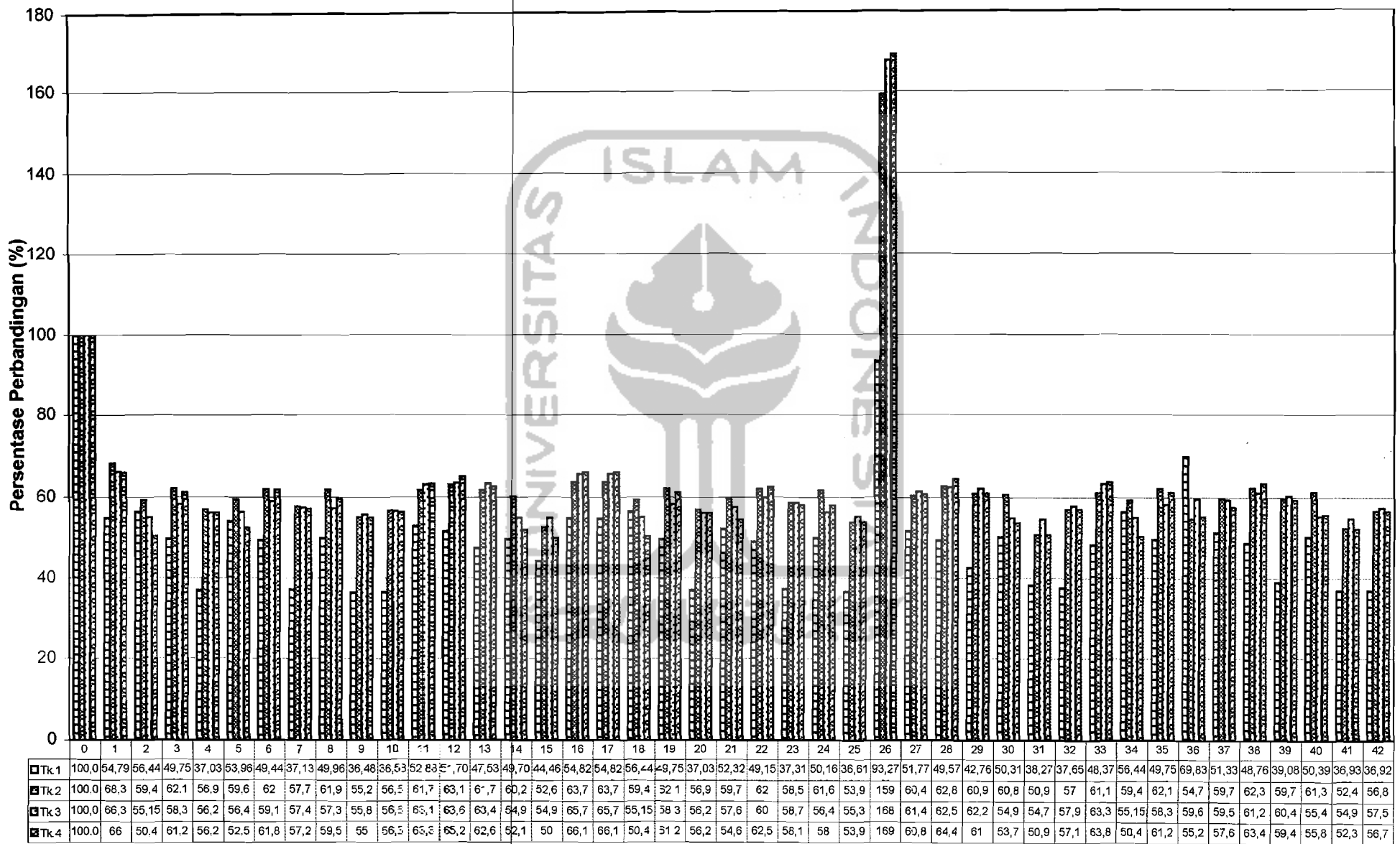
Bentuk matrik massa $[M]$, matrik kekakuan $[K]$, matrik *mode shape* $[\Phi]$, frekuensi sudut $\{\omega\}$, dan partisipasi setiap *mode* (Γ) sama dengan hitungan pada kombinasi 0, seperti yang ditunjukkan pada persamaan (5.1a), (5.1b), (5.8), (5.9), (5.11c), (5.12c), (5.13c), dan (5.14c). Selanjutnya menyusun persamaan matrik redaman, yaitu untuk kombinasi 31 menjadi,

$$[C_{31}] = \begin{bmatrix} 22,5888 & -21,7944 & 0 & 0 \\ -21,7944 & 22,5888 & -0,7944 & 0 \\ 0 & -0,7944 & 10,5888 & -9,7944 \\ 0 & 0 & -9,7944 & 9,7944 \end{bmatrix} \text{kip/(in/dt)} \quad (5.29)$$

Tabel 5.2.c Respon Struktur MDOF Akibat Gempa El Centro (1940), Untuk Kombinasi 31

(i)	t(i) dt	Yt (cm/dt2)	Yt (in/dt2)	g1	g2	g3	g4	Z1	Z2	Z3	Z4	Simpangan Relatif (in)			
												Y1	Y2	Y3	Y4
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	0,01	6,17778	2,4322	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0,02	3,56938	1,4053	-0,000236	-0,000200	-0,000206	-0,000151	-0,000057	-0,000039	-0,000071	-0,000033	-0,000200	-2,375E-04	-2,286E-04	-2,516E-04
3	0,03	0,97079	0,3822	-0,000594	-0,000437	-0,000445	-0,000253	-0,000143	-0,000085	-0,000153	-0,000056	-0,000437	-5,878E-04	-5,703E-04	-6,573E-04
4	0,04	4,19697	1,6523	-0,000963	-0,000601	-0,000591	-0,000266	-0,000232	-0,000117	-0,000203	-0,000058	-0,000611	-9,234E-04	-9,300E-04	-1,103E-03
5	0,05	7,43295	2,9264	-0,001463	-0,000816	-0,000764	-0,000335	-0,000353	-0,000159	-0,000263	-0,000074	-0,000848	-1,359E-03	-1,431E-03	-1,704E-03
6	0,06	10,6591	4,1965	-0,002205	-0,001157	-0,001042	-0,000486	-0,000532	-0,000226	-0,000358	-0,000107	-0,001223	-2,006E-03	-2,178E-03	-2,589E-03
7	0,07	6,68769	2,6329	-0,003292	-0,001671	-0,001470	-0,000715	-0,000794	-0,000326	-0,000505	-0,000157	-0,001783	-2,961E-03	-3,269E-03	-3,881E-03
8	0,08	2,71626	1,0694	-0,004543	-0,002142	-0,001818	-0,000834	-0,001096	-0,000418	-0,000625	-0,000183	-0,002322	-4,024E-03	-4,532E-03	-5,409E-03
9	0,09	-1,25517	-0,4942	-0,005784	-0,002435	-0,001938	-0,000813	-0,001395	-0,000475	-0,000666	-0,000179	-0,002715	-5,005E-03	-5,811E-03	-6,980E-03
10	0,1	3,60861	1,4207	-0,006851	-0,002469	-0,001752	-0,000664	-0,001652	-0,000482	-0,000602	-0,000146	-0,002883	-5,747E-03	-6,951E-03	-8,399E-03
11	0,11	8,47238	3,3356	-0,007931	-0,002492	-0,001537	-0,000625	-0,001913	-0,000487	-0,000528	-0,000137	-0,003065	-6,463E-03	-8,125E-03	-9,833E-03
12	0,12	13,3362	5,2505	-0,009197	-0,002665	-0,001490	-0,000735	-0,002218	-0,000520	-0,000512	-0,000162	-0,003413	-7,357E-03	-9,479E-03	-1,147E-02
13	0,13	7,12896	2,8067	-0,010815	-0,003084	-0,001727	-0,000985	-0,002609	-0,000602	-0,000594	-0,000216	-0,004021	-8,600E-03	-1,116E-02	-1,351E-02
14	0,14	0,92176	0,3629	-0,012510	-0,003442	-0,001928	-0,001082	-0,003017	-0,000672	-0,000663	-0,000238	-0,004590	-9,901E-03	-1,290E-02	-1,567E-02
15	0,15	4,11852	1,6215	-0,014024	-0,003542	-0,001872	-0,000978	-0,003383	-0,000692	-0,000644	-0,000215	-0,004933	-1,098E-02	-1,446E-02	-1,769E-02





Gambar 5.3.b Grafik Persentase Perbandingan Kecepatan Antar Tingkat Maksimum