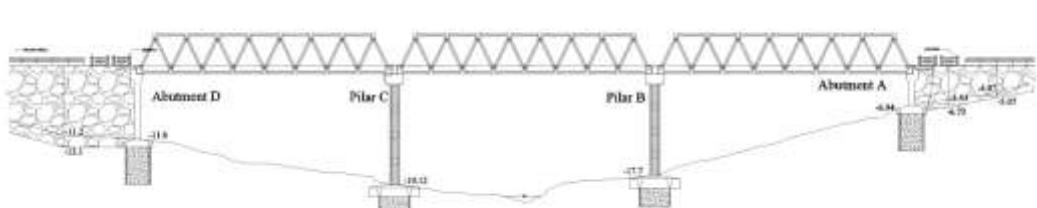


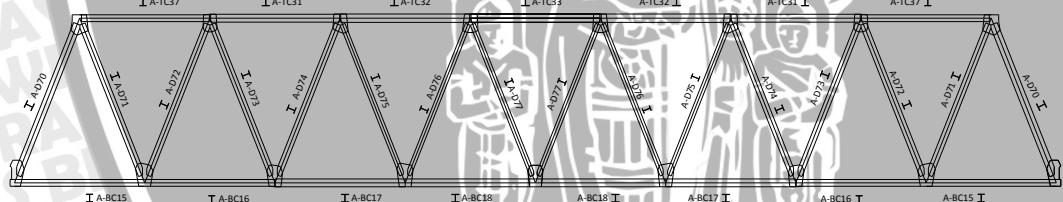
BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

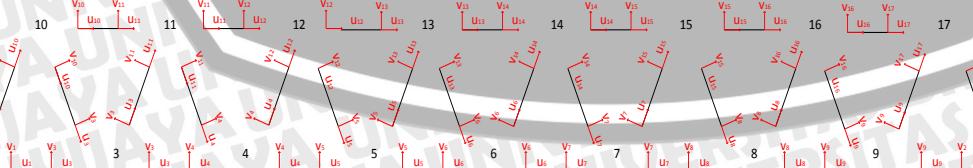
Pada bab ini akan dibahas respon dinamis rangka jembatan Kalilanang. Pembahasan meliputi penyusunan matriks massa, kekakuan, dan redaman, menghitung frekuensi alami struktur, analisis respon dinamis rangka Jembatan Kalilanang dalam arah memanjang akibat beban gempa. Potongan memanjang rangka sebagaimana tampak pada gambar 4.1



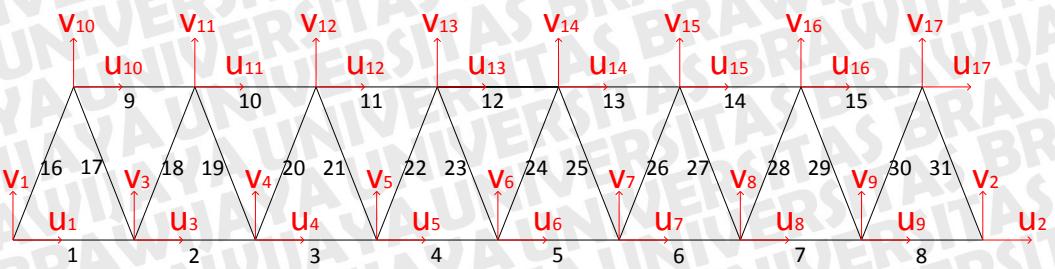
Gambar 4.1 Tampak memanjang rangka jembatan



Gambar 4.2 Kode profil rangka jembatan Kalilanang



Gambar 4.3 Koordinat Sumbu Lokal Struktur Rangka Batang



Gambar 4.4 Koordinat Sumbu Global Struktur Rangka Batang

4.1 Analisis Dinamis Pada Rangka untuk Pembebatan Dua Dimensi

4.1.1 Data batang

Data tentang geometri rangka jembatan Kalilanang meliputi panjang, luas, massa, dan orientasi sudut terhadap sumbu x global,

Tabel 4.1 data geometri tiap elemen batang

| No Batang | Panjang L (mm) | Luas Penampang A (mm ²) | Massa \bar{m} (kg/mm ²) | Sudut θ (°) |
|-----------|----------------|-------------------------------------|---------------------------------------|--------------------|
| 1 | 5000 | 8000 | 0,0628 | 0 |
| 2 | 5000 | 8000 | 0,0628 | 0 |
| 3 | 5000 | 8800 | 0,06908 | 0 |
| 4 | 5000 | 8800 | 0,06908 | 0 |
| 5 | 5000 | 8000 | 0,0628 | 0 |
| 6 | 5000 | 8000 | 0,0628 | 0 |
| 7 | 5000 | 8800 | 0,06908 | 0 |
| 8 | 5000 | 8800 | 0,06908 | 0 |
| 9 | 5000 | 7000 | 0,05495 | 0 |
| 10 | 5000 | 8800 | 0,06908 | 0 |
| 11 | 5000 | 12300 | 0,096555 | 0 |
| 12 | 5000 | 12300 | 0,096555 | 0 |
| 13 | 5000 | 12300 | 0,096555 | 0 |
| 14 | 5000 | 8800 | 0,06908 | 0 |
| 15 | 5000 | 7000 | 0,05495 | 0 |
| 16 | 6777,91 | 11700 | 0,091845 | 68,36 |
| 17 | 6777,91 | 8000 | 0,0628 | 291,64 |
| 18 | 6777,91 | 8000 | 0,0628 | 68,36 |
| 19 | 6777,91 | 6840 | 0,053694 | 291,64 |
| 20 | 6777,91 | 6840 | 0,053694 | 68,36 |
| 21 | 6777,91 | 6840 | 0,053694 | 291,64 |
| 22 | 6777,91 | 6040 | 0,047414 | 68,36 |

bersambung ke halaman berikutnya

Lanjutan tabel 4.1

| No Batang | Panjang L (mm) | Luas Penampang A (mm ²) | Massa \bar{m} (kg/mm') | Sudut θ (°) |
|--------------|-------------------|---|-----------------------------|-----------------------|
| 23 | 6777,91 | 6040 | 0,047414 | 291,64 |
| 24 | 6777,91 | 6040 | 0,047414 | 68,36 |
| 25 | 6777,91 | 6040 | 0,047414 | 291,64 |
| 26 | 6777,91 | 6840 | 0,053694 | 68,36 |
| 27 | 6777,91 | 6840 | 0,053694 | 291,64 |
| 28 | 6777,91 | 6840 | 0,053694 | 68,36 |
| 29 | 6777,91 | 8000 | 0,0628 | 291,64 |
| 30 | 6777,91 | 8000 | 0,0628 | 68,36 |
| 31 | 6777,91 | 11700 | 0,091845 | 291,64 |

4.1.2 Matriks Kekakuan

4.1.2.1 Matriks Kekakuan Lokal Tiap Rangka Batang

Seperti yang telah dijelaskan pada bab II, matriks kekakuan lokal tiap elemen rangka batang dipengaruhi oleh luas penampang profil (A), panjang profil (L), dan modulus elastisitas profil (E) seperti pada persamaan (2-49)

$$[k_i] = \frac{A_i E}{L_i} \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Diambil elemen rangka batang nomor 16 pada jembatan Kalilanang yang memiliki data sebagai berikut:

$$A = 11700 \text{ mm}^2$$

$$L = 6777,91 \text{ mm}$$

$$E = 210000 \text{ MPa} = 21412,52 \text{ kg/mm}^2$$

Kemudian dimasukkan ke dalam persamaan (2-49)

$$[k_{16}] = \frac{(11700)(21412,52)}{6777,91} \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 36962,2 & 0 & -36962,2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ -36962,2 & 0 & 36962,2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{matrix} u_1 \\ v_1 \\ u_{10} \\ v_{10} \end{matrix}$$

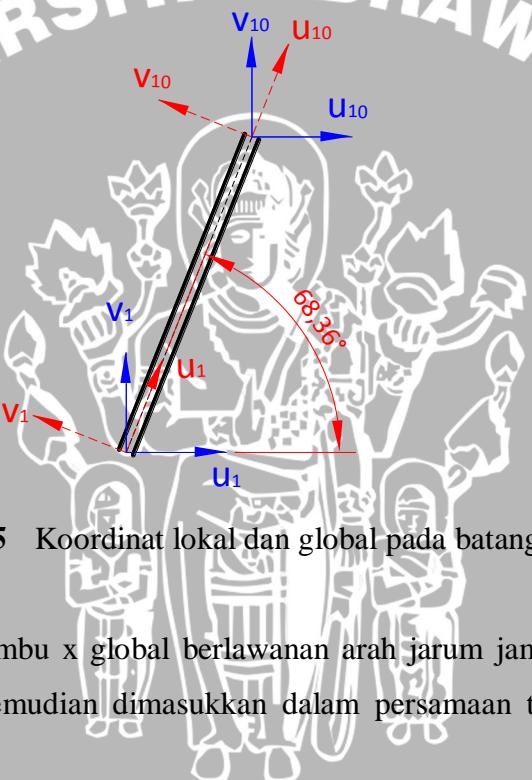
Untuk batang yang lain dapat dilihat dalam lampiran

4.1.2.2 Matriks Kekakuan Global Struktur Rangka Batang

Untuk menyusun matriks kekakuan global diperlukan matriks transformasi yang mentransformasi koordinat kekakuan elemen lokal menjadi koordinat kekakuan struktur global. Matriks transformasi tergantung pada sudut kemiringan batang (θ) sesuai dengan persamaan (2-75)

$$[T] = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta & 0 & 0 \\ -\sin\theta & \cos\theta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \cos\theta & \sin\theta \\ 0 & 0 & -\sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix}$$

Pentuan sumbu koordinat dan nilai sudut kemiringan batang (θ), sebagai berikut:



Gambar 4.5 Koordinat lokal dan global pada batang 16

Sudut ditarik dari sumbu x global berlawanan arah jarum jam ke sumbu x lokal, didapatkan $\theta_{16} = 63,36^\circ$, kemudian dimasukkan dalam persamaan transformasi matriks kekakuan.

$$[K_i] = [T]^T [k_i] [T] \quad (4-1)$$

dimana:

$[K]$ = matriks kekakuan global batang ke- i

$[T]$ = matriks transformasi

$[k]$ = matriks kekakuan lokal batang ke- i

Perhitungan batang 16, untuk transforamsi matriks kekakuan yang lain terlampir

$$[k_{16}] = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta & 0 & 0 \\ -\sin\theta & \cos\theta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \cos\theta & \sin\theta \\ 0 & 0 & -\sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix}^T \times \begin{bmatrix} 36962,2 & 0 & -36962,2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ -36962,2 & 0 & 36962,2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta & 0 & 0 \\ -\sin\theta & \cos\theta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \cos\theta & \sin\theta \\ 0 & 0 & -\sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix}$$

$$[k_{16}] = \begin{bmatrix} 0,4 & -0,9 & 0 & 0 \\ 0,9 & 0,4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0,4 & -0,9 \\ 0 & 0 & 0,9 & 0,4 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 36962,2 & 0 & -36962,2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ -36962,2 & 0 & 36962,2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 0,4 & 0,9 & 0 & 0 \\ -0,9 & 0,4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0,4 & 0,9 \\ 0 & 0 & -0,9 & 0,4 \end{bmatrix}$$

$$[k_{16}] = \begin{bmatrix} u_1 & v_1 & u_{10} & v_{10} \\ 5026,64 & 12670 & -5026,6 & -12670 \\ 12670 & 31935,6 & -12670 & -31936 \\ -5026,6 & -12670 & 5026,64 & 12670 \\ -12670 & -31936 & 12670 & 31935,6 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ v_1 \\ u_{10} \\ v_{10} \end{bmatrix}$$

Kemudian disusun menjadi suatu matriks kekakuan global

$$[K] = \begin{bmatrix} u_1 & v_1 & \dots & u_{10} & v_{10} & \dots \\ 5026,64+... & 12669,98+... & ... & -5026,64+... & -12669,98+... & ... \\ 12669,98+... & 31935,57+... & ... & -12669,98+... & -31935,57+... & ... \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ -5026,64+... & -12669,98+... & ... & 5026,64+... & 12669,98+... & ... \\ -12669,98+... & -31935,57+... & ... & 12669,98+... & 31935,57+... & ... \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ v_1 \\ u_{10} \\ v_{10} \\ \dots \end{bmatrix}$$

Detail keseluruhan matriks kekakuan global dapat dilihat dalam lampiran

4.1.3 Matriks Massa

4.1.3.1 Matriks Massa Lokal Tiap Rangka Batang

Matriks massa lokal tiap elemen rangka batang dipengaruhi oleh massa per-satuan panjang (\bar{m}) dan panjang profil (L), seperti pada persamaan (2-74)

$$[m_i] = \frac{\bar{m}_i L_i}{6} \begin{bmatrix} 2 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 2 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 2 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 2 \end{bmatrix}$$

Diambil elemen rangka batang nomor 16 pada jembatan Kalilanang yang memiliki data sebagai berikut:

$$\bar{m} = 0,09185 \text{ kg/mm}^3$$

$$L = 6777,91 \text{ mm}$$

Kemudian dimasukkan ke dalam persamaan (2-74)

$$[m_{16}] = \frac{(0,09185)(6778)}{6} \begin{bmatrix} 2 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 2 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 2 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 207,506 & 0 & 103,753 & 0 \\ 0 & 207,506 & 0 & 103,753 \\ 103,753 & 0 & 207,506 & 0 \\ 0 & 103,753 & 0 & 207,506 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ v_1 \\ u_{10} \\ v_{10} \end{bmatrix}$$

4.1.3.2 Matriks Massa Global Struktur Rangka Batang

Transformasi matriks massa lokal ke matriks massa global sama dengan cara transformasi matriks kekakuan, sebagai berikut:

$$[M_i] = [T]^T [m_i] [T] \quad (4-2)$$

dimana:

$[M]$ = matriks massa global batang ke-*i*

$[T]$ = matriks transformasi

$[m]$ = matriks massa lokal batang ke-*i*

Perhitungan batang 16, untuk transforamsi matriks massa yang lain terlampir

$$[m_{16}] = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta & 0 & 0 \\ -\sin\theta & \cos\theta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \cos\theta & \sin\theta \\ 0 & 0 & -\sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} 207,51 & 0 & 103,75 & 0 \\ 0 & 207,51 & 0 & 103,75 \\ 103,75 & 0 & 207,51 & 0 \\ 0 & 103,75 & 0 & 207,51 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta & 0 & 0 \\ -\sin\theta & \cos\theta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \cos\theta & \sin\theta \\ 0 & 0 & -\sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix}$$

$$[m_{16}] = \begin{bmatrix} 0,3688 & -0,929 & 0 & 0 \\ 0,9295 & 0,3688 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0,3688 & -0,929 \\ 0 & 0 & 0,9295 & 0,3688 \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} 207,51 & 0 & 103,75 & 0 \\ 0 & 207,51 & 0 & 103,75 \\ 103,75 & 0 & 207,51 & 0 \\ 0 & 103,75 & 0 & 207,51 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0,3688 & 0,9295 & 0 & 0 \\ -0,929 & 0,3688 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0,3688 & 0,9295 \\ 0 & 0 & -0,929 & 0,3688 \end{bmatrix}$$

$$[m_{16}] = \begin{bmatrix} u_1 & v_1 & u_{10} & v_{10} \\ 207,51 & 0 & 103,75 & 0 \\ 0 & 207,51 & 0 & 103,75 \\ 103,75 & 0 & 207,51 & 0 \\ 0 & 103,75 & 0 & 207,51 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ v_1 \\ u_{10} \\ v_{10} \end{bmatrix}$$

Kemudian disusun menjadi suatu matriks kekakuan global

$$[M] = \begin{bmatrix} u_1 & v_1 & \dots & u_{10} & v_{10} & \dots \\ 207,51+\dots & 0+\dots & \dots & 103,75+\dots & 0+\dots & \dots \\ 0+\dots & 207,51+\dots & \dots & 0+\dots & 103,75+\dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 103,75+\dots & 0+\dots & \dots & 103,75+\dots & 0+\dots & \dots \\ 0+\dots & 103,75+\dots & \dots & 0+\dots & 207,51+\dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \end{bmatrix} \begin{array}{c} u_1 \\ v_1 \\ \dots \\ u_{10} \\ v_{10} \\ \dots \end{array}$$

Detail keseluruhan matriks massa global dapat dilihat dalam lampiran

4.1.4 Menentukan Frekuensi Alami dan Frekuensi Teredam dari Sistem

$[\bar{K}] - \omega^2 [\bar{M}] \{a\} = \{0\}$ merupakan *eigen value problem* sesuai persamaan (2-86)

Dimana persamaan di atas yang boleh sama dengan nol adalah

$$[\bar{K}] - \omega^2 [\bar{M}] = 0 \text{ dan } \{a\} \neq 0$$

Sehingga untuk mendapatkan nilai ω , diperlukan solusi non-trivial

$$[\bar{K}] - \omega^2 [\bar{M}] = 0$$

Dengan menggunakan bantuan software STAADPro 2006 didapatkan
(data masukan/input dan keluaran/output terlampir)

Tabel 4.2 Hasil perhitungan STAADPro 2006 (Perhitungan Modal Frekuensi & Partisipasi Massa)

| Mode | Frequency (Hz) | Period (detik) | Partisipasi X (%) | Partisipasi Y (%) | Partisipasi Z (%) |
|------|----------------|----------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| 1 | 9.473 | 0.106 | 0.000 | 85.714 | 0.000 |
| 2 | 25.993 | 0.038 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| 3 | 43.245 | 0.023 | 0.000 | 8.194 | 0.000 |
| 4 | 59.053 | 0.017 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| 5 | 74.016 | 0.014 | 0.000 | 2.714 | 0.000 |
| dst. | ... | ... | ... | ... | ... |

Tabel 4.2 menghasilkan frekuensi (f) sedangkan yang dicari adalah frekuensi alami (ω_n) dan frekuensi teredam (ω_D). hubungan antara f , ω_n , dan ω_D sesuai dengan persamaan berikut:

$$\omega_n = f \times 2\pi \quad (4-3)$$

$$\omega_D = \omega_n \sqrt{(1 - \xi^2)} \quad (4-4)$$

Tabel 4.3 Pengolahan data keluaran STAADPro 2006

| Mode | $\omega_n = f \times 2\pi$ (rad/det) | $\omega_D = \omega_n \sqrt{1 - \xi^2}$ (rad/det) |
|------|---|---|
| 1 | $9,473 \times 2 (3,14) = 59,54$ | $59,54 \sqrt{1 - 0,05^2} = 59,47$ |
| 2 | $25,993 \times 2 (3,14) = 163,98$ | $163,98 \sqrt{1 - 0,05^2} = 163,17$ |
| 3 | $43,245 \times 2 (3,14) = 271,82$ | $271,82 \sqrt{1 - 0,05^2} = 271,48$ |

Catatan $\xi = 0,05$ (Chen & Duan, 3-7)

4.1.5 Matriks Redaman

4.1.5.1 Matriks Redaman Lokal Tiap Rangka Batang

4.1.5.1.1 Matriks Redaman pada Mode Shape 1

Matriks redaman didapatkan dari persamaan berikut

$$[c_i] = 2\xi\omega_n [m_i] \quad (4-5)$$

dimana:

$[c_i]$ = matriks redaman lokal batang ke- i

$[m_i]$ = matriks massa lokal batang ke- i

ξ = rasio redaman

ω_n = frekuensi alami

Diketahui

$\xi = 0,05$; $\omega_n = 59,47$ rad/det

Perhitungan matriks redaman batang 16, untuk batang yang lain terlampir

$$[c_{16}] = 2 \times 0,05 \times 59,47 \times \begin{bmatrix} 207,506 & 0 & 103,753 & 0 \\ 0 & 207,506 & 0 & 103,753 \\ 103,753 & 0 & 207,506 & 0 \\ 0 & 103,753 & 0 & 207,506 \end{bmatrix}$$

$$[c_{16}] = \begin{bmatrix} u_1 & v_1 & u_{10} & v_{10} \\ 1235,489 & 0 & 617,745 & 0 \\ 0 & 1235,489 & 0 & 617,745 \\ 617,745 & 0 & 1235,489 & 0 \\ 0 & 617,745 & 0 & 1235,489 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ v_1 \\ u_{10} \\ v_{10} \end{bmatrix}$$

4.1.5.1.2 Martiks Redaman pada Mode Shape 2

Diketahui

$$\xi = 0,05; \omega_n = 163,17 \text{ rad/det}$$

dimasukkan ke dalam persamaan matriks redaman (4-5)

Perhitungan matriks redaman batang 16, untuk batang yang lain terlampir

$$[c_{16}] = 2 \times 0,05 \times 163,17 \times \begin{bmatrix} 207,506 & 0 & 103,753 & 0 \\ 0 & 207,506 & 0 & 103,753 \\ 103,753 & 0 & 207,506 & 0 \\ 0 & 103,753 & 0 & 207,506 \end{bmatrix}$$

$$[c_{16}] = \begin{bmatrix} 3390,289 & 0 & 748,144 & 0 \\ 0 & 3390,289 & 0 & 748,144 \\ 748,144 & 0 & 3390,289 & 0 \\ 0 & 748,144 & 0 & 3390,289 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ v_1 \\ u_{10} \\ v_{10} \end{bmatrix}$$

4.1.5.1.3 Martiks Redaman pada Mode shape 3

diketahui

$$\xi = 0,05; \omega_n = 271,48 \text{ rad/det}$$

dimasukkan ke dalam persamaan matriks redaman (4-5)

Perhitungan matriks redaman batang 16, untuk batang yang lain terlampir

$$[c_{16}] = 2 \times 0,05 \times 271,48 \times \begin{bmatrix} 207,506 & 0 & 103,753 & 0 \\ 0 & 207,506 & 0 & 103,753 \\ 103,753 & 0 & 207,506 & 0 \\ 0 & 103,753 & 0 & 207,506 \end{bmatrix}$$

$$[c_{16}] = \begin{bmatrix} 5640,420 & 0 & 2820,210 & 0 \\ 0 & 5640,420 & 0 & 2820,210 \\ 2820,210 & 0 & 5640,420 & 0 \\ 0 & 2820,210 & 0 & 5640,420 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ v_1 \\ u_{10} \\ v_{10} \end{bmatrix}$$

4.1.5.2 Matriks Redaman Global Struktur Rangka Batang

Dari matriks redaman lokal di atas, kemudian ditransformasi dengan persamaan betikut:

$$[C_i] = [T]^T [c_i] [T] \quad (4-6)$$

dimana:

$[C_i]$ = matriks redaman global batang ke- i

$[c_i]$ = matriks redaman lokal batang ke- i

$[T]$ = matriks transformasi

Setelah itu disusun menjadi sebuah matriks redaman global

4.1.5.2.1 Matriks Redaman Global pada Mode shape 1

Perhitungan matriks redaman global, dengan memasukkan nilai-nilai yang ada ke dalam persamaan (4-6)

$$[C_{16}] = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta & 0 & 0 \\ -\sin\theta & \cos\theta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \cos\theta & \sin\theta \\ 0 & 0 & -\sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} 1235,49 & 0 & 617,75 & 0 \\ 0 & 1235,49 & 0 & 617,75 \\ 617,75 & 0 & 1235,49 & 0 \\ 0 & 617,75 & 0 & 1235,49 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta & 0 & 0 \\ -\sin\theta & \cos\theta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \cos\theta & \sin\theta \\ 0 & 0 & -\sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix}$$

$$[C_{16}] = \begin{bmatrix} 0,368 & -0,929 & 0 & 0 \\ 0,929 & 0,368 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0,368 & -0,929 \\ 0 & 0 & 0,929 & 0,368 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1235,49 & 0 & 617,75 & 0 \\ 0 & 1235,49 & 0 & 617,75 \\ 617,75 & 0 & 1235,49 & 0 \\ 0 & 617,75 & 0 & 1235,49 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 0,368 & 0,9295 & 0 & 0 \\ -0,929 & 0,368 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0,368 & 0,929 \\ 0 & 0 & -0,929 & 0,368 \end{bmatrix}$$

$$[C_{16}] = \begin{bmatrix} u_1 & v_1 & u_{10} & v_{10} \\ 1235,489 & 0 & 617,745 & 0 \\ 0 & 1235,489 & 0 & 617,745 \\ 617,745 & 0 & 1235,489 & 0 \\ 0 & 617,745 & 0 & 1235,489 \end{bmatrix}$$

Kemudian disusun menjadi suatu matriks kekakuan global

$$[C] = \begin{bmatrix} u_1 & v_1 & \dots & u_{10} & v_{10} & \dots \\ 1235,489+\dots & 0+\dots & \dots & 617,745+\dots & 0+\dots & \dots \\ 0+\dots & 1235,489+\dots & \dots & 0+\dots & 617,745+\dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 617,745+\dots & 0+\dots & \dots & 1235,489+\dots & 0+\dots & \dots \\ 0+\dots & 617,745+\dots & \dots & 0+\dots & 1235,489+\dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \end{bmatrix}$$

Detail keseluruhan matriks redaman global pada mode shape 3 terlampir

4.1.5.2.2 Martiks Redaman Global pada Mode shape 2

Perhitungan matriks redaman global, dengan memasukkan nilai-nilai yang ada ke dalam persamaan (4-6)

$$[C_{16}] = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta & 0 & 0 \\ -\sin\theta & \cos\theta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \cos\theta & \sin\theta \\ 0 & 0 & -\sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix}^T \times \begin{bmatrix} 3390,288 & 0 & 1695,114 & 0 \\ 0 & 3390,288 & 0 & 1695,114 \\ 1695,114 & 0 & 3390,288 & 0 \\ 0 & 1695,114 & 0 & 3390,288 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta & 0 & 0 \\ -\sin\theta & \cos\theta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \cos\theta & \sin\theta \\ 0 & 0 & -\sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix}$$

$$[C_{16}] = \begin{bmatrix} 0,368 & -0,929 & 0 & 0 \\ 0,929 & 0,368 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0,368 & -0,929 \\ 0 & 0 & 0,929 & 0,368 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 3390,288 & 0 & 1695,114 & 0 \\ 0 & 3390,288 & 0 & 1695,114 \\ 1695,114 & 0 & 3390,288 & 0 \\ 0 & 1695,114 & 0 & 3390,288 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 0,368 & 0,9295 & 0 & 0 \\ -0,929 & 0,368 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0,368 & 0,929 \\ 0 & 0 & -0,929 & 0,368 \end{bmatrix}$$

$$[C_{16}] = \begin{bmatrix} u_1 & v_1 & u_{10} & v_{10} \\ 3390,23 & 0 & 1695,11 & 0 \\ 0 & 3390,23 & 0 & 1695,11 \\ 1695,11 & 0 & 3390,23 & 0 \\ 0 & 1695,11 & 0 & 3390,23 \end{bmatrix}$$

Kemudian disusun menjadi suatu matriks kekakuan global

$$[C] = \begin{bmatrix} u_1 & v_1 & \dots & u_{10} & v_{10} & \dots \\ 3390,23+\dots & 0+\dots & \dots & 1695,11+\dots & 0+\dots & \dots & u_1 \\ 0+\dots & 3390,23+\dots & \dots & 0+\dots & 1695,11+\dots & \dots & v_1 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1695,11+\dots & 0+\dots & \dots & 3390,23+\dots & 0+\dots & \dots & u_{10} \\ 0+\dots & 1695,11+\dots & \dots & 0+\dots & 3390,23+\dots & \dots & v_{10} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \end{bmatrix}$$

Detail keseluruhan matriks redaman global pada mode shape 3 terlampir

4.1.5.2.3 Martiks Redaman Global pada Mode shape 3

Perhitungan matriks redaman global, dengan memasukkan nilai-nilai yang ada ke dalam persamaan (4-6)

$$[C_{16}] = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta & 0 & 0 \\ -\sin\theta & \cos\theta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \cos\theta & \sin\theta \\ 0 & 0 & -\sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix}^T \times \begin{bmatrix} 5640,42 & 0 & 2820,21 & 0 \\ 0 & 5640,42 & 0 & 2820,21 \\ 2820,21 & 0 & 5640,42 & 0 \\ 0 & 2820,21 & 0 & 5640,42 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta & 0 & 0 \\ -\sin\theta & \cos\theta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \cos\theta & \sin\theta \\ 0 & 0 & -\sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix}$$

$$[C_{16}] = \begin{bmatrix} 0,368 & -0,929 & 0 & 0 \\ 0,929 & 0,368 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0,368 & -0,929 \\ 0 & 0 & 0,929 & 0,368 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 5640,42 & 0 & 2820,21 & 0 \\ 0 & 5640,42 & 0 & 2820,21 \\ 2820,21 & 0 & 5640,42 & 0 \\ 0 & 2820,21 & 0 & 5640,42 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 0,368 & 0,9295 & 0 & 0 \\ -0,929 & 0,368 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0,368 & 0,929 \\ 0 & 0 & -0,929 & 0,368 \end{bmatrix}$$

$$[C_{16}] = \begin{bmatrix} u_1 & v_1 & u_{10} & v_{10} \\ 5640,42 & 0 & 2820,21 & 0 \\ 0 & 5640,42 & 0 & 2820,21 \\ 2820,21 & 0 & 5640,42 & 0 \\ 0 & 2820,21 & 0 & 5640,42 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ v_1 \\ u_{10} \\ v_{10} \end{bmatrix}$$

Kemudian disusun menjadi suatu matriks kekakuan global

$$[C] = \begin{bmatrix} u_1 & v_1 & \dots & u_{10} & v_{10} & \dots \\ 5640,42+... & 0+... & \dots & 2820,21+... & 0+... & \dots \\ 0+... & 5640,42+... & \dots & 0+... & 2820,21+... & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 2820,21+... & 0+... & \dots & 5640,42+... & 0+... & \dots \\ 0+... & 2820,21+... & \dots & 0+... & 5640,42+... & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ v_1 \\ u_{10} \\ v_{10} \\ \dots \end{bmatrix}$$

Detail keseluruhan matriks redaman global pada *mode shape* 3 terlampir

4.1.5.3 Matriks Mode shape

Dari perhitungan yang dilakukan di STAADPro 2006 didapatkan *mode shape*, ditabelkan di bawah ini

Tabel 4.4 *Mode shape* tiap-tiap titik nodal

| Node | Mode Shape 1 | | Mode Shape 2 | | Mode Shape 3 | |
|------|--------------|-------|--------------|--------|--------------|--------|
| | X | Y | X | Y | X | Y |
| 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 2 | -0,38 | 0 | 0 | 0 | -0,392 | 0 |
| 3 | -0,015 | 0,371 | 0,055 | -0,659 | -0,094 | 0,828 |
| 4 | -0,059 | 0,701 | 0,19 | -1 | -0,275 | 0,739 |
| 5 | -0,119 | 0,919 | 0,317 | -0,75 | -0,323 | -0,298 |
| 6 | -0,19 | 1 | 0,371 | 0 | -0,196 | -1 |
| 7 | -0,261 | 0,919 | 0,317 | 0,75 | -0,069 | -0,298 |
| 8 | -0,321 | 0,701 | 0,19 | 1 | -0,117 | 0,739 |
| 9 | -0,365 | 0,371 | 0,055 | 0,659 | -0,297 | 0,828 |
| 10 | -0,349 | 0,18 | 0,431 | -0,319 | -0,421 | 0,422 |
| 11 | -0,314 | 0,544 | 0,314 | -0,891 | -0,233 | 0,948 |
| 12 | -0,264 | 0,828 | 0,179 | -0,954 | -0,107 | 0,272 |
| 13 | -0,216 | 0,982 | 0,109 | -0,413 | -0,141 | -0,826 |
| 14 | -0,164 | 0,982 | 0,109 | 0,413 | -0,251 | -0,826 |
| 15 | -0,117 | 0,828 | 0,179 | 0,954 | -0,285 | 0,272 |
| 16 | -0,066 | 0,544 | 0,314 | 0,891 | -0,158 | 0,948 |
| 17 | -0,031 | 0,18 | 0,431 | 0,319 | 0,029 | 0,422 |

Dari hasil *mode shape* di atas, dapat disusun matriks *mode shape* sebagai berikut:

Mode shape 1

$$[\phi_1] = \begin{bmatrix} u_1 & v_1 & u_2 & v_2 & u_3 & v_3 & u_4 & v_4 & u_5 & v_5 \\ 0,000 & 0,000 & -0,380 & 0,000 & -0,015 & 0,371 & -0,059 & 0,701 & -0,119 & 0,919 \\ u_6 & v_6 & u_7 & v_7 & u_8 & v_8 & u_9 & v_9 & u_{10} & v_{10} \\ -0,190 & 1,000 & -0,261 & 0,919 & -0,321 & 0,701 & -0,365 & 0,371 & -0,349 & 0,180 \\ u_{11} & v_{11} & u_{12} & v_{12} & u_{13} & v_{13} & u_{14} & v_{14} & u_{15} & v_{15} \\ -0,314 & 0,544 & -0,264 & 0,828 & -0,216 & 0,982 & -0,164 & 0,982 & -0,117 & 0,828 \\ u_{16} & v_{16} & u_{17} & v_{17} & & & & & & \\ -0,066 & 0,544 & -0,031 & 0,180 & & & & & & \end{bmatrix}$$

Mode shape 2

$$[\phi_2] = \begin{bmatrix} u_1 & v_1 & u_2 & v_2 & u_3 & v_3 & u_4 & v_4 & u_5 & v_5 \\ 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,055 & -0,659 & 0,190 & -1,000 & 0,317 & -0,750 \\ u_6 & v_6 & u_7 & v_7 & u_8 & v_8 & u_9 & v_9 & u_{10} & v_{10} \\ 0,371 & 0,000 & 0,317 & 0,750 & 0,190 & 1,000 & 0,055 & 0,659 & 0,431 & -0,319 \\ u_{11} & v_{11} & u_{12} & v_{12} & u_{13} & v_{13} & u_{14} & v_{14} & u_{15} & v_{15} \\ 0,314 & -0,891 & 0,179 & -0,954 & 0,109 & -0,413 & 0,109 & 0,413 & 0,179 & 0,954 \\ u_{16} & v_{16} & u_{17} & v_{17} & & & & & & \\ 0,314 & 0,891 & 0,431 & 0,319 & & & & & & \end{bmatrix}$$

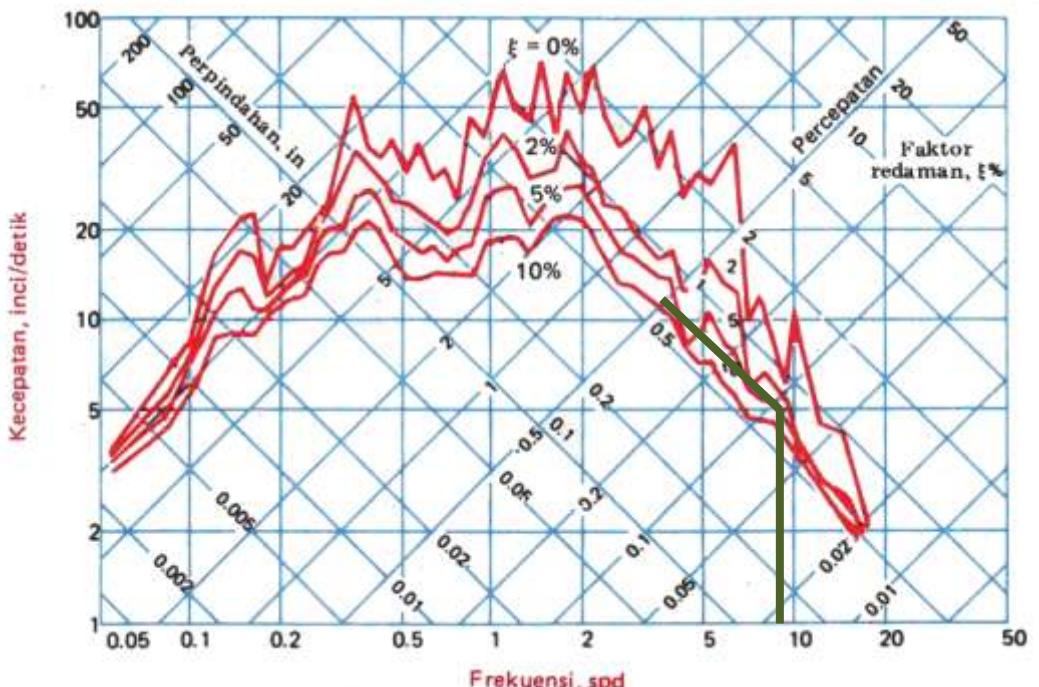
Mode shape 3

$$[\phi_3] = \begin{bmatrix} u_1 & v_1 & u_2 & v_2 & u_3 & v_3 & u_4 & v_4 & u_5 & v_5 \\ 0,000 & 0,000 & -0,392 & 0,000 & -0,094 & 0,828 & -0,275 & 0,739 & -0,323 & -0,298 \\ u_6 & v_6 & u_7 & v_7 & u_8 & v_8 & u_9 & v_9 & u_{10} & v_{10} \\ -0,196 & -1,000 & -0,069 & -0,298 & -0,117 & 0,739 & -0,297 & 0,828 & -0,421 & 0,422 \\ u_{11} & v_{11} & u_{12} & v_{12} & u_{13} & v_{13} & u_{14} & v_{14} & u_{15} & v_{15} \\ -0,233 & 0,948 & -0,107 & 0,272 & -0,141 & -0,826 & -0,251 & -0,826 & -0,285 & 0,272 \\ u_{16} & v_{16} & u_{17} & v_{17} & & & & & & \\ -0,158 & 0,948 & 0,029 & 0,422 & & & & & & \end{bmatrix}$$

4.1.6 Pembebaan Struktur

4.1.6.1 Pembebaan Struktur pada Mode shape 1 dengan $\omega_n = 59,54 \text{ rad/sec}$

Dari Grafik Respon Spektra untuk $f = 9,47 \text{ Hz}$ dengan rasio redaman ($\zeta = 5\%$),



Gambar 4.6 Percepatan tanah maksimum dengan $f = 9,47 \text{ Hz}$ dan $\zeta = 5\%$, pada spektrum respon sistem elastis untuk Gempa El Centro 1940

didapat percepatan tanah maksimum = $0,714 \text{ in/sec}^2 = 18,1356 \text{ mm/sec}^2$

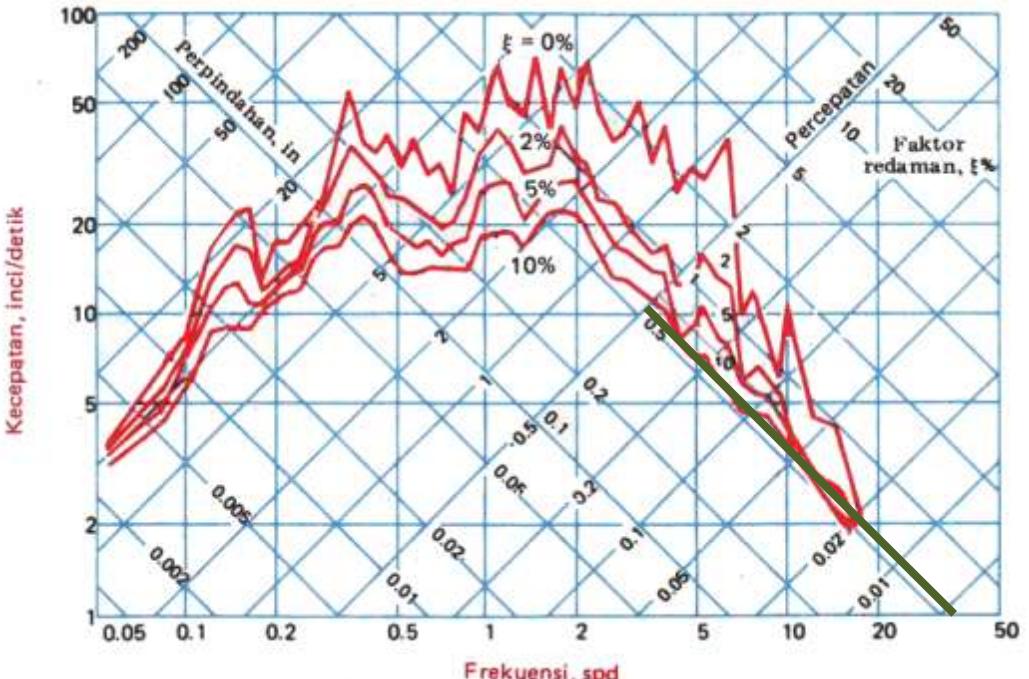
persamaan pembebaan sesuai dengan persamaan (2.104)

$$F = [M] \ddot{u}_{st} = [M] .18,1356$$

Matriks pembebaan terlampir

4.1.6.2 Pembebanan Struktur pada Mode shape 2 dengan $\omega_n = 163,38$ rad/sec

Dari Grafik Respon Spektra untuk $f = 25,99$ Hz dengan rasio redaman (ζ) = 5%,



Gambar 4.7 Percepatan tanah maksimum dengan $f = 25,99$ Hz dan $\zeta = 5\%$, pada spektrum respon sistem elastis untuk Gempa El Centro 1940

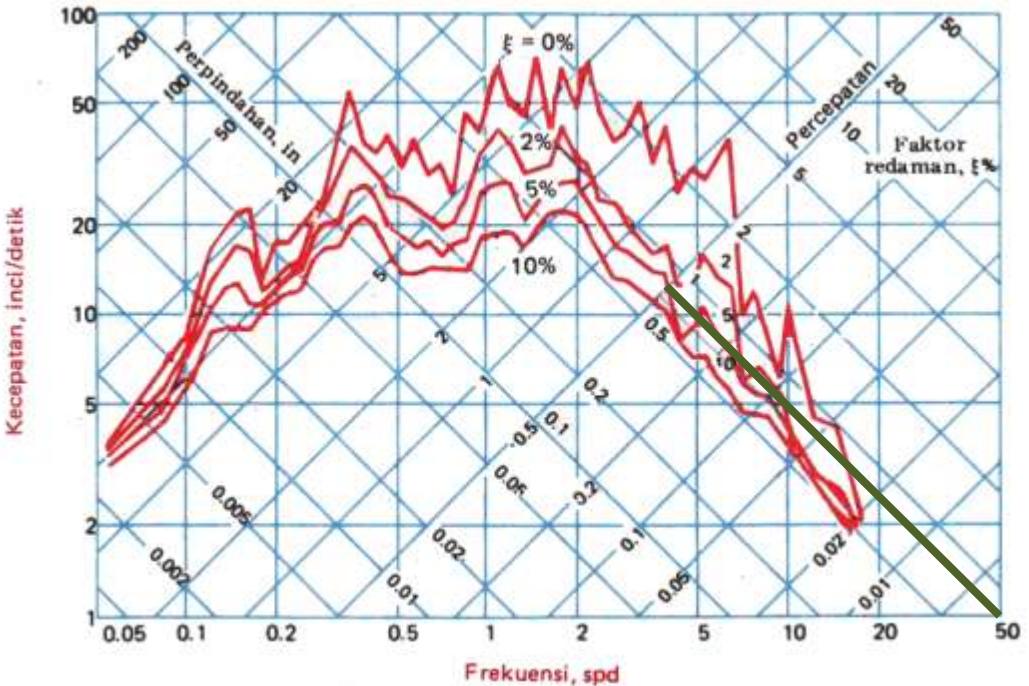
didapat percepatan tanah maksimum = $0,51 \text{ in/sec}^2 = 12,954 \text{ mm/sec}^2$

$$F = [M] \ddot{u}_{st} = [M] \cdot 12,954$$

Matriks pembebangan terlampir

4.1.6.3 Pembebanan Struktur pada Mode shape 3 dengan $\omega_n = 271,82$ rad/sec

Dari Grafik Respon Spektra untuk $f = 43,24$ Hz dengan rasio redaman ($\zeta = 5\%$),



Gambar 4.8 Percepatan tanah maksimum dengan $f = 271,82$ Hz dan $\zeta = 5\%$, pada spektrum respon sistem elastis untuk Gempa El Centro 1940

didapat percepatan tanah maksimum = $0,65 \text{ in/sec}^2 = 16,51 \text{ mm/sec}^2$

$$F = [M] \ddot{u}_{st} = [M] \cdot 16,51$$

Matriks pembebangan terlampir



Kemudian matriks F dinormalisasi dengan matriks ϕ sehingga menjadi matriks pembebanan pada tiap nodal *mode shape*, yaitu:

- Pada *Mode shape* 1

$$P = \phi_1 \times F$$

$$[P] = \begin{bmatrix} u_1 & v_1 & u_2 & v_2 & u_3 & v_3 & u_4 & v_4 & u_5 & v_5 \\ -670,922 & 690,806 & -2.662,868 & 726,018 & -1.043,138 & 4.914,540 & -1.269,079 & 8.699,587 & -1.756,381 & 11.285,538 \\ u_6 & v_6 & u_7 & v_7 & u_8 & v_8 & u_9 & v_9 & u_{10} & v_{10} \\ -2.283,918 & 11.611,095 & -2.850,812 & 10.775,209 & -3.522,084 & 8.647,576 & -4.259,299 & 5.121,917 & -3.071,126 & 2.368,607 \\ u_{11} & v_{11} & u_{12} & v_{12} & u_{13} & v_{13} & u_{14} & v_{14} & u_{15} & v_{15} \\ -3.325,598 & 6.898,399 & -3.322,154 & 11.571,596 & -3.030,574 & 14.052,674 & -2.524,315 & 14.052,674 & -2.049,003 & 11.571,596 \\ u_{16} & v_{16} & u_{17} & v_{17} & & & & & & \\ -1.533,063 & 6.898,399 & -1.487,344 & 2.368,607 & & & & & & \end{bmatrix}$$

- Pada *Mode shape* 2

$$P = \phi_1 \times F$$

$$[P] = \begin{bmatrix} u_1 & v_1 & u_2 & v_2 & u_3 & v_3 & u_4 & v_4 & u_5 & v_5 \\ 616,556 & -875,494 & 620,285 & 920,169 & 1.164,769 & -5.999,352 & 1.799,185 & -8.445,932 & 2.518,237 & -6.238,362 \\ u_6 & v_6 & u_7 & v_7 & u_8 & v_8 & u_9 & v_9 & u_{10} & v_{10} \\ 2.688,544 & -50,844 & 2.394,244 & 5.967,192 & 1.781,424 & 8.439,763 & 1.192,564 & 6.245,846 & 2.698,835 & -2.956,384 \\ u_{11} & v_{11} & u_{12} & v_{12} & u_{13} & v_{13} & u_{14} & v_{14} & u_{15} & v_{15} \\ 2.500,373 & -7.715,714 & 1.948,832 & -8.879,853 & 1.534,502 & -3.952,376 & 1.534,502 & 3.952,376 & 1.948,832 & 8.879,853 \\ u_{16} & v_{16} & u_{17} & v_{17} & & & & & & \\ 2.500,373 & 7.715,714 & 2.698,835 & 2.956,384 & & & & & & \end{bmatrix}$$

- Pada *Mode shape* 2

$$P = \phi_1 \times F$$

$$[P] = \begin{bmatrix} u_1 & v_1 & u_2 & v_2 & u_3 & v_3 & u_4 & v_4 & u_5 & v_5 \\ -802,374 & 1438,280 & -2320,695 & 1509,821 & -1768,871 & 8983,972 & -2828,201 & 7295,881 & -3125,613 & -2962,900 \\ u_6 & v_6 & u_7 & v_7 & u_8 & v_8 & u_9 & v_9 & u_{10} & v_{10} \\ -2117,803 & -9167,651 & -1276,503 & -2837,357 & -1678,771 & 7393,170 & -3155,415 & 9333,988 & -3351,328 & 4758,864 \\ u_6 & v_6 & u_7 & v_7 & u_8 & v_8 & u_9 & v_9 & u_{10} & v_{10} \\ -2117,803 & -9167,651 & -1276,503 & -2837,357 & -1678,771 & 7393,170 & -3155,415 & 9333,988 & -3351,328 & 4758,864 \\ u_{16} & v_{16} & u_{17} & v_{17} & & & & & & \\ -1939,779 & 9642,224 & -927,660 & 4758,864 & & & & & & \end{bmatrix}$$



4.2 Respons Struktur

4.2.1 Respon Pola

Persamaan Pola: $\ddot{y}_n + 2\zeta_n \omega_n \dot{y}_n + \omega_n^2 y_n = P_n$

dan persamaan respon pola adalah:

$$y(t) = \frac{P_n}{\omega_D (\zeta \omega_n)^2 + \omega_D} [1 - (\zeta \omega_n \sin \omega_D t + \cos \omega_D t) e^{-\zeta \omega_n t}]$$

4.2.1.1 Respon pola pada mode shape 1 akibat beban P

Dengan $\omega_n = 59,54$ rad/sec, rasio redaman (ζ) = 5% dan $\omega_D = 59,47$ rad/sec

Maka respon polanya:

$$\ddot{y}_n + 2(0,05)(59,54) \dot{y}_n + (59,54)^2 y_n = P_n$$

Sehingga persamaan respon pada mode shape 1 adalah:

$$y(t) = \frac{P_n}{59,47 (0,05 \times 59,54)^2 + 59,47} [1 - (0,05 \cdot 59,54 \sin 59,47 t + \cos 59,47 t) e^{-(0,05 \cdot 59,54)t}]$$

$$y(t) = \frac{P_n}{586,5246} [1 - (2,977 \sin 59,47 t + \cos 59,47 t) e^{-2,977t}]$$

diambil titik nodal 6

$$y_{u6}(t) = -3,894 [1 - (2,977 \sin 59,47 t + \cos 59,47 t) e^{-2,977t}]$$

$$y_{v6}(t) = 19,796 [1 - (2,977 \sin 59,47 t + \cos 59,47 t) e^{-2,977t}]$$

4.2.1.2 Respon pola pada mode shape 2 akibat beban P

Dengan $\omega_n = 163,38$ rad/sec, rasio redaman (ζ) = 5% dan $\omega_D = 163,17$ rad/sec

Maka respon polanya:

$$\ddot{y}_n + 2(0,05)(163,38) \dot{y}_n + (163,38)^2 y_n = P_n$$

Sehingga persamaan respon pada mode shape 2 adalah:

$$y(t) = \frac{P_n}{163,17 (0,05 \times 163,38)^2 + 163,17} [1 - (0,05 \cdot 163,38 \sin 163,17 t + \cos 163,17 t) e^{-(0,05 \cdot 163,38)t}]$$

$$y(t) = \frac{P_0}{11051,922} [1 - (8,169 \sin 163,17 t + \cos 163,17 t) e^{-8,169t}]$$

diambil titik nodal 6

$$y_{u6}(t) = 0,243 [1 - (8,169 \sin 163,17 t + \cos 163,17 t) e^{-8,169t}]$$

$$y_{v6}(t) = -0,0046 [1 - (8,169 \sin 163,17 t + \cos 163,17 t) e^{-8,169t}]$$

4.2.1.3 Respon pola pada mode shape 3 akibat beban P

Dengan $\omega_n = 271,82$ rad/sec, rasio redaman (ζ) = 5% dan $\omega_D = 271,48$ rad/sec

Maka respon polanya:

$$\ddot{y}_n + 2(0,05)(271,82) \dot{y}_n + (271,82)^2 y_n = P_n$$

Sehingga persamaan respon pada mode shape 3 adalah:

$$y(t) = \frac{P_n}{271,48(0,05 \times 271,82)^2 + 271,48} [1 - (0,05 \cdot 271,82 \sin 271,48 t + \cos 271,48 t) e^{-(0,05 \cdot 271,82)t}]$$

$$y(t) = \frac{P_n}{49875,0245} [1 - (13,591 \sin 271,48 t + \cos 271,48 t) e^{-(13,591)t}]$$

dambil titik nodal 6

$$y_{u6}(t) = -0,042 [1 - (13,591 \sin 271,48 t + \cos 271,48 t) e^{-13,591t}]$$

$$y_{v6}(t) = -0,184 [1 - (13,591 \sin 271,48 t + \cos 271,48 t) e^{-13,591t}]$$



4.2.2 Respon pada Koordinat Nodal

Respon koordinat nodal (u) pada tiap *mode shape* merupakan perkalian dari matriks *mode shape* dengan respon pola: $\{u\} = [\phi] \cdot \{y\}$

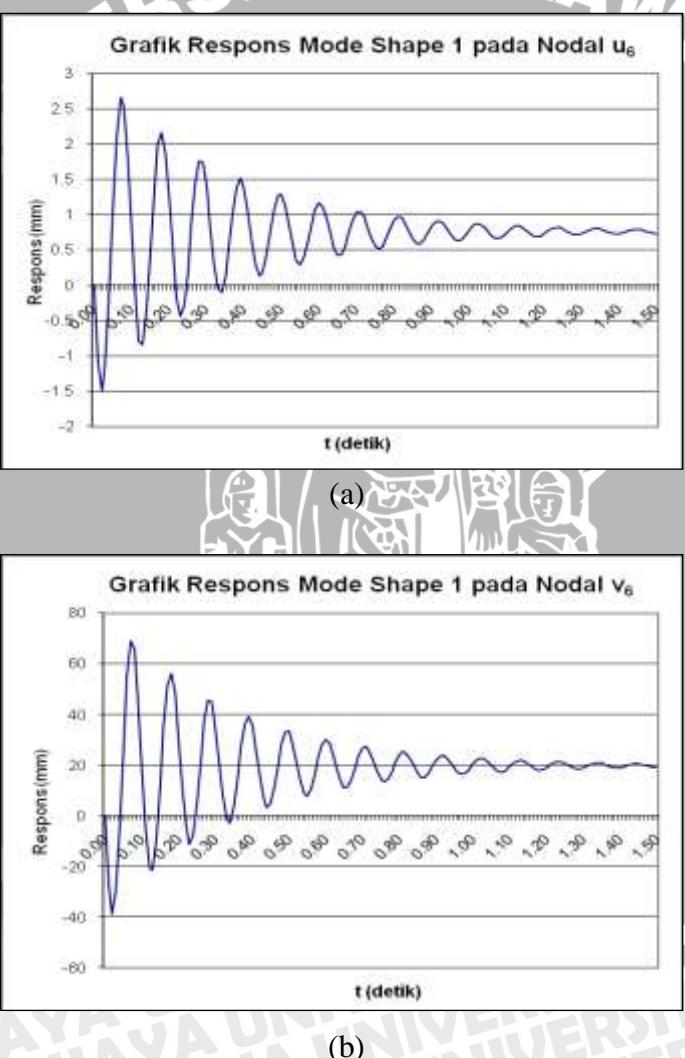
4.2.2.1 Respon koordinat tiap nodal $\{u\}$ pada *mode shape* 1

$$u = \phi_1 \cdot y$$

$$u_{v6}(t) = 0,763 [1 - (2,977 \sin 59,47t + \cos 59,47t)e^{-2,977t}]$$

$$u_{v6}(t) = 19,796 [1 - (2,977 \sin 59,47t + \cos 59,47t)e^{-2,977t}]$$

dengan memasukkan variabel waktu (t) ke dalam persamaan respon di atas, maka dihasilkan grafik respon dari titik nodal 6



Gambar 4.9 Respon titik nodal 6 pada rangka jembatan Kalilang pada *mode shape* 1
 (a) respon arah horisontal, (b) respon arah vertikal

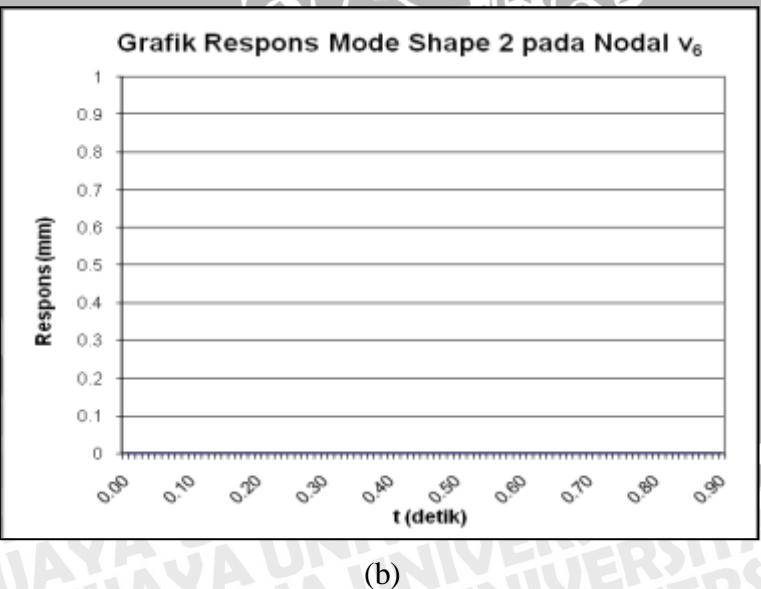
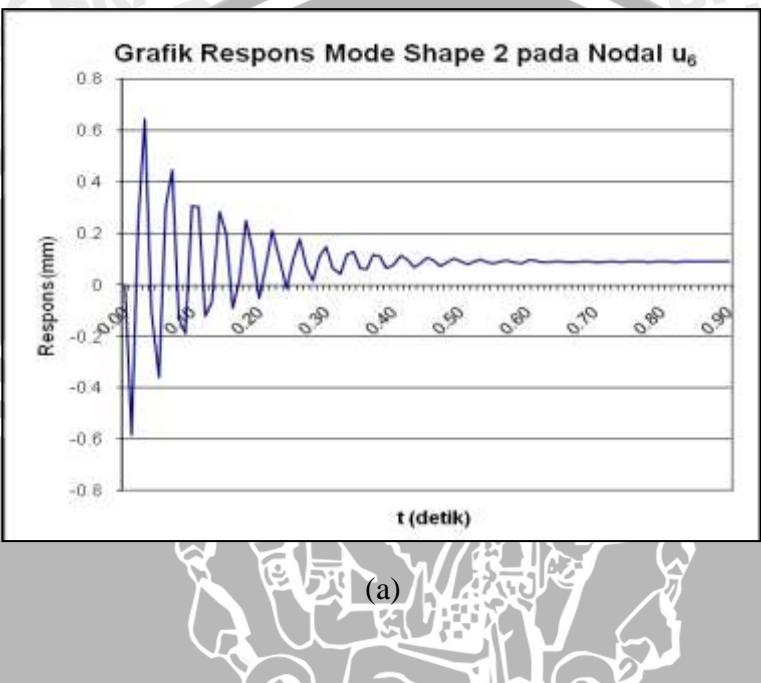
4.2.2.2 Respon koordinat tiap nodal $\{u\}$ pada mode shape 2

$$u = \phi_2 \cdot y$$

$$u_{v6}(t) = 0,090 [1 - (8,169 \sin 163,17t + \cos 163,17t)e^{-8,169t}]$$

$$u_{u6}(t) = 0$$

dengan memasukkan variabel waktu (t) ke dalam persamaan respon di atas, maka dihasilkan grafik respon dari titik nodal 6



Gambar 4.10 Respon titik nodal 6 pada rangka jembatan Kalilang pada mode shape 2

(a) respon arah horisontal, (b) respon arah vertikal

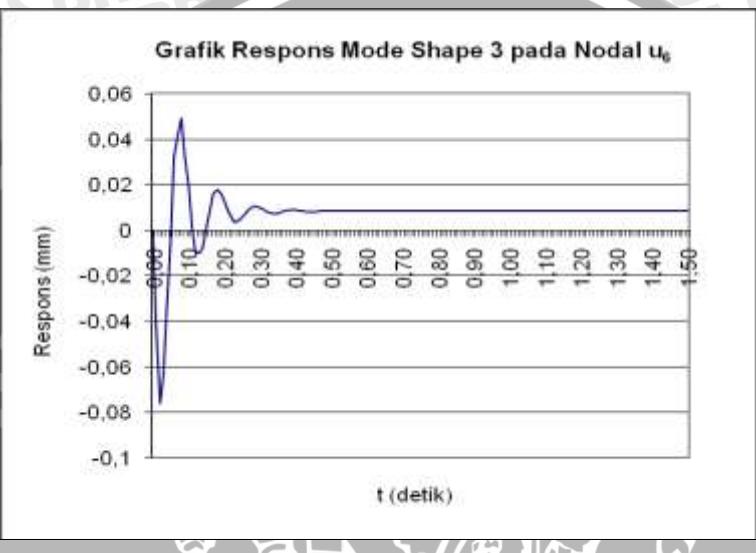
4.2.2.3 Respon koordinat tiap nodal $\{u\}$ pada mode shape 3

$$u = \phi_3 \cdot y$$

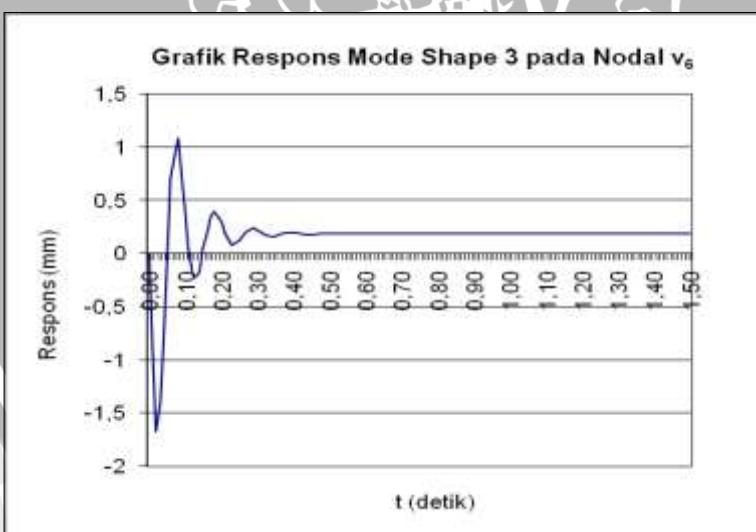
$$u_{u6}(t) = 0,008 [1 - (13,591 \sin 271,48t + \cos 271,48t)e^{-13,591t}]$$

$$u_{v6}(t) = 0,184 [1 - (13,591 \sin 271,48t + \cos 271,48t)e^{-13,591t}]$$

dengan memasukkan variabel waktu (t) ke dalam persamaan respon di atas, maka dihasilkan grafik respon dari titik nodal 6



(a)



(b)

Gambar 4.11 Respon titik nodal 6 pada rangka jembatan Kalilang pada mode shape 3

(a) respon arah horisontal, (b) respon arah vertikal

4.2.3 Gambar Respon Maksimum Tiap Mode shape

Pada hasil perhitungan respon struktur diketahui bahwa respon maksimum terjadi pada saat t=0,07 detik.

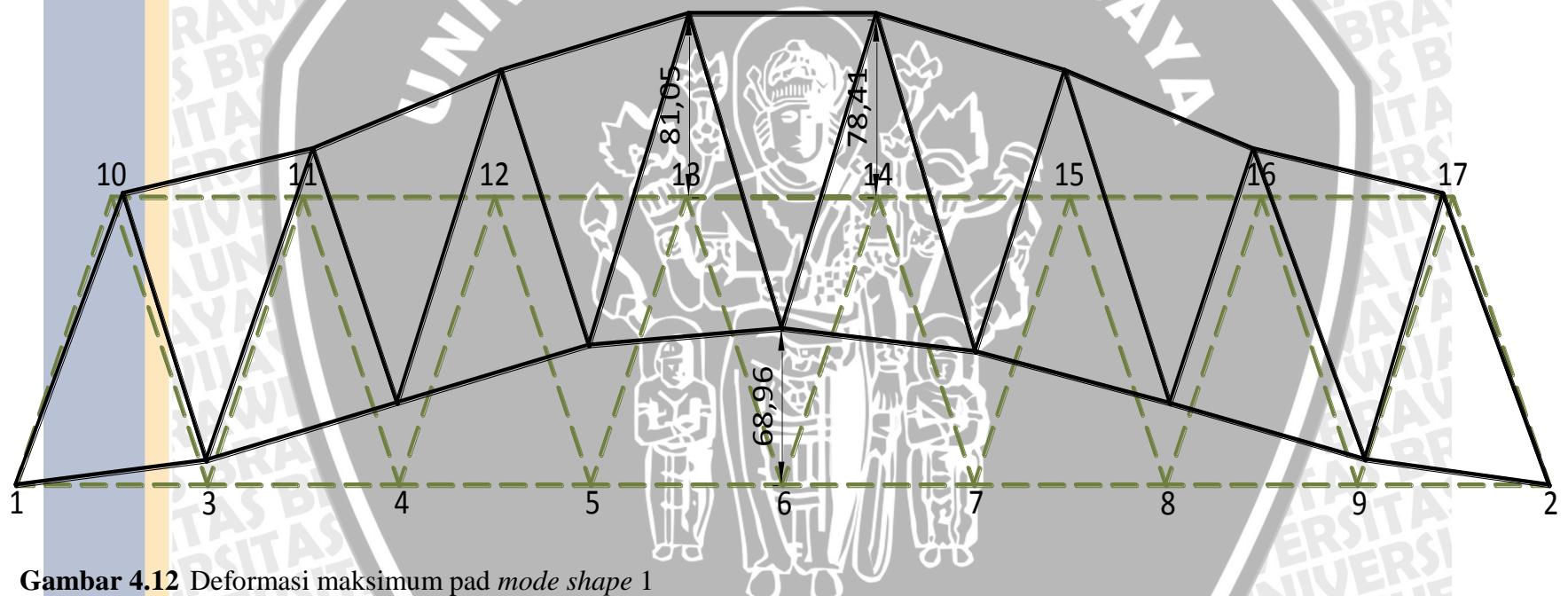
Deformasi yang terjadi ditabelkan sebagai berikut:

Tabel 4.5 Rekapitulasi lendutan maksimum pada tiap-tiap mode shape

| Nodal | <i>Mode shape 1</i> | | <i>Mode shape 2</i> | | <i>Mode shape 3</i> | |
|-------|---------------------|--------|---------------------|-------|---------------------|-------|
| | Deformasi (mm) | u | Deformasi (mm) | u | Deformasi (mm) | v |
| 1 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 |
| 2 | 6,013 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,093 | 0,000 |
| 3 | 0,093 | 10,834 | 0,029 | 1,776 | 0,017 | 0,760 |
| 4 | 0,445 | 36,238 | 0,154 | 3,794 | 0,079 | 0,551 |
| 5 | 1,242 | 61,628 | 0,359 | 2,102 | 0,103 | 0,090 |
| 6 | 2,660 | 68,995 | 0,448 | 0,000 | 0,042 | 0,936 |
| 7 | 4,421 | 58,841 | 0,341 | 2,011 | 0,009 | 0,086 |
| 8 | 6,718 | 36,021 | 0,152 | 3,792 | 0,020 | 0,558 |
| 9 | 9,238 | 11,291 | 0,029 | 1,849 | 0,096 | 0,789 |
| 10 | 6,369 | 2,533 | 0,523 | 0,424 | 0,144 | 0,205 |
| 11 | 6,205 | 22,299 | 0,353 | 3,089 | 0,062 | 0,934 |
| 12 | 5,212 | 56,933 | 0,157 | 3,806 | 0,021 | 0,072 |
| 13 | 3,890 | 82,000 | 0,075 | 0,733 | 0,031 | 0,776 |
| 14 | 2,460 | 82,000 | 0,075 | 0,733 | 0,077 | 0,776 |
| 15 | 1,425 | 56,933 | 0,157 | 3,806 | 0,091 | 0,072 |
| 16 | 0,601 | 22,299 | 0,353 | 3,089 | 0,031 | 0,934 |
| 17 | 0,274 | 2,533 | 0,523 | 0,424 | -0,003 | 0,205 |

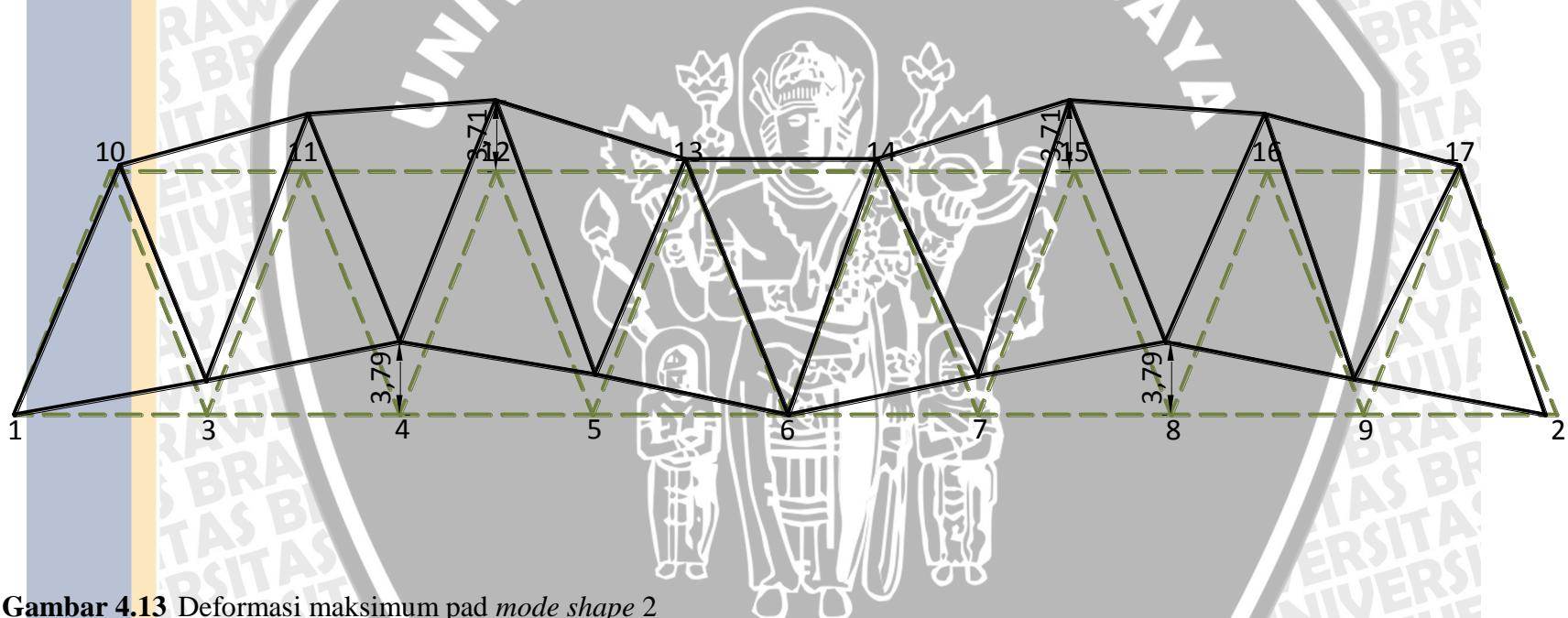
Dari tabulasi di atas dapat digambarkan defomasi yang terjadi

4.2.3.1 Respon Maksimum Struktur pada *Mode shape 1*



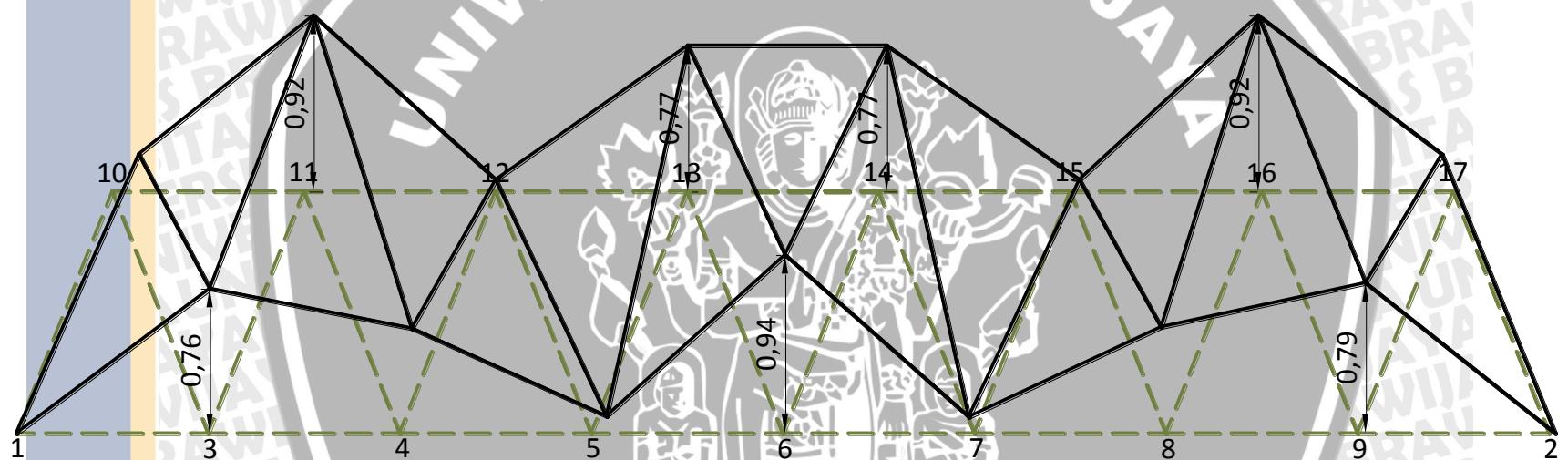
Gambar 4.12 Deformasi maksimum pada mode shape 1

4.2.3.2 Respon Maksimum Struktur pada *Mode shape 2*



Gambar 4.13 Deformasi maksimum pad mode shape 2

4.2.3.3 Respon Maksimum Struktur pada *Mode shape 3*



Gambar 4.14 Deformasi maksimum pad mode shape 3

4.3 Pembahasan

Dari hasil analisis matriks kekakuan diketahui bahwa semakin panjang batang, semakin kecil koefisien matriks kekakuan dan semakin besar luasan penampang batang semakin besar koefisien matriks kekakuan. Pada analisis matriks massa diketahui bahwa koefisien matriks massa tergantung pada besarnya massa per satuan panjang batang rangka dan panjang batang rangka. Sedangkan matriks redaman dipengaruhi oleh rasio redaman, massa, dan frekuensi alami struktur pada mode tertentu. Matriks transformasi berfungsi sebagai pentransformasi koordinat derajat kebebasan dari koordinat elemen lokal menjadi koordinat struktur global.

Berdasarkan matiks kekakuan dan matriks massa akan dicari besarnya frekuensi alami (ω_n) struktur dengan menggunakan persamaan $[[K] - [M]\omega^2]\{u\} = 0$ dimana diperlukan solusi non-trivial untuk menentukan ω_n yang merupakan eigenvalue dan $\{\phi\}$ yang merupakan eigenvektor. Akan didapatkan beberapa nilai frekuensi alami yang semakin besar pada mode-mode yang lebih tinggi.

Dari frekuensi alami struktur, dapat diketahui frekuensi getar struktur (f). Berdasarkan frekuensi dan rasio redaman struktur dapat diketahui besarnya percepatan tanah (\ddot{u}_{gs}) maksimum yang membebani struktur jika terjadi gempa dengan persamaan gaya pola $\{F\} = \{M\} \cdot \ddot{u}_{gs}$. Gaya pola tersebut dinormalisasi dengan *mode shape* $\{\phi\}$ untuk mengubahnya menjadi beban aktual P dengan persamaan $P = \phi \cdot F$.

Respon pola dapat ditentukan dengan persamaan (2-99)

$$y(t) = \frac{P_n}{\omega_D (\zeta \omega_n)^2 + \omega_D} \left[1 - (\zeta \omega_n \sin \omega_D t + \cos \omega_D t) e^{-\zeta \omega_n t} \right]$$

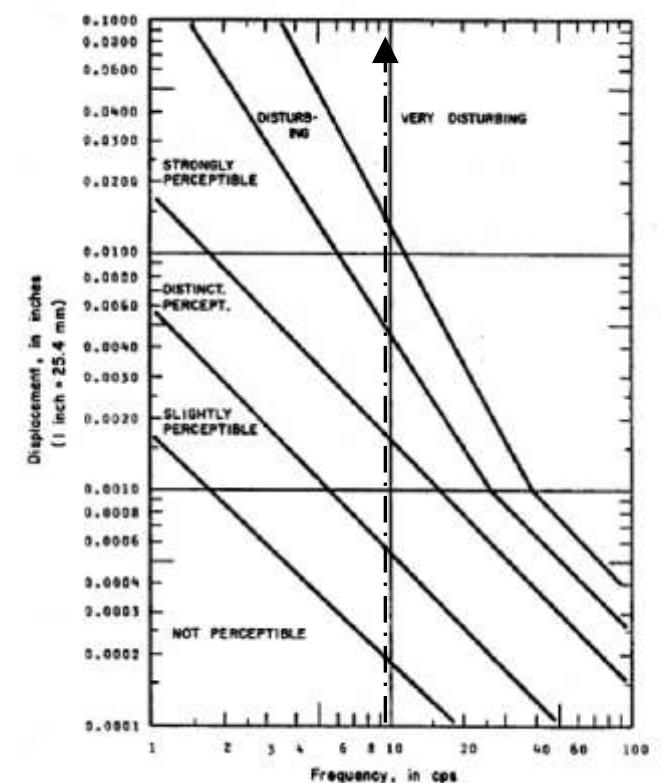
dengan detail pengintegralan

dapat dilihat pada lampiran. Kemudian respon pola (y) tersebut dinormalisasi kembali dengan menggunakan *mode shape* ϕ untuk menjadi respon aktual (u), dengan persamaan $u = \phi \cdot y$

Tiap nodal dianalisis dengan hal serupa hingga didapatkan respon tiap nodal per satuan waktu (t) untuk tiap derajat kebebasan tertentu (dapat dilihat pada tabel dan grafik). Dari grafik yang dihasilkan dapat dilihat bahwa respon tiap nodal mencapai nilai maksimum pada saat $t = 0.07$ detik dan terus mengecil sebagai akibat dari sistem redaman sebesar 5%.

Besarnya respon maksimum diplotkan sebagai deformasi untuk tiap nodal pada struktur sehingga pada *mode shape* 1 struktur membentuk seperti setengah gelombang, pada *mode shape* 2 membentuk seperti satu gelombang dan pada *mode shape* 3 seperti satu setengah gelombang. Jika diteruskan hingga *mode shape* selanjutnya akan didapat bentuk seperti lebih banyak gelombang. Akan tetapi kemungkinan hal tersebut tidak akan dicapai oleh struktur sebab sebelum terjadi *mode shape* yang lebih tinggi, boleh jadi struktur akan telah rusak akibat jumlah getaran perdetik atau frekuensi getaran yang dialami oleh struktur terlalu tinggi.

Meninjau kajian pustaka dalam tesis “*Alternative Acceleration-Based Serviceability Criterion for Fiber Reinforced Polymer Deck-on-Steel Girder Bridges*” oleh Marcelo Augusto da Silva Machado tentang kemampuan layan alternatif (*alternative service ability*), di antaranya membahas respon manusia terhadap getaran yang ditunjukkan dalam grafik di bawah ini.

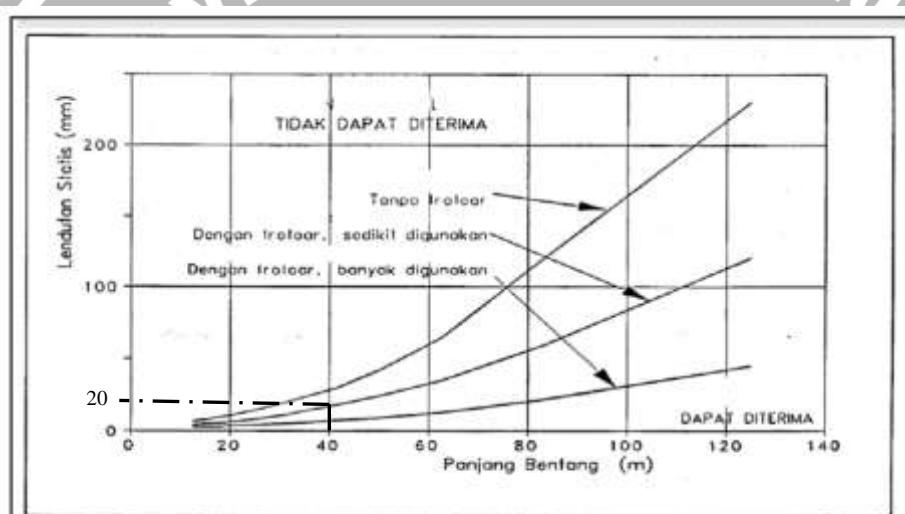


Gambar 4.15 Tingkat toleransi manusia terhadap getaran vertikal
(Sumber: Tesis Marcelo Augusto da Silva Machado)

Dari analisis yang telah dilakukan didapatkan frekuensi yang terjadi pada *mode shape* pertama sebesar 9,47 cps dan deformasi sebesar 68,995 mm (2,72 in) pada titik 6. Setelah diplot ke dalam grafik di atas diperoleh bahwa manusia sangat terganggu (*very*

disturbing) yang artinya manusia merasa sangat tidak nyaman berada pada kondisi tersebut. Sedangkan untuk frekuensi yang terjadi pada *mode shape* ke 2 dan ke 3 sudah melebihi batas grafik di atas sehingga memiliki pengaruh yang lebih besar kepada manusia (misalnya: terluka). Maka rangka tersebut tidak memenuhi syarat *service ability* lendutan jika terjadi percepatan gempa seperti gempa el-Centro tahun 1940.

Berdasarkan RSNI T0-3-2005 Perencanaan Struktur Baja Untuk Jembatan pasal 4.7.2 untuk syarat *service ability* lendutan statis yang terjadi tidak boleh melebihi 1/800 bentang jembatan yaitu $1/800 \times 40\text{ m} = 0,05\text{ m} = 50\text{ mm}$ dan didukung dengan syarat kegunaan untuk pejalan kaki pada Gambar 17 RSNI T-02-2005 Pembebanan untuk Jembatan. Untuk bentang jembatan 40 m dengan trotoar yang jarang digunakan, lendutan yang disyaratkan maksimum 20 mm.



Gambar 17 Lendutan statis maksimum untuk jembatan

Gambar 4.16 Lendutan statis maksimum untuk jembatan
(sumber: RSNI T-02-2005)

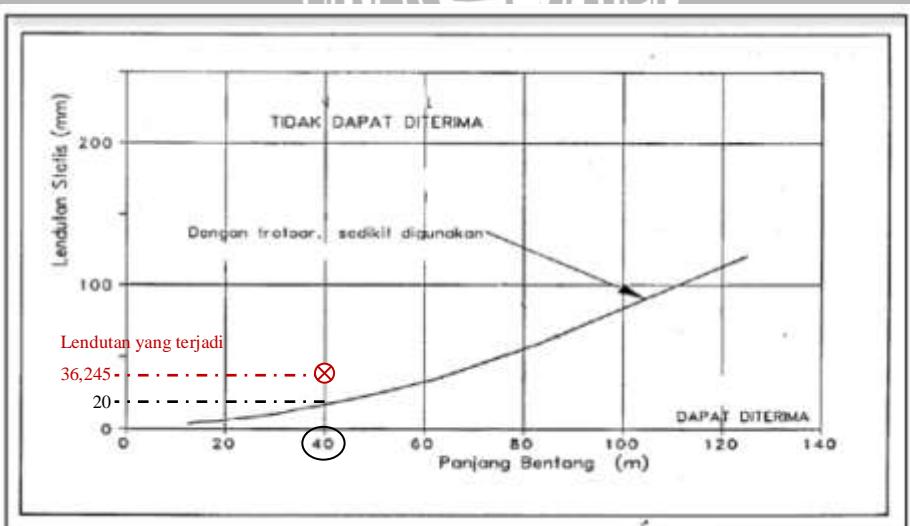
Dari hasil analisis lendutan statis ekivalen dari keadaan layan (akibat aksi permanen, aksi transien dan aksi khusus yang dapat dihitung pada lampiran) didapat lendutan statis yang terjadi sebagai berikut.

Tabel 4.6 Rekapitulasi lendutan statis

| Beban | Titik | Lendutan (mm) | |
|---------------|-------|---------------|---------|
| | | x | y |
| Aksi Permanen | 6 | 9,491 | -49,055 |
| Beban T dan D | 6 | 7,012 | -36,245 |
| Beban Angin | 6 | 0,645 | -3,336 |
| Pejalan Kaki | 6 | 0,912 | -4,713 |
| Gempa | 6 | 2,157 | -13,129 |
| Layan 1 | 6 | 17,148 | -88,635 |
| Layan 2 | 6 | 17,415 | -90,012 |
| Ultimit | 6 | 18,660 | -98,429 |

Untuk memenuhi syarat gambar 17 RSNI T-02-2005 diperlukan lendutan maksimum yang terjadi akibat beban lalu lintas (beban T dan D) yakni sebesar 36,245 mm. Lendutan ini tidak memenuhi syarat kegunaan (*service ability*) untuk pejalan kaki (lihat gambar 4.17). Sedangkan beban kerja tidak mungkin terjadi tanpa kombinasi dengan beban yang lain, misalnya kombinasi beban lalu lintas dengan beban sendiri dari jembatan.

Syarat lendutan berdasarkan RSNI T0-3-2005 pasal 4.7.2 adalah akibat beban layan. Dari tabel di atas didapatkan lendutan akibat beban kombinasi kelayanan 2 sebesar 90,012 mm yang tentunya tidak memenuhi persyaratan tersebut.

**Gambar 4.16** Lendutan statis yang terjadi

BAB IV 43

| | | |
|-------|---|----|
| 4.1 | ANALISIS DINAMIS PADA RANGKA UNTUK PEMBEBANAN DUA DIMENSI | 44 |
| 4.1.1 | <i>Data batang</i> | 44 |
| 4.1.2 | <i>Matriks Kekakuan</i> | 45 |
| 4.1.3 | <i>Matriks Massa</i> | 47 |
| 4.1.4 | <i>Menentukan Frekuensi Alami dan Frekuensi Teredam dari Sistem</i> | 49 |
| 4.1.5 | <i>Matriks Redaman</i> | 50 |
| 4.1.6 | <i>Pembebanan Struktur</i> | 56 |
| 4.2 | RESPONS STRUKTUR | 60 |
| 4.2.1 | <i>Respon Pola</i> | 60 |
| 4.2.2 | <i>Respon pada Koordinat Nodal</i> | 62 |
| 4.2.3 | <i>Gambar Respon Maksimum Tiap Mode shape</i> | 65 |
| 4.3 | PEMBAHASAN | 69 |

