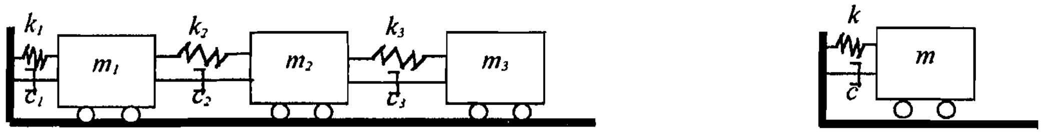
# BAB III
# LANDASAN TEORI

## 3.1. Pendahuluan

Pada umumnya suatu struktur akan bergoyang apabila memperoleh pembebanan dari luar misalnya akibat beban angin maupun akibat gerakan tanah / gempa. Getaran-getaran seperti ini dikelompokkan sebagai getaran dipaksa atau *forced vibration system.* Sedangkan getaran yang diakibatkan dari beban orang yang melompat pada ujung balok kantilever dan mempunyai kondisi awal (*initial condition*), dapat dikatagorikan termasuk pada getaran bebas atau *free vibration system.*

## 3.2. Karakteristik Respon Struktur dengan Derajat Kebebasan banyak (*Multi Degree of Freedom* / MDOF)

Model matematika yang dipakai untuk menurunkan persamaan differensial gerakan pada struktur dengan derajat kebebasan banyak, serupa dengan model matematika pada struktur dengan derajat kebebasan tunggal. Model matematika tersebut terdiri atas serangkaian massa yang dirangkaikan secara seri antara massa yang satu dengan massa yang lain. Model matematika tersebut adalah sebagai berikut:




a) Struktur MDOF　　　　b) Struktur SDOF

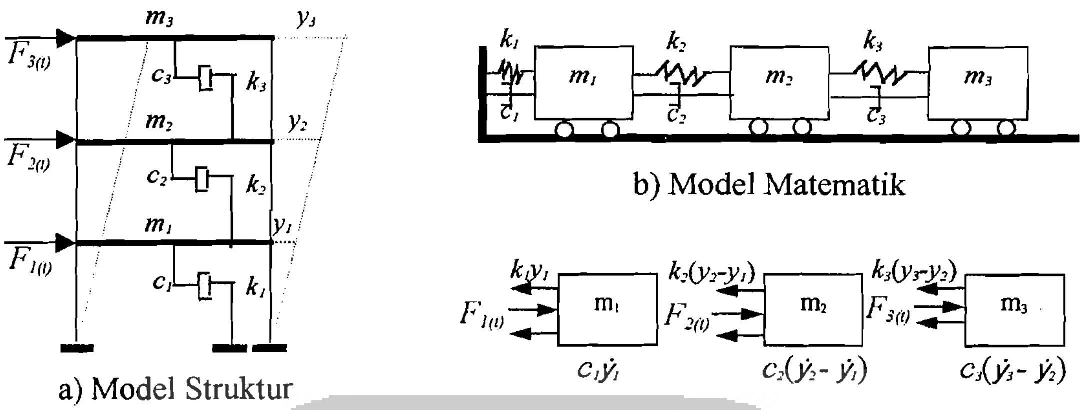
Gambar 3.1 Model Matematik

Pada struktur dengan derajat kebebasan tunggal (SDOF) hanya terdapat satu massa yang menggumpal (*lumped mass)* pada tempat tertentu (gambar 3.1b). oleh beban dinamik, maka konstruksi akan berayun kekanan dan kekiri sepanjang waktu yang ditinjau. Dalam keadaan tersebut maka posisi massa pada setiap saat dapat dinyatakan dalam satu koordinat (amplitudo) saja, atau hanya mempunyai koordinat tunggal. Oleh karenanya respon struktur dapat dimengerti dan dicari dengan cara yang tidak terlalu rumit.

Pada gambar (3.1a), struktur dengan derajat kebebasan banyak, maka persoalannya menjadi lain dan agak rumit yang kadang-kadang susah untuk dibayangkan. Pada konstruksi ini ada beberapa massa, yang mana posisi massa yang satu berbeda dengan posisi massa yang lain walaupun pada waktu yang sama. Pada saat yang lain lagi, posisi-posisi massa tersebut sudah berubah posisinya antara yang satu terhadap yang lain. Dengan keadaan seperti itu, maka untuk menyatakan posisi suatu struktur pada setiap saat diperlukan banyak koordinat, yang jumlahnya sebanyak massa (*lumped mass)* yang ada pada struktur yang bersangkutan.(Widodo, 1996).

Gerakan-gerakan setiap massa pada setiap saat secara umum dinyatakan dalam persamaan diferensial gerakan (*differential equation of motion*), oleh sebab itu struktur dengan derajat kebebasan banyak akan terdapat banyak persamaan diferensial gerakan, yang secara keseluruhan dalam satu struktur akan ada satu set persamaan simultan.

Untuk memperoleh persamaan diferensial gerakan pada suatu struktur bertingkat banyak dapat digunakan anggapan *shear building.*



a) Model Struktur

b) Model Matematik

c) Free body diagram

Gambar 3.2. Struktur MDOF

Pada bangunan gedung bertingkat banyak-3 seperti gambar 3.2, maka struktur akan mempunyai tiga derajat kebebasan, sehingga struktur yang mempunyai n-tingkat akan mempunyai n-derajat kebebasan dan mempunyai n-*modes*.

Untuk memperoleh persamaan differensial gerakan pada struktur MDOF umumnya disusun berdasarkan atas goyangan struktur menurut *first mode* atau mode pertama yaitu goyangan yang $y_3>y_2>y_1$. berdasarkan keseimbangan dinamik pada *free body* diagram 3.2, maka akan diperoleh persamaan seperti dibawah ini :

$$m_1\ddot{y}_1 + c_1\dot{y}_1 + k_1 y_1 - c_2(\dot{y}_2-\dot{y}_1) - k_2(y_2-y_1) - F_1(t) = 0 \qquad (3.1a)$$

$$m_2\ddot{y}_2 + c_2(\dot{y}_2-\dot{y}_1) + k_2(y_2-y_1) - c_3(\dot{y}_3-\dot{y}_2) - k_3(y_3-y_2) - F_2(t) = 0 \qquad (3.1b)$$

$$m_3\ddot{y}_3 + c_3(\dot{y}_3-\dot{y}_2) - k_3(y_3-y_2) - F_3(t) = 0 \qquad (3.1c)$$

Dari persamaan (3.1) di atas tampak bahwa untuk mendapatkan keseimbangan dinamik suatu massa yang ditinjau, ternyata dipengaruhi oleh kekakuan, redaman dan simpangan massa baik sebelum maupun sesudahnya. Persamaan dengan sifat-sifat seperti itu biasanya disebut *coupled equation* karena persamaan-persamaan tersebut akan saling tergantung satu sama lain. Persamaan *coupled* harus diselesaikan secara simultan artinya dengan melibatkan semua persamaan yang ada. Pada struktur dengan derajat kebebasan banyak, persamaan differensial gerakannya merupakan persamaan yang *dependent* atau *coupled* antara satu dengan yang lainnya.

Dengan menyusun persamaan di atas menurut parameter yang sama (percepatan, kecepatan, dan simpangan), maka persamaan (3.1) dapat ditulis menjadi matriks uraian seperti dibawah ini :

$$m_1\ddot{y}_1 + (c_1 + c_2)\,\dot{y}_1 - c_2\dot{y}_2 + (k_1 + k_2)y_1 - k_2y_2 = F_1(t) \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \text{(3.2a)}$$

$$m_2\ddot{y}_2 - c_2\dot{y}_1 + (c_2 + c_3)\,\dot{y}_2 - c_3\dot{y}_3 - k_2y_1 + (k_2 + k_3)y_2 - k_3y_3 = F_1(t) \ldots\ldots\ldots \text{(3.2b)}$$

$$m_3\ddot{y}_3 - c_3\dot{y}_2 + c_3\dot{y}_3 - k_3y_2 + k_3y_3 = F_1(t) \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \text{(3.2c)}$$

Selanjutnya persamaan (3.2) dapat ditulis dalam bentuk matriks ekspresi,

$$[\mathrm{M}]\,\{\ddot{y}\} + [\mathrm{C}]\,\{\dot{y}\} + [\mathrm{K}]\,\{y\} = \{\mathrm{F}_{(t)}\} \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \text{(3.3)}$$

yang mana matriks ekspresi di atas (matriks – matriks massa, redaman, dan kekakuan) masing-masing adalah :

$$[\mathrm{M}] = \begin{bmatrix} m_1 & 0 & 0 \\ 0 & m_2 & 0 \\ 0 & 0 & m_3 \end{bmatrix}, [\mathrm{C}] = \begin{bmatrix} c_1 + c_2 & -c_2 & 0 \\ -c_2 & c_2 + c_3 & -c_3 \\ 0 & -c_3 & c_3 \end{bmatrix},$$

$$[\mathrm{K}] = \begin{bmatrix} k_1 + k_2 & -k_2 & 0 \\ -k_2 & k_2 + k_3 & -k_3 \\ 0 & -k_3 & k_3 \end{bmatrix} \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \text{(3.4)}$$

Sedangkan $\{\ddot{Y}\}$, $\{\dot{Y}\}$, $\{Y\}$ dan {F(t)} masing-masing adalah vektor percepatan, vektor kecepatan, vektor simpangan dan vektor beban, atau :

$$\{\ddot{Y}\} = \begin{Bmatrix} \ddot{y}_1 \\ \ddot{y}_2 \\ \ddot{y}_3 \end{Bmatrix}, \{\dot{Y}\} = \begin{Bmatrix} \dot{y}_1 \\ \dot{y}_2 \\ \dot{y}_3 \end{Bmatrix}, \{Y\} = \begin{Bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \end{Bmatrix} \text{ dan } \{F(t)\} = \begin{Bmatrix} F_1(t) \\ F_2(t) \\ F_3(t) \end{Bmatrix} \quad\text{......................(3.5)}$$

Pada kenyataan nilai $\ddot{Y}_t$ bervariasi sesuai dengan hasil rekaman waktu terjadinya gempa, dan kemudian nilai tersebut menjadi sejarah pembebanan (*loading history*) pada struktur yang ditinjau. Untuk menyelesaikan persamaan tersebut jalan yang ditempuh berbeda dengan struktur SDOF dan sekaligus merupakan karakteristik dari struktur dengan derajat kebebasan banyak.

Untuk menyelesaikan persamaan (3.3) di atas, maka persamaan tersebut harus dijadikan persaman yang homogen, yaitu dengan mengambil ruas kanan sama dengan nol, maka jadilah sistem getaran bebas (*free vibration system*). Umumnya besarnya redaman kritik berkisar antara 5%, oleh karenanya kemudian diambil suatu pendekatan bahwa struktur dianggap tidak mempunyai redaman (*undamped free vibration* system) (Widodo, 1996). Pendekatan tersebut diambil agar dalam penyelesaian persamaannya menjadi lebih sederhana.

Maka persamaan (3.3) akan menjadi :

$$[M]\{\ddot{y}\} + [K]\{y\} = 0 \quad\text{..........................................................(3.6)}$$

Persamaan (3.6) tersebut diasumsikan pada getaran bebas, maka vector {y} berbentuk

$$\{y\} = \{\phi\}z(t) \quad\text{..................................................................(3.7a)}$$

$$\{\ddot{y}\} = \{\phi\}\ddot{z}(t) \quad\text{..................................................................(3.7b)}$$

dimana $\phi$ adalah vector *mode shape* yaitu suatu vector yang tidak berdimensi, yang memiliki paling sedikit sebuah elemen yang tidak sama dengan nol. Sedangkan z dan

$\ddot{z}$ adalah vektor perpindahan dan vektor percepatan. Jika persamaan (3.7) dimasukkan dalam persamaan (3.6) maka persamaannya akan menjadi sebagi berikut:

$$[M]\{\phi\}\ddot{z}(t) + [K]\{\phi\}z(t) = 0 \qquad (3.8)$$

[M] dan [K] adalah matriks konstan dan pada sebuah hipotesis disebutkan bahwa ($\phi$) juga merupakan matriks konstan, maka akan didapatkan :

$$\ddot{z}(t) + (\text{constan})\, z(t) = 0 \qquad (3.9)$$

Jika constan di atas adalah $\omega_n^2$ (*undamped natural frequency*), maka persaman (3.9) akan menjadi :

$$\ddot{z}(t) + \omega_n^2 z(t) = 0 \qquad (3.10)$$

Persamaan (3.10) diselesaikan dengan :

$$z(t) = A\sin\omega_n t \qquad (3.11)$$

dari uraian-uraian di atas, maka persamaan (3.7) akan menjadi :

$$\{y\} = \{\phi\}A\sin\omega t \qquad (3.12a)$$

$$\{\ddot{y}\} = -\omega^2\{\phi\}A\sin\omega t \qquad (3.12b)$$

Persamaan (3.12) di atas dimasukkan kedalam persamaan (3.6) maka akan didapat :

$$(-\omega^2 [M]\{\phi\} + [K]\{\phi\})\, A\sin\omega t\} = 0 \qquad (3.13)$$

Persamaan (3.13) akan mempunyai persamaan jika A dan $\omega$ tidak sama dengan nol, sehingga :

$$([K] - \omega^2[M])\{\phi\} = 0 \qquad (3.14)$$

Persamaan (3.14) adalah persamaan yang sangat penting biasa disebut persamaan *eigenproblem* atau karakteristik problem. Persamaan (3.14) merupakan persamaan simultan yang harus dicari penyelesaiannya. Persamaan simultan baik persamaan yang homogen maupun persamaan yang tidak homogen dapat diselesaikan dengan memakai dalil / hukum Cramer (1704-1752). Dalil tersebut dalam Widodo (1997) menyatakan bahwa penyelesaian persamaan simultan yang homogen akan ada nilainya apabila determinan dari matriks yang merupakan koefisien dari vektor $\{\phi\}$ adalah nol, sehingga :

$$([K] - \omega^2[M]) = 0 \qquad (3.15)$$

Jumlah *mode* pada struktur dengan derajat kebebasan banyak biasanya dapat dihubungkan dengan jumlah massa. *Mode* itu sendiri adalah pola/ragam getaran/goyangan suatu struktur bangunan. *Mode* ini hanya merupakan fungsi dari properti dinamik dari struktur yang ditinjau yaitu massa dan kekakuan tingkat. *Mode* tidak terpengaruh oleh waktu dan frekuensi getaran. Dengan adanya hubungan antara massa struktur dengan jumlah *mode*, maka bangunan yang mempunyai 4-tingkat misalnya, akan mempunyai 4 derajat kebebasan dan akan mempunyai 4 jenis *mode* gerakan dan akan mempunyai 4 nilai frekuensi sudut yang berhubungan langsung dengan jenis/nomor *mode*nya. Apabila jumlah derajat kebebasan adalah n, maka persamaan (3.15) akan menghasilkan suatu polinomial pangkat n yang dalam penyelesaiannya tidak seperti gedung yang hanya mempunyai 2-tingkat saja atau struktur yang hanya memiliki 2-derajat kebebasan. Pada struktur yang hanya memiliki 2-derajat kebebasan, dalam menghitung ordinat-ordinat *normal modes* masih dapat diselesaikan dengan menggunakan determinan (metode Crammer) karena nilai determinan masih dapat dihitung dengan mudah. Tetapi untuk bangunan yang lebih tinggi, dalam menghitung nilai determinan tersebut akan menghadapi kesulitan.

Pada konstruksi dengan derajat kebebasan banyak, justru masalah inilah yang menjadi problem utama, masalah yang sulit dan memerlukan banyak waktu (Mario Paz, 1985) dalam Widodo (1996). Untuk memperoleh ragam goyangan ini telah dikembangkan banyak metode, misalnya metode polynomial, Holzer, Stodola, Jacobi, Matriks iterasi dan lain-lain yang semuanya mempunyai karaktersitik sendiri-sendiri.

Untuk mengatasi masalah ini telah dipakai beberapa alternatif, misalnya dengan jalan mereduksi dinamik matriks (*static / dynamic condensation)* atau hanya dengan memperhitungkan beberapa kontribusi *mode* yang rendah saja. Kontribusi dari *mode* yang lebih banyak memang akan menyebabkan simpangan yang lebih besar, tetapi derajat pengaruhnya semakin kecil pada *mode* yang lebih tinggi (Christhoper Arnold, Robert Reitherman, 1982; Wiratman Wangsadinata, 1973; Norman B. Green, 1981) dalam Widodo (1996).

**3.3. Metode Jacobi**

Pada penelitian kami ini, dalam menyelesaikan persamaan polinomial pangkat banyak dipakai salah satu dari beberapa metode yang ada, yaitu metode Jacobi. Metode Jacobi telah dikembangkan untuk menyelesaikan masalah-masalah matriks yang riil dan simetris. Metode tersebut telah diusulkan selama satu abad yang lalu dan telah digunakan secara luas. Metode Jacobi ini berusaha mentranformasi suatu matriks A menjadi matriks diagonal $A_{k+1}$. Dalam keadaan ini elemen-elemen diagonal utama matriks $A_{k+1}$ adalah serupa ortogonal (*selular orthogonal*), sehingga harga-harga eigen dari matriks $A_{k+1}$ adalah juga harga-harga eigen dari matriks A. Andaikata $A_0 = A$ dan $U_i$ adalah matriks ortogonal yang memenuhi hubungan

$$U_1 = U_1^{-1} * A_0 * U_1 \qquad \text{......} (3.16)$$

$$A_2 = U_2^{-1} * A_1 * U_2 \qquad \text{......} (3.17)$$

atau dalam bentuk umum

$$\begin{aligned} A_{k+1} &= U_{k+1}^{-1} * A_k * U_{k+1} \\ A_{k+1} &= U_{k+1}^{-1} * A * U_{k+1} \end{aligned} \qquad \text{......} (3.18)$$

yang mana, $U_k' = U_1\, U_2\, U_3 \ldots\ldots U_k$, untuk $k \rightarrow \alpha$, matriks $A_{k+1}$ menjadi matriks diagonal.

Matriks $A_{k+1}$ dan matriks A adalah serupa ortogonal maka dapat disimpulkan bahwa harga-harga eigen dari matriks $A_{k+1}$ sama dengan harga-harga eigen dari matriks A. Karena matriks $A_{k+1}$ (untuk $k \rightarrow \alpha$) telah menjadi matriks diagonal berarti bahwa harga-harga eigen terletak pada elemen-elemen diagonalnya. Masalahnya sekarang adalah bagaimana mentranformasi matriks A menjadi matriks diagonal $A_{k+1}$. Jacobi memperkenalkan cara mentranformasikan tersebut yang sering disebut matriks rotasi. Matriks rotasi $A_{k+1}$ adalah sebuah matriks diagonal yang diubah menjadi :

$$U_{k+1} = \begin{array}{c} \begin{array}{ccccc} \phantom{1} & i & j & \phantom{-} & \phantom{0} \end{array} \\ \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & - & 0 \\ 0 & \cos\alpha & -\sin\alpha & - & 0 \\ 0 & \sin\alpha & \cos\alpha & - & 0 \\ - & - & - & - & - \\ 0 & 0 & 0 & - & 0 \end{bmatrix} \end{array} \begin{array}{c} \\ \\ i \\ j \\ \\ \end{array} \qquad \text{......} (3.19)$$

maksudnya, mula-mula kita punya matriks diagonal, kemudian elemen-elemen untuk baris ke i dan j maupun kolom ke i dan j diganti dengan cos α dan sin α. Seperti pada persamaan berikut:

$$U_{ii} = \cos\alpha \qquad U_{ij} = -\sin\alpha$$

$$U_{ji} = \sin\alpha \qquad U_{jj} = \cos\alpha \quad \ldots\ldots (3.20)$$

Sudut α dicari dari persamaan

$$tg2\alpha = 2\frac{a_{ij}^{(k)}}{a_{ii}^{(k)} - a_{jj}^{(k)}} \quad \ldots\ldots (3.21)$$

Jadi dengan demikian dapat diperoleh elemen-elemen dari matriks $U_{k+1}^{-1}$ dapat dicari dengan mudah karena $U_{k+1}$ adalah matriks ortogonal sehingga $U_{k+1}^{-1} = U_{k+1}^{T}$. Dari sini dapat dihitung $A_{k+1} = U_{k+1}^{-1} * A_k * U_{k+1}$, untuk $k = 0 \rightarrow \alpha$.

Untuk k besar matriks $A_{k+1}$ akan berubah menjadi :

$$A_{k+1} = \begin{bmatrix} a_{11}^{(k)} & 0 & - & 0 \\ 0 & a_{22}^{(k)} & - & 0 \\ - & & & - \\ 0 & 0 & - & a_{nn}^{(k)} \end{bmatrix} \quad \ldots\ldots (3.22)$$

yang berarti harga-harga eigen dari matriks $A_k$ dan $A_{k+1}$ adalah

$$\lambda_1 = a_{11}^{k} \qquad \lambda_2 = a_{22}^{k} \qquad \lambda_n = a_{nn}^{k} \quad \ldots\ldots (3.23)$$

Vektor eigen dapat diperoleh dengan jalan mengalikan matrik-matrik rotasi yang telah dipakai

$$U_k = U_1 * U_2 * \ldots\ldots U_k \quad \ldots\ldots (3.24)$$

Untuk menghindari kesulitan dalam mendapatkan α, maka penentuan cos α dan sin α dari tg 2α dicari sebagai berikut.

$$\cos\alpha = \sqrt{\frac{1}{2}}\left[1+\frac{q}{\sqrt{p^2+q^2}}\right] \text{ dengan } q > 0 \quad \ldots\ldots (3.25)$$

$$\sin\alpha = \frac{1}{2} * \frac{\sin 2\alpha}{\cos\alpha} = \frac{p}{2\cos\alpha\sqrt{p^2+q^2}} \quad \ldots\ldots (3.26)$$

**3.4. Analisis Beban Statik Ekivalen**

Seperti dijelaskan sebelumnya bergetarnya bangunan akibat gempa kemudian disederhanakan seolah-olah terdapat gaya horizontal yang bekerja pada massa bangunan. Apabila bangunan mempunyai banyak massa maka terdapat banyak gaya horizontal yang masing-masing bekerja pada massa-massa tersebut. Sesuai dengan prinsip keseimbangan, maka dapat dianalogikan seperti adanya gaya horizontal yang bekerja pada dasar bangunan yang kemudian disebut Gaya Geser Dasar. Gaya Geser Dasar dihitung dengan rumus sebagai berikut :

$$V = CIKW_t \quad \ldots\ldots (3.27)$$

dimana :

V adalah gaya geser dasar

C adalah koefisien gempa dasar

I adalah faktor keutamaan gedung

K adalah faktor jenis struktur

$W_t$ adalah berat total bangunan

### 3.4.1. Koefisien Gempa dasar (C)

Koefisien gempa dasar harus ditentukan dari gambar (3.2) untuk wilayah gempa yang ditunjukkan dalam gambar (3.1) dengan memakai waktu getar alami struktur gedung sebagai berikut :

a. Untuk struktur-struktur gedung berupa portal-portal tanpa unsur-unsur pengaku yang mambatasi simpangan :

$$T = 0{,}085\ H^{3/4} \text{ untuk portal baja} \quad (3.28a)$$

$$T = 0{,}06\ H^{3/4} \text{ untuk portal beton} \quad (3.28b)$$

b. Untuk struktur-struktur gedung yang lain :

$$T = \frac{0{,}09\,H}{\sqrt{B}} \quad (3.29)$$

dimana H adalah tinggi bangunan total dalam meter diukur dari sistim penjepitan lateral struktur, dan B adalah panjang seluruhnya dari denah struktur pada alasnya dalam arah yang ditinjau (dalam meter). Di samping menggunakan kedua rumus di atas, dalam menentukan waktu getar alami juga harus dicek dengan persamaan Rayleigh :

$$T = 6{,}3\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N} W_i d_i^{\,2}}{g\sum_{i=1}^{N} F_i d_i}} \quad (3.30)$$

Dimana :

N : Jumlah tingkat total di atas dasar gedung

$W_i$ : Berat tingkat i

$d_i$ : Simpangan horisontal pusat massa pada tingkat i

$F_i$ : Beban gempa horisontal dalam arah yang ditinjau yang bekerja pada tingkat I

g : percepatan gravitasi

Nilai C yang diperoleh dengan menggunakan T pada persamaan (3.30), tidak boleh kurang dari 80% nilai yang diperoleh dengan memakai T pada persamaan (3.28) atau persamaan (3.29).

Jika suatu gedung terletak pada lokasi batas wilayah sehingga kepastian wilayahnya tidak jelas, maka gedung tersebut harus dianggap terletak di dalam yang mensyaratkan nilai koefisien gempa dasar yang lebih besar. Selain memakai periode getar dan wilayah gempa, dalam memilih nilai C juga melihat jenis tanah bawah pada gedung tersebut. Ada dua jenis tanah yaitu tanah keras dan tanah lunak. Untuk pemakaian pada suatu struktur gedung harus dianggap berdiri di atas tanah bawah yang lunak, apabila suatu struktur gedung tersebut terletak di atas endapan-endapan tanah dengan kedalaman-kedalaman yang melampaui nilai-nilai tersebut dibawah ini :

- Untuk tanah kohesif dengan kekuatan geser pada kadar air tetap rata-rata tidak lebih dari 0,5 $kg/cm^2$ : 6 m
- Untuk setiap tempat dimana lapisan yang menutupinya terdiri dari tanah kohesif dengan kekuatan geser pada kadar air tetap rata-rata tidak lebih dari 1 $kg/cm^2$ atau terdiri dari tanah butiran yang sangat padat : 9 m
- Untuk tanah kohesif dengan kekuatan geser pada kadar air tetap rata-rata tidak lebih dari 2 $kg/cm^2$ : 12 m
- Untuk tanah butiran terikat yang sangat padat : 20 m

### 3.4.2. Faktor Keutamaan Gedung ( I )

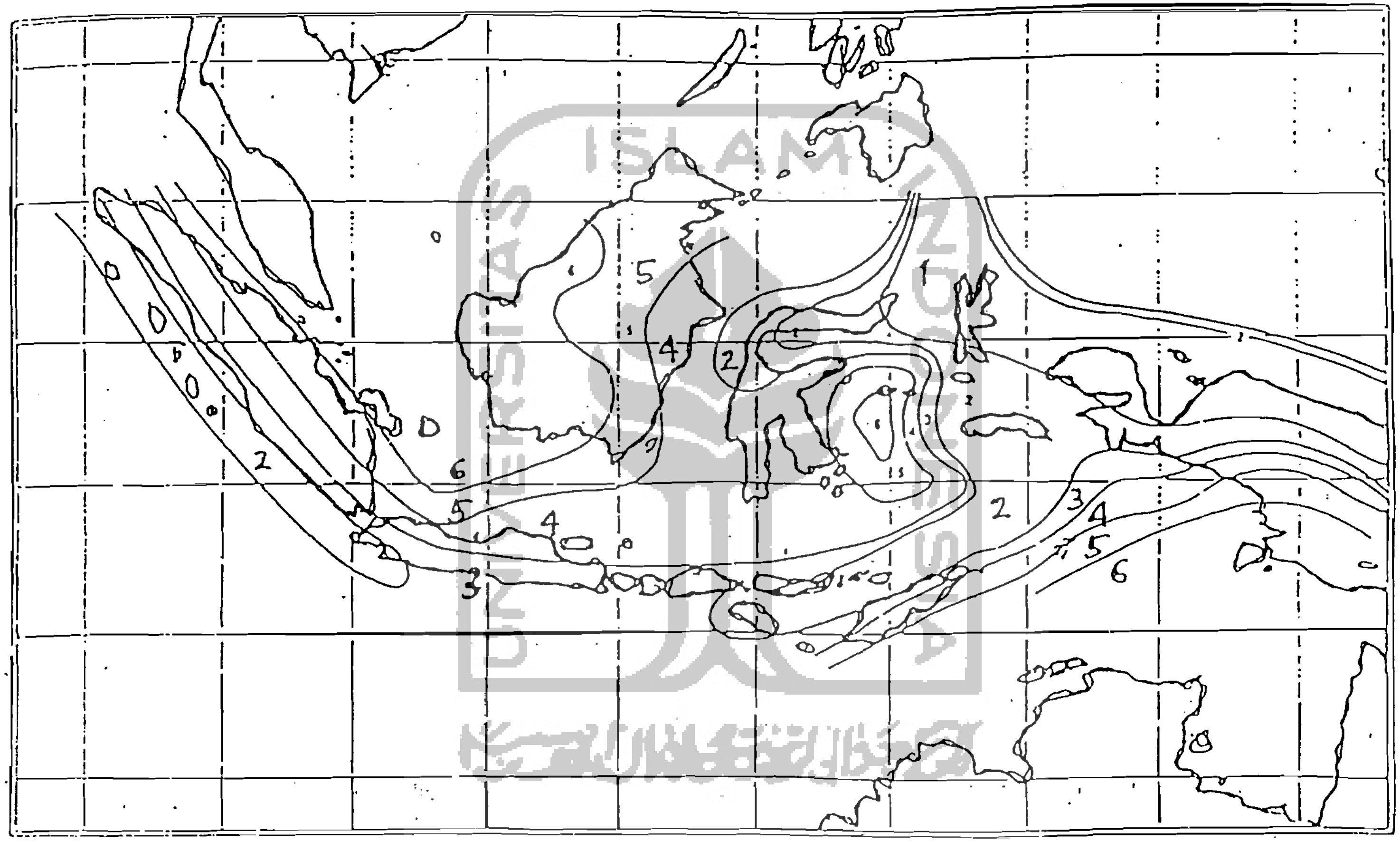
Setiap maksud pemakaian bangunan akan mempunyai tingkat resiko yang berlainan. Misalnya bangunan untuk Instalasi bahan bakar tingkat keamanannya harus lebih bessar dari pada bangunan biasa. Koefisien bangunan I untuk berbagai jenis bangunan dapat dilihat pada tabel 3.1.

### 3.4.3. Faktor Jenis Struktur ( K )

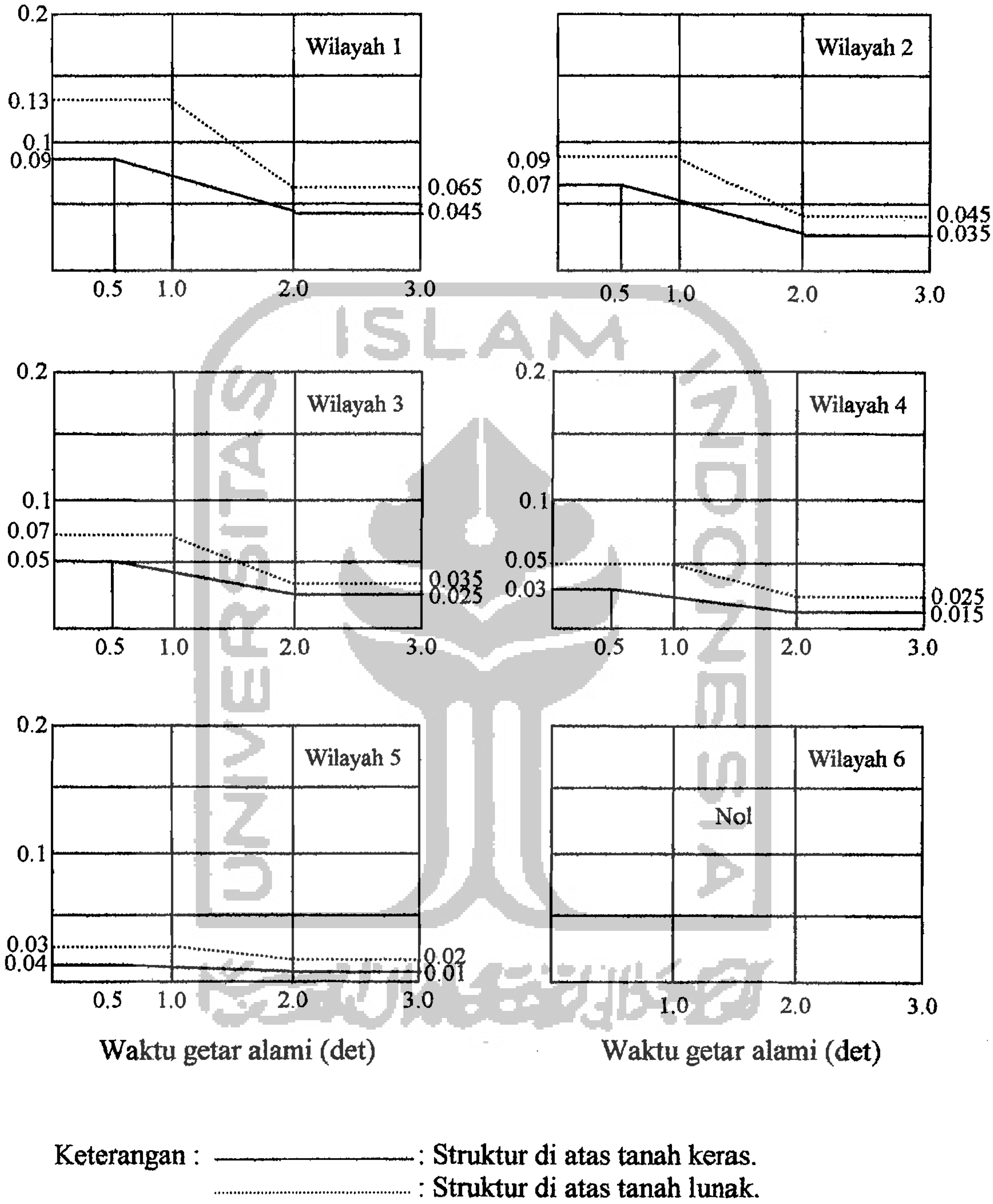
Setiap bahan yang dipakai untuk struktur utama mempunyai perilaku sendiri-sendiri, misalnya kayu, baja ataupun beton. Jenis bahan ini akan mempengaruhi repon bangunan akibat beban gempa, sehingga setiap jenis bahan akan mempunyai koefisien sendiri-sendiri. Koefisien K untuk tiap-tiap jenis struktur dapat dilihat pada tabel 3.2.

### 3.4.5. Berat Total Bangunan ($W_t$)

Berat total bangunan merupakan kombinasi dari beban mati seluruhnya dan beban hidup vertikal yang direduksi. Kofisien reduksi untuk beban hidup yang dikaitkan dengan fungsi gedung dapat dilihat pada tabel 3.3.




Gambar 3.3 Wilayah-wilayah gempa untuk Indonesia




Gambar 3.4 Koefisien gempa dasar C (SKBI-1.3.53.1987)

**Tabel 3.1 Faktor Jenis Struktur (K) Untuk Berbagai Struktur Jenis Gedung**

| No | Jenis Struktur | Jenis Bahan/Struktur Bang- | Faktor Jenis Struktur (K) |
|---|---|---|---|
| 1 | Portal Daktail | Beton bertulang | 1,0 |
| | | Beton prestress | 1,4 |
| | | Struktur baja | 1,0 |
| | | Struktur kayu | 1,7 |
| 2 | Dinding geser daktilitas I | Beton bertulang | 1,0 |
| 3 | Dinding geser kantilever daktilitas I | Beton bertulang | 1,2 |
| | | Dinding berongga bertulang | 2,5 |
| | | Kayu | 2,0 |
| 4 | Dinding geser kantilever daktilitas terbatas | Beton bertulang | 1,5 |
| | | Dinding berongga bertulang | 3,0 |
| | | Kayu | 2,5 |
| 5 | Portal dengan ikatan diagonal | Beton bertulang | 2,5 |
| | | Struktur baja | 2,5 |
| | | Struktur kayu | 3,0 |
| 6 | Struktur kantilever tak bertingkat | Beton bertulang | 2,5 |
| | | Struktur baja | 2,5 |
| 7 | Cerobong, tangki kecil | Beton bertulang | 3,0 |
| | | Struktur baja | 3,0 |

**Tabel 3.2Faktor Keutamaan Bangunan (I)**

| No | Jenis Gedung | Faktor Keutamaan Gedung (I) |
|---|---|---|
| 1 | Gedung-Gedung Monumental | 1,5 |
| 2 | Fasilitas-fasilitas penting yang harus tetap berfungsi sesudah suatu gempa terjadi :<br>a. Rumah Sakit<br>b. Bangunan penyimpanan pangan<br>c. Pusat penyelamatan dalam keadaan darurat<br>d. Pusat pembangkit tenaga<br>e. Bangunan air minum<br>f. Fasilitas radio dan televisi<br>g. Tempat orang berkumpul | 1,5 |
| 3 | Fasilitas distribusi bahan gas dan minyak bumi di daerah perkotaan | 2,0 |
| 4 | Struktur yang menyimpan bahan-bahan berbahaya (asam, bahan beracun, dll) | 2,0 |
| 5 | Struktur-struktur lain | 1,0 |

**Tabel 3.3 Koefisien Reduksi Beban Hidup**

| No | Penggunaan gedung | Koefisien reduksi beban hidup |
|---|---|---|
| 1 | Rumah tinggal, asrama, hotel, rumah sakit | 0,3 |
| 2 | Sekolah, ruang kuliah | 0,5 |
| 3 | Masjid, gereja, bioskop, restoran, ruang dansa | 0,5 |
| 4 | Kantor, bank | 0,3 |
| 5 | Toko, toserba, pasar | 0,8 |
| 6 | Gudang, perpustakaan, ruang arsip | 0,8 |
| 7 | Pabrik, bengkel | 0,9 |
| 8 | Garasi, gedung parkir | 0,5 |
| 9 | Gang dan tangga : | |
| | a. Perumahan/penghunian | 0,3 |
| | b. Pendidikan, kantor | 0,5 |
| | c. Pertemuan umum, perdagangan penyimpanan, industri, tempat kendaraan | 0,5 |

### 3.5. *Modal Effective Mass*

*Modal effective Mass* dicari dengan rumus sebagai berikut :

$$M_{im} = \frac{\left[\sum_{i=1}^{N} \phi_{im} M_i\right]^2}{\sum_{i=1}^{N} \phi_{im}^2 M_i} \quad \text{.......... (3.33)}$$

### 3.6. *Modal Base Shear*

*Modal base shear* diperoleh dengan mengalikan gaya geser dasar pada analisis beban statik ekivalen dengan prosentase pada masing-masing mode.

$$V_{im} = (\%M_{im}) \text{x } V \quad \text{.......... (3.34)}$$

dimana :

$M_{im}$ = *modal effective mass*

V = gaya geser dasar akibat beban statik ekivalen.

Berdasarkan teknik SRSS, total gaya geser dasar dapat dihitung dengan :

$$V = \sqrt{\sum_{m=1}^{N} V_m^2} \quad \text{.......... (3.35)}$$

Dalam menentukan bobot *modal effective weight* dan *modal base shear* harus dibuat skala sampai 90 % dari gaya geser yang ditentukan dengan metode beban statik ekivalen. Dan dibuat skala rasio antara 90 % dari gaya geser yang dihitung pakai metode beban statik ekivalen dengan gaya geser dasar yang dihitung menggunakan persamaan (3.35).

### 3.7. *Modal Effective Height* ($h_j$)

*Modal Effective Height* dapat dihitung dengan menggunakan rumus sebagai berikut :

$$h_j^* = \frac{\sum_{j=1}^{N} h_j m_j \phi_{ij}}{m_j \phi_{ij}} \qquad (3.36)$$

Dimana :

$h_j^*$ = *modal effective height* pada mode ke-j

$h_j$ = tinggi massa ke-j

$m_j$ = massa ke-j

$\phi_{ij}$ = mode ke-j, massa ke-i

### 3.8. *Modal Seismic Force* ($F_{im}$)

*Modal seismic force* di tingkat i ditentukan dengan rumus :

$$F_{im} = C_{im} V_m \qquad (3.37)$$

Dimana $C_{im}$ adalah koefisien modal gempa di tingkat i yang diperoleh dari :

$$C_{im} = \frac{\phi_{im} m_i}{\sum_{j=1}^{N} \phi_{jm} m_j} \qquad (3.38)$$

Dengan memakai teknik SRSS, desain gaya gempa dapat dihitung dengan :

$$F_i = \sqrt{\sum_{m=1}^{N} F_{im}^2} \qquad (3.39)$$

### 3.9. *Modal Shear Force* ($V_{im}$)

*Modal shear force* di tingkat gedung I sama dengan jumlah gaya gempa $F_{im}$ di atas tingkat tersebut. Secara matematis ditunjukkan dengan :

$$V_{im} = \sum_{j=i}^{N} F_{jm} \qquad (3.40)$$

Dengan memakai teknik SRSS, desain gaya geser tingkat dapat dihitung dengan :

$$V_i = \sqrt{\sum_{m=1}^{N} V_{im}^2} \qquad (3.41)$$

**3.10.** ***Modal Overtuning Moment*** **($M_{im}$)**

*Overtuning Moment* atau momen guling merupakan jumlah momen akibat dari gaya gempa di atas tingkat tersebut. Secara matematisnya sebagai berikut :

$$M_{im} = \sum_{j=i+1}^{N} F_{jm}(h_j - h_i) \qquad (3.42)$$

**3.11.** ***Modal Story Drift*** **($\Delta_{im}$)**

*Modal story drift* atau simpangan tingkat untuk tingkat gedung ke-i, yang dimodelkan sebagai shear building, memakai :

$$\Delta_{im} = \frac{V_{im}}{k_i} \qquad (3.43)$$

dimana : $V_{im}$ = modal shear force di tingkat i

$k_i$ = jumlah kekakuan di tingkat i

Di dalam peraturan mengharuskan simpangan horisontal struktur yang dihitung dengan analisis dinamik dikalikan dengan factor $\frac{1}{0,9K}$. Dimana K adalah factor jenis struktur, maka rumus untuk *modal story drift* menjadi :

$$\Delta_{im} = \frac{V_{im}}{0,9Kk_i} \qquad (3.44)$$

Dengan memakai teknik SRSS, maka simpangan tingkat rencana dihitung dengan :

$$\Delta_{im} = \sqrt{\sum_{m=1}^{N} \Delta_{im}^2} \quad \text{............} \quad (3.45)$$

Perlu diingat bahwa maksimum simpangan tingkat yang diperbolehkan oleh peraturan Indonesia adalah 0,005$h_i$.

**3.12. *Modal Lateral Displacement* ($d_{im}$)**

*Modal lateral displacement* pada tingkat gedung ke-i dihitung dengan :

$$d_{im} = \sum_{j=1}^{i} \Delta_{jm} \quad \text{............} \quad (3.46)$$

dimana $\Delta_{jm}$ adalah *modal story drift.*

Dengan memakai teknik SRSS, *lateral displacement* rencana dapat dihitung dengan :

$$d_i = \sqrt{\sum_{m=1}^{N} d_{im}^2} \quad \text{............} \quad (3.47)$$