

BAB III

LANDASAN TEORI

3.1 Umum

Semakin tinggi suatu bangunan, aksi gaya lateral menjadi semakin penting. Pada ketinggian tertentu ayunan lateral bangunan menjadi demikian besar sehingga pertimbangan kekakuan, kekuatan bahan struktur, menentukan rancangan. Derajat kekakuannya terutama tergantung pada jenis sistem struktur yang dipilih. Lebih jauh lagi, efisiensi suatu sistem tertentu berkaitan langsung dengan jumlah bahan yang digunakan. Dengan demikian, optimasi suatu struktur untuk kebutuhan ruang tertentu haruslah menghasilkan kekakuan maksimum, tetapi dengan berat sekecil mungkin, sehingga akan dihasilkan sistem struktur yang inovatif dan dapat diterapkan pada ambang ketinggian tertentu.

Dalam perancangan bangunan tingkat tinggi tahan gempa, selama gempa bumi, bangunan mengalami gerakan vertikal dan gerakan horisontal. Gaya gempa baik dalam arah vertikal maupun horisontal, akan membebani titik-titik pada massa struktur. Struktur biasanya direncanakan terhadap gaya vertikal dengan faktor keamanan yang memadai, sebaliknya gaya gempa horisontal menyerang titik-titik lemah pada struktur yang kekuatannya tidak memadai dan akan langsung menyebabkan keruntuhan dan kegagalan (*failure*). Atas alasan ini, prinsip utama

dalam perencanaan bangunan tahan gempa ialah meningkatkan kekuatan struktur terhadap gaya lateral yang umumnya tidak memadai, salah satu alternatifnya adalah dinding geser (*Shear wall*).

Tapi tidak semua perencanaan gedung menggunakan dinding geser, hanya merupakan struktur rangka. Bila struktur seperti ini dipaksakan untuk dilaksanakan, maka bila ada beban lateral tentu dengan konsekuensi dimensi kolom akan lebih besar jika diinginkan simpangan struktur sama dengan simpangan yang terjadi pada struktur dengan dinding geser. Besarnya dimensi tersebut karena ada perbedaan kekakuan elemen vertikal. Tapi bila dibuat kolom dengan volume beton sama dengan volume beton pada dinding geser, maka berapa besar simpangan pada struktur ini akan menarik untuk diteliti jika dibandingkan dengan struktur dengan dinding geser.

3.2 Analisis Pembebanan Pada Struktur

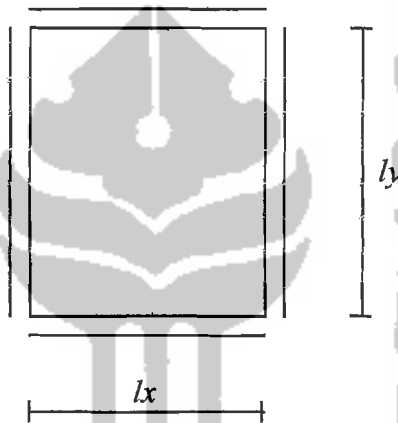
Pembebanan yang dipakai dalam analisis berat struktur mengacu pada Peraturan Pembebanan Indonesia untuk Rumah dan Gedung 1983, meliputi beban mati, beban hidup, beban gempa, dan beban angin.

3.2.1 Beban mati

Beban mati (*D*) adalah berat dari semua bagian suatu gedung yang bersifat tetap, termasuk segala tambahan, penyelesaian mesin-mesin serta peralatan tetap yang merupakan bagian yang tak terpisahkan dari gedung tersebut.

Dalam analisis ini yang termasuk beban mati adalah beban plat, kolom, balok, dinding geser, tangga, lift, dan dinding. Beban plat dan dinding dipikul oleh balok yang mempunyai dengan dikonversikan menjadi beban merata. Beban tangga sepenuhnya ditahan oleh dinding geser, sedangkan beban lift hanya sebagian yang dibebankan ke dinding geser. Beban-beban ini merupakan beban terpusat.

Beban pelat dipikul oleh balok-balok yang mempunyai dengan dikonversikan ke dalam beban merata. Rumus-rumus yang melandasinya antara lain.

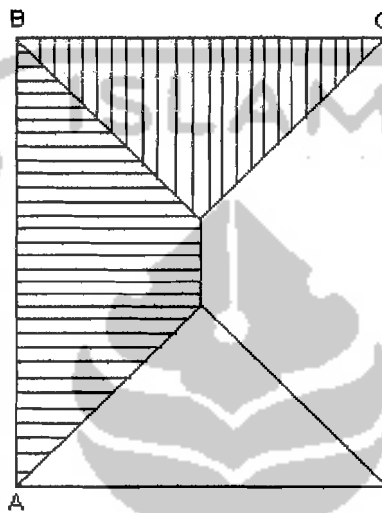


Gambar 3.1 Pelat

Dari model struktur dapat diketahui bahwa pelat direncanakan terjepit penuh pada keempat sisinya sesuai dengan Gambar 3.1. Dengan l_x adalah bentang terpendek dan l_y adalah bentang terpanjang. Setelah l_x diketahui maka tebal minimum pelat h_{\min} (Gideon, 1994) adalah :

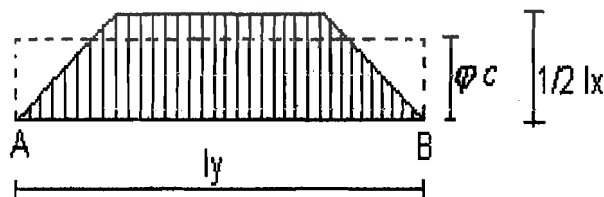
$$h_{\min} = \frac{1}{28} l \quad (3.1)$$

Kemudian dihitung pembagian beban-beban pelat pada balok-balok yang mempunyai dengan menggunakan metode amplop yang dapat ditunjukkan pada Gambar 3.2.



Gambar 3.2 Distribusi beban pelat pada balok dengan metode amplop

Dari Gambar 3.2 dapat dilihat bahwa balok A-B menerima distribusi beban pelat yang berbentuk trapesium, sedangkan balok B-C menerima beban pelat berbentuk segitiga.



Gambar 3.3 Distribusi beban pelat pada balok A-B

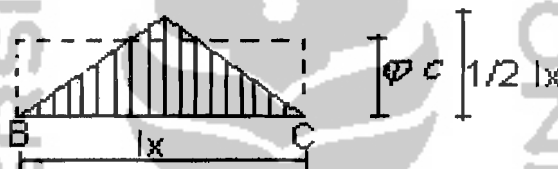
Dari bentuk trapesium dapat dikonversikan menjadi bentuk persegi panjang dengan merubah $0.5 l_x$ menjadi φc .

$$\varphi = 1 - \frac{4}{3} \cdot \frac{c^2}{l^2} \quad (3.2)$$

Dimana : $c = 0.5 l_x$, $l = l_y$

maka; $W_D = \text{Beban pelat terfaktor} \times \varphi c \text{ KN/m}$ (3.3)

Sedangkan balok B-C menerima distribusi beban pelat berbentuk segitiga yang dapat dilihat pada Gambar 3.4.



Gambar 3.4 Distribusi beban pelat pada balok B-C

Dari bentuk segitiga dapat dikonversikan menjadi bentuk persegi panjang dengan merubah $0.5 l_x$ menjadi φc .

$$\varphi = 1 - \frac{4}{3} \cdot \frac{c^2}{l^2} \quad (3.4)$$

dimana : $c = 0.5 l_x$, $l = l_x$

maka; $W_D = \text{Beban pelat terfaktor} \times \varphi c \text{ KN/m}$ (3.5)

Hasil pembebanan pada balok diatas untuk pelat berbentuk persegi panjang, sedangkan pada model struktur perhitungan pelat dibagi menjadi bentuk trapesium, sehingga perhitungan di atas dikonversikan dengan Tabel Baresi.

3.2.2 Beban hidup

Beban hidup (L) adalah semua beban yang terjadi akibat pemakaian dan penghunian suatu gedung, termasuk beban-beban pada lantai yang berasal dari barang-barang yang dapat berpindah dan atau beban akibat air hujan pada atap. Model struktur yang digunakan difungsikan sebagai gedung perpustakaan, maka beban hidup yang digunakan adalah 400 kg/m^2 .

3.5.3 Beban gempa

Gempa bumi terdiri dari gerakan-gerakan lapisan bumi ke arah horisontal dan vertikal, dimana biasanya gerakan vertikalnya lebih kecil dari daripada gerakan horisontalnya. Peninjauan pengaruh gempa elemen vertikal maka digunakan pembebanan kombinasi (ekstrim)

$$F = \text{Beban Grafitasi} + 100 \% \text{ Beban Gempa arah X} \\ + 30 \% \text{ Beban Gempa arah Y.} \quad (3.6)$$

(Pedoman Perencanaan Ketahanan Gempa untuk Rumah dan Gedung SKBI – 1.3.53.1987 pasal 2.3.2).

Karena efek terbesar ditimbulkan oleh gerakan arah horisontal, efek ini pula yang biasanya diperhitungkan. Perencanaan beban gempa yang digunakan pada

struktur adalah beban statik ekivalen yang merupakan representasi dari beban gempa setelah disederhanakan, yaitu penyederhanaan gaya inersia yang bekerja pada suatu massa dan disederhanakan menjadi beban statik yang terdistribusi sepanjang tinggi struktur. Sedangkan gaya inersia adalah suatu gaya yang bekerja pada suatu massa apabila massa tersebut dibebani secara dinamik seperti beban gempa. Apabila lapisan tanah dibawah struktur dengan massa tertentu tiba-tiba saja bergerak, maka inersia dari massa cenderung melawan gerakan. Diantara lapisan tanah dengan massa tersebut akan timbul gaya geser.

3.2.4 Beban Angin

Semua beban yang bekerja pada semua gedung yang disebabkan oleh selisih tekanan udara sehingga dapat menimbulkan tekanan pada sisi di pihak angin (*windward*) dan hisapan pada sisi belakang (*leeward*).

Model struktur adalah gedung bertampang bundar, maka P_{tekan} sama dengan P_{hisap} . Dari Peraturan Pembebanan Indonesia untuk Gedung diperoleh koefisien tekan angin (c_w) untuk tekanan positif dan negatif sebesar 0,7 dengan tekanan P_w

$$P_{\text{tekan}} = P_{\text{hisap}} \quad (3.7)$$

$$P_w = (42,5 + 0,6 h) \quad (3.8)$$

dimana : h = tinggi efektif bangunan, A = luas bidang tekan

maka,
$$P(\text{tekan/ hisap}) = c_w \times A \times P_w. \quad (3.9)$$

Pendistribusian diasumsikan sebagai gaya terpusat pada joint bidang tekan / hisap pada bangunan.

Peninjauan gaya gempa dan angin ditinjau dari pemisalan dari satu arah tertentu yang keduanya diambil keadaan yang paling ekstrem (diasumsikan gaya gempa terjadi bersamaan dengan gaya angin). Dengan mengambil pemisalan arah gempa dan arah angin terjadi pada sumbu X.

3.3 Kekakuan Struktur

Analisis kekakuan dari elemen-elemen struktur digunakan untuk perhitungan gaya lateral yang akan ditahan oleh struktur rangka dan struktur dinding geser.

$$\text{Kekakuan } (k) = 12 \cdot E \cdot I / lk^3 \quad (3.10)$$

Dimana : E = Modulus Elastisitas material yang digunakan.

$$E = 4700 \sqrt{f'_c} \quad (3.11)$$

I = Inersia penampang dari elemen struktur tersebut (m^4)

lk = panjang (tinggi) dari elemen tersebut (m).

a. Elemen dinding geser

$$\text{Inersia penampang pipa, } I = \pi/64 \cdot (D^4 - d^4) \quad (3.12)$$

Dimana : D = Diameter lingkaran luar dinding geser (m).

d = Diameter lingkaran dalam dinding geser (m).

b. Elemen kolom

Perhitungan Inersia dari elemen kolom digunakan untuk mencari kekakuan elemen-elemen vertikal struktur. Perhitungan pada setiap kolom

dilakukan dengan titik pusat struktur sebagai acuan, sehingga membentuk sudut terhadap sumbu Lokal X – Y. Pada model struktur terdapat dua bentuk kolom, yaitu kolom berbentuk bundar dan persegi. Pada kolom berbentuk bundar berapapun sudut yang terjadi terhadap sumbu X – Y, maka inersianya akan selalu sama besar yaitu :

$$\text{Inersia penampang bundar} = \pi/64 \cdot D^4. \quad (3.13)$$

Dimana : D = diameter penampang

Sedangkan inersia penampang persegi dengan lebar (b), dan tinggi (h) adalah :

$$\text{Inersia penampang persegi} = 1/12 \cdot b \cdot h^3. \quad (3.14)$$

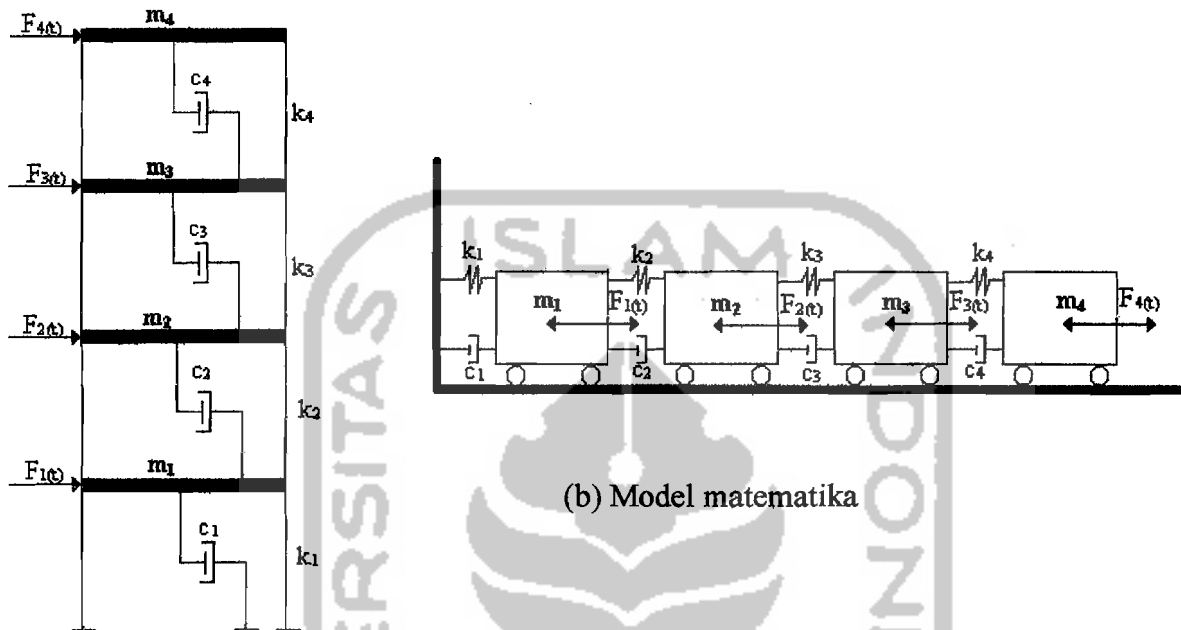


Pada model struktur terdapat 36 kolom dengan penampang persegi pada bagian terluar bangunan sehingga untuk tiap kolom mempunyai perbedaan sudut sebesar 10 derajat. Karena analisis inersia kolom dilakukan dengan titik pusat struktur sebagai acuan, maka penampang kolom akan membentuk sudut terhadap sumbu X – Y. Untuk itu analisis inersia kolom dilakukan dengan menggunakan bantuan program AutoCAD R-14.

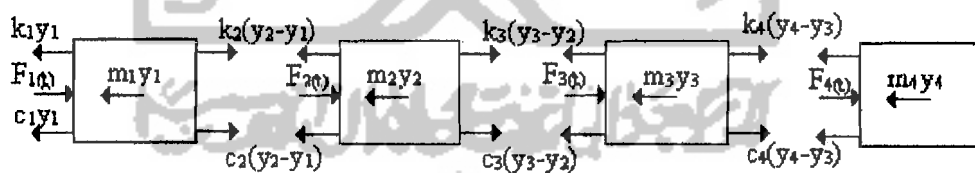
3.2 Analisis Gaya Gempa

Struktur yang perilaku terhadap pengaruh beban gempa sulit diperkirakan, harus dianalisis dengan analisis dinamik. Analisis dinamik yang dipergunakan pada penelitian ini adalah analisis ragam spektrum respon (*Modal Analysis*), yaitu respon dinamik dari struktur dengan beberapa derajat kebebasan (*Multi Degree of Freedom / MDOF*) didapat dari superposisi respon dari sejumlah bandul getar dengan satu derajat kebebasan (*Single Degree of Freedom / SDOF*).

Untuk menyatakan persamaan differensial gerakan pada struktur dengan derajat kebebasan banyak maka dipakai anggapan dan pendekatan seperti pada struktur dengan derajat kebebasan tunggal (*SDOF*). Anggapan adalah bahwa prinsip shear building masih berlaku pada struktur dengan derajat kebebasan banyak (*MDOF*). Untuk mendapatkan persamaan differensial tersebut maka tetap dipakai prinsip keseimbangan dinamik pada suatu massa yang ditinjau. Untuk memperoleh persamaan tersebut maka diambil model struktur seperti berikut ini.



(a) Struktur 4 DOF



(c) Diagram gaya

Gambar 3.5 Penerapan *lumped mass model* pada struktur 4 DOF

Pada struktur bangunan bertingkat empat, mempunyai empat derajat kebebasan. Jumlah kebebasan sering dihubungkan secara langsung dengan jumlah

tingkat. Berdasarkan keseimbangan dinamik pada Gambar 3.5 maka akan diperoleh,

$$m_1 y_1 + k_1 y_1 + c_1 y_1 - k_2 (y_2 - y_1) - c_2 (y_2 - y_1) - F_{1(t)} = 0 \quad (3.15)$$

$$m_2 y_2 + k_2 (y_2 - y_1) + c_2 (y_2 - y_1) - k_3 (y_3 - y_2) - c_3 (y_3 - y_2) - F_{2(t)} = 0 \quad (3.16)$$

$$m_3 y_3 + k_3 (y_3 - y_2) + c_3 (y_3 - y_2) - k_4 (y_4 - y_3) - c_4 (y_4 - y_3) - F_{3(t)} = 0 \quad (3.17)$$

$$m_4 y_4 + k_4 (y_4 - y_3) + c_4 (y_4 - y_3) - F_{4(t)} = 0 \quad (3.18).$$

Persamaan 3-15 sampai 3.18 dapat ditulis dalam bentuk matriks

$$[M] \{Y\} + [C] \{\dot{Y}\} + [K] \{Y\} = \{F_{(t)}\} \quad (3.19)$$

dimana; [M], [C], dan [K] berturut-turut adalah matrik massa, matrik redaman, dan matrik kekakuan. Sedangkan {Y}, {\dot{Y}}, {Y}, dan {F_{9(t)}} masing-masing adalah vektor percepatan, vektor kecepatan, vektor simpangan, dan vektor beban.

Pada getaran bebas struktur dengan derajat kebebasan banyak, persamaan diferensial sama dengan persamaan 3.19 dengan nilai F_(t) sama dengan nol atau

$$[M] \{Y\} + [C] \{\dot{Y}\} + [K] \{Y\} = \{0\} \quad (3.20)$$

Frekuensi sudut pada struktur dengan redaman mempunyai nilai hampir sama dengan frekuensi sudut pada struktur yang dianggap tanpa redaman, bila nilai *damping ratio* cukup kecil. Apabila hal ini diadopsi untuk struktur dengan derajat kebebasan banyak, maka nilai {C}=0. Sehingga persamaan 3.20 akan menjadi

$$[M] \{Y\} + [K] \{Y\} = \{0\} \quad (3.21)$$

Karena persamaan 3.21 adalah persamaan diferensial pada struktur MDOF yang dianggap tidak mempunyai redaman, maka persamaan diharapkan dalam fungsi harmonik menurut bentuk,

$$\{Y\} = \{\phi\}_j \text{Sin}(\omega t)$$

$$\{Y\} = -\omega \{\phi\}_j \text{Cos}(\omega t) \quad (3.22)$$

$$\{Y\} = -\omega^2 \{\phi\}_j \text{Sin}(\omega t)$$

Dimana $\{\phi\}_j$ suatu ordinat massa pada mode ke-j. Substitusi persamaan 3.22 ke dalam persamaan 3.21 akan diperoleh

$$-\omega^2 [M]\{\phi\}_j \text{Sin}(\omega t) + [K]\{\phi\}_j \text{Sin}(\omega t) = 0$$

$$\{[K] - \omega^2 [M]\}\{\phi\}_j = 0 \quad (3.23)$$

Persamaan simultan baik persamaan yang homogen maupun persamaan yang tidak homogen dapat diselesaikan dengan memakai hukum *Cramer* (1704-1752). Hukum tersebut menyatakan bahwa penyelesaian persamaan simultan yang homogen akan ada nilainya apabila determinan dari matriks yang merupakan koefisien dari vektor $\{\phi\}_j$ adalah nol, sehingga

$$|[K] - \omega^2 [M]| = 0 \quad (3.24)$$

Apabila jumlah derajat kebebasan adalah empat, maka persamaan 3.24 akan menghasilkan suatu polinomial pangkat empat, yang selanjutnya akan menghasilkan ω^2_j untuk $j = 1, 2, 3, \text{ dan } 4$. Selanjutnya substitusi masing-masing ω ke dalam persamaan 3.23 akan diperoleh nilai-nilai ϕ_1, \dots, ϕ_4 .

Dengan diperolehnya nilai-nilai frekuensi sudut untuk tiap-tiap mode, maka akan diperoleh nilai periode getar (T) tiap-tiap mode yaitu

$$T_1 = \frac{2\pi}{\omega_1} \quad T_2 = \frac{2\pi}{\omega_2} \quad T_3 = \frac{2\pi}{\omega_3} \quad T_4 = \frac{2\pi}{\omega_4} \quad (3.25)$$

$$\omega_1 = \sqrt{\lambda_1 \frac{k}{m}} \quad \omega_2 = \sqrt{\lambda_2 \frac{k}{m}} \quad \omega_3 = \sqrt{\lambda_3 \frac{k}{m}} \quad \omega_4 = \sqrt{\lambda_4 \frac{k}{m}} \quad (3.26)$$

Nilai-nilai pola ragam atau *mode shapes* tidak tergantung pada beban luar, melainkan tergantung pada properti fisik struktur yaitu massa dan kekakuan. *Mode shapes* juga tidak dipengaruhi oleh waktu artinya nilai-nilai tersebut akan tetap asalkan nilai-nilai massa dan kekakuan tidak berubah.

Persamaan gaya horisontal tingkat atau gaya horisontal maksimum yang bekerja pada suatu massa akibat mode ke- j .

$$F_j = M_j \frac{P_j^*}{M_j^*} c g \quad (3.27)$$

Dimana, F_j = gaya horisontal tiap mode

M = matriks massa

ϕ_j = nilai koordinat tiap pola/ragam goyangan /mode ke- j

$\frac{P_j^*}{M_j^*}$ = faktor partisipasi gempa

$$P_j^* = (\phi)_j^T [M] \{I\}$$

$$M_j^* = (\phi)_j^T [M] \{\phi\}_j$$

C = koefisien gempa dasar

g = Percepatan gravitasi.

Gaya geser dasar merupakan jumlah dari hasil penjumlahan gaya horisontal tingkat tiap mode.

Karena dengan memakai rumus-rumus tersebut di atas terlalu panjang perhitungannya, maka digunakan program SANS89 untuk mempermudah mencari gaya gempa tiap lantai. Hasil dari gaya gempa ini digunakan untuk memperhitungkan defleksi struktur.