

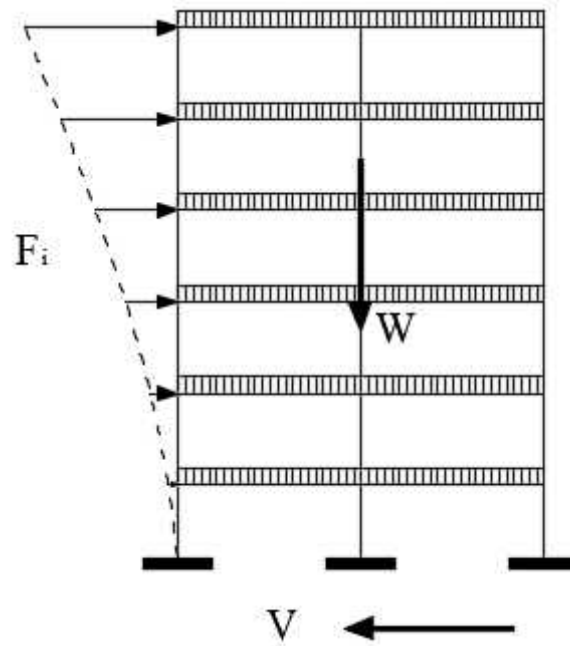
BAB III

LANDASAN TEORI

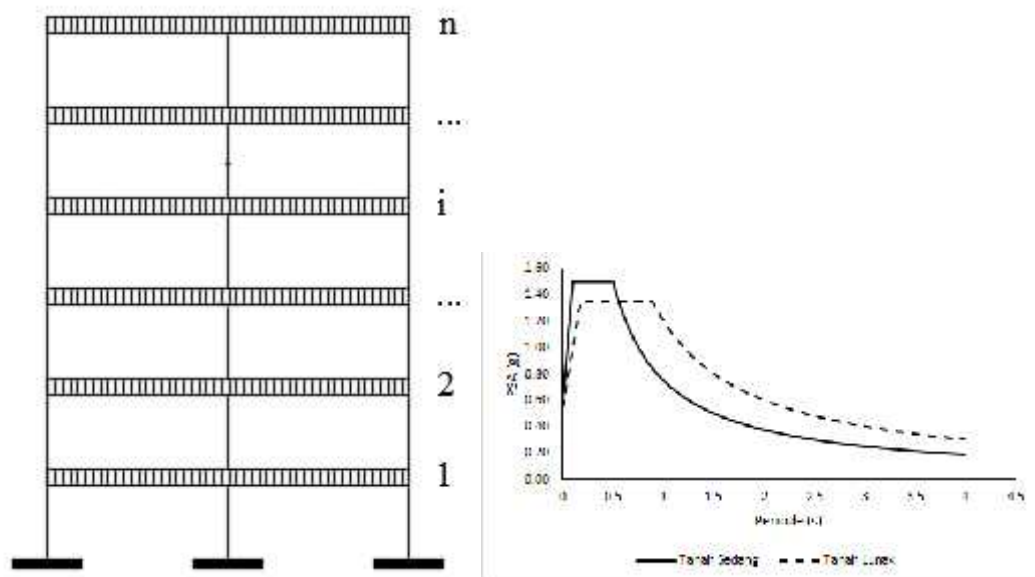
3.1 Gempa Bumi

Widodo (2017) menjelaskan gempa bumi menurut beberapa sumber yang telah berusaha mendeskripsikan apa pengertian gempa bumi secara umum adalah bergetarnya permukaan tanah karena pelepasan energi secara tiba-tiba akibat dari pecah atau slipnya massa batuan di lapisan kerak bumi. Pengertian tersebut sekaligus menjawab mengapa permukaan tanah menjadi bergetar, yaitu akibat energi gempa yang merambat dari pusat gempa ke segala arah. Kejadian gempa bumi belum tentu mengakibatkan suatu bencana, apabila magnitudo gempa yang relatif kecil, apalagi kalau jarak episenternya jauh dan fokus atau hiposenternya relatif dalam maka dampaknya terhadap kehidupan manusia relatif kecil, namun apabila sebaliknya gempa bumi dapat mengakibatkan bencana yaitu jika dampak-dampak tersebut sudah mengganggu aktivitas normal suatu komunitas lokal, regional maupun nasional.

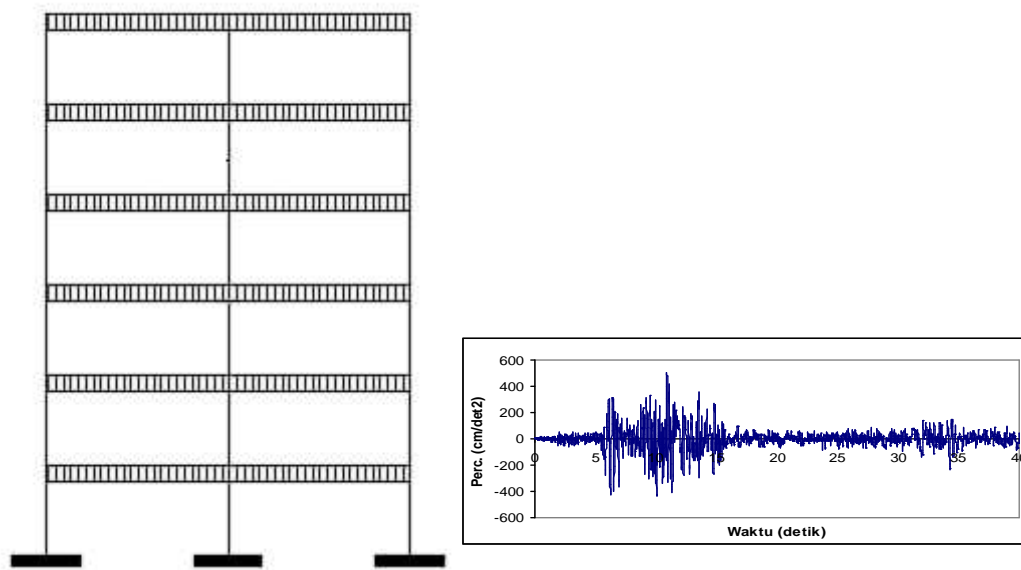
Beban gempa bumi walaupun hanya beberapa detik tetapi akibatnya sungguh menakutkan. Gerakan tanah akibat gempa bumi umumnya sangat secara acak dan hanya terjadi beberapa detik sampai puluhan detik saja. Karena sifat getarannya yang secara acak dan tidak seperti beban statik maka efek beban gempa terhadap respon struktur tidaklah dapat diketahui dengan mudah. Oleh karena itu diperlukan usaha-usaha penyederhanaan agar model analisis pengaruh gempa terhadap respons struktur dapat diperhitungkan. Terdapat tiga kategori utama untuk memperhitungkan efek gempa terhadap analisis struktur bangunan gedung yaitu menggunakan metode ekuivalen statik, spektrum respons, dan analisis riwayat waktu (*Time History Analysis, THA*).



Gambar 3.1 Model Ekuivalen Statik
(Sumber : Widodo, 2017)



Gambar 3.2 Model Spektrum Respons
(Sumber : Widodo, 2017)



Gambar 3.3 Model Analisis Riwayat Waktu (THA)

(Sumber : Widodo, 2017)

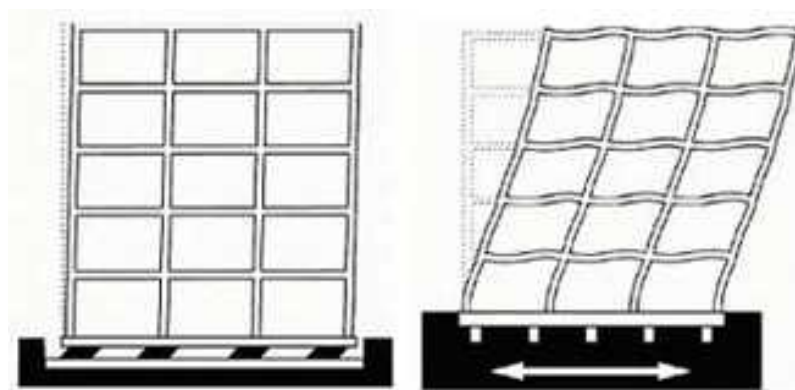
3.2 Isolasi Dasar (*Base Isolation*)

3.2.1 Pengertian Isolasi Dasar (*Base Isolation*)

Sistem isolasi dasar yang merupakan sistem kontrol pasif yang dapat menjaga integritas struktur. Sistem ini dapat diadopsi untuk mendesain struktur baru, maupun perbaikan dari struktur eksisting. Strategi dari sistem isolasi dasar adalah memberikan fleksibilitas lateral yang membantu mengurangi gaya gempa dengan mengubah perioda alami struktur untuk menghindari resonansi dengan frekuensi utama yang terkandung pada gempa yang terjadi. Selain itu, sistem isolasi dasar juga memberikan tambahan redaman pada struktur yang akan mengabsorpsi energi gempa pada saat terjadinya pergerakan pada sistem isolasi.

Penggunaan sistem isolasi dasar sangat efektif untuk bangunan tingkat rendah medium yang berlokasi di tanah keras. Adanya sistem isolasi dasar pada bangunan tingkat tinggi menjadi tidak efektif karena perioda natural yang tinggi membuat percepatan gempa kecil walaupun tidak menggunakan sistem isolasi. Namun adanya pertimbangan lain seperti kenyamanan pengguna, bangunan penting yang harus tetap berfungsi pada saat dan setelah gempa, elemen non-struktural yang tidak rusak membuat adanya dorongan untuk mengembangkan

penggunaan sistem isolasi dasar pada bangunan tingkat tinggi. Penggunaan sistem isolasi dasar pada struktur dengan perioda natural berkisar dari 1 sampai 3 detik dapat dilakukan dengan meningkatkan kekakuan struktur dengan memberikan bresing atau dinding geser pada struktur dan meningkatkan fleksibilitas dari sistem isolasi yang digunakan (Jain dan Thakkar, 2004). Perbandingan perilaku bangunan dengan dan tanpa isolasi dasar apabila dikenai beban gempa dapat dilihat pada Gambar 3.4.



a) *Base Isolated Building*

b) *Fixed Base Building*

Gambar 3.4 Perbandingan Respons Bangunan dengan Isolasi Dasar dan Bangunan Konvensional (*Fixed Base*) Terhadap Beban Gempa

(Sumber : Rathjen, 2003)

3.2.2 Jenis-jenis Isolasi Dasar (*Base Isolation*)

Secara garis besar isolasi dasar dibagi kedalam dua kelompok, yaitu isolasi dasar yang menggunakan material karet sebagai isolator (*rubber type seismic isolation*) dan tanpa menggunakan material karet sebagai isolatornya (*non-rubber type seismic isolation*) seperti dijelaskan berikut ini.

1. *Rubber type seismic isolation*

Isolasi dasar yang menggunakan bantalan karet peredam gempa (*seismic rubber bearing*) sebagai isolator adalah yang paling populer penggunaannya. Popularitas bantalan karet ini semakin meningkat karena mampu membuktikan keandalannya pada saat gempa bumi Los Angeles awal tahun 1994 dan Kobe akhir tahun 1994.

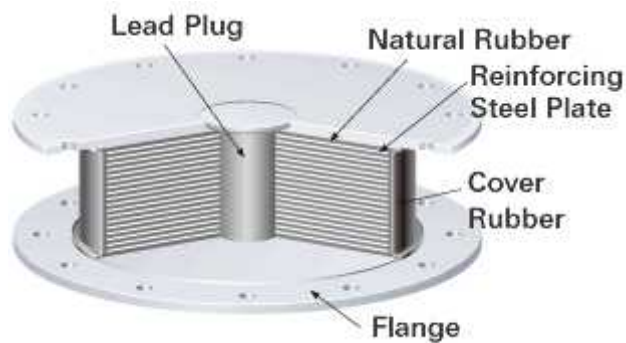
Bantalan karet ini terbuat dari lembaran-lembaran vulkanis karet yang direkatkan pada pelat-pelat baja secara berselang-seling. Pelat-pelat baja tersebut bertujuan meningkatkan kekakuan karet kearah vertikal sehingga karet tidak menggelembung kesamping karena beban bangunan.

Para ahli mempekirakan umur pemakaian bantalan karet yang dibuat dengan sistem pengomponan karet yang benar, bisa lebih dari satu abad. Selain itu karena bantalan ini terpasang lepas diantara pondasi bangunan dan bangunan atas, sudah tersedia pula cara mengganti (bila benar-benar diperlukan) bantalan yang rusak dengan yang baru.

Macam-macam isolasi dasar dengan isolator bantalan karet yang banyak digunakan adalah seperti dibawah ini.

a. *Laminated Natural Rubber Bearing (Lead Rubber Bearings - LRBs)*

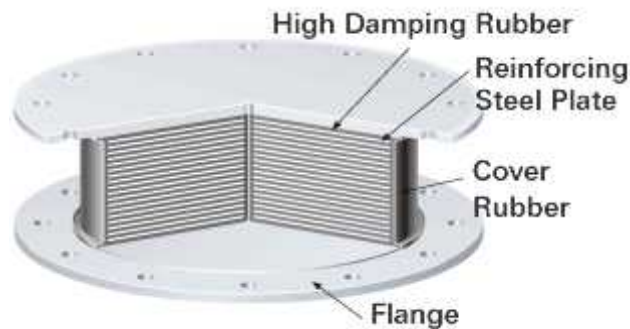
Timah hitam (*lead*) dipasang pada sumbu bantalan karet, dibagian atas dan bawah diberi lempengan pelat baja. Timah hitam digunakan untuk menyerap energi dari gempa dan untuk menahan beban angin, LRBs dapat dilihat pada Gambar 3.5.



Gambar 3.5 *Lead Rubber Bearing*
(Sumber : Bridgestone, 2015)

b. *High Damping Rubber Bearings – HDRs*

Pada dasarnya jenis alat isolasi dasar ini sama dengan LRBs hanya saja disini propertis dari karet telah dimodifikasi agar dapat memberi kemampuan redaman yang lebih tinggi dan mampu menyerap energi gempa bumi, HDRs dapat dilihat pada Gambar 3.6.



Gambar 3.6 High Damping Rubber Bearing
(Sumber : Bridgestone, 2015)

2. Non-Rubber Type Seismic Isolation

Non-rubber type seismic isolation yang paling banyak dikenal antara lain *lead extrusion dumper*, *ball roller bearing* dan *sliding bearing*, yang paling banyak digunakan adalah *lead extrusion dumper*.

3.2.3 Perletakan Isolasi Dasar (*Base Isolation*)

Lokasi perletakan isolasi dasar yang dianjurkan adalah serendah mungkin agar dapat melindungi struktur sebanyak mungkin. Pertimbangan biaya dan praktis juga mempengaruhi pemilihan lokasi penempatan isolasi dasar. Pada bangunan pemilihan lokasi biasanya terletak pada lantai dasar (*ground level*) atau dibawah *basement* (Meyes, 1984).

Menurut Meyes (1984) ada empat macam perletakan isolasi dasar pada bangunan berdasarkan keuntungan dan kerugian seperti diuraikan berikut ini.

1. Isolasi dasar ditempatkan pada dasar kolom lantai pertama (*first story coloumns*).

Keuntungannya diuraikan sebagai berikut ini.

- a. Penambahan biaya struktur kecil,
- b. Dasar kolom bisa dihubungkan dengan diafragma, dan
- c. Mudah memasukkan sistem cadangan untuk beban vertikal.

Kerugiannya diuraikan sebagai berikut ini.

- a. Membutuhkan kantilever khusus.
2. Isolasi dasar ditempatkan pada puncak dari kolom *basement*.

Keuntungannya diuraikan sebagai berikut ini.

- a. Tidak memerlukan *sub-basement*,
- b. Penambahan biaya struktur yang kecil,
- c. Pada level isolasi dasar kolom dihubungkan dengan diafragma, dan
- d. Kolom juga berfungsi sebagai sistem cadangan untuk beban vertikal.

Kerugiannya diuraikan sebagai berikut ini.

- a. Membutuhkan ruang khusus dibawah lantai pertama, dan
 - b. Membutuhkan perhatian yang khusus untuk tangga dibawah lantai pertama.
3. Isolasi dasar ditempatkan pada tengah-tengah kolom *basement (mid-height of basement coloumns)*.

Keuntungannya diuraikan sebagai berikut ini.

- a. Tidak diperlukan *sub-basement*, dan
- b. Kolom *basement* tidak perlu sekaku seperti pada *base isolator* yang diletakan pada bagian atas atau bawah kolom.

Kerugiannya diuraikan sebagai berikut ini.

- a. Diperlukan perhatian khusus untuk *elevator* dan tangga akibat dari simpangan *mid-story*,
 - b. Tidak terdapat diafragma pada *level*, dan
 - c. Sulit untk memasang sistem cadangan untk beban vertikal.
4. Isolasi dasar ditempatkan pada *sub-basement*.

Keuntungannya diuraikan sebagai berikut ini.

- a. Dasar kolom dihubungkan dengan diafragma pada *level* isolasinya, dan
- b. Mudah untuk memasang sistem cadangan untuk beban vertikal.

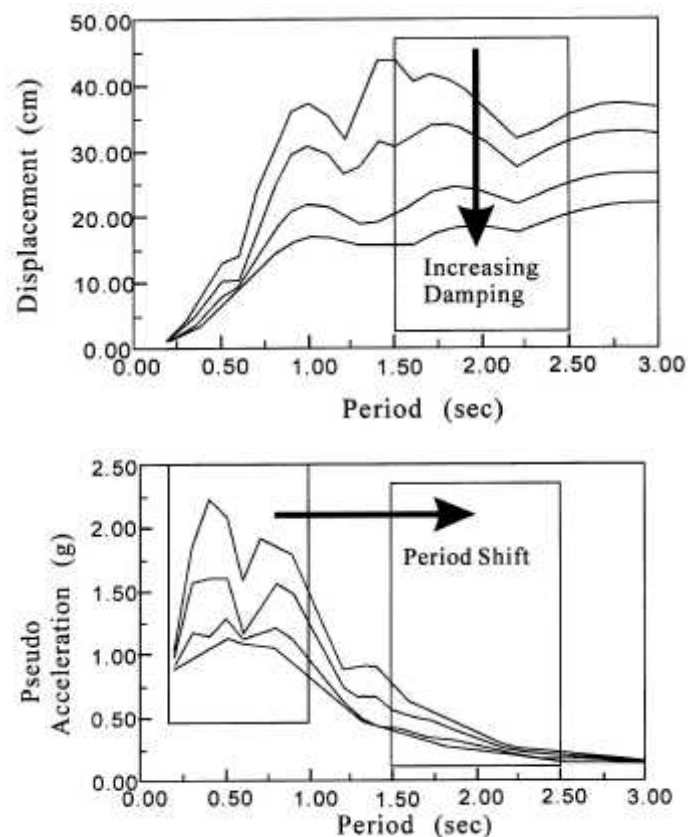
Kerugiannya diuraikan sebagai berikut ini.

- a. Diperlukan penambahan biaya untk *sub-basement*, kecuali *sub-besement* memang diperlukan, dan
- b. Membutuhkan dinding penahan tanah (*retaining wall*).

3.2.4 Prinsip sistem Isolasi Dasar (*Base Isolation*)

Sistem isolasi dasar sangat baik dipakai di daerah yang frekuensi getaran gempa yang tinggi dan pada kondisi tanah yang keras. Pada kondisi ini bentuk

spektrum respons percepatan cenderung meningkat secara tajam pada nilai-nilai periode getar T awal, setelah mencapai puncaknya kemudian cenderung menurun secara terus menerus sampai pada periode getar yang ditinjau. Pemasangan isolasi dasar sangat tepat pada kondisi ini karena isolasi dasar memperpanjang waktu periode getar T , sehingga pada kondisi ini spektrum respons cenderung menurun. Hal ini berlaku sebaliknya apabila sistem isolasi dasar dipasang pada kondisi gempa dengan frekuensi gempa rendah dan pada kondisi tanah lunak. Pada kondisi ini spektrum percepatan cenderung rendah pada nilai-nilai periode getar T awal. Kemudian akan meningkat secara tajam bersamaan dengan bertambahnya waktu periode getar T . Pemasangan isolasi dasar tidak baik pada kondisi ini karena pada saat isolasi dasar memperpanjang waktu periode getar T , akan jatuh pada puncak gempa ini. Untuk lebih jelasnya lihat pada Gambar 3.7.



Gambar 3.7 Efek dari Isolasi Dasar Terhadap Waktu Getar T pada saat Terjadi Gempa
(Sumber : Yang, 2003)

Pada gambar tersebut menunjukkan sistem-sistem tipe percepatan respons struktur dengan tipe puncak respons periode terjadi pada 0,5 detik. Pemasangan isolasi dasar sangat tepat pada kondisi ini karena periode getar T lebih panjang pada saat kondisi percepatan tanah mencapai periode diata 0,5 detik yang bersamaan dengan menurunnya puncak respons periode. Hal ini berlaku sebaliknya apabila waktu puncak repons lebih panjang dimana gempa berlangsung pada frekuensi rendah dan tanah lunak. Adanya isolasi dasar tidak baik digunakan pada kondisi tanah tersebut, karena isolasi dasar memperpanjang waktu getar T sehingga terjadi pada puncak respons maksimum tersebut.

Jenis struktur sangat mempengaruhi penggunaan isolasi dasar. Jenis struktur ini terdiri dari struktur beton bertulang dan struktur baja. Kedua struktur tersebut dibedakan menurut angka kekakuan dari masing-masing struktur. Struktur beton bertulang cenderung mempunyai sifat kaku sehingga kekakuan yang terjadi sangat tinggi. Kekakuan tersebut sangat berpengaruh terhadap frekuensi getar struktur (ω), sehingga dengan kekakuan tinggi maka ω besar, dan itu membuat periode getar struktur beton kecil. Sebaliknya terjadi pada struktur baja dengan periode getar struktur yang lebih besar dari beton.

3.2.5 Manfaat sistem Isolasi Dasar (*Base Isolation*)

Manfaat yang diperoleh dengan pemakain isolasi dasar adalah sebagai berikut.

1. Kemampuan menahan beban bangunan yang diisolasi dan meneruskan defleksi horizontal relatif terhadap bumi/tanah (BPPP, 1997).
2. Mempunyai tenaga pemulihan untuk mengembalikan bangunan pada posisi semula relatif terhadap bumi/tanah (BPPP, 1997).
3. Kemampuan meredam untuk mengurangi akselerasi defleksi horizontal reatif terhadap tanah, sehingga dapat mencegah struktur rusak ataupun runtuh jika terkena gempa (BPPP, 1997).
4. Penggunaan sangat fleksibel karena dapat digunakan pada banguna baru maupun bangunan lama (*retrofitting*) (Lin, 1997).

5. Umur kerja isolatornya relatif panjang yakni berkisar 70-100 tahun sehingga bisa lebih lama dari umur bangunan itu sendiri (Lin, 1997).

3.2.6 Kriteria desain isolasi dasar (*Base Isolation*)

Mendesain untuk isolasi dasar harus memastikan bahwa isolator dapat menahan beban gravitasi maksimum dari struktur tersebut selama masa layan bangunan, dan isolator dapat memberikan fungsi ganda berupa pergeseran periode dan kehilangan energi ke struktur terisoasi selama terdapat gempa. Berdasarkan tujuan desain sebelumnya, langkah-langkah desain dijelaskan sebagai berikut (Mayes dan Naeim, 2001).

1. Menentukan ukuran dan lokasi isolasi dasar berdasarkan beban gravitasi maksimum.
2. Menghitung dimensi isolasi dasar yang menghasilkan pergeseran periode yang dengan tujuan mengurangi gaya gempa.
3. Mementukan nilai rasio redaman isolator sedemikian rupa sehingga simpangan struktur dapat dikontrol sesuai batasan nilai desain beban angin
4. Memeriksa kinerja isolator akibat beban gravitasi, angin, panas, gempa dan kondisi beban lainnya yang dapat terjadi.

Unutk mengimplentasikan seluruh prosedur pada isolator seimik, hanya sistem isolasi dasar dengan bahan *Lead Rubbers Bearing* dan *High Damping Rubber* yang di jelas kan pada tuagas akhir ini.

3.2.7 Desain *Lead Rubber Bearing* (LRBs)

Lead Rubber Bearings (LRBs) biasanya terbuat dari lapisan berulang pelat baja dan karet alam dengan lubang pusat dimana inti utama dipasang rapat. Pada saat gaya geser lateral beralngsung maka hasil tingkat tegangan geser rendah, sekitar 8 hingga 10 MPa pada suhu normal (20 ° C), serta berperilaku deformasi histeresis yang cukup stabil selama beberapa siklus. Salah satu fitur dari inti utama adalah bahwa ia dapat menarik kembali pada suhu normal dan tidak akan mengalami masalah kegagalan kelelahan di bawah beban siklik. Kekakuan yang cukup selalu dipastikan oleh LRB untuk struktur di bawah beban layanan. Di bagian ini, prosedur desain untuk LRBs diuraikan.

1. Tahap desain LRBs Bearings.

Berikut ini beberapa parameter yang digunakan dalam desain perletakan isolasi dasar. Prosedur desain pada LRBs dijelaskan sebagai berikut:

- a. Menentukan kondisi tanah untuk struktur yang terisolasi.
- b. Memilih desain regangan geser γ_{max} dan rasio redaman efektif ξ_{eff} untuk bantalan isolasi, dengan target desain periode T_D untuk struktur yang terisolasi. Regangan geser γ_{max} dan rasio redaman efektif ξ_{eff} dapat diperoleh dari penyedia material.
- c. Menggunakan rumus kode, analisis statis atau dinamis untuk menentukan kekakuan horisontal efektif K_{eff} dan simpangan maksimum D_D pada bantalan isolasi.
- d. Memilih properti material, termasuk modulus elastisitas E dan modulus geser G , dari laporan uji laboratorium.
- e. Menghitung total tinggi karet t_r dalam bantalan sesuai dengan desain simpangan dan desain regangan geser γ_{max} :

$$t_r = \frac{D_D}{\gamma_{max}} \quad (3.1)$$

- f. Desain pusat inti pada isolasi (*Lead Core*): Menentukan luas penampang (A_p) dan diameter (d_p) pada pusat inti berdasarkan nilai leleh jangka pendek dan Q_d dan tegangan leleh f_{py} :

$$A_p = \frac{Q_d}{f_{py}} \quad (3.2)$$

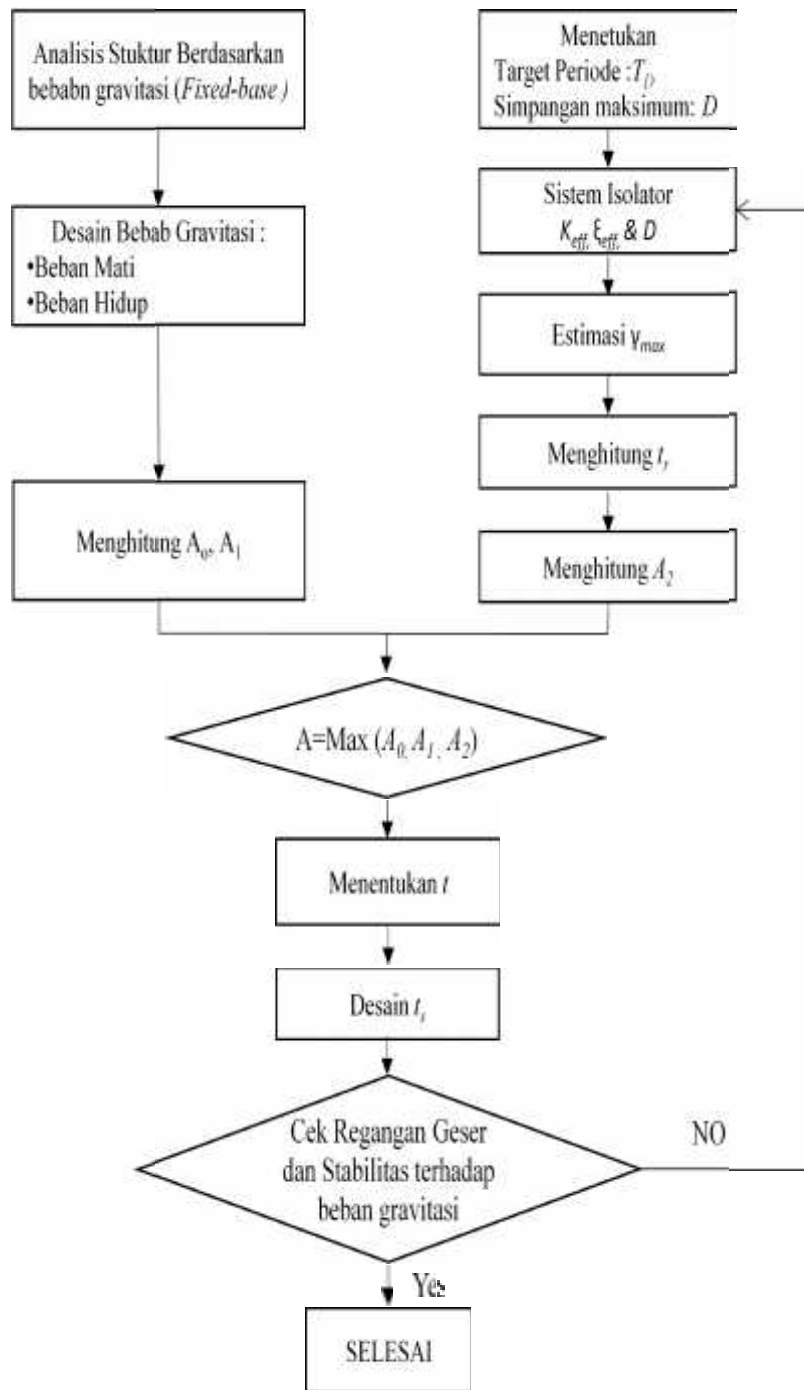
dengan:

f_{yp} = Tegangan leleh dari *lead plug* dalam geser = 1500 psi = 10 MPa
(Mayes dan Naeim, 2000),

Q_d = Kekuatan leleh dari *lead plug* = $W_D/(4D)$,

W_d = Energi yang hilang per siklus = $2 K_{eff} D^2 \xi_{eff}$, dan

D = Desain perpidahan bearing.



Gambar 3.8 *Flow chart* Desain LRBs
(Sumber : Yeong-Bin, 2003)

g. Menghitung luas efektif dan ketebalan masing-masing lapisan karet

1) Pilih faktor bentuk S dengan kondisi tidak goyang:

$$\frac{K_v}{K_h} = \frac{\frac{E_c \cdot A}{t_r}}{\frac{G \cdot A}{t_r}} = \frac{E_c}{G} = \frac{E \cdot (1 + 2kS^2)}{G} \geq 400 \quad \text{dengan } S > 10 \quad (3.3)$$

dengan:

K_v = Kekakuan vertikal bantalan, K_h = Kekakuan horizontal bantalan,

G = Modulus geser, di antara 0.4 sampai 1.0 MPa

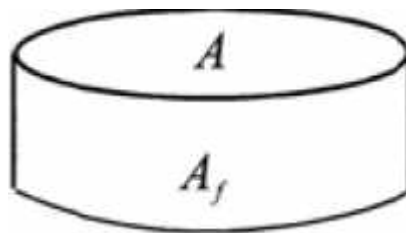
E = Modulus elastisitas, di antara 1.5 sampai 5.0 MPa

E_c = Modulus tekan dari komposit baja-karet, $E_c = E(1 + 2kS^2)$

A = luasan bantalan, t_r = Tinggi total lapisan karet, k = Faktor modifikasi, di antara 1 sampai 0.5, S = Faktor bentuk = A/A_f (Kelly, 1993), dan A_f = Luas selimut bantalan.

2) Menentukan luas penampang efektif (A_o) pada bantalan berdasarkan tegangan geser izin untuk beban vertikal P_{DL+LL} :

$$\tau_c = \frac{P_{DL+LL}}{A_o} \leq 80 \text{ kg / cm}^2 = 7.84 \text{ MPa} \quad (3.4)$$

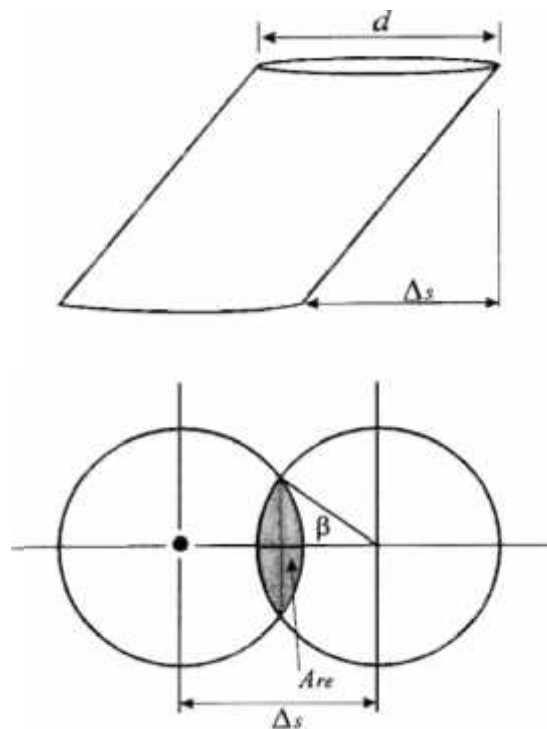


Gambar 3.9 Selimut Bantalan
(Sumber : Yeong-Bin, 2003)

Tabel 3.1 Hubungan Kekerasan Karet dengan Konstanta Material

Rubber Hardness IRHD ± 2	Modulus Elastisitas E (N/cm ²)	Modulus Geser G (N/cm ²)	Faktor Modifikasi k
30	91	30	0.93
35	118	37	0.89
40	150	45	0.85
45	180	54	0.8
50	220	64	0.73
55	325	81	0.64
60	445	106	0.57
65	585	137	0.54
70	735	173	0.53
75	940	222	0.52

(Sumber : Bridgestone, 2015)

**Gambar 3.10 Luas Tereduksi Penampang Bantalan**

(Sumber : Yeong-Bin, 2003)

- 3) Menentukan luas penampang efektif (A_l) pada bantalan dari regangan geser karena beban vertikal P_{DL+LL} :

$$x_c = 6 S \frac{P_{DL+LL}}{E_c \cdot A_1} \leq \frac{V_b}{3} \quad (3.5)$$

Dimana b adalah perpanjangan karet saat jeda. Batas $b/3$ dipilih sesuai dengan panduan spesifikasi *American Association of State Highway and Transportasi Officials* (1983).

4) Menentukan kekakuan elastis (K_r) dari bantalan

$$K_d = K_r \left(1 + 12 \frac{A_p}{A_0} \right) \quad (3.6)$$

Dimana K_d = kekakuan setelah leleh dari LRBs arah horizontal (Naeim dan Kelly, 1999):

$$K_d = K_{eff} - \frac{Q_d}{D} \quad (3.7)$$

5) Menentukan luas penampang minimum (A_{sf}) untuk kegagalan geser bantalan:

$$A_{sf} = \frac{K_r \cdot t_r}{G} \quad (3.8)$$

Luas penampang minimum A_{sf} digunakan untuk menentukan dimensi bantalan kemudian menghitung luas penampang efektif A_2 sebagai luas tereduksi. Lihat Gambar 3.10.

$$A_{re} = L \cdot (B - \Delta_s) \quad \text{untuk bantalan persegi} \quad (3.9)$$

$$A_{re} = \frac{d^2}{4} (S - \sin S) \quad \text{untuk bantalan lingkaran} \quad (3.10)$$

$$S = 2 \cos^{-1} \left(\frac{\Delta_s}{d} \right) \quad (3.11)$$

dengan:

L, B = Dimensi rencana dari bantalan tegak lurus dan sejajar dengan simpangan, dan

s = Perpindahan horizontal.

- 6) Menentukan luas penampang (A) yang diambil dari nilai maksimum A_0 , A_1 dan A_2 .
- 7) Memilih dimensi lapisan karet berdasarkan desain luas penampang (A).
- h. Menghitung tebal lapisan (t) dan jumlah lapisan (N) karet:

- 1) Gunakan faktor S dan dimensi lapisan karet untuk menentukan ketebalan setiap lapis karet (t):

$$S = \frac{L \cdot B}{2(L + B) \cdot t} \quad \text{untuk bantalan persegi} \quad (3.12)$$

$$S = \frac{f d^2 / 4}{f dt} = \frac{d}{4t} \quad \text{untuk bantalan lingkaran} \quad (3.13)$$

dengan:

L, B = Dimensi rencana dari bantalan persegi,

d = Diameter bantalan lingkaran, dan

t = Tebal setiap lapis karret.

- 2) Menentukan jumlah lapis karet (N):

$$t_r = N \times t \rightarrow N = \frac{t_r}{t} \quad (3.14)$$

- i. Menghitung tebal pelat baja (t_s):

$$t_s \geq \frac{2(t_i + t_{i+1}) \cdot P_{DL+LL}}{A_{re} \cdot F_s} \geq 2 \text{ mm} \quad (3.15)$$

dengan:

t_i, t_{i+1} = Ketebalan lapisan karet di bagian atas dan bawah pelat baja,

F_s = $0.6 F_y$,

F_y = Tegangan leleh pelat baja (=274.4 MPa), dan

A_{re} = Luas penampang bantalan tereduksi akibat simpangan horizontal.

- j. Semua parameter yang telah ditentukan untuk bantalan diperiksa kembali terhadap regangan geser dan kondisi stabilitas sesuai perhitungan diberikan selanjutnya. Jika persyaratan ini tidak terpenuhi, ulangi desain.

2. Cek regangan geser dan stabilitas untuk LRBs

- a. Lapisan karet yang digunakan harus memenuhi persyaratan regangan geser akibat beban vertikal P_{DL+LL} :

$$\chi_c = 6S \cdot v_c = 6S \frac{P_{DL+LL}}{E_c \cdot A} \leq \frac{v_b}{3} \quad (3.16)$$

Dimana v_c adalah:

$$v_c = \frac{\Delta_c}{t_r} = \frac{P_{DL+LL}}{E_c \cdot A} \quad (3.17)$$

dengan:

Δ_c = Perpindahan kompresi bantalan, dan

t_r = Perpanjangan karet saat waktu jeda.

- b. Kondisi stabilitas: Untuk mencegah bantalan menjadi tidak stabil, tegangan tekan rata-rata dari bantalan harus kurang dari toleransi yang telah ditetapkan::

$$\dagger_c = \frac{P}{A} < \dagger_{cr} = \frac{G \cdot S \cdot L}{2.5 \cdot t_r} \quad (3.18)$$

Dimana L adalah dimensi rencana terkecil dari bantalan persegi panjang atau diameter d dari bantalan lingkaran. Perlu dicatat bahwa formula berikut digunakan oleh Naeim dan Kelly (1999).

3.2.8 Desain *High Damping Bearing* (HDRs)

Bahan isolasi lapisan karet yang merupakan bantalan dari *High Damping Rubber Bearing* (HDR) biasanya terbuat dari bahan yang sangat non-linear dalam ketentuan tegangan geser. Redaman efektif berada pada kisaran 0,10-0,2 kondisi kritis dengan mudah diredam oleh HDRs, bahan karet di tambahkan senyawa kimia khusus yang dapat mengubah sifat material dari karet. Pernyataan sebelumnya mengartikan agar kekakuan dan redaman HDRs harus cukup besar untuk menahan beban angin dan gempa bumi dengan frekuensi rendah. Pada penerapannya, kekakuan dan redaman properti dari HDR masih tetap stabil terhadap lebih dari satu desain beban. Hal tersebut serupa dengan apa yang telah dilakukan dalam beberapa studi sebelumnya bahwa HDR diasumsikan elastis linear dan isotropik.

1. Tahap desain HDRs Bearings.

Tahapan desain untuk HDRs hampir sama dengan tahapan desain LRBs, melainkan pada LRBs terdapat beberapa penambahan untuk mendesain inti utamanya (*lead core*) sedangkan HDR tidak ada penambahan. Prosedur desain pada HDRs dijelaskan sebagai berikut:

- a. Menentukan kondisi tanah untuk struktur yang terisolasi.
- b. Memilih desain regangan geser γ_{max} dan rasio redaman efektif η_{eff} untuk bantalan isolasi, dengan target desain periode T_D untuk struktur yang terisolasi. Regangan geser γ_{max} dan rasio redaman efektif η_{eff} dapat diperoleh dari penyedia material.
- c. Menggunakan rumus kode, analisis statis atau dinamis untuk menentukan kekakuan horisontal efektif K_{eff} dan simpangan maksimum D_D pada bantalan isolasi.
- d. Memilih properti material, termasuk modulus elastisitas E dan modulus geser G , dari laporan uji laboratorium.
- e. Menghitung total tinggi karet t_r dalam bantalan sesuai dengan desain simpangan dan desain regangan geser γ_{max} :

$$t_r = \frac{D_D}{\gamma_{max}} \quad (3.19)$$

- f. Menghitung luas efektif dan ketebalan masing-masing lapisan karet
 - 1) Pilih faktor bentuk S dengan kondisi tidak goyang:

$$\frac{K_v}{K_h} = \frac{\frac{E_c \cdot A}{t_r}}{\frac{G \cdot A}{t_r}} = \frac{E_c}{G} = \frac{E \cdot (1 + 2kS^2)}{G} \geq 400 \text{ dengan } S > 10 \quad (3.20)$$

- 2) Menentukan luas penampang efektif (A_0) pada bantalan berdasarkan tegangan geser izin untuk beban vertikal P_{DL+LL} :

$$\tau_c = \frac{P_{DL+LL}}{A_0} \leq 80 \text{ kg / cm}^2 = 7.84 \text{ MPa} \quad (3.21)$$

- 3) Menentukan luas penampang efektif (A_I) pada bantalan dari regangan geser karena beban vertikal P_{DL+LL} :

$$x_c = 6 S \frac{P_{DL+LL}}{E_c \cdot A_1} \leq \frac{V_b}{3} \quad (3.22)$$

4) Menentukan luas penampang minimum (A_{sf}) untuk kegagalan geser bantalan:

$$A_{sf} = \frac{K_{eff} \cdot t_r}{G} \quad (3.23)$$

Luas penampang minimum A_{sf} digunakan untuk menentukan dimensi bantalan kemudian menghitung luas penampang efektif A_2 sebagai luas tereduksi. Lihat Gambar 3.10.

$$A_{re} = L \cdot (B - \Delta_s) \quad \text{untuk bantalan persegi} \quad (3.24)$$

$$A_{re} = \frac{d^2}{4} (S - \sin S) \quad \text{untuk bantalan lingkaran} \quad (3.25)$$

$$S = 2 \cos^{-1} \left(\frac{\Delta_s}{d} \right) \quad (3.26)$$

5) Menentukan luas penampang (A) yang diambil dari nilai maksimum A_0 , A_1 dan A_2 .

6) Memilih dimensi lapisan karet berdasarkan desain luas penampang (A).

g. Menghitung tebal lapisan (t) dan jumlah lapisan (N) karet:

1) Gunakan faktor S dan dimensi lapisan karet untuk menentukan ketebalan setiap lapis karet (t):

$$S = \frac{L \cdot B}{2(L + B) \cdot t} \quad \text{untuk bantalan persegi} \quad (3.27)$$

$$S = \frac{f d^2 / 4}{f d t} = \frac{d}{4 t} \quad \text{untuk bantalan lingkaran} \quad (3.28)$$

dengan:

L, B = Dimensi rencana dari bantalan persegi,

d = Diameter bantalan lingkaran, dan

t = Tebal setiap lapis karret.

2) Menentukan jumlah lapis karet (N):

$$t_r = N \times t \rightarrow N = \frac{t_r}{t} \quad (3.29)$$

h. Menghitung tebal pelat baja (t_s):

$$t_s \geq \frac{2(t_i + t_{i+1}) \cdot P_{DL+LL}}{A_{re} \cdot F_s} \geq 2 \text{ mm} \quad (3.30)$$

i. Semua parameter yang telah ditentukan untuk bantalan diperiksa kembali terhadap regangan geser dan kondisi stabilitas sesuai perhitungan diberikan selanjutnya. Jika persyaratan ini tidak terpenuhi, ulangi desain.

2. Cek regangan geser dan stabilitas untuk HDRs

a. Lapisan karet yang digunakan harus memenuhi persyaratan regangan geser akibat beban vertikal P_{DL+LL} :

$$\nu_c = 6S \cdot \nu_c = 6S \frac{P_{DL+LL}}{E_c \cdot A} \leq \frac{\nu_b}{3} \quad (3.31)$$

Dimana ν_c adalah:

$$\nu_c = \frac{\Delta_c}{t_r} = \frac{P_{DL+LL}}{E_c \cdot A} \quad (3.32)$$

dengan:

Δ_c = Perpindahan kompresi bantalan, dan

ν_c = Perpanjangan karet saat waktu jeda.

b. Kondisi stabilitas: Untuk mencegah bantalan menjadi tidak stabil, tegangan tekan rata-rata dari bantalan harus kurang dari toleransi yang telah ditetapkan::

$$\dagger_c = \frac{P}{A} < \dagger_{cr} = \frac{G \cdot S \cdot L}{2.5 \cdot t_r} \quad (3.33)$$

Dimana L adalah dimensi rencana terkecil dari bantalan persegi panjang atau diameter d dari bantalan lingkaran. Perlu dicatat bahwa formula berikut digunakan oleh Naeim dan Kelly (1999).

3.3 Massa Struktur

Menurut Widodo (2001) terdapat dua pendekatan pokok yang umumnya dilakukan untuk mendeskripsikan massa struktur. Pendekatan pertama adalah menurut prinsip *Shear Building* dimana massa dianggap menggumpal pada tempat – tempat tertentu (*lumped mass*) sehingga massa hanya akan bergerak secara horizontal. Karena percepatan hanya terjadi pada struktur yang mempunyai massa maka matriks massa merupakan matriks diagonal. Pendekatan yang kedua adalah menurut prinsip *Consistent Mass Matrix* yang mana elemen struktur akan berdeformasi menurut bentuk fungsi (*shape function*) tertentu. Apabila tiga derajat kebebasan (horizontal, vertikal, dan rotasi) diperhitungkan pada setiap node maka standar *consistent mass matrix* dapat diperoleh dengan *off-diagonal* matriks tidak sama dengan nol sebagaimana terjadi pada prinsip *lumped mass*. Untuk menghitung massa struktur baik *single lumped mass* maupun *multiple lumped mass* dapat dihitung dengan Persamaan 3.34.

$$m = \frac{W}{g} \quad (3.34)$$

dengan:

m = Massa tergumpal (kg.dt²/cm),

W = Berat struktur (kg), dan

g = Percepatan gravitasi bumi = 980 (cm/dt²).

3.4 Kekakuan Struktur

3.4.1 Kekakuan Isolasi Dasar (*Base Isolation*)

Kekakuan merupakan parameter yang penting dalam penyelesaian persoalan dinamik. Kekakuan selalu akan dihubungkan dengan massa yang mana keduanya akan memberikan pengaruh tersendiri dalam penyelesaian dinamika struktur. Nilai kekakuan awal *base isolation* dapat dihitung dengan Persamaan 3.35.

$$K_0 = \frac{G \times A}{h} \quad (3.35)$$

dengan:

K_0 = Kekakuan isolasi dasar (kg/cm),

T = Periode target (det),

W = Berat struktur (kg), dan

g = Percepatan gravitasi (cm/det²).

3.4.2 Kekakuan Struktur Muto (1975)

Menurut Widodo (2001) pada prinsip semakin kaku balok maka semakin besar kemampuannya dalam mengekang rotasi ujung kolom, sehingga akan menambah kekakuan kolom. Apabila kekakuan balok akan di perhitungkan, artinya balok dan plat lantai tidak kaku sempurna, maka kekakuan kolom berdasar rumus Muto (1975) ataupun Aydin dan Gonen (1994) dapat dipakai. Perhitungan kekakuan balok akan lebih teliti apabila pengaruh plat lantai ikut diperhatikan sehingga diperhitungkan sebagai balok T. pada prinsip Muto, kekakuan joint juga dapat diperhitungkan sehingga hitungan kekakuan baik kekakuan balok maupun kekakuan kolom menjadi teliti.

Muto (1975) memberikan alternatif tata cara menghitung kekakuan kolom dengan memperhitungkan kekakuan balok. Hal ini berarti bahwa joint-joint dimungkinkan untuk berotasi.

Maka kekakuan kolom Muto (1975) dapat diperoleh dengan Persamaan 3.36.

$$K_m = C_m \times K_f \quad (3.36)$$

dengan:

K_m = Kekakuan Muto (1975),

C_m = Suatu koefisien, dan

K_f = Kekakuan kolom jepit-jepit.

3.5 Redaman Struktur

Menurut Widodo (2001) redaman merupakan peristiwa penyerapan energi (*energy dissipation*) oleh struktur akibat adanya berbagai macam sebab,

diantaranya penyerapan energi oleh adanya gerakan antar molekul didalam material, penyerapan energi oleh gesekan alat penyambung maupun sistem dukungan, penyerapan energi akibat gesekan dengan udara dan pada respons inelastis penyerapan energi juga terjadi akibat adanya rotasi sendi plastis. Widodo (2001) menjelaskan bahwa untuk memperoleh nilai redaman ada tiga cara yaitu redaman proporsional dengan massa (*Mass Proportional Damping*), redaman proporsional dengan kekakuan (*Stiffness Proportional Damping*), dan redaman proporsional terhadap massa dan kekakuan (*Mass And Stiffness Proportional Damping*)

3.5.1 Redaman proporsional terhadap massa (*Mass Proportional Damping*)

$$[C] = r \cdot [M] \quad (3.37)$$

$$r = 2 \cdot \zeta_j \cdot \check{S}_j \quad (3.38)$$

Dalam hal ini nilai ζ_j dan \check{S}_j adalah nilai damping ratio dan kecepatan sudut pada mode ke - j yang dijadikan nilai referensi.

3.5.2 Redaman proporsional terhadap kekakuan (*Stiffness Proportional Damping*)

$$[C] = s \cdot [K] \quad (3.39)$$

$$s = \frac{2 \cdot \check{S}_j}{\check{S}_j} \quad (3.40)$$

Dalam hal ini nilai ζ_j dan \check{S}_j adalah nilai damping ratio dan kecepatan sudut pada mode ke - j yang dijadikan nilai referensi.

3.5.3 Redaman proporsional terhadap massa dan kekakuan (*Mass and Stiffness Proportional Damping*)

$$[C] = r \cdot [M] + s \cdot [K] \quad (3.41)$$

$$s = \frac{2 \cdot (\zeta_j \cdot \check{S}_j - \zeta_i \cdot \check{S}_i)}{\check{S}_j^2 - \check{S}_i^2} \quad (3.42)$$

$$r = 2 \cdot (\zeta_j \cdot \check{S}_j - s \cdot \check{S}_i) \quad (3.43)$$

Dalam hal ini nilai ζ_j dan \tilde{S}_j adalah nilai damping ratio dan kecepatan sudut pada mode ke $-j$ yang dijadikan nilai referensi. Setelah didapatkan nilai ζ_j dan \tilde{S}_j maka kemudian dapat di substitusikan ke Persamaan 3.41 untuk mendapat nilai redaman.

3.6 Persamaan Diferensial Gerakan Struktur Isolasi Dasar

3.6.1 Persamaan Diferensial Derajat Kebebasan Banyak (MDOF)

Penyelesaian persamaan struktur tidak selalu bisa dilakukan dengan derajat kebebasan tunggal, tetapi pada kenyataannya struktur bangunan gedung yang mempunyai derajat kebebasan banyak (“*multi degree of freedom, MDOF*”).

Penyelesaian dari persamaan differensial gerakan struktur gedung dengan derajat kebebasan banyak (MDOF) dapat ditulis dalam bentuk Persamaan 3.44.

$$[M][\ddot{Y}] + [C][\dot{Y}] + [K][Y] = [0] \quad (3.44)$$

Persamaan 3.42 diatas dapat disusun lagi dalam bentuk matriks.

$$\text{Matriks massa} \quad [M] = \begin{bmatrix} m_1 & 0 & 0 \\ 0 & m_2 & 0 \\ 0 & 0 & m_3 \end{bmatrix}$$

$$\text{Matriks redaman} \quad [C] = \begin{bmatrix} c_1 + c_2 & -c_2 & 0 \\ -c_2 & c_2 + c_3 & -c_3 \\ 0 & -c_3 & c_3 \end{bmatrix}$$

$$\text{Matriks kekakuan} \quad [K] = \begin{bmatrix} k_1 + k_2 & -k_2 & 0 \\ -k_2 & k_2 + k_3 & -k_3 \\ 0 & -k_3 & k_3 \end{bmatrix}$$

$$\text{Vektor simpangan} \quad \{y\} = \begin{Bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \end{Bmatrix}$$

$$\text{Vektor kecepatan} \quad \{\dot{y}\} = \begin{Bmatrix} \dot{y}_1 \\ \dot{y}_2 \\ \dot{y}_3 \end{Bmatrix}$$

$$\text{Vektor percepatan} \quad \{\ddot{y}\} = \begin{Bmatrix} \ddot{y}_1 \\ \ddot{y}_2 \\ \ddot{y}_3 \end{Bmatrix}$$

1. Nilai Karakteristik (*Eigen Problem*)

Kemudian setelah persamaan-persamaan differensial diatas telah dibuat maka selanjutnya adalah menghitung nilai karakteristik (*Eigen Problem*) diantaranya frekuensi sudut (ω), periode getar (T), frekuensi alam (f) dan mode shapes (ϕ).

Seperti telah dijelaskan sebelumnya bahwa didalam menghitung frekuensi sudut untuk struktur gerakan bangunan gedung dengan derajat kebebasan banyak (MDOF), diambil suatu anggapan bahwa struktur tersebut tidak mempunyai nilai redaman atau matriks $[C] = 0$. Oleh karena nilai matriks redaman $[C] = 0$, maka matriks persamaan differensial gerakan bangunan gedung pada Persamaan 3.44 dapat ditulis menjadi Persamaan 3.45.

$$\begin{bmatrix} m_1 & 0 & 0 \\ 0 & m_2 & 0 \\ 0 & 0 & m_3 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{y}_1 \\ \ddot{y}_2 \\ \ddot{y}_3 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} k_1 + k_2 & -k_2 & 0 \\ -k_2 & k_2 + k_3 & -k_3 \\ 0 & -k_3 & k_3 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (3.45)$$

Persamaan 3.45 diatas dapat ditulis dalam bentuk matriks yang lebih kompak seperti pada Persamaan 3.46.

$$[M][\ddot{Y}] + [K][Y] = [0] \quad (3.46)$$

Karena Persamaan 3.46 adalah persamaan differensial yang sejenis, maka penyelesaian persamaan tersebut diharapkan dalam fungsi harmonik menurut bentuk persamaan berikut ini.

$$y = \{w\}_i \sin(\check{S}t) \quad (3.47)$$

$$\dot{y} = \check{S}\{w\}_i \cos(\check{S}t) \quad (3.48)$$

$$\ddot{y} = -\check{S}^2 \{w\}_i \sin(\check{S}t) \quad (3.49)$$

Yang mana (ϕ_i) adalah suatu ordinat massa pada mode ke $-i$. Kemudian substitusikan Persamaan 3.47 s/d Persamaan 3.49 ke Persamaan 3.48 maka akan diperoleh persamaan berikut ini.

$$-\check{S}^2 [M] \{w\}_i \sin(\check{S}t) + [K] \{w\}_i \sin(\check{S}t) = 0 \quad (3.50)$$

Selanjutnya Persamaan 3.50 dapat disederhanakan menjadi:

$$\{[K] - \check{S}^2 [M]\} \{w\}_i = 0 \quad (3.51)$$

Persamaan 3.51 diatas adalah suatu persamaan yang sangat penting dan pada umumnya disebut sebagai persamaan *Eigen Problem* yang harus dicari penyelesaiannya. Salah satu cara yang dapat digunakan untuk menyelesaikan persamaan tersebut adalah dengan memakai dalil *Cramer*. Dalil tersebut menyatakan bahwa persamaan yang homogen akan ada nilainya apabila determinan dari matriks yang merupakan koefisien dari vektor (ϕ_i) adalah nol, sehingga menjadi Persamaan 3.52.

$$\{[K] - \check{S}^2 [M]\} = 0 \quad (3.52)$$

Penyelesaian persamaan *Eigen Problem* dapat dicari dengan berbagai metode yang ada, misalnya dengan *Polynomial Method* yang nantinya akan menghasilkan nilai – nilai *Eigenvektor*. Dengan meninjau kembali Persamaan 3.45 maka dapat disusun Persamaan *Eigen Problem* sebagai berikut.

$$\begin{bmatrix} (k_1 + k_2) - \check{S}^2 m_1 & -k_2 & 0 \\ -k_2 & (k_2 + k_3) - \check{S}^2 m_2 & -k_3 \\ 0 & -k_3 & (k_3) - \check{S}^2 m_3 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} w_1 \\ w_2 \\ w_3 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (3.53)$$

dengan:

w = Mode shapes struktur bangunan, dan

= Frekuensi sudut (rad/dt).

Apabila diambil suatu nilai konstanta dimana $k_1 = k_2 = k_3 = k$ dan $m_1 = m_2 = m_3 = m$, maka Persamaan 3.53 dapat ditulis menjadi persamaan berikut ini.

$$\begin{bmatrix} 2k - \check{S}^2 m & -k & 0 \\ -k & 2k - \check{S}^2 m & -k \\ 0 & -k & k - \check{S}^2 m \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} w_1 \\ w_2 \\ w_3 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (3.54)$$

Apabila Persamaan 3.54 dibagi dengan nilai k , maka diperoleh suatu persamaan sebagai berikut ini.

$$\begin{bmatrix} 2 - \frac{\check{S}^2}{k/m} & -1 & 0 \\ -1 & 2 - \frac{\check{S}^2}{k/m} & -1 \\ 0 & -1 & 1 - \frac{\check{S}^2}{k/m} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} w_1 \\ w_2 \\ w_3 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (3.55)$$

Jika diambil suatu notasi $\check{\gamma} = \frac{\check{S}^2}{k/m}$ maka Persamaan 3.55 dapat ditulis

kembali menjadi persamaan berikut ini.

$$\begin{bmatrix} 2 - \check{\gamma} & -1 & 0 \\ -1 & 2 - \check{\gamma} & -1 \\ 0 & -1 & 1 - \check{\gamma} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} w_1 \\ w_2 \\ w_3 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (3.56)$$

Persamaan 3.56 dapat disederhanakan menjadi persamaan aljabar biasa,

$$(2 - \check{\gamma})w_1 - w_2 = 0 \quad (3.57)$$

$$-w_1 + (2 - \check{\gamma})w_2 - w_3 = 0 \quad (3.58)$$

$$-w_2 + (1 - \check{\gamma})w_3 = 0 \quad (3.59)$$

Untuk mencari akar – akar tersebut dapat diperoleh dengan menggunakan rumus *Fadeev Laverier Method*. Setelah nilai-nilai $\check{\gamma}_i$ (dimana $i = 1, 2, 3$) diperoleh maka nilai frekuensi sudut $\check{\omega}_i$ (dimana $i = 1, 2, 3$) dapat dicari menggunakan Persamaan 3.60.

$$\tilde{S}_i = \sqrt{\frac{k_i}{m}} \quad (3.60)$$

dengan:

i = Indeks 1, 2, 3,.....,n.

Setelah nilai \tilde{S}_i diperoleh, maka disubstitusikan kedalam persamaan mode shapes (ϕ_1 , ϕ_2 , dan ϕ_3) yaitu pada Persamaan 3.57 s/d Persamaan 3.59 yang kemudian nilai – nilai mode shapes tersebut digambar untuk mengetahui pola atau ragam goyangan.

Langkah selanjutnya adalah mencari periode getar (T) struktur tanah tiap – tiap mode dengan menggunakan Persamaan 3.61.

$$T_i = \frac{2f}{\tilde{S}_i} \quad (3.61)$$

dengan:

i = Mode ke 1, 2, 3,....., n, dan

f = Frekuensi sudut (rad/dt).

Setelah nilai – nilai mode shapes () didapatkan, untuk langkah selanjutnya adalah menghitung nilai partisipasi setiap mode atau *mode participation factor* ().

$$\Gamma_j = \frac{P_j}{M_j} \quad (3.62)$$

Dimana nilai:

$$P_j = \{w\}_j^T [M] \quad (3.63)$$

$$M_j = \{w\}_j^T [M] \{w\}_j \quad (3.64)$$

3.7 Integrasi Numerik Persamaan Diferensial Dependen (*Coupled*)

Widodo (2001) menyatakan untuk menghasilkan model non liner inelastik maka perlu dilakukan integrasi numerik dengan persamaan differensial koupling. Persamaan differensial koupling (*coupled differential equations*) adalah

sekelompok persamaan differensial yang saling tergantung satu dengan yang lain. Salah satu ciri dari persamaan differensial *coupled* adalah apabila koefisien diluar diagonal matriks (*off diagonal values*) nilainya tidak nol atau *non-zero off diagonal matriks*.

Salah satu metode yang dapat digunakan untuk menyelesaikan integrasi persamaan differensial coupled struktur MDOF secara langsung adalah – *Newmark Method*. Yang dimaksud metode – *Newmark* disini adalah metode yang berdasarkan pada *incremental method*, yaitu dapat digunakan untuk struktur yang berperilaku linier inelastis maupun struktur non linier inelastis. Persamaan differensial – *Newmark* adalah sebagai berikut ini.

$$m.\Delta\ddot{y}_i + c.\Delta\dot{y}_i + k.\Delta y_i = \Delta p_i \quad (3.65)$$

Apabila beban dinamik yang digunakan adalah beban gempa maka untuk struktur MDOF persamaan differensial 3.48 diatas menjadi seperti berikut ini.

$$[M]\Delta\ddot{y}_i + [C]\Delta\dot{y}_i + [K]\Delta y_i = [M]\Delta\ddot{y}_{b,i} \quad (3.66)$$

Perlu diingat bahwa metode – *Newmark* pada persamaan 3.49 memakai perjanjian notasi untuk perubahan simpangan struktur, perubahan kecepatan struktur dan perubahan percepatan struktur sebagaimana terlihat pada Persamaan 3.67 s/d Persamaan 3.69.

$$\Delta y_i = y_{i+1} - y_i \quad (3.67)$$

$$\Delta \dot{y}_i = \dot{y}_{i+1} - \dot{y}_i \quad (3.68)$$

$$\Delta \ddot{y}_i = \ddot{y}_{i+1} - \ddot{y}_i \quad (3.69)$$

Sedangkan untuk perubahan intensitas pembebanan pada interval yang ditinjau mengikuti Persamaan 3.70.

$$\Delta p_i = \Delta p_{i+1} - p_i \quad (3.70)$$

Persamaan untuk struktur MDOF yang diakibatkan oleh gempa bumi adalah sebagaimana Persamaan 3.71.

$$\Delta p_i = [M](y_{b,i+1} - y_{b,i}) \quad (3.71)$$

Untuk memulai proses integrasi numerik tersebut maka digunakan Persamaan 3.72 s/d 3.74.

$$\Delta \ddot{y}_i = \left(\frac{1}{S \times \Delta t^2} \times [\Delta y_i] \right) - \left(\frac{1}{S \times \Delta t} \times [\dot{y}_i] \right) - \left(\frac{1}{2S} \times [\ddot{y}_i] \right) \quad (3.72)$$

Untuk persamaan perubahan kecepatan diberikan dibawah ini.

$$\Delta \dot{y}_i = \left(\frac{\alpha}{S \times \Delta t} \times \Delta y_i \right) - \left(\frac{\alpha}{S} \times \dot{y}_i \right) + \left(1 - \frac{\alpha}{2S} \right) \Delta t \cdot \ddot{y}_i \quad (3.73)$$

Kemudian untuk perubahan simpangan adalah sebagai berikut ini.

$$\Delta y_i = \frac{\Delta \hat{P}_i}{\hat{K}} \quad (3.74)$$

Yang mana,

$$\hat{K} = [K] + \left\{ \frac{\alpha}{S \times \Delta t} \times [C] \right\} + \left\{ \frac{1}{S \times \Delta t^2} \times [M] \right\} \quad (3.75)$$

$$\Delta \hat{P}_i = (p_{i+1} - p_i) + a \cdot \dot{y}_i + b \cdot \ddot{y}_i \quad (3.76)$$

Struktur MDOF yang diakibatkan beban gempa bumi, maka Persamaan 3.76 dapat ditulis kembali menjadi sebagai berikut ini.

$$\Delta \hat{P}_i = [M] (\ddot{y}_{b,i+1} - \ddot{y}_{b,i}) + a \cdot \dot{y}_i + b \cdot \ddot{y}_i \quad (3.77)$$

Nilai a dan b dapat dicari dengan persamaan-persamaan berikut ini.

$$a = \left\{ \frac{1}{S \times \Delta t} \times [M] \right\} + \left\{ \frac{\alpha}{S} \times [C] \right\} \quad (3.78)$$

$$b = \left\{ \frac{1}{2 \times S} \times [M] \right\} + \left\{ \left(\frac{\alpha}{2 \times S} - 1 \right) \times \Delta t \times [C] \right\} \quad (3.79)$$

Selanjutnya besarnya nilai simpangan, kecepatan dan percepatan pada akhir interval adalah sebagai berikut ini.

$$y_{i+1} = y_i + \Delta y_i \quad (3.80)$$

$$\dot{y}_{i+1} = \dot{y}_i + \Delta \dot{y}_i \quad (3.81)$$

$$\ddot{y}_{i+1} = \ddot{y}_i + \Delta \ddot{y}_i \quad (3.82)$$

3.8 Analisis Respons Struktur Akibat Gempa

3.8.1 Simpangan Struktur

1. Simpangan antar tingkat (*Interstory Drift*)

Simpangan antar tingkat adalah simpangan suatu massa yang diperoleh dengan mengurangi simpangan netto tiap tingkat dengan simpangan dibawahnya. Nilai simpangan netto (y_n) dan simpangan antar tingkat (yy) dapat dihitung dengan Persamaan 3.83 dan 3.84.

$$y_n = y_i - y_{base} \quad (3.83)$$

$$yy = y_n - y_{n-1} \quad (3.84)$$

2. Rasio simpangan antar tingkat (*Interstory Drift Ratio*)

Rasio simpangan antar tingkat adalah simpangan antar tingkat dibagi tinggi tingkat yang ditinjau, pada waktu yang bersamaan. Besarnya nilai simpangan antar tingkat (yr) dihitung dengan Persamaan 3.85.

$$yr = \frac{yy_{(i)}}{h} \times 100 \% \quad (3.85)$$

3.8.2 Gaya horizontal tingkat

Apabila simpangan tingkat telah diperoleh, maka langkah selanjutnya adalah menghitung gaya horizontal tingkat. Hal ini sesuai dengan prinsip analisis elastik untuk problem dinamika struktur bahwa simpangan horizontal, gaya horizontal tingkat dan momen tingkat adalah elastik respons penting yang selal di cari (Widodo, 2017). Besarnya nilai gaya horizontal tingkat (F) dihiutng dengan Persamaan 3.86.

$$F = y_n \times [K] \quad (3.86)$$

3.8.3 Gaya geser tingkat

Apabila hanya diperhitungkan gaya horizontal gempa satu arah, maka gaya geser tingkat (V), dapat diperoleh degan Persamaan 3.87.

$$V = \sum_{j=i}^n F_j \quad (3.87)$$

Gaya horizontal tingkat ke-i kontribusi mode ke-j, F_{ij} dapat bertanda positif atau negatif tergantung dari tanda koordinat mode shape. Apabila gaya horizontal tingkat tersebut berlawanan tanda maka arahnya saling berlawanan.

3.8.4 Momen guling (*Overtuning Moment*)

Gaya horizontal tingkat (F_{ij}) telah dapat dihitung, momen guling dapat dihitung menggunakan Persamaan 3.88.

$$M_g = \sum_{j=i}^n F_j \times h_j \quad (3.88)$$

3.9 Ramberg Osgood Models (R-O Models)

3.9.1 Regangan Geser Non Linier Inelastis Struktur Bangunan Gedung

Regangan geser non linier inelastis pada tiap – tiap tingkat bangunan dapat dicari dengan tinjauan perbedaan simpangan (y) dan tinggi tingkat bangunan yang diketahui (h), maka besarnya nilai regangan geser tanah (*shear strain*) dapat dicari berdasarkan Persamaan 3.89.

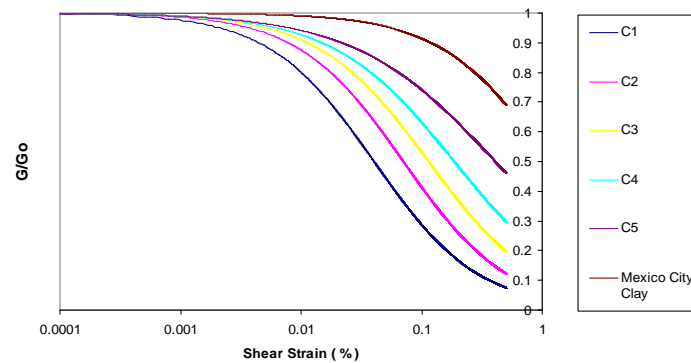
$$\chi_{n(i)} = \frac{y_{n(i)} - y_{n-1(i)}}{h} \quad (3.89)$$

dengan:

- $\chi_{(i)}$ = Regangan geser tingkat bangunan ke – n pada iterasi ke – i,
- $y_{n(i)}$ = Simpangan lapisan tanah ke – n pada iterasi ke – i, dan
- h = Tinggi tingakat bangunan.

3.9.2 Modulus Geser (G_i) dan Kekakuan (K_i) Isolasi Dasar

Menurut Vucetic dan Bobry (1991) besarnya nilai rasio modulus geser tiap step (G_i) terhadap modulus geser maksimum (G_0) dapat dicari dengan menggunakan pendekatan sebuah grafik hubungan modulus geser dengan regangan geser seperti ditunjukkan pada Gambar 3.11 berikut ini.



Gambar 3.11 Nilai G_i/G_0 Untuk Nilai Regangan Geser Tertentu Pada Semua Jenis Tanah

(Sumber : Vucetic dan Orby, 1991)

Selain itu nilai G_i/G_0 juga dapat dicari dengan persamaan rumus empiris menggunakan Persamaan 3.90.

$$\frac{G_i}{G_0} = \frac{1}{1 + r \left(\frac{x^r}{x_h} \right)} \quad (3.90)$$

Setelah nilai rasio G_i/G_0 didapatkan dengan Persamaan 3.90 maka step selanjutnya adalah mencari nilai modulus geser tanah tiap-tiap step (G_i). Nilai modulus geser tiap-tiap step (G_i) dapat dicari dengan Persamaan 3.91.

$$G_i = \frac{1}{1 + r \left(\frac{x^r}{x_h} \right)} \times G_0 \quad (3.91)$$

Nilai kekakuan tiap-tiap step (K_i) dapat dicari dengan Persamaan 3.92.

$$K_i = \frac{G_i \times A}{h} \quad (3.92)$$

Nilai x adalah regangan geser dalam persen. Nilai x_h dan r dapat diambil dari Tabel 3.2.

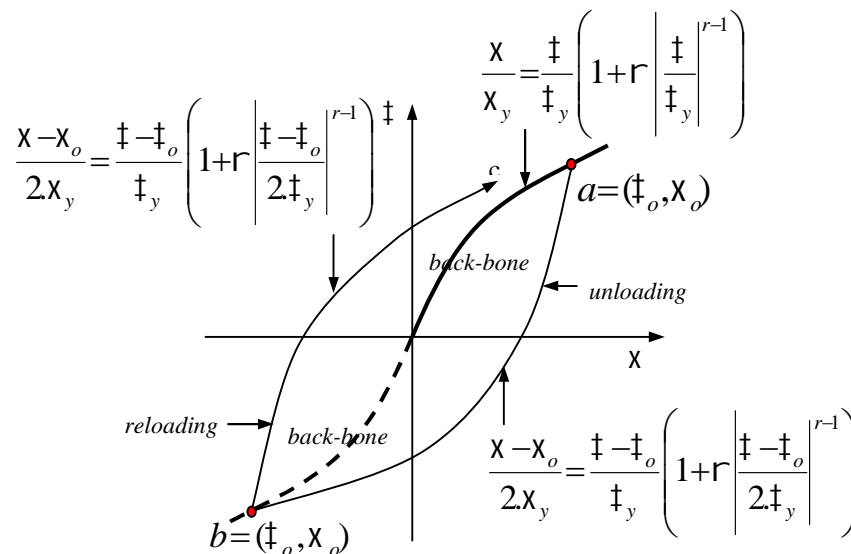
Tabel 3.2 Nilai PI, h, dan

Type	Indeks Plastisitas	h	
C ₁	5 – 9	0,04	1,00
C ₂	10 – 19	0,07	1,00
C ₃	20 – 39	0,12	0,95
C ₄	40 – 79	0,20	0,87
C ₅	80 – 99	0,38	0,75
Mexico	100	1,10	0,97

Sumber : Widodo (2012)

3.9.3 Tegangan Geser Non Linier Inelastis Isolasi Dasar ()

Model histeretik Ramberg Osgood (1943), terdiri dari tiga kondisi tertentu yaitu kondisi pembebanan awal (*backbone*), kondisi pengurangan pembebanan (*unloading*) dan kondisi pembebanan kembali (*reloading*) sebagaimana terlihat pada Gambar 3.12 dibawah ini.



Gambar 3. 12 Histeretik Ramberg Osgood dan rules yang dipakai

(Sumber : Widodo, 2017)

Berdasarkan Gambar diatas terdapat tiga kondisi pembebanan yaitu kondisi pembebanan awal (*back-bone*), kondisi penurunan beban (*unloading*) dan kondisi pembebanan kembali (*reloading*). Hal ini terjadi sesuai dengan mekanisme beban gempa yaitu beban bolak-balik (siklis). Persamaan untuk ketiga kondisi diatas dapat dilihat pada Persamaan 3.93 sampai Persamaan 3.95.

Untuk kondisi pembebanan awal (*back-bone*) sebagai berikut ini.

$$\frac{x}{x_y} = \frac{\ddagger}{\ddagger_y} \left(1 + r \left| \frac{\ddagger}{\ddagger_y} \right|^{r-1} \right) \quad (3.93)$$

Apabila regangan geser isolasi dasar () < 0 atau ketika terjadi kondisi *unloading* maka digunakan persamaan berikut ini.

$$\frac{x - x_o}{2 \cdot x_y} = \frac{\ddagger - \ddagger_o}{\ddagger_y} \left(1 + r \left| \frac{\ddagger - \ddagger_o}{2 \cdot \ddagger_y} \right|^{r-1} \right) \quad (3.94)$$

Apabila regangan geser tanah () > 0 atau ketika terjadi kondisi *reloading* maka digunakan persamaan berikut ini.

$$\frac{x - x_o}{2 \cdot x_y} = \frac{\ddagger - \ddagger_o}{\ddagger_y} \left(1 + r \left| \frac{\ddagger - \ddagger_o}{2 \cdot \ddagger_y} \right|^{r-1} \right) \quad (3.95)$$

Untuk nilai tegangan pada saat mengalami keruntuhan (\ddagger_y) adalah sebagai berikut ini.

$$\ddagger_y = \frac{0.1 \times W}{A} \quad (3.96)$$

dengan:

- \ddagger_y = Tegangan geser bangunan pada saat mengalami kegagalan (kg/cm^2),
 - W = Berat bangunan (kg),
 - A = Luas bidang isolasi dasar (cm^2),
 - o = Regangan geser isolasi dasar saat beban berbalik (*load reversal*),
 - y = Regangan geser isolasi dasar pada saat mengalami kegagalan atau keruntuhan,
 - o = Tegangan geser isolasi dasar saat beban berbalik (*load reversal*),
 - y = Tegangan geser isolasi dasar pada saat mengalami kegagalan (kg/cm^2), dan
- dan r = Koefisien bentuk dan posisi dari kurva.

Jika diambil suatu notasi sebagai berikut ini.

$$c = \frac{X - X_o}{2X_y} \quad (3.97)$$

$$x = \frac{\tau - \tau_o}{2\tau_y} \quad (3.98)$$

Dengan melihat kembali hubungan pada Persamaan 3.80 dan Persamaan 3.81 maka Persamaan 3.94 dan Persamaan 3.95 dapat ditulis dalam bentuk sebagai berikut ini.

$$x + r \cdot x^r - c = 0 \quad (3.99)$$

Untuk memperoleh nilai x pada Persamaan 3.99 diatas dapat dicari dengan integrasi numerik dengan menggunakan metode *Newton Raphson*. Selanjutnya nilai tegangan geser (*shear stress*) untuk awal integrasi dapat dicari dengan Persamaan 3.100.

$$\tau = 2 \cdot x \tau_y \quad (3.100)$$

Untuk integrasi selanjutnya maka nilai tegangan geser (*shear stress*) dapat dicari dengan persamaan berikut ini.

$$\tau = (2 \cdot x \tau_y) + \tau_o \quad (3.101)$$

Beberapa parameter dalam pemodelan struktur siklis model Ramberg Osgood antara lain:

1. Parameter

Hara (1980) mengusulkan dalam penelitiannya bahwa dengan mengasumsikan $\tau = f$ dan $\tau = f$ maka besarnya regangan geser tanah pada saat mengalami kegagalan (f) dapat dicari dengan Persamaan 3.102.

$$r = \frac{X_f}{X_r} - 1 \quad (3.102)$$

Parameter dapat digunakan sebagai alternatif untuk menentukan besarnya modulus geser pada saat mengalami kegagalan atau keruntuhan (G_f) yang besarnya nilai diberikan pada Persamaan 3.103.

$$r = \frac{G_r}{G_f} - 1 \quad (3.103)$$

2. Parameter r

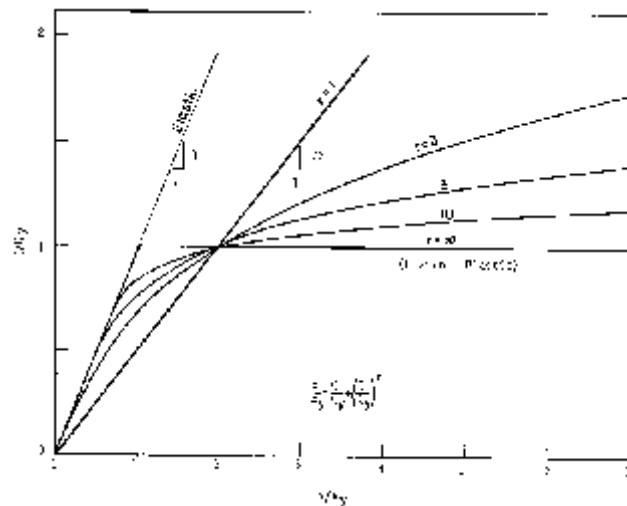
Penentuan parameter r akan sangat berguna untuk memperoleh hasil yang cukup mendekati pada saat tegangan mengalami kegagalan (*yield*). Menurut Ishihara (1969) menunjukkan bahwa besarnya nilai r untuk berbagai jenis tanah adalah sebagai berikut ini.

Tabel 3.3 Pendekatan Nilai r Saat Mengalami Keruntuhan

Soil Type	Parameter r
Clay	1,65 – 2,80
Sand	2,30 – 4,40
Gravel	1,90 – 3,40

Sumber :Balkema, AA, 1982 dalam "Numerical Models In Geomechanics"

Tetapi Movses J. Kaldjian dan William R. S. Fan (1967) menunjukkan hasil penelitiannya mengenai besaran konstanta r untuk berbagai jenis tanah adalah sebagai berikut ini.



Gambar 3.13 Nilai r Dalam Beban Siklis Berbagai Jenis Tanah
(Sumber : Andhika, 2008)