

PERENCANAAN BANGUNAN TAHAN GEMPA DENGAN MENGGUNAKAN BASE ISOLATOR (LRB): CONTOH KASUS GEDUNG AUDITORIUM UNIVERSITAS CENDRAWASIH, PAPUA

Daniel Rumbi Teruna

1. Pendahuluan

Perencanaan konvensional bangunan tahan gempa adalah berdasarkan konsep bagaimana meningkatkan kapasitas tahanan struktur terhadap gaya gempa yang bekerja padanya. Misalnya dengan menggunakan shear wall, system rangka pemikul momen khusus, system rangka dengan bracing dan sebagainya. Konsekuensinya, pada bangunan dimana kekakuan lateralnya cukup besar akan mengalami percepatan lantai yang besar, sedangkan pada bangunan fleksibel akan mengalami perpindahan lateral yang cukup besar, sehingga bangunan akan mengalami kerusakan yang signifikan pada peristiwa gempa kuat

Filosofi perencanaan bangunan tahan gempa yang diadopsi hampir seluruh Negara didunia mengikuti ketentuan berikut ini :

- Pada gempa kecil bangunan tidak boleh mengalami kerusakan
- Pada gempa menengah komponen struktural tidak boleh rusak, namun komponen non-struktural diijinkan mengalami kerusakan
- Pada gempa kuat komponen struktural boleh mengalami kerusakan, namun bangunan tidak boleh mengalami keruntuhan

Jadi, bangunan yang dirancang secara konvensional harus mampu berdeformasi inelastic, dengan kata lain bangunan harus berperilaku duktail. Namun, meningkatkan kinerja bangunan pada level operasional merupakan tujuan utama bagi beberapa tipe bangunan seperti:

- Bangunan yang berhubungan dengan fasilitas keadaan darurat (rumah sakit, pembangkit listrik, telekomunikasi, dsb)
- Bangunan dengan komponen atau bahan yang beresiko tinggi terhadap makhluk hidup(fasilitas nuklir, bahan kimia, dsb)
- Bangunan yang berhubungan dengan orang banyak (mall, apartemen, perkantoran, hotel, dsb)
- Bangunan yang berhubungan dengan pertahanan Negara
- Bangunan yang memiliki komponen dan peralatan elektronik yang mahal
- Bangunan/museum/monumen yang berhubungan dengan sejarah

Adalah suatu hal yang sulit untuk menghindari kerusakan bangunan-bangunan tersebut diatas akibat gempa, bila digunakan perencanaan konvensional, karena hanya bergantung kepada kekuatan komponen struktur itu sendiri, serta perilaku respon pasca elastis.

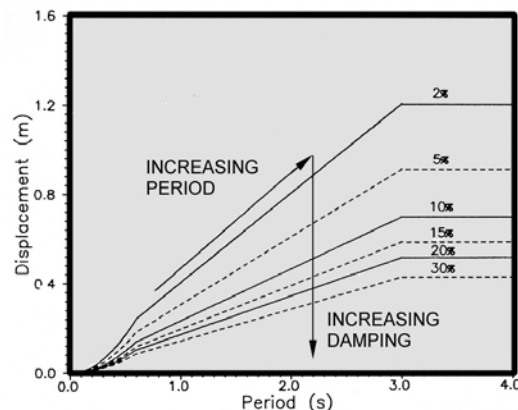
Seiring dengan perkembangan teknologi dalam perencanaan bangunan tahan gempa, telah dikembangkan suatu pendekatan desain alternatif untuk mengurangi resiko kerusakan bangunan akibat gempa, dan mampu mempertahankan integritas komponen

struktural dan non-struktural terhadap gempa kuat. Pendekatan desain ini bukan dengan cara memperkuat struktur bangunan, tetapi adalah dengan mereduksi gaya gempa yang bekerja pada bangunan. Salah satu konsep pendekatan perencanaan yang telah digunakan banyak orang adalah dengan menggunakan isolasi seismic atau sering juga disebut dengan nama base isolation.

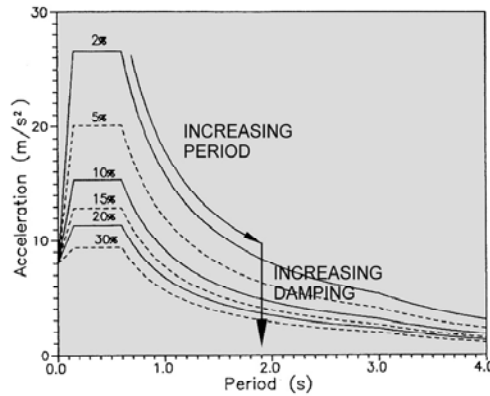
2. Konsep Sistem Isolasi Seismik

Konsep isolasi seismic merupakan perkembangan yang cukup signifikan dalam rekayasa kegempaan dalam 20 tahun terakhir ini. Sistem ini telah banyak digunakan Negara – Negara yang mempunyai resiko tinggi terhadap gempa seperti Jepang, Italy, USA, Selandia Baru, Portugal, Iran, Indonesia, Turki, China, dan Taiwan,. sistem ini akan memisahkan bangunan atau struktur dari komponen horizontal pergerakan tanah dengan menyisipkan bahan isolator dengan kekakuan horizontal yang relative kecil antara bangunan atas dengan pondasinya. Bangunan dengan sistem ini mempunyai frekwensi yang jauh lebih kecil dari bangunan konvensional dan frekwensi dominan dari gerakan tanah. Akibatnya percepatan gempa yang bekerja pada bangunan menjadi lebih kecil. Ragam getar pertama bangunan hanya menimbulkan deformasi lateral pada sistem isolator, sedangkan bagian atas akan berperilaku sebagai rigid body motion. Ragam-ragam getar yang lebih tinggi yang menimbulkan deformasi pada struktur adalah orthogonal terhadap ragam pertama dan gerakan tanah sehingga ragam-ragam getar ini tidak ikut berpartisipasi didalam respons struktur, atau dengan kata lain energi gempa tidak disalurkan ke struktur bangunan (Naeim and Kelly, 1999)

Pada gempa kuat, isolator dengan kekakuan horizontal yang relatif kecil ,akan menyebabkan perioda alamiah bangunan lebih besar,(umumnya antara 2 s/d 3,5 detik). Pada perioda ini, percepatan gempa relatif kecil, khususnya pada tanah keras. Berhubung isolator akan mereduksi percepatan pada struktur bangunan. Namun, sebaliknya akan menyebabkan peningkatan perpindahan pada bangunan. Untuk membatasi perpindahan sampai pada batas yang dapat diterima, sistem isolasi juga dilengkapi dengan elemen-elemen yang mampu mendissipasi energi. Disamping itu, sistem isolasi juga mempunyai kemampuan untuk kembali pada posisi semula setelah terjadinya gerakan seismik. Sedangkan pada gempa kecil atau akibat angin kekakuan horizontal dari sistem isolator harus memadai, agar tidak menimbulkan getaran yang menyebabkan ketidaknyamanan penghuninya. Pada gambar 1 dan 2 dapat dilihat respon tipikal percepatan dan perindahan sebagai fungsi dari damping.



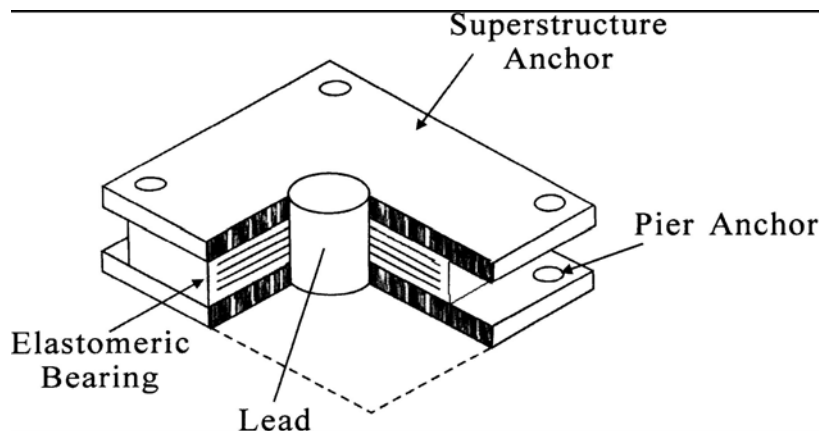
Gambar 1 Respon spektra perpindahan sebagai fungsi dari damping



Gambar 2 Respon spektra percepatan sebagai fungsi dari damping

3. Pemodelan Lead Rubber Bearing

Lead Rubber Bearing (LRB) seperti pada gambar 3 ini adalah salah satu sistem anti seismik base isolator yang banyak digunakan pada bangunan untuk mereduksi gaya gempa. LRB ini terdiri dari beberapa lapisan karet alam atau sintetis yang mempunyai nisbah redaman kritis antara 2-5%. Untuk meningkatkan nisbah damping bahan karet ini dicampur dengan extrafine carbon block, oil atau resin, serta bahan isian lain sehingga meningkatkan damping antara 10% sampai 20% pada shear strain 100%. Untuk dapat menahan beban vertikal (tidak terjadi tekuk), maka karet diberi lempengan baja yang dilekatkan ke lapisan karet dengan sistem vulkanisir. Untuk meningkatkan nisbah redaman sistem ini, maka pada bagian tengahnya diberikan batang bulat dari timah, sehingga nisbah redaman sistem ini dapat mencapai hingga sampai 30%.



4. Karakteristik Hubungan Gaya dan Perpindahan

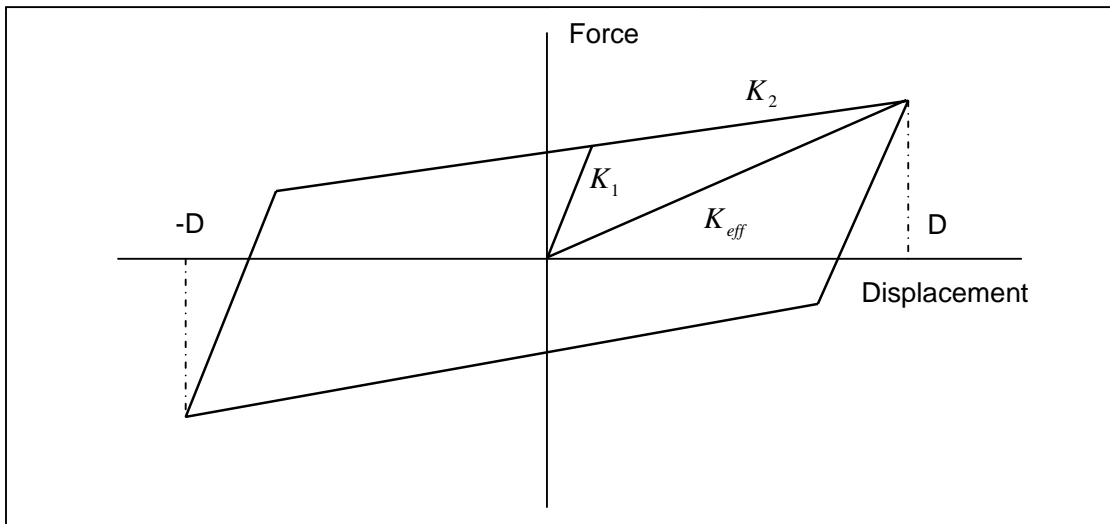
Perilaku hubungan gaya dan perpindahan pada LRB seperti ditunjukkan pada gambar 4. Dalam analisis struktur, LRB dapat dimodelkan sebagai model linier atau bi-linier. Untuk analisis linier digunakan kekakuan efektif K_{eff} , sedangkan untuk analisis nonlinier ada tiga parameter yang menentukan karakteristik dari LRB, yaitu: Kekakuan awal K_1 , kekakuan pasca leleh K_2 , dan kekuatan leleh dari inti timah Q . Kekakuan awal K_1 yang cukup besar direncanakan untuk menahan beban angin dan gempa kecil.

Pada umumnya nilai kekakuan ini mencapai 6.5 sampai 10 kali dari kekakuan pasca leleh K_2 ^[2]. Untuk analisis linier biasanya digunakan kekakuan effective K_{eff} , Kekakuan K_1 dan K_2 ditentukan dari test percobaan hysteresis loop, sedangkan kekakuan effectif ditentukan dari persamaan berikut ini (Naeim and Kelly, 1999)

$$K_{eff} = K_2 + \frac{Q}{D}, \quad D \geq D_y \quad (1)$$

dan $Q = A_p \tau_y$

Dimana A_p dan τ_y adalah luas penampang dan tegangan geser leleh inti timah. Besarnya tegangan geser leleh berkisar antara 800 Mpa -1000 Mpa.



Gambar 4 Aproximasi bi-linier hysteresis loop

Nisbah redaman dengan pemodelan redaman viskos ekuivalen diperoleh dari persamaan berikut ini (Chopra, 1995)

$$\xi = \frac{1}{4\pi} \frac{E_D}{E_S} \quad (2)$$

Dimana E_D adalah energi yang dissipasi per cycle (luas kurva hysteresis loop) diberikan sebagai

$$E_D = 4Q(D - D_y) \quad (3)$$

dan E_S adalah energi regangan diberikan sebagai

$$E_S = \frac{1}{2} K_{eff} D^2 \quad (4)$$

Mengingat respons spectra dibuat berdasarkan nisbah redaman 5%, maka respons spectra yang digunakan pada bangunan yang menggunakan isolasi seismic dapat

direduksi yang besarnya bergantung kepada nisbah redaman isolator seismic tersebut. Salah satu formula yang dapat digunakan untuk menentukan besarnya reduksi ini adalah berdasarkan Eurocode 8

$$\eta = \sqrt{\frac{10}{5 + \xi}} \quad (5)$$

Dimana ξ adalah nisbah redaman LRB. Contoh bila $\xi=16\%$ maka $\eta = 0.69$. Jadi respons spectra dapat direduksi 30% lebih. Sedangkan peraturan UBC 97 menggunakan faktor reduksi $\frac{1}{B}$ yang besarnya untuk $\xi=16\%$ adalah sekitar 0.71

5. Tekuk dan Stabilitas Pada LRB

Sebagaimana dijelaskan sebelumnya bahwa bangunan dengan isolator seismic akan mengalami deformasi lateral yang cukup besar, sehingga perlu diperiksa stabilitas terhadap deformasi lateral yang disebut dengan istilah rollout displacement. Disamping itu LRB juga harus mampu memikul beban vertical agar tidak terjadi tekuk. Tegangan tekan rata-rata pada LRB dihitung dengan formula berikut ini. (Yang et all, 2003)

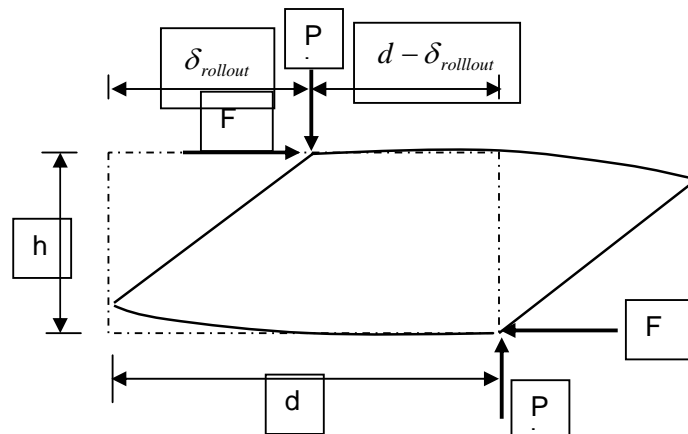
$$\sigma_c = \frac{P}{A} \leq \sigma_{cr} = \frac{G.S.L}{2.5t_r}$$

$$S = \begin{cases} \frac{L+B}{2(L+B)t} & \text{untuk bearing persegi} \\ \frac{d}{4t} & \text{untuk bearing lingkaran} \end{cases} \quad (6)$$

Dimana G modulus geser bearing, S adalah factor bentuk, L lebar terkecil dari bearing ($L \leq B$) atau diameter d untuk bearing bentuk lingkaran, t adalah tebal satu lapis karet, dan t_r adalah tebal total dari lapisan karet. Formula lain yang dapat digunakan seperti yang diusulkan (Naiem dan Kelly, 2001)

$$\sigma_c = \frac{P}{A} \leq \sigma_{cr} = \begin{cases} \frac{\pi.G.S.d.}{2\sqrt{2}.t_r} & \text{untuk bearing lingkaran} \\ \frac{\pi.G.S.L}{\sqrt{6}.t_r} & \text{untuk bearing persegi} \end{cases} \quad (7)$$

Untuk mencegah ketidakstabilan pada bearing akibat perpindahan horizontal yang besar, maka perpindahan maksimum (rollout displacement) tidak boleh lebih besar dari formula berikut ini. (Yang et all, 2003)



Gambar 5 Keseimbangan gaya pada bearing

Persamaan keseimbangan pada posisi batas perpindahan adalah

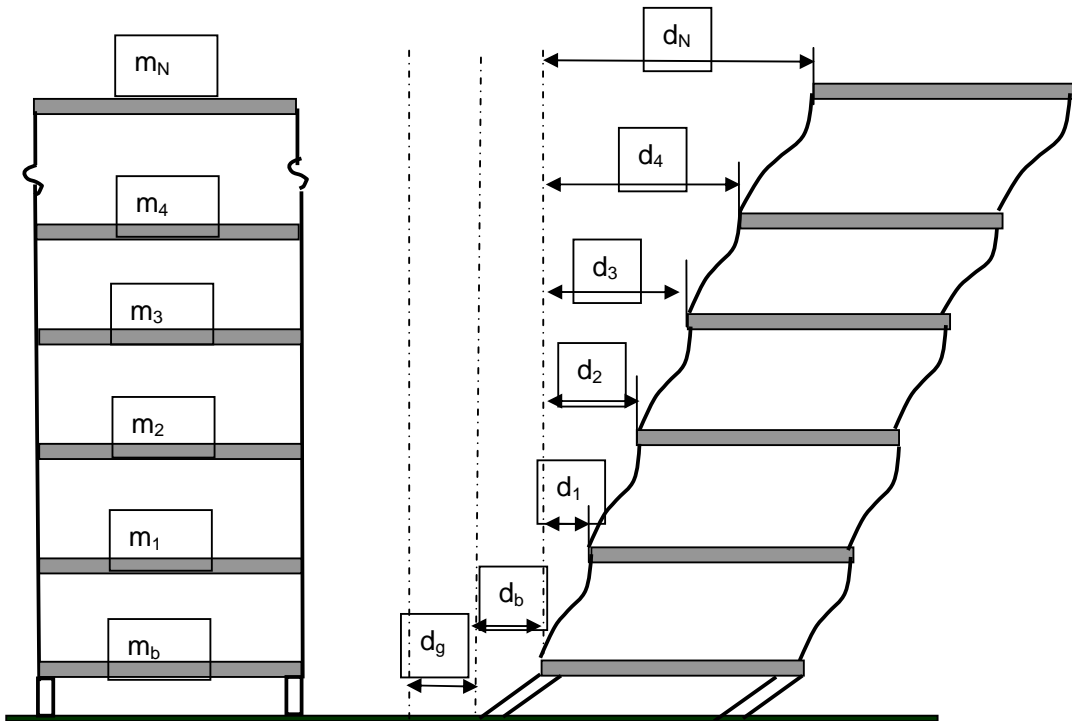
$$F.h = P(d - \delta_{rollout}) \quad (8)$$

Sedangkan $F = K_{eff} \delta_{rollout}$, maka perpindahan maksimum menjadi

$$D \leq \delta_{rollout} = \frac{Pd}{P + K_{eff}h} \quad (9)$$

6. Analisis Struktur Bangunan Dengan Base Isolator

Konsep bangunan dengan isolator adalah mengeliminasi pengaruh ragam-ragam getar yang lebih tinggi terhadap struktur. Persamaan gerakan bangunan dengan isolasi seismic akibat gaya gempa, ditinjau atas dua bagian yaitu pertama untuk struktur bangunan diatas isolator dan untuk struktur pada level bearing isolator. Tinjau suatu bangunan seperti gambar 6.



Gambar 7 Perpindahan pada bangunan

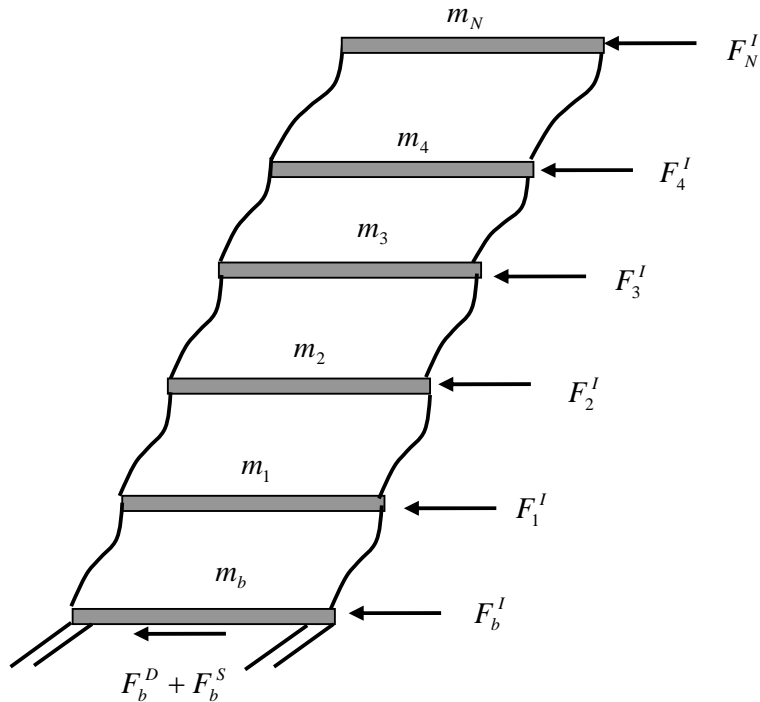
Gambar 6 Bangunan dengan base isolator

Suatu bangunan dengan jumlah lantai N . Penomoran lantai mulai dari 1 sampai ke N , dimana lantai paling bawah bertumpu pada bearing. Perpindahan relative setiap lantai ditunjukkan pada gambar 7. Perpindahan pada tanah dinamakan d_g , pada bearing d_b , dan lantai satu sampai atas berturut-turut dinamakan $d_1, d_2, d_3, d_4, \dots, d_N$

6.1. Persamaan Gerakan Pada Bearing Isolator

Tinjau diagram freebody seperti gambar 8. Gaya pegas diberi symbol S dan gaya damping diberi symbol D . Persamaan keseimbangan dapat ditulis seperti

$$\{F_N^I\} + \dots + \{F_i^I\} + \dots + \{F_1^I\} + \{F_b^I\} + \{F_b^D\} + \{F_b^S\} = \{0\} \quad (10)$$



Vektor gaya inersia secara umum untuk lantai ke i dapat ditulis sebagai:

$$\{F_i^I\} = [M_i]\{\ddot{d}_i\} + [M_i]\{\ddot{d}_b\} + [M_i]\{\ddot{d}_g\}$$

(10) dimana $[M_i] \equiv 3N \times 3$ adalah matrix massa lantai ke i , $\{\ddot{d}_i\} = \begin{Bmatrix} \ddot{x}_i \\ \ddot{y}_i \\ \ddot{\theta}_i \end{Bmatrix}$, $\{\ddot{d}_b\} = \begin{Bmatrix} \ddot{x}_b \\ \ddot{y}_b \\ \ddot{\theta}_b \end{Bmatrix}$,

dan $\{\ddot{d}_g\} = \begin{Bmatrix} \ddot{x}_g \\ \ddot{y}_g \\ 0 \end{Bmatrix}$ masing –masing adalah vektor percepatan pada lantai ke i , isolator, dan gerakan tanah.

Bila gaya-gaya inersia setiap lantai, gaya redaman dan gaya pegas isolator disubstitusikan ke pers.(10), didapat persamaan gerakan pada isolator sebagai (Roke, 2003)

$$[M_t]\{\ddot{d}_b\} + [C_b]\{\dot{d}_b\} + [K_b]\{d_b\} = -\sum_{i=1}^N ([M_i]\{\ddot{d}_i\}) - [M_t]\{\ddot{d}_g\}$$

(11)

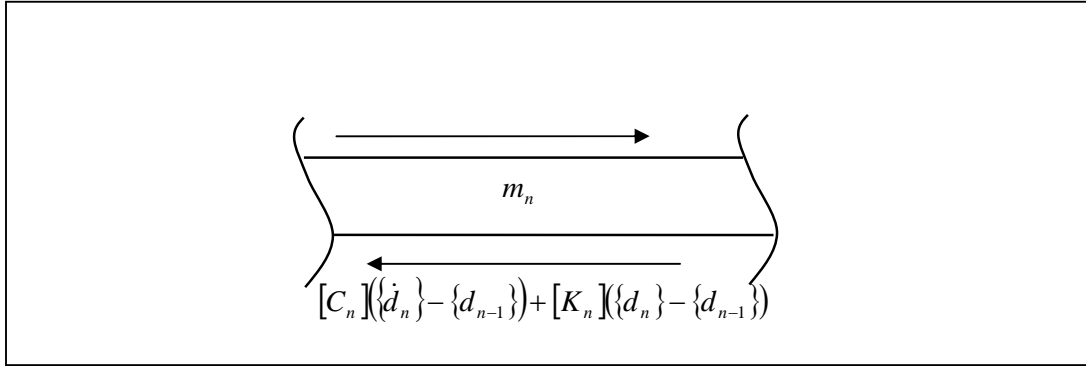
dimana $[M_t] = [M_b] + \sum_{i=1}^N M_i$ adalah massa total struktur yang bekerja pada isolator.

6.2. Persamaan Gerakan Pada Struktur Atas

Persamaan gerakan diperoleh dengan menjumlahkan gaya-gaya yang bekerja pada free body gambar 9.

$$[M_n]\{\ddot{d}_n\} + [C_{n+1}]\{\dot{d}_{n+1} - \dot{d}_n\} + [K_{n+1}]\{d_{n+1} - d_n\} - [M_n]\{\ddot{d}_g\} - [C_n]\{\dot{d}_n - \dot{d}_{n-1}\} + [K_n]\{d_n - d_{n-1}\}$$

(12)



Gambar 9 Free body diagram pada massa n

Untuk struktur bangunan dengan jumlah lantai N, persamaan (12) dapat ditulis menjadi

$$[M_u]\{\ddot{d}_u\} + [C_u]\{\dot{d}_u\} + [K_u]\{d_u\} = -[M_{uc}]\{\ddot{d}_b\} - [M_{uc}]\{\ddot{d}_g\} \quad (13)$$

dimana

$$[M_u] = \begin{bmatrix} [M_1] & [0] & \dots & [0] \\ [0] & [M_2] & & \vdots \\ & & \ddots & \\ \vdots & & & [M_{n-1}] & [0] \\ [0] & & \dots & [0] & [M_n] \end{bmatrix}$$

(14)

$$[C_u] = \begin{bmatrix} [C_1 + C_2] & [-C_2] & [0] & \dots & [0] \\ [-C_2] & [C_2 + C_3] & [-C_3] & & \\ & [-C_3] & [C_3 + C_4] & & \\ & & & \ddots & \\ \vdots & & & & [C_{n-1} + C_n] & [-C_n] \\ [0] & & \dots & & [-C_n] & [C_n] \end{bmatrix}$$

(15)

$$[K_u] = \begin{bmatrix} [K_1 + K_2] & [-K_2] & [0] & \dots & [0] \\ [-K_2] & [K_2 + K_3] & [-K_3] & & \\ & [-K_3] & [K_3 + K_4] & & \\ & & & \ddots & \\ \vdots & & & & [K_{n-1} + K_n] & [-K_n] \\ [0] & & & \dots & [-K_n] & [K_n] \end{bmatrix}$$

(16)

$$[M_{uc}] = \begin{Bmatrix} [M_1] \\ [M_2] \\ \vdots \\ [M_{N-1}] \\ [M_N] \end{Bmatrix} \equiv 3N \times 3, \quad \{d_u\} = \begin{Bmatrix} \{d_1\} \\ \{d_2\} \\ \vdots \\ \{d_{N-1}\} \\ \{d_N\} \end{Bmatrix} \equiv 3N \times 3$$

(17)

Persamaan gerakan pada bearing isolator (pers.11) dan pada struktur atas (pers.13) adalah persamaan diffrensial terikat. Dengan melakukan metode superposisi modal, maka pers. (11) dan pers. (13) dapat dibuat menjadi lebih sederhana, dimana response struktur diperoleh dari kombinasi linier dari setiap ragam getar (Chopra , 1995).

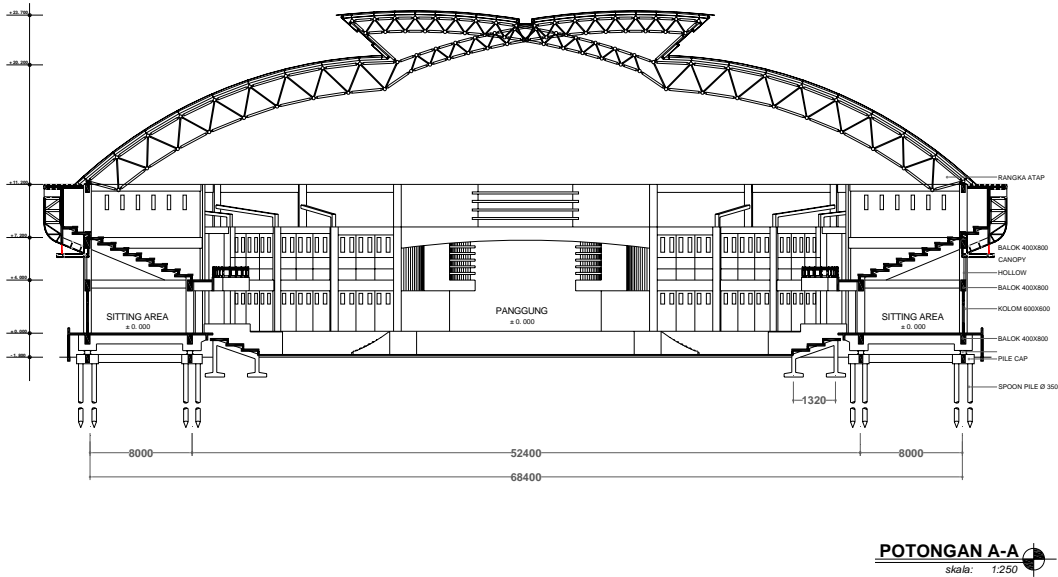
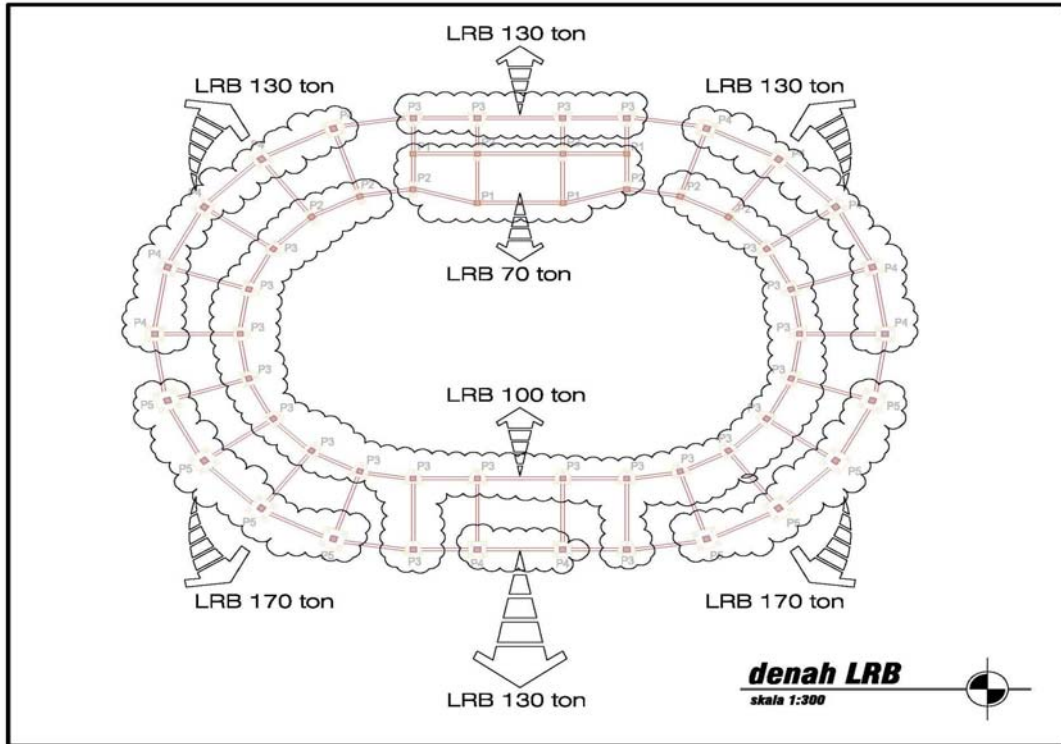
Menimbang dalam desain praktis hanya response maksimum yang dibutuhkan, maka percepatan gempa yang digunakan diambil dari desain response spektra seperti yang diberikan dalam desain code. Berhubung respons spectra ini dibuat dengan asumsi damping ratio 5%, maka untuk bangunan dengan base isolator, respons spectra ini dapat direduksi seperti pada pers.(5). Disamping itu struktur atas bangunan dengan isolator harus dirancang dalam keadaan elastis, maka factor modifikasi reponse R biasanya diambil 2. Sedangkan struktur dibawa isolator diambil $R = 1s/d1.5$

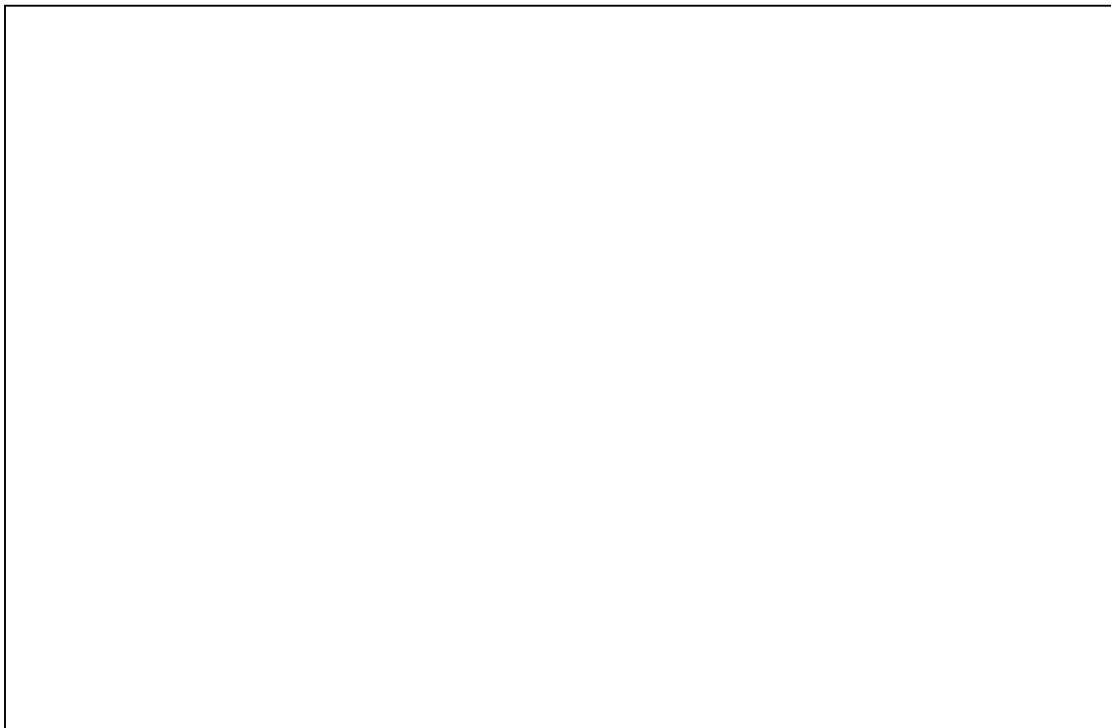
7. Contoh Kasus Bangunan Auditorium UNCEN

Bangunan Auditorium dengan kapasitas 3500 orang terletak di kota Jayapura provinsi Papua. Struktur bangunan dari beton bertulang, sedangkan atap bangunan dari struktur baja. Bangunan didukung sebanyak 56 LRB yang terdiri dari empat tipe dengan rasio redaman sama sebesar 16%. Bangunan direncanakan terletak pada zona 6 peta gempa Indonesia. Response spectra yang digunakan adalah untuk tanah sedang sesuai dengan SNI-03-1726-2002. Bentuk denah dan potongan bangunan diberikan seperti pada gambar 10. dan gambar 11.

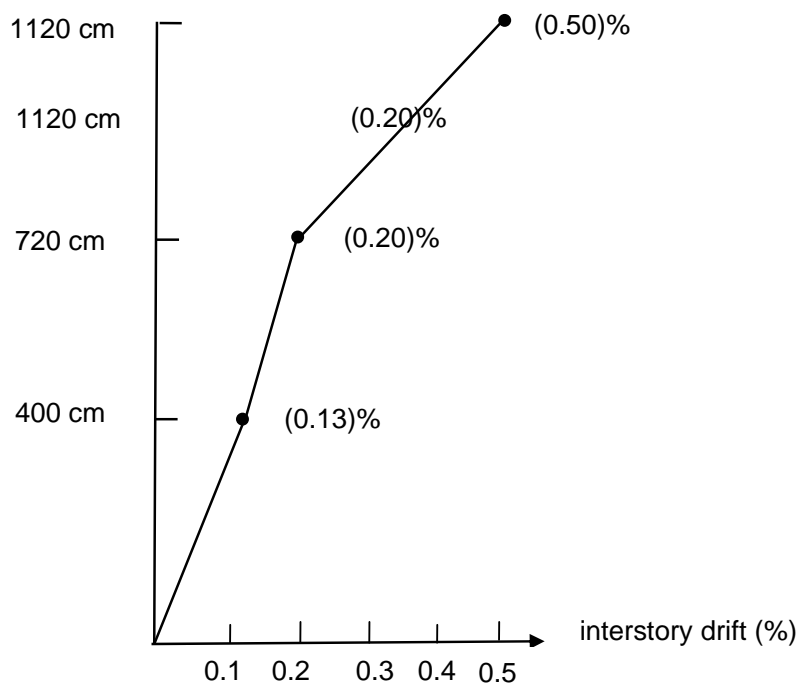
Analisis struktur dilakukan dengan bantuan program SAP.2000 Ver. 10.1 dengan pemodelan isolator sebagai linier model. Gaya gempa yang bekerja dalam dua arah dimana arah yang satunya diambil cukup 30% saja. Dari hasil analisa diperoleh waktu getar struktur untuk arah x dan y adalah 0,51 detik dan 0.49 detik, sedangkan untuk

bangunan isolator untuk kedua arah berturut-turut 1.80 detik dan 1.77 detik. Perpindahan maksimum pada isolator mencapai 18.2 cm, sedangkan interstory drift untuk bangunan dengan isolator pada kedua arah diberikan pada gambar 12 dan gambar 13. Sedangkan base shear untuk kedua arah bangunan diberikan pada table 1.





Gambar 12 Simpangan antar tingkat arah memanjang bangunan



Gambar 13 Simpangan antar tingkat arah melintang bangunan

Tabel 1 Besar base shear dengan factor modifikasi respon R=2

Arah bangunan	R	Base shear(ton)	persentase (%)
melintang (x)	2	857	11.5
memanjang (y)	2	892	12.0

8. Diskusi dan Kesimpulan

Dari gambar 12 dan gambar 13 dapat dilihat bahwa interstory drift yang terjadi cukup kecil dimana untuk arah melintang bangunan besarnya berturut-turut 0.13%, 0.20%, dan 0.50%. Sedangkan untuk arah memanjang bangunan besar interstory drift sebesar 0.10%, 0.13%, dan 0.20%. Dari hasil ini menunjukkan bangunan diatas isolator berperilaku sebagai rigid body. Dapat dikatakan secara keseluruhan kinerja bangunan dengan isolator berada pada level operasional. Interstory drift maksimum terjadi pada atap pada arah memanjang sebesar 0.5%. Hal ini dapat dimengerti karena kolom lantai atas dihubungkan dengan struktur baja dengan sambungan sederhana (simple connection). Akibatnya kolom penahan beban lateral berperilaku sebagai kolom cantilever.

Pada table 1 dapat dilihat bahwa pada bangunan dengan isolator rasio antara gaya geser dasar terhadap berat bangunan maksimum sebesar 12.0% . Bila bangunan tanpa isolator ,rasio gaya geser terhadap berat bangunan bisa mencapai 45%. Jadi dapat dilihat penggunaan isolator dapat mereduksi besar gaya geser sampai 72%. Ini dapat dimengerti karena salah satu pengaruh yang ditimbulkan oleh penggunaan isolator adalah memperpanjang periode getar bangunan. Disamping itu damping rasio isolator sebesar 16% bisa mereduksi response spectra sebesar 30%.

9. Daftar Pustaka

1. Chopra, A.K., 1995. *Dynamics of Structures*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ.
2. Eurocode 8," *Design Of Structures For Earthquake Resistance*," Part 1: General rules, Seismic Actions and Rules For Building.
3. Kelly, J.M., and Naeim, F.(1999),"*Design Of Seismic Isolated Building: From Theory To Practice*," John Wiley & Sons, Inc., New York.
4. Kelly, J. M., 1993. *Earthquake-Resistant Design with Rubber*, Springer-Verlag, New York.
5. Marioni, A.(1998),"*The Use Of High Damping Rubber Bearing For The Protection Of The Structures From The Seismic Risk*," Jornadas Portuguesas de Engenharia de Estruturas, Lisbon
6. Naeim, F. and Kelly, J.M.(2001),"*The Seismic Design Handbook: Design Of Structures With Seismic Isolation*," CD-ROM
7. Roke, A.D., (2005)," Thesis of Master of Science," School Engineering, University of Pittsburrgh.
8. Yang, B.Y., Chang, C.K., and Yau, D.J. (2003)," *Earthquake Engineering Handbook: Base Isolation*," CD-ROM.