

**ANALISIS DINAMIK STRUKTUR BANGUNAN GEDUNG YANG
MENGUNAKAN SISTEM *SEISMIC ISOLATION*
*LEAD RUBBER BEARING***

(Skripsi)

Oleh

EFRI DWIYANTO



**FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2017**

ABSTRACT

DYNAMIC ANALYSIS OF BUILDING STRUCTURES USING SEISMIC ISOLATION SYSTEM LEAD RUBBER BEARING

By

EFRI DWIYANTO

Indonesia is an archipelagic country that passes seismic path, so that earthquakes often occur. Earth vibrations caused by an earthquake, can vibrate the structure on it and cause deformation that can damage the structural building. One effort to reduce the damage is by using seismic isolation system. This system will separate the structure of the horizontal components of ground movement by inserting the base isolator.

This study was conducted to examine the effect of using base isolator (lead rubber bearing) when compared with the building without using base isolator on the medium soil and soft soil. Interstory drift is calculated using the response spectrum method by manual and Software SAP2000.

Results of the analysis showed that the use of base isolator increase the natural period of the structure so that it can decrease the interstory drift in the building. Significant internal reduction is seen in the magnitude of the column column shear forces with the base isolator. The amount of shear force reduction reached 94% in both medium and soft base type. The support reactions of fix base and base isolation structures were 4217,96 kN and 913,28 kN on medium soil, 6677,71 kN and 1453,79 kN on soft soils. The maximum interstory drift at fix base and base isolation is 4,3335 mm and 0.5741 mm on medium soil, 6,8606 mm and 0,9139 mm in soft soil, respectively. The reduction of interstory drift in both soil type reached 91%.

Keywords : *Interstory drift, seismic isolation, lead rubber bearing, response spectrum, SAP2000*

ABSTRAK

ANALISIS DINAMIK STRUKTUR BANGUNAN GEDUNG YANG MENGUNAKAN SISTEM *SEISMIC ISOLATION LEAD RUBBER BEARING*

Oleh

EFRI DWIYANTO

Indonesia merupakan negara kepulauan yang dilalui jalur seismik, sehingga sering kali terjadi gempa bumi. Getaran pada tanah yang diakibatkan oleh gempa bumi, dapat menggetarkan struktur di atasnya dan menimbulkan deformasi yang dapat merusak struktural bangunan. Salah satu upaya untuk mengurangi kerusakan tersebut adalah dengan menggunakan sistem *seismic isolation*. Sistem ini akan memisahkan struktur dari komponen horizontal pergerakan tanah dengan menyisipkan *base isolator*.

Penelitian ini dilakukan untuk mengkaji pengaruh penggunaan *base isolator (lead rubber bearing)* bila dibandingkan dengan bangunan tanpa menggunakan *base isolator* pada jenis tanah dasar sedang dan lunak. Simpangan dihitung menggunakan respon spektrum secara manual dan dengan bantuan *software* SAP2000.

Dari hasil analisa yang dilakukan, diperoleh bahwa penggunaan *base isolator* memperbesar periode alami struktur sehingga dapat memperkecil *interstory drift* pada bangunan. Reduksi gaya dalam cukup signifikan terlihat pada besarnya gaya geser kolom struktur dengan *base isolator*. Besarnya reduksi gaya geser mencapai 94% baik pada jenis tanah dasar sedang maupun lunak. Reaksi tumpuan dari struktur *fix base* dan *base isolation* adalah 4217,96 kN dan 913,28 kN pada tanah sedang, 6677,71 kN dan 1453,79 kN pada tanah lunak. *Interstory drift* maksimum pada *fix base* dan *base isolation* sebesar 4,3335 mm dan 0,5741 mm pada tanah sedang, 6,8606 mm dan 0,9139 mm pada tanah lunak. Reduksi *interstory drift* pada kedua jenis tanah dasar tersebut mencapai 91%.

Kata kunci : Simpangan, *seismic isolation*, *lead rubber bearing*, *response spectrum*, SAP2000

**ANALISIS DINAMIK STRUKTUR BANGUNAN GEDUNG YANG MENGGUNAKAN
SISTEM *SEISMIC ISOLATION*
*LEAD RUBBER BEARING***

Oleh

EFRI DWIYANTO

Skripsi

**Sebagai Salah Satu Syarat untuk Mencapai Gelar
SARJANA TEKNIK**

Pada

**Jurusan Teknik Sipil
Fakultas Teknik Universitas Lampung**



**FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2017**

Judul Skripsi : **ANALISIS DINAMIK STRUKTUR
BANGUNAN GEDUNG YANG
MENGUNAKAN SISTEM *SEISMIC
ISOLATION LEAD RUBBER BEARING***

Nama Mahasiswa : **Efri Dwiyanto**

Nomor Pokok Mahasiswa : 1315011040

Jurusan : Teknik Sipil

Fakultas : Teknik



Bayzoni, S.T., M.T.
NIP 19730514 200003 1 001

Ir. Eddy Purwanto, M.T.
NIP 19551212 199010 1 001

2. Ketua Jurusan Teknik Sipil

Dr. Gatot Eko Susilo, S.T., M.Sc., Ph.D.
NIP 19700915 199503 1 006

MENGESAHKAN

1. Tim Penguji

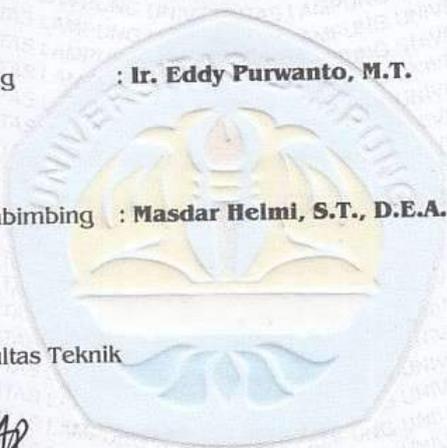
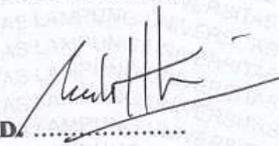
Pembimbing Utama : **Bayzoni, S.T., M.T.**



Anggota Pembimbing : **Ir. Eddy Purwanto, M.T.**



Penguji Bukan Pembimbing : **Masdar Helmi, S.T., D.E.A., Ph.D.**



2. Dekan Fakultas Teknik

Prof. Dr. Suharno, M.Sc.
NIP 19620717 198703 1 002

Tanggal Lulus Ujian Skripsi : **12 Desember 2017**

LEMBAR PERNYATAAN

Dengan ini menyatakan dengan sebenarnya bahwa :

1. Skripsi dengan judul Analisis Dinamik Struktur Bangunan Gedung Yang Menggunakan Sistem *Seismic Isolation Lead Rubber Bearing* adalah karya saya sendiri dan saya tidak melakukan penjiplakan atau pengutipan atas karya penulis lain dengan cara yang tidak sesuai tata etika ilmiah yang berlaku dalam masyarakat akademik atau yang disebut plagiarisme.
2. Hak intelektual atas karya ilmiah ini diserahkan sepenuhnya kepada Universitas Lampung.

Atas pernyataan ini, apabila di kemudian hari ternyata ditemukan adanya ketidakbenaran, saya bersedia menanggung akibat dan sanksi yang diberikan kepada saya dan saya sanggup dituntut sesuai hukum yang berlaku.

Bandar Lampung, 29 Desember 2017

Pembuat Pernyataan



Efri Dwiyanto

RIWAYAT HIDUP



Penulis dilahirkan di Kotagajah, 25 April 1995, sebagai anak kedua dari 3 bersaudara dari pasangan Bapak Bambang Suyanto dan Ibu Dewi Masitho. Pendidikan Taman Kanak-kanak (TK) Pertiwi Rukti Harjo diselesaikan pada tahun 2001, Sekolah Dasar diselesaikan di SD Negeri 2 Rukti Harjo Kecamatan Seputih Raman, Kabupaten Lampung Tengah pada tahun 2007, Sekolah Menengah Pertama di SMP Negeri 1 Seputih Raman pada tahun 2010 dan Sekolah Menengah Atas di SMA Negeri 1 Kotagajah pada tahun 2013.

Pada tahun 2013, penulis terdaftar sebagai mahasiswa Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Lampung melalui jalur Seleksi Nasional Masuk Perguruan Tinggi Negeri (SNMPTN). Pada bulan Januari sampai Maret 2016, penulis melaksanakan Kerja Praktik di Proyek Pembangunan Royal Dental Hospital Serpong. Pada bulan Januari sampai Februari 2017 penulis melaksanakan Kuliah Kerja Nyata di Desa Rukti Basuki, Kecamatan Rumbia, Kabupaten Lampung Tengah. Penulis mengambil tugas akhir dengan judul Analisis Dinamik Struktur Bangunan Gedung Yang Menggunakan Sistem *Seismic Isolation Lead Rubber Bearing*.

Tanpa mengurangi rasa syukurku pada Allah Subhanahu Wata"ala, kupersembahkan
karyaku

Kepada Bapak dan Ibu tersayang

Terimakasih atas bimbingan, didikan, kasih sayang, kesabaran, serta doa yang selalu kalian
berikan kepadaku sehingga aku bisa sampai di tahap ini.

Kepada Keluargaku tercinta

Kakak dan adik serta keponakan yang selalu mendoakan dan mengharapkan
keberhasilanku atas kasih sayang, perhatian, dan dorongan semangatnya takkan pernah
aku lupakan.

Kepada Sahabat dan Teman-temanku

Atas dukungan, kesabaran dan bantuannya sehingga karya ini dapat selesai.

Serta

Almamater tercinta

Fakultas Teknik Universitas Lampung

MOTTO

“Barang siapa keluar untuk mencari ilmu maka dia berada di jalan ALLAH”

(HR. Turmudzi)

“Sesungguhnya bersama kesulitan ada kemudahan.”

(QS. Al-Insyirah : 6)

“Start where you are. Use what you have. Do what you can.”

(Arthur Ashe)

“The important thing is to never stop questioning.”

(Albert Einstein)

SANWACANA

Puji syukur penulis panjatkan ke hadirat Allah SWT, karena atas rahmat dan hidayah-Nya, penulis dapat menyelesaikan skripsi ini. Pada kesempatan ini penulis menyampaikan rasa terima kasih yang tulus kepada :

1. Bapak Prof. Dr. Ir. Hasriadi Mat Akin, M.P., selaku Rektor Universitas Lampung.
2. Bapak Prof. Drs. Suharno, M.Sc., Ph.D., selaku Dekan Fakultas Teknik, Universitas Lampung.
3. Bapak Dr. Gatot Eko Susilo, S.T., M.Sc., selaku Pembimbing Akademik saya serta Ketua Bidang Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Lampung.
4. Bapak Suyadi, S.T., M.T., selaku Dosen Pembimbing I, Bapak Bayzoni, S.T.,M.T., selaku Dosen Pembimbing II dan Bapak Ir. Eddy Purwanto, M.T., selaku Dosen Pembimbing II Pengganti atas ketersediaannya dalam memberikan bimbingan, pengarahan, serta ilmu yang sangat bermanfaat dalam proses penyelesaian skripsi ini.
5. Bapak Masdar Helmi, S.T., D.E.A., Ph.D., selaku Dosen Penguji, terima kasih atas bantuannya dalam memberikan ilmu disaat proses pengerjaan skripsi, serta saran-saran dan masukan yang diberikan kepada saya.

6. Bapak dan Ibu Dosen Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Lampung atas ilmu bidang sipil maupun bukan yang telah diberikan selama perkuliahan.
7. Bapak dan Ibu Staf Administrasi dan Pegawai Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Lampung, yang telah banyak membantu dalam persiapan pelaksanaan seminar dan penyelesaian skripsi.
8. Keluarga besar saya, yang selalu memberikan dukungan serta do'a untuk kesuksesan saya dalam menyelesaikan perkuliahan di Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Lampung.
9. Teman-teman seperjuangan Teknik Sipil 2013, yang telah menjadi keluarga baru dan telah mengajarkan saya tentang banyak hal dalam kehidupan ini.
10. Kakak-kakak dan Adik-adik tingkat Teknik Sipil Universitas Lampung yang telah banyak membantu saya selama berkuliah serta memberikan rasa kekeluargaan yang erat di Teknik Sipil Universitas Lampung.

Semoga skripsi ini dapat bermanfaat.

Bandar Lampung, 2017
Penulis,

Efri Dwiyanto

DAFTAR ISI

	Halaman
DAFTAR GAMBAR	iii
DAFTAR TABEL.....	v
DAFTAR NOTASI.....	vii
I. PENDAHULUAN	1
A. Latar Belakang	1
B. Rumusan Masalah.....	3
C. Batasan Masalah	3
D. Tujuan Penelitian	4
E. Manfaat Penelitian	5
II. TINJAUAN PUSTAKA.....	6
A. Gempa Bumi	6
B. Klasifikasi Situs	7
C. Prinsip <i>Shear Building</i>	8
D. Sistem Berderajat Kebebasan Tunggal (SDOF)	10
E. Sistem Berderajat Kebebasan Banyak (MDOF).....	12
F. Persyaratan Umum Perencanaan Ketahanan untuk Gedung.....	18
G. <i>Seismic Isolation</i>	26
H. <i>Lead Rubber Bearing</i> (LBR)	27
I. Pembebanan Struktur	29

III. METODOLOGI PENELITIAN.....	34
A. Pendekatan Penelitian	34
B. Lokasi Penelitian.....	34
C. Data Penelitian	34
D. Prosedur Penelitian	36
E. Kerangka Penelitian	38
IV. HASIL ANALISIS DAN PEMBAHASAN	39
A. Penjelasan Umum	39
B. Pembebanan	40
C. Analisis MDOF.....	47
D. Perencanaan <i>Lead Rubber Bearing</i>	66
E. Pemodelan Struktur Bangunan Tanpa dan Dengan Menggunakan <i>Lead Rubber Bearing</i> Menggunakan <i>Software</i> SAP2000	69
F. Analisis MDOF <i>Damped (Lead Rubber Bearing)</i>	85
V. PENUTUP.....	108
A. Kesimpulan	108
B. Saran	110

DAFTAR PUSTAKA

LAMPIRAN

DAFTAR GAMBAR

Gambar	Halaman
1. Pola goyangan struktur bertingkat banyak	9
2. Komponen yang bekerja pada sistem.....	10
3. Gaya-gaya yang bekerja	10
4. Pemodelan struktur dengan derajat kebebasan banyak	12
5. Keseimbangan gaya dinamik dengan f_S , f_D dan f_I	13
6. Peralihan struktur dengan metode analisis ragam	15
7. Spektrum respons desain	23
8. Penentuan simpangan antar lantai	25
9. Perilaku struktur bangunan dengan <i>base isolation system</i>	26
10. <i>Lead rubber bearing</i>	27
11. <i>Lead rubber bearing hysteresis loops</i>	29
12. Peta parameter S_S	32
13. Peta parameter S_I	33
14. Pemodelan struktur tiga dimensi bangunan gedung dengan SAP2000.....	36
15. Pemodelan balok dan pelat arah sumbu x-y	36
16. <i>Flow chart</i> penelitian	38
17. Grafik spektrum respons desain kota Bandar Lampung	47
18. Massa yang dihitung pada arah panjang bangunan.....	48
19. Massa yang dihitung pada arah pendek bangunan.....	48

20. Kotak <i>quick grid lines</i>	69
21. <i>Grid</i> bangunan pada sumbu x-z	70
22. Kotak <i>add material property</i>	70
23. Kotak <i>material property data</i>	71
24. Kotak <i>rectangular section</i>	72
25. Kotak <i>define load patterns</i>	72
26. Kotak <i>mass source data</i>	73
27. Kotak <i>response spectrum function definition</i>	74
28. Kotak <i>load case data</i>	75
29. Kotak <i>load case combination data</i>	76
30. Memodelkan <i>frame</i> pada <i>grid</i>	77
31. Memberikan tumpuan pada <i>base joint</i>	77
32. Tumpuan pada model struktur	78
33. Meng- <i>input</i> beban merata pada <i>frame</i>	78
34. Kotak <i>object model – line information</i>	79
35. Kotak <i>diaphragm constraint</i>	80
36. Kotak <i>link/support property data</i>	81
37. Meng- <i>input</i> data <i>lead rubber bearing</i>	82
38. Memodelkan <i>lead rubber bearing</i> pada <i>base joint</i>	82
39. Kotak <i>analysis options</i>	83
40. Simpangan lantai pada model struktur SAP2000 sumbu x-z	83
41. Simpangan lantai pada model struktur SAP2000 sumbu y-z	84
42. Grafik deformasi di tiap lantai untuk arah panjang bangunan	104
43. Grafik deformasi di tiap lantai untuk arah pendek bangunan	104

DAFTAR TABEL

Tabel	Halaman
1. Klasifikasi situs	8
2. Koefisien situs (F_a)	19
3. Koefisien situs (F_v)	20
4. Simpangan antar lantai tingkat ijin (Δ_a)	25
5. Besarnya beban mati tambahan	30
6. Rekapitulasi massa tiap lantai untuk arah panjang bangunan	50
7. Rekapitulasi massa tiap lantai untuk arah pendek bangunan	50
8. Hasil perhitungan kekakuan LRB untuk tanah sedang	68
9. Hasil perhitungan kekakuan LRB untuk tanah lunak	68
10. Deformasi lateral tiap lantai untuk arah panjang bangunan pada tanah sedang	99
11. Deformasi lateral tiap lantai untuk arah panjang bangunan pada tanah lunak	99
12. Deformasi lateral tiap lantai untuk arah pendek bangunan pada tanah sedang	100
13. Deformasi lateral tiap lantai untuk arah pendek bangunan pada tanah lunak	101
14. <i>Interstory drift</i> untuk arah panjang bangunan pada tanah sedang	101
15. <i>Interstory drift</i> untuk arah panjang bangunan pada tanah lunak.	102
16. <i>Interstory drift</i> untuk arah pendek bangunan pada tanah sedang	102
17. <i>Interstory drift</i> untuk arah pendek bangunan pada tanah lunak..	103

18. Beban kerja dinamis di tiap lantai	103
19. Persentase reduksi <i>interstory drift</i> untuk arah panjang bangunan	105
20. Persentase reduksi <i>interstory drift</i> untuk arah pendek bangunan	105

DAFTAR NOTASI

A_{pb}	adalah luas penampang total lead
A_{rubber}	adalah luas penampang total karet
c	adalah redaman
C_d	adalah faktor pembesaran defleksi
D	adalah beban mati yang bekerja pada gedung adalah perpindahan horizontal lead rubber bearing
D_y	adalah perpindahan setelah leleh lead rubber bearing
E	adalah beban gempa, yang ditentukan menurut SNI 1726:2012
F_a	adalah faktor amplifikasi terkait percepatan pada getaran periode pendek
f_{ypb}	adalah tegangan leleh lead
F	adalah beban kerja dinamis pada analisis respon spektrum
F_v	adalah faktor amplifikasi terkait percepatan yang mewakili getaran periode 1 detik
g	adalah percepatan gravitasi adalah modulus geser lead rubber bearing
h_{sx}	adalah tinggi tingkat di bawah tingkat x
I	adalah faktor keutamaan gempa adalah momen inersia
k	adalah kekakuan gedung
K_{eff}	adalah kekakuan efektif lead rubber bearing
K_d	adalah kekakuan sebelum elastis lead rubber bearing
K_u	adalah kekakuan elastis lead rubber bearing
L	adalah beban hidup yang bekerja pada gedung
m	adalah massa
Q_d	adalah kekakuan karakteristik lead rubber bearing

R	adalah koefisien modifikasi respon
S _a	adalah spektrum respons percepatan desain
SA	adalah kelas situs untuk batuan keras
SB	adalah kelas situs untuk batuan
SC	adalah kelas situs untuk tanah keras
SD	adalah kelas situs untuk tanah sedang
SE	adalah kelas situs untuk tanah lunak
SF	adalah kelas situs untuk tanah khusus
S _{DS}	adalah parameter percepatan spektral desain untuk periode pendek
S _{D1}	adalah Parameter percepatan spektral desain untuk periode 1 detik
S _s	adalah percepatan gempa MCER terpetakan untuk periode pendek
S ₁	adalah percepatan gempa MCER terpetakan untuk periode 1 detik
S _{MS}	adalah parameter spektrum respons percepatan pada periode pendek
S _{M1}	adalah parameter spektrum respons percepatan pada periode 1 detik
T	adalah periode getar fundamental struktur
W	adalah beban angin yang bekerja pada gedung
Δ	adalah besar defleksi maksimum yang terjadi
\ddot{v}	adalah percepatan
\dot{v}	adalah kecepatan
v	adalah perpindahan
ω	adalah frekuensi getar gedung
φ	adalah mode shape
β_{eff}	adalah nilai redaman kritis lead rubber bearing
δ _x	adalah defleksi pusat massa di tingkat x
δ _{xe}	adalah defleksi yang ditentukan dengan analisis elastik
Δ _a	adalah simpangan antar lantai tingkat ijin

BAB I PENDAHULUAN

A. Latar Belakang

Indonesia merupakan negara kepulauan yang dilalui jalur seismik. Hal ini menyebabkan gempa bumi sering terjadi di negara ini. Gerakan tanah (*ground motion*) akibat gempa bumi umumnya sangat tidak teratur dan hanya terjadi beberapa detik sampai puluhan detik, walaupun terkadang dapat terjadi lebih dari satu menit. Pelepasan energi ini diakibatkan karena adanya deformasi lempeng tektonik yang terjadi pada kerak bumi. Lempeng yang lebih berat massanya akan menyusup ke bawah, sedangkan yang ringan akan terangkat.

Peristiwa gempa merupakan peristiwa dinamik yang akan menimbulkan getaran pada tanah, dan selanjutnya akan menggetarkan struktur yang ada di atas tanah tersebut. Bangunan bertingkat apabila terkena gaya gempa, akan mempunyai pola goyangan (*mode shapes*) sebanyak jumlah tingkatnya. Selain itu akan terjadi deformasi yang cukup besar pada lantai bangunan sehingga dapat menyebabkan kerusakan struktural.

Beberapa penyederhanaan yang sering digunakan untuk memperhitungkan efek gempa terhadap analisis struktur bangunan yaitu menggunakan beban ekuivalen statik, spektrum respon (*response spectrum*) dan analisis riwayat waktu (*time history analysis*). Dalam analisis ini digunakan metode *response*

spectrum dikarenakan mengacu pada SNI 1726:2012 (Tata cara perencanaan ketahanan gempa untuk struktur bangunan gedung dan non gedung).

Kerusakan bangunan akibat gempa secara konvensional dicegah dengan memperkuat struktur bangunan terhadap gaya gempa yang bekerja padanya. Namun, hasil ini sering kali kurang memuaskan, karena kerusakan elemen baik struktural maupun non-struktural umumnya disebabkan adanya *interstory drift* (perbedaan simpangan antar tingkat). Untuk memperkecil *interstory drift* dapat dilakukan dengan memperkaku bangunan dalam arah lateral. Namun, hal ini akan memperbesar gaya gempa yang bekerja pada bangunan (Teruna, 2005).

Metode yang lebih baik adalah dengan meredam energi gempa sampai pada tingkat yang tidak membahayakan bangunan yakni menggunakan sistem *seismic isolation*. Sistem *seismic isolation* ini akan memisahkan struktur dari komponen horizontal pergerakan tanah dengan menyisipkan *base isolator* yang memiliki kekakuan horizontal relatif besar, antara struktur atas dan bawah (Kunde & Jangid, 2003).

Menurut FEMA 451B, *base isolator* dibedakan menjadi dua yakni *elastromeric bearings* (*low damping natural*, *high damping natural rubber bearing*, *lead rubber bearing*) dan *sliding bearing* (*flat sliding bearing*, *spherical sliding bearing*). Dalam analisis ini dipakai *lead rubber bearing* dikarenakan jenis *base isolator* tersebut memiliki kapasitas redaman yang tinggi (*high damping capacity*), fleksibilitas horizontal (*horizontal flexibility*) dan kekakuan vertikal yang tinggi (*high vertical stiffness*) (Buckle et al., 2006).

B. Rumusan Masalah

Selain penggunaan *base isolator*, jenis tanah dasar pada letak bangunan juga mempengaruhi perilaku dinamis struktur bangunan gedung. Berdasarkan hal tersebut maka perlu adanya analisis *response spectrum* mengenai:

1. Bagaimana pengaruh penggunaan *base isolator* berupa *lead rubber bearing* terhadap perilaku dinamis struktur bangunan gedung akibat beban gempa?
2. Bagaimana pengaruh perbedaan jenis tanah dasar (tanah sedang dan tanah lunak) pada letak bangunan terhadap perilaku dinamis struktur bangunan gedung akibat beban gempa?

C. Batasan Masalah

Pengerjaan penelitian ini memiliki batasan-batasan sebagai berikut:

1. Struktur bangunan gedung yang digunakan menggunakan data struktur gedung konvensional terdiri dari 12 lantai dengan panjang 49 m, lebar 14 m dan tinggi tiap lantai sebesar 3,8 m.
2. Letak bangunan diasumsikan berada pada dua jenis tanah dasar yang berbeda yakni tanah sedang dan tanah lunak.
3. Penggunaan *base isolator* berjenis *lead rubber bearing* dengan periode target (T_b) = 3 s, modulus geser (G) = 0,4 MPa, deformasi desain *lead rubber bearing* (D_D) = 100 mm, tegangan leleh *lead* (f_y^{pb}) = 5 MPa koefisien modifikasi respon (R) = 8, faktor pembesaran defleksi (C_d) = $5^{1/2}$, serta data-data desain lain dihitung sesuai beban vertikal yang diderita tumpuan pada struktur bangunan.

4. Persyaratan beton struktural untuk bangunan gedung sesuai dengan SNI 2847:2013.
5. Pembebanan minimum untuk perancangan bangunan gedung sesuai dengan SNI 1727:2013.
6. Perencanaan ketahanan gempa untuk struktur bangunan sesuai dengan SNI 1726:2012.
7. Gempa rencana ditetapkan sebagai gempa dengan kemungkinan terlewatinya besarnya selama umur struktur bangunan 50 tahun adalah sebesar 2%.
8. Perencanaan *lead rubber bearing* sesuai dengan International Building Code (IBC) 2000.
9. *Software* Microsoft Excel pada pembuatan spektrum respon desain dan analisis *response spectrum* menggunakan rumus empiris.
10. *Software* MATLAB untuk mencari nilai frekuensi getar (ω) dan eigenvalue dari persamaan determinan.
11. *Software* SAP2000 untuk pemodelan struktur bangunan gedung dan analisis *response spectrum* akibat beban gempa.

D. Tujuan Penelitian

Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui seberapa besar pengaruh dari penggunaan *lead rubber bearing* pada suatu struktur bangunan gedung yang berada pada dua jenis tanah dasar yang berbeda yakni tanah sedang dan tanah lunak dengan analisis *response spectrum*.

E. Manfaat Penelitian

Hasil dari penelitian ini diharapkan dapat memberikan informasi mengenai pengaruh dari penggunaan *base isolator* berupa *lead rubber bearing* pada struktur bangunan gedung yang berada pada dua jenis tanah dasar yang berbeda, yakni tanah sedang dan tanah lunak. Selain itu diharapkan dapat menambah pengetahuan dalam analisis *response spectrum* struktur bangunan gedung dengan bantuan *software* SAP2000 dan MATLAB.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

A. Gempa Bumi

Secara keilmuan, gempa bumi adalah suatu peristiwa pelepasan energi gelombang *seismic* yang terjadi secara tiba-tiba. Pelepasan energi ini diakibatkan karena adanya deformasi lempeng tektonik yang terjadi pada kerak bumi (Hartuti, 2009). Ilmu yang mempelajari tentang gempa disebut dengan seismologi. Frekuensi gempa bumi suatu wilayah, mengacu pada jenis dan ukuran gempa bumi yang di alami selama periode waktu. Gempa bumi diukur dengan menggunakan alat Seismometer, serta skala Richter adalah skala yang dilaporkan oleh observatorium seismologi nasional.

Kebanyakan gempa bumi disebabkan karena adanya pelepasan energi yang dihasilkan oleh tekanan akibat lempengan yang bergerak. Semakin lama, tekanan itu kian membesar dan akhirnya mencapai pada keadaan di mana tekanan tersebut tidak dapat ditahan lagi oleh pinggiran lempengan, pada saat itulah gempa bumi akan terjadi. Gempa bumi biasanya terjadi di perbatasan lempengan-lempengan tersebut.

Beberapa gempa bumi lain juga dapat terjadi karena pergerakan magma di dalam gunung berapi. Gempa bumi seperti itu merupakan gejala akan terjadinya letusan gunung berapi. Beberapa gempa bumi juga terjadi karena

menumpuknya massa air yang sangat besar di balik dam, seperti Dam Karibia di Zambia, Afrika. Sebagian lagi juga dapat terjadi karena injeksi atau akstraksi cairan dari/ke dalam bumi (contoh: pada beberapa pembangkit listrik tenaga panas bumi dan di Rocky Mountain Arsenal). Terakhir, gempa juga dapat terjadi dari peledakan bahan peledak. Hal ini dapat membuat para ilmuwan memonitor tes rahasia senjata nuklir yang dilakukan pemerintah. Gempa bumi yang disebabkan oleh manusia seperti ini dinamakan seismisitas terinduksi (Hartuti, 2009).

B. Klasifikasi Situs

Penjelasan mengenai prosedur klasifikasi suatu situs untuk memberikan kriteria desain seismik berupa faktor-faktor amplifikasi pada bangunan mengacu pada SNI 1726:2012 (Tata cara perencanaan ketahanan gempa untuk struktur bangunan gedung dan non gedung). Dalam perumusan kriteria desain seismik suatu bangunan di permukaan tanah atau penentuan amplifikasi besaran percepatan gempa puncak dari batuan dasar ke permukaan tanah untuk suatu situs, maka situs tersebut harus diklasifikasikan terlebih dahulu. Profil tanah di situs harus diklasifikasikan sesuai dengan Tabel 1, berdasarkan profil tanah lapisan 30 m paling atas. Penetapan kelas situs harus melalui penyelidikan tanah di lapangan dan di laboratorium, yang dilakukan oleh otoritas yang berwenang atau ahli desain geoteknik bersertifikat, dengan minimal mengukur secara independen dua dari tiga parameter tanah yang tercantum dalam Tabel 1.

Tabel 1. Klasifikasi situs

Kelas situs	\bar{v}_s (m/detik)	\bar{N} atau \bar{N}_{ch}	\bar{s}_u (kPa)
SA	> 1500	N/A	N/A
SB	750 - 1500	N/A	N/A
SC	350 - 750	> 50	≥ 100
SD	175 - 350	15 - 50	50 - 100
SE	< 175	< 15	< 50
Atau setiap profil tanah yang mengandung lebih dari 3 m tanah dengan karakteristik sebagai berikut:			
- Indeks plastisitas, $PI > 20$,			
- Kadar air, $w \geq 40 \%$,			
- Kuat geser niralir $\bar{s}_u < 25 \text{ kPa}$			
Setiap profil lapisan tanah yang memiliki salah satu atau lebih dari karakteristik berikut:			
- Rawan dan berpotensi gagal atau runtuh akibat beban gempa seperti mudah likuifasi, lempung sangat sensitif, tanah tersementasi lemah			
SF (tanah khusus)	- Lempung sangat organik dan/atau gambut (ketebalan $H > 7,5 \text{ m}$ dengan Indeks Plastisitas $PI > 75$		
	- Lapisan lempung lunak/setengah teguh dengan ketebalan $H > 7,5 \text{ m}$ dengan $\bar{s}_u < 50 \text{ kPa}$		

(Sumber: SNI 1726:2012)

Catatan: N/A = tidak dapat dipakai

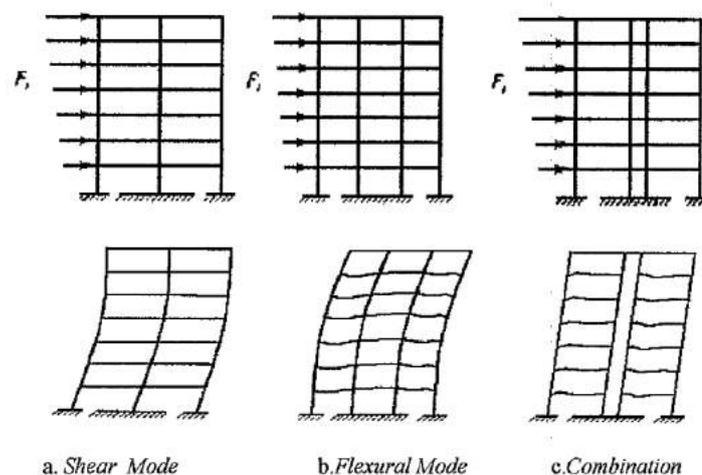
C. Prinsip *Shear Building*

Suatu struktur bangunan bertingkat yang mengalami gaya horizontal akan mengalami goyangan. Umumnya terdapat tiga macam pola goyangan yang dapat terjadi, dimana pola tersebut dipengaruhi oleh kombinasi kelangsingan struktur, jenis struktur utama penahan beban dan jenis bahan yang dipakai. Misalnya, struktur bangunan dengan *core cantilever concrete wall* akan berbeda polanya dengan struktur *open moment resisting concrete frame* (Priastiwi, 2005)

Pola goyangan yang pertama adalah bangunan yang bergoyang dengan dominasi geser (*shear mode*) atau pola goyangan geser. Pola semacam ini biasanya terjadi pada bangunan bertingkat banyak dengan portal terbuka sebagai struktur utama. Struktur bangunan fleksibel, sementara pelat lantai relatif kaku terhadap arah horizontal, seperti terlihat pada Gambar 1 (a).

Pola goyangan yang kedua adalah pola goyangan dengan dominasi lentur (*flexural mode*). Pola goyangan semacam ini biasanya terdapat pada bangunan yang mempunyai dinding yang kaku, seperti pada *frame wall* atau *cantilever wall*, yang kedua-duanya dijepit secara kaku di pondasinya. Struktur dinding yang kaku dengan anggapan jepit pada pondasinya akan membuat struktur dinding berperilaku seperti struktur dinding kantilever dan akan berdeformasi menurut prinsip lentur. Pola kedua ini terlihat pada Gambar 1 (b).

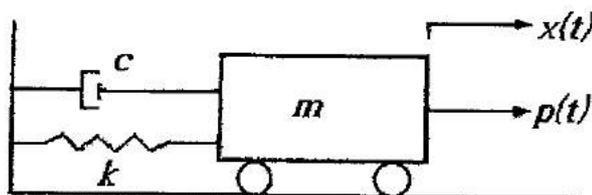
Pola goyangan yang ketiga adalah kombinasi diantara goyangan geser dan goyangan lentur. Struktur portal terbuka yang dikombinasikan dengan struktur dinding (*frame wall structure*) yang tidak terlalu kaku akan berperilaku goyangan kombinasi ini. Pola ketiga ini terlihat pada Gambar 1 (c).



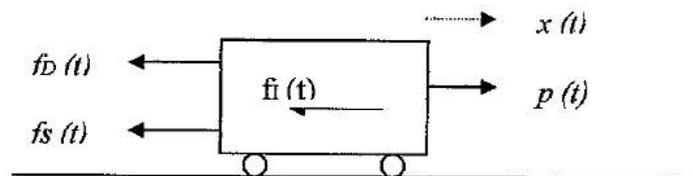
Gambar 1. Pola goyangan struktur bertingkat banyak
(Sumber: Chopra, 1995)

D. Sistem Berderajat Kebebasan Tunggal (*Single Degree of Freedom, SDOF*)

Sistem derajat kebebasan tunggal (SDOF) hanya akan mempunyai satu koordinat yang diperlukan untuk menyatakan posisi massa pada saat tertentu yang ditinjau. Bangunan satu tingkat adalah salah satu contoh bangunan derajat kebebasan tunggal. Struktur dengan derajat kebebasan tunggal (*single degree of freedom*) dapat dimodelkan sebagai berikut:



Gambar 2. Komponen yang bekerja dalam sistem
(Sumber: Chopra, 1995)



Gambar 3. Gaya-gaya yang bekerja
(Sumber: Chopra, 1995)

Komponen yang berpengaruh penting dalam sistem yang mengalami beban dinamik adalah massa (m), kekakuan (k), redaman (c) dan gaya luar ($p(t)$). Dalam pemodelan diasumsikan komponen massa terkumpul pada satu titik (*lumped mass*) dan komponen kekakuan lateral tidak mempunyai massa.

Sesuai prinsip kesetimbangan, maka untuk gambar di atas diperoleh:

$$f_I(t) + f_D(t) + f_S(t) = p(t) \quad \text{..... (2.1)}$$

Sesuai dengan prinsip D' Alembert (Clough & Penzien, 1993), yang menyatakan bahwa dalam kondisi dimana suatu partikel mengalami

pergerakan, maka pada partikel tersebut akan muncul gaya internal yang disebut inersia $f_I(t)$ yang besarnya adalah sama dengan massa dikalikan dengan percepatannya dan memiliki arah yang berlawanan dengan arah gerak dari massa tersebut.

$$f_I(t) = m\ddot{v}(t) \quad \dots\dots\dots (2.2)$$

Dengan mengasumsikan redaman yang bekerja adalah redaman *viscous* (proporsional terhadap kecepatan) maka gaya redaman $f_D(t)$ adalah hasil kali dari konstanta redaman dan kecepatan.

$$f_D(t) = c\dot{v}(t) \quad \dots\dots\dots (2.3)$$

Gaya pegas elastik $f_S(t)$ adalah hasil kali konstanta pegas dan simpangan.

$$f_S(t) = kv(t) \quad \dots\dots\dots (2.4)$$

Sehingga persamaan (2.1) dapat ditulis:

$$m\ddot{v}(t) + c\dot{v}(t) + kv(t) = p(t) \quad \dots\dots\dots (2.5)$$

Persamaan tersebut sering juga disebut persamaan umum gerak SDOF, dimana nilai $v(t)$ merupakan nilai simpangan yang tergantung pada waktu dan dapat didefinisikan sebagai:

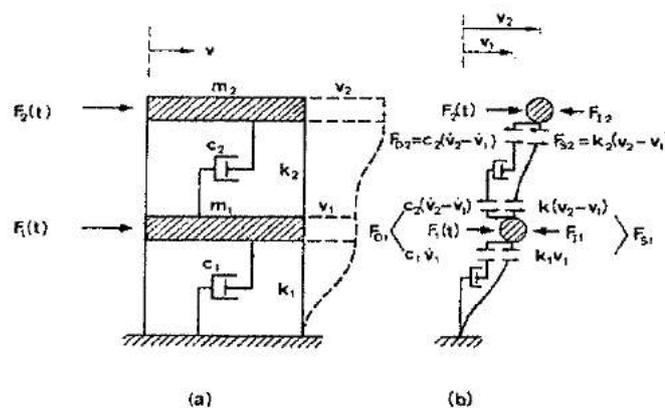
$$\ddot{v}(t) = \frac{d^2v(t)}{dt^2} \quad (\text{percepatan}) \quad \dots\dots\dots (2.6)$$

$$\dot{v}(t) = \frac{dv(t)}{dt} \quad (\text{kecepatan}) \quad \dots\dots\dots (2.7)$$

$$v(t) = \text{perpindahan/simpangan}$$

E. Sistem Berderajat Kebebasan Banyak (*Multi Degree of Freedom, MDOF*)

Untuk menyatakan persamaan diferensial gerakan pada struktur dengan derajat kebebasan banyak (MDOF), maka dipakai anggapan dan pendekatan seperti pada struktur dengan derajat kebebasan tunggal (SDOF). Struktur dengan derajat kebebasan banyak (*multi degree of freedom*) dapat dimodelkan dengan Gambar 4 di bawah ini:



Gambar 4. Pemodelan struktur dengan derajat kebebasan banyak (Sumber: Chopra, 1995)

Pemodelan struktur dengan derajat kebebasan seperti terlihat pada Gambar 4 tersebut mempunyai persamaan gerak:

$$m_1 \ddot{v}_1 + (c_1 + c_2) \dot{v}_1 - c_2 \dot{v}_2 + (k_1 + k_2) v_1 - k_2 v_2 = p_1 \quad \dots\dots\dots (2.8)$$

$$m_2 \ddot{v}_2 - c_2 \dot{v}_1 + c_2 \dot{v}_2 - k_2 v_1 + k_2 v_2 = p_2 \quad \dots\dots\dots (2.9)$$

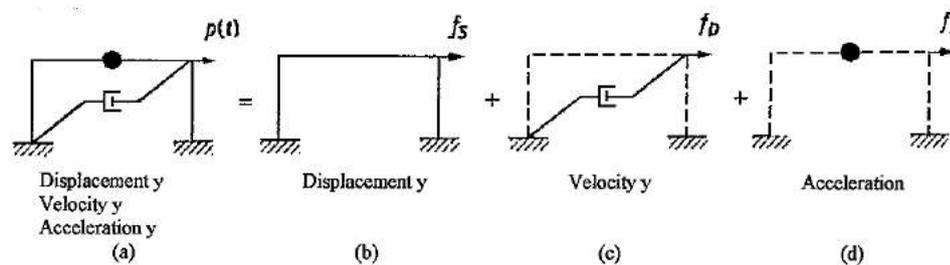
Persamaan-persamaan tersebut dapat ditulis dalam bentuk matriks sebagai berikut:

$$\begin{pmatrix} m_1 & 0 \\ 0 & m_2 \end{pmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{v}_1 \\ \ddot{v}_2 \end{Bmatrix} + \begin{pmatrix} c_1 + c_2 & -c_2 \\ -c_2 & c_2 \end{pmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{v}_1 \\ \dot{v}_2 \end{Bmatrix} + \begin{pmatrix} k_1 + k_2 & -k_2 \\ -k_2 & k_2 \end{pmatrix} \begin{Bmatrix} v_1 \\ v_2 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} p_1 \\ p_2 \end{Bmatrix} \quad \dots\dots\dots (2.10)$$

Persamaan (2.10) dapat ditulis dalam bentuk matriks yang lebih kompak,

$$[m]\{\ddot{v}\} + [c]\{\dot{v}\} + [k]\{v\} = \{p(t)\} \quad \dots\dots\dots (2.11)$$

dimana $[m]$, $[c]$ dan $[k]$ berturut-turut adalah matriks massa, matriks redaman dan matriks kekakuan. Sedangkan $\{\ddot{v}\}$, $\{\dot{v}\}$, $\{v\}$ dan $\{p(t)\}$ masing-masing adalah vektor percepatan, vektor kecepatan, vektor simpangan dan vektor beban. Secara visual Chopra (1995) menyajikan keseimbangan antara gaya dinamik, gaya pegas, gaya redam dan gaya inersia seperti terlihat pada Gambar 5.



Gambar 5. Keseimbangan gaya dinamik dengan f_S , f_D dan f_I
(Sumber: Chopra, 1995)

1. Getaran Bebas Tanpa Redaman

Untuk sistem dinamik bebas tanpa redaman, maka persamaan (2.11) menjadi:

$$[m]\{\ddot{v}\} + [k]\{v\} = \{0\} \quad \dots\dots\dots (2.12)$$

Salah satu solusi yang memenuhi syarat untuk persamaan (2.12) adalah:

$$\{v\} = \{A\} \sin \omega t$$

$$\{\dot{v}\} = \omega \{A\} \cos \omega t$$

$$\{\ddot{v}\} = -\omega^2 \{A\} \sin \omega t$$

$$\{\ddot{v}\} = -\omega^2 \{v\} \quad \dots\dots\dots (2.13)$$

Substitusi persamaan (2.13) ke dalam persamaan (2.12) menghasilkan:

$$-\omega^2 [m]\{v\} + [k]\{v\} = 0 \quad \dots\dots\dots (2.14)$$

$$[[k] - \omega^2[m]]\{v\} = 0 \quad \dots\dots\dots (2.15)$$

Nilai $v_1 \neq 0$, maka persamaan (2.15) mempunyai solusi (non-trivial) bila persamaan,

$$|[k] - \omega^2[m]| = 0 \quad \dots\dots\dots (2.16)$$

dimana jumlah “n” adalah jumlah derajat kebebasan.

Dengan mensubstitusikan ω^2 ke dalam persamaan (2.15)

$$[[k] - \omega^2[m]] \{A\} \sin \omega t = 0$$

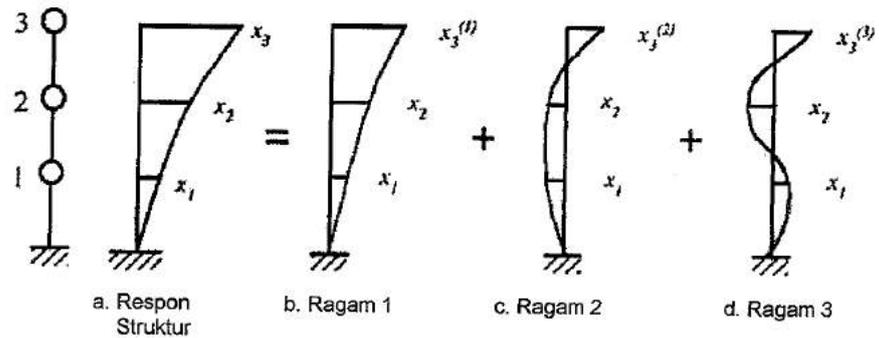
Maka besar $\{A\}$ tidak dapat diselesaikan, tetapi bentuk vektor arah $\{A\}$ dapat ditentukan

$$\{A^{(i)}\} = \{\phi^{(i)}\}Y^{(i)} \quad \dots\dots\dots (2.17)$$

$\{\phi^{(i)}\}$ disebut sebagai vektor eigen atau ragam getar dan $Y^{(i)}$ adalah amplitudo. Vektor-vektor eigen menggambarkan pola-pola deformasi dari struktur untuk setiap frekuensi getar.

2. Metode Analisis Ragam

Metode analisis ragam mendefinisikan bahwa simpangan struktur yang terjadi merupakan penjumlahan dari simpangan untuk masing-masing ragam getarnya. Hal tersebut terlihat pada Gambar 6.



Gambar 6. Peralihan struktur dengan metode analisis ragam (Sumber: Chopra, 1995)

a. Getaran bebas tanpa redaman

Dengan mengetahui ragam getar struktur ϕ dan adanya hubungan ortogonal, solusi dari persamaan (2.12) adalah:

$$\{v\} = \{\phi^{(1)}\}Y_1 + \{\phi^{(2)}\}Y_2 + \dots + \{\phi^{(n)}\}Y_n \quad \dots\dots\dots (2.18)$$

dalam bentuk matriks:

$$\begin{Bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ v_3 \end{Bmatrix} = \begin{pmatrix} \phi_1^{(1)} & \phi_1^{(2)} & \phi_1^{(3)} \\ \phi_2 & \phi_2 & \phi_2 \\ \phi_3 & \phi_3 & \phi_3 \end{pmatrix} \begin{Bmatrix} Y_1 \\ Y_2 \\ Y_3 \end{Bmatrix} \quad \dots\dots\dots (2.19)$$

$$\{v\} = [\phi]\{Y\}$$

Bila kondisi $\{v\}$ diketahui, misalnya kondisi awal ($t = 0$) maka $\{Y(t = 0)\}$ akan dapat diketahui:

$$\{v\} = [\phi]\{Y\} \quad \dots\dots\dots (2.20)$$

$$\{\phi^{(n)}\}^T [m]\{v\} = \{\phi^{(n)}\}^T [m][\phi]\{Y\} \quad \dots\dots\dots (2.21)$$

$$\begin{aligned} \{\phi^{(n)}\}^T [m][\phi]\{Y\} &= \{\phi^{(1)}\}^T [m]\{\phi^{(1)}\}Y_1 + \dots + \\ &\{\phi^{(n)}\}^T [m]\{\phi^{(n)}\}Y_n \quad \dots\dots\dots (2.22) \end{aligned}$$

Dengan sifat ortogonal:

$$\{\phi^{(n)}\}^T [m][\phi]\{Y\} = \{\phi^{(n)}\}^T [m]\{\phi^{(n)}\}Y_n \quad \dots\dots\dots (2.23)$$

$$\{\phi^{(n)}\}^T [m]\{v\} = \{\phi^{(n)}\}^T [m]\{\phi^{(n)}\}Y_n \quad \dots\dots\dots (2.24)$$

$$Y_n = \frac{\{\phi^{(n)}\}^T [m] \{v\}}{\{\phi^{(n)}\}^T [m] \{\phi^{(n)}\}} \quad \dots\dots\dots (2.25)$$

b. Getaran paksa tanpa redaman

Untuk sistem dinamik dengan getaran paksa tanpa redaman, maka persamaan (2.11) akan menjadi:

$$[m] \{\ddot{v}\} + [k] \{v\} = \{p(t)\} \quad \dots\dots\dots (2.26)$$

Persamaan ini biasa disebut *uncoupled* dan tidak dapat diselesaikan kecuali dengan pendekatan metode analisis ragam.

$$\{v\} = [\phi] \{Y\} \quad \dots\dots\dots (2.27)$$

Substitusikan persamaan (2.27) ke dalam persamaan (2.26)

$$[m][\phi] \{Y\} + [k][\phi] \{Y\} = \{p(t)\} \quad \dots\dots\dots (2.28)$$

$$\{\phi^{(n)}\}^T [m] \{\phi^{(n)}\} Y_n + \{\phi^{(n)}\}^T [k] \{\phi^{(n)}\} Y_n = \{\phi^{(n)}\}^T \{p(t)\} \quad \dots\dots\dots (2.29)$$

Definisikan

$$M_n = \{\phi^{(n)}\}^T [m] \{\phi^{(n)}\} \quad \dots\dots\dots (2.30)$$

$$K_n = \{\phi^{(n)}\}^T [k] \{\phi^{(n)}\} \quad \dots\dots\dots (2.31)$$

$$P_n = \{\phi^{(n)}\}^T \{p(t)\} \quad \dots\dots\dots (2.32)$$

sehingga persamaan (2.28) menjadi:

$$M_n Y_n + K_n Y_n = P_n(t) \quad \dots\dots\dots (2.33)$$

dengan

$$K_n = \omega_n^2 M_n \quad \dots\dots\dots (2.34)$$

selesaikan y_n untuk mode ke $-n$ sehingga untuk mode yang lain dapat dicari dengan cara yang sama dan didapatkan solusi akhirnya sebagai:

$$\{v\} = \{\phi^{(1)}\}y_1 + \{\phi^{(2)}\}y_2 + \dots + \{\phi^{(n)}\}y_n \quad \dots\dots\dots (2.35)$$

c. Getaran paksa dengan redaman

Persamaan untuk getaran paksa dengan redaman adalah:

$$[m]\{\ddot{v}\} + [c]\{\dot{v}\} + [k]\{v\} = \{p(t)\} \quad \dots\dots\dots (2.36)$$

Persamaan (2.36) disebut *coupled* dan tidak dapat diselesaikan kecuali dengan pendekatan metode analisis ragam yang merubah persamaan *coupled* menjadi persamaan *uncoupled* untuk struktur dengan derajat kebebasan tunggal pada mode n .

$$M_n \ddot{Y}_n + C_n \dot{Y}_n + K_n Y_n = P_n(t) \quad \dots\dots\dots (2.37)$$

Dimana

$$M_n = \{\phi^{(n)}\}^T [m] \{\phi^{(n)}\} \quad \dots\dots\dots (2.38)$$

$$C_n = \{\phi^{(n)}\}^T [c] \{\phi^{(n)}\} = 2\xi_n \omega_n M_n \quad \dots\dots\dots (2.39)$$

$$K_n = \{\phi^{(n)}\}^T [k] \{\phi^{(n)}\} \quad \dots\dots\dots (2.40)$$

$$P_n = \{\phi^{(n)}\}^T \{p(t)\} \quad \dots\dots\dots (2.41)$$

M_n , K_n dan C_n disebut persamaan massa, konstanta pegas dan koefisien redaman untuk n mode ragam getar. Atau persamaan tersebut bisa ditulis:

$$\ddot{Y}_n + 2\xi_n \omega_n \dot{Y}_n + \omega_n^2 Y_n = P_n(t) \quad \dots\dots\dots (2.42)$$

dengan:

$$\omega_n^2 = \frac{K_n}{M_n}$$

$$\xi_n = \frac{C_n}{2M_n \omega_n}$$

F. Persyaratan Umum Perencanaan Ketahanan Gempa untuk Gedung

Berdasarkan SNI 1726:2012

1. Gempa Rencana

Pengaruh gempa rencana harus ditinjau dalam perencanaan dan evaluasi struktur bangunan gedung dan non gedung, serta berbagai bagian dan peralatannya secara umum. Sesuai SNI 1726:2012, gempa rencana ditetapkan sebagai gempa dengan kemungkinan terlewati besarnya selama umur struktur bangunan 50 tahun adalah sebesar 2%.

2. Kombinasi dan Pengaruh Beban Gempa

Struktur, komponen elemen struktur dan elemen-elemen fondasi harus dirancang sedemikian hingga kuat rencananya sama atau melebihi pengaruh beban-beban terfaktor dengan kombinasi-kombinasi sebagai berikut:

- a. $1,4D$
- b. $1,2D + 1,6L + 0,5 (Lr \text{ atau } R)$
- c. $1,2D + 1,6 (Lr \text{ atau } R) + (L \text{ atau } 0,5W)$
- d. $1,2D + 1,0W + L + 0,5 (Lr \text{ atau } R)$
- e. $1,2D + 1,0E + L$
- f. $0,9D + 1,0W$
- g. $0,9D + 1,0E$

3. Koefisien Situs dan Parameter Respon Spektral

Untuk penentuan respon spektral percepatan gempa MCE_R di permukaan tanah, diperlukan suatu faktor amplifikasi seismik pada periode 0,2 detik dan periode 1 detik. Faktor amplifikasi meliputi faktor amplifikasi getaran terkait percepatan pada getaran periode pendek (F_a) dan faktor amplifikasi terkait percepatan yang mewakili getaran periode 1 detik (F_v). Parameter spektrum respon percepatan pada periode pendek (S_{MS}) dan periode 1 detik (S_{M1}) yang disesuaikan dengan pengaruh klasifikasi situs, harus ditentukan dengan perumusan berikut ini:

$$S_{MS} = F_a S_S \quad \dots\dots\dots (2.43)$$

$$S_{M1} = F_v S_1 \quad \dots\dots\dots (2.44)$$

Keterangan:

S_S = percepatan gempa MCE_R terpetakan untuk periode pendek

S_1 = percepatan gempa MCE_R terpetakan untuk periode 1 detik

dan koefisien situs F_a dan F_v mengikuti Tabel 2 dan Tabel 3.

Tabel 2. Koefisien situs (F_a)

Kelas situs	Parameter respon spektral percepatan gempa (MCE_R) terpetakan pada periode pendek, $T=0,2$ detik, S_S				
	$S_S \leq 0,25$	$S_S = 0,5$	$S_S = 0,75$	$S_S = 1,0$	$S_S \geq 1,25$
SA	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
SB	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
SC	1,2	1,2	1,1	1,0	1,0
SD	1,6	1,4	1,2	1,1	1,0
SE	2,5	1,7	1,2	0,9	0,9
SF			SS ^b		

(Sumber: SNI 1726:2012)

Catatan:

(a) Untuk nilai-nilai antara S_1 dapat dilakukan interpolasi linier

(b) SS = situs yang memerlukan investigasi geoteknik spesifik

Tabel 3. Koefisien situs (F_v)

Kelas situs	Parameter respon spektral percepatan gempa (MCE_R) terpetakan pada periode pendek, $T=1$ detik, S_I				
	$S_I \leq 0,1$	$S_I = 0,2$	$S_I = 0,3$	$S_I = 0,4$	$S_I \geq 0,5$
SA	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
SB	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
SC	1,7	1,6	1,5	1,4	1,3
SD	2,4	2,0	1,8	1,6	1,5
SE	3,5	3,2	2,8	2,4	2,4
SF	SS ^b				

(Sumber: SNI 1726:2012)

Catatan:

(a) Untuk nilai-nilai antara S_I dapat dilakukan interpolasi linier

(b) SS = situs yang memerlukan investigasi geoteknik spesifik

4. Parameter Percepatan Spektral Desain

Parameter percepatan spektral desain untuk periode pendek (S_{DS}) dan periode 1 detik (S_{D1}), harus ditentukan melalui perumusan berikut ini:

$$S_{DS} = \frac{2}{3} S_{MS} \quad \dots\dots\dots (2.45)$$

$$S_{D1} = \frac{2}{3} S_{M1} \quad \dots\dots\dots (2.46)$$

5. Spektrum Respon Desain

Spektrum respon adalah suatu spektrum yang disajikan dalam bentuk grafik antara periode getar struktur T , lawan respon-respon maksimum berdasarkan rasio redaman dan gempa tertentu. Respon-respon maksimum dapat berupa simpangan maksimum (*spectral displacement*, S_D) kecepatan maksimum (*spectral velocity*, S_V) atau percepatan maksimum (*spectral*

acceleration, S_A) massa struktur *single degree of freedom (SDOF)*, (Widodo, 2001).

Sebagaimana diketahui, SNI gempa Indonesia yang terakhir adalah SNI 1726:2012 (Tata Cara Perencanaan Ketahanan Gempa Untuk Struktur Bangunan Gedung dan Non Gedung) menggunakan gempa 2500 tahun, berbeda dengan SNI sebelumnya (SNI 1726:2002), yang mana SNI tersebut mengacu pada ASCE 7-10, IBC 2009 dan FEMA P-7502009.

Peta gempa 2500 tahun tersebut dibuat dengan suatu estimasi faktor aman minimum terhadap keruntuhan, yang disepakati, berdasarkan pengalaman dan keputusan konservatif, sebesar 1,5 sehingga dalam analisis akan digunakan nilai $2/3$ ($1/1,5$) yang artinya, jika suatu struktur terkena suatu gempa 1,5 kali lebih besar dari gempa rencana, maka kecil kemungkinan struktur tersebut untuk runtuh (Naeim, 2001). Akan tetapi, faktor aman sesungguhnya masih dipengaruhi oleh tipe struktur, *detailing*, dan lain-lain (Bozorgnia and Bertero, 2004).

Dengan pertimbangan bahwa pencegahan terhadap runtuhnya suatu bangunan yang dikenai gempa besar yang relatif jarang terjadi (gempa 2500 tahun) serta faktor aman 1,5 terhadap keruntuhan maka ASCE (dan IBC serta NEHRP) mendefinisikan desain gerakan tanah sebagai $1/1,5$ (atau $2/3$) kali gempa 2500 tahun (Naeim, 2001).

Penggunaan percepatan 0,2 detik dan 1,0 detik adalah karena pada interval 0,2 detik dan 1,0 detik mengandung energi gempa terbesar (AISC, 2005). Selain itu, periode 0,2 detik umumnya mewakili periode getar struktur

terpendek (bangunan 2 tingkat) yang direncanakan menurut ketentuan ASCE yang telah mempertimbangkan efek dari tanah, goyangan pada pondasi dan faktor lain yang biasanya diabaikan dalam analisis struktur (Taranath, 2010).

Spektrum respon pada ASCE mengacu pada spektrum respon elastik, yang direduksi dengan suatu nilai R dan redaman 5% (FEMA 451B, 2007).

Penggunaan nilai R tersebut diperhitungkan terhadap:

- a. Suplai daktilitas yang diantisipasi
- b. *Overstrength* (kuat lebih)
- c. Redaman (jika berbeda dari 5 %)
- d. Kinerja struktur yang sama yang telah lalu
- e. Redundansi

Spektrum respon desain diperlukan dan prosedur gerak tanah dari spesifik-situs tidak digunakan, sehingga kurva spektrum respon desain harus dikembangkan dengan mengacu Gambar 7 dan mengikuti ketentuan di bawah ini:

1. Untuk periode yang lebih kecil dari T_0 , spektrum respon percepatan desain (S_a), harus diambil dari persamaan:

$$S_a = S_{DS} \left(0,4 + 0,6 \frac{T}{T_0} \right) \quad \dots\dots\dots (2.47)$$

2. Untuk periode lebih besar dari atau sama dengan T_0 dan lebih kecil dari atau sama dengan T_S , spektrum respon percepatan desain (S_a), sama dengan S_{DS} .

3. Untuk periode lebih besar dari T_s , spektrum respon percepatan desain (S_a), diambil berdasarkan persamaan:

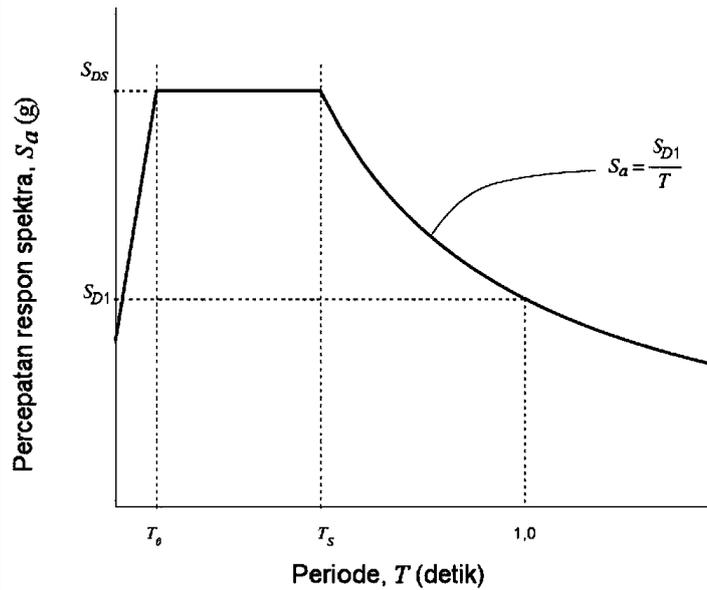
$$S_a = \frac{S_{D1}}{T} \quad \dots\dots\dots (2.48)$$

Keterangan:

- S_{DS} = percepatan desain pada periode pendek
- S_{D1} = percepatan desain pada periode 1 detik
- T = periode getar fundamental struktur

$$T_0 = 0,2 \frac{S_{D1}}{S_{DS}} \quad \dots\dots\dots (2.49)$$

$$T_s = \frac{S_{D1}}{S_{DS}} \quad \dots\dots\dots (2.50)$$



Gambar 7. Spektrum respon desain
(Sumber: SNI 1726:2012)

6. Penentuan dan Batasan Simpangan Antar Lantai

Simpangan (*drift*) adalah suatu perpindahan lateral relatif antara dua tingkat bangunan yang berdekatan atau dapat dikatakan simpangan mendatar tiap-tiap tingkat bangunan (*horizontal story to story deflection*). Simpangan lateral dari suatu sistem struktur akibat beban gempa sangatlah

penting yang dilihat dari tiga pandangan yang berbeda (Naeim, 1989), antara lain :

- a. Kestabilan struktur (*structural stability*).
- b. Kesempurnaan arsitektural (*architectural integrity*) dan potensi kerusakan bermacam-macam komponen bukan struktur.
- c. Kenyamanan manusia (*human comfort*), sewaktu terjadi gempa bumi dan sesudah bangunan mengalami gerakan gempa.

Menurut Richard N. White (1987), dalam perencanaan bangunan tinggi selalu dipengaruhi oleh lendutan (*deflection*), bukannya oleh kekuatan (*strenght*).

Penentuan simpangan antar lantai tingkat desain (Δ) harus dihitung sebagai perbedaan defleksi pada pusat massa di tingkat teratas dan terbawah yang ditinjau seperti Gambar 8.

Defleksi pusat massa di tingkat x (δ_x) harus ditentukan sesuai persamaan berikut:

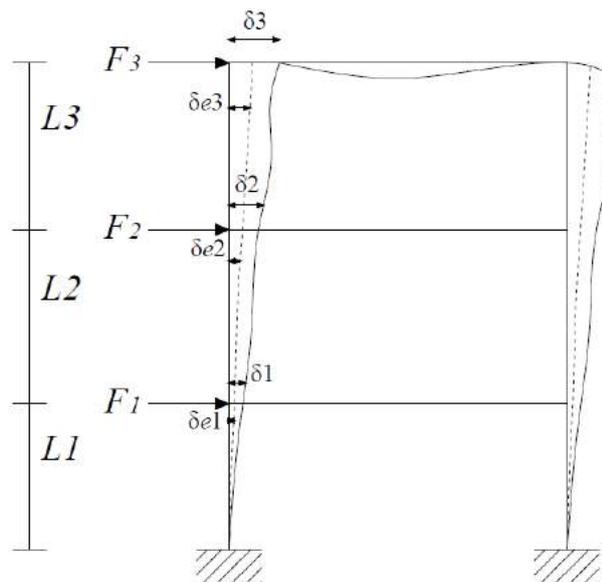
$$\delta_x = \frac{C_d \delta_{xe}}{I_e} \dots\dots\dots (2.51)$$

Keterangan:

C_d = faktor pembesaran defleksi (Tabel 9 pada SNI 1726:2012)

δ_{xe} = defleksi yang ditentukan dengan analisis elastik

I_e = faktor keutamaan gempa



Gambar 8. Penentuan simpangan antar lantai
(Sumber: SNI 1726:2012)

Simpangan antar lantai tingkat desain (Δ) tidak boleh melebihi simpangan antar lantai tingkat ijin (Δ_a) seperti didapatkan dari Tabel 4 untuk semua tingkat.

Tabel 4. Simpangan antar lantai tingkat ijin (Δ_a)

Struktur	Kategori resiko		
	I atau II	III	IV
Struktur selain dari struktur dinding geser batu bata, 4 tingkat atau kurang dengan dinding interior, partisi, langit-langit dan sistem dinding eksterior yang telah didesain untuk mengakomodasi simpangan antar lantai tingkat	$0,025h_{sx}$	$0,020h_{sx}$	$0,015h_{sx}$
Struktur dinding geser kantilever batu bata	$0,010h_{sx}$	$0,010h_{sx}$	$0,010h_{sx}$
Struktur dinding geser batu bata lainnya	$0,007h_{sx}$	$0,007h_{sx}$	$0,007h_{sx}$
Semua struktur lainnya	$0,020h_{sx}$	$0,015h_{sx}$	$0,010h_{sx}$

(Sumber: SNI 1726:2012)

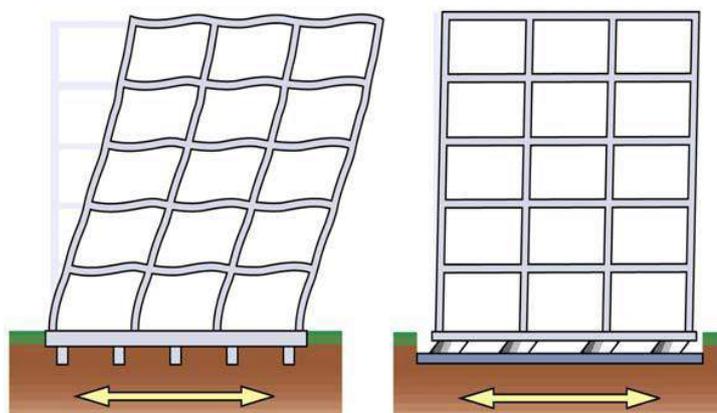
Keterangan:

h_{sx} adalah tinggi tingkat di bawah tingkat x

G. *Seismic Isolation*

Seismic isolation adalah teknik modifikasi untuk mengurangi efek dari gempa bumi pada gedung bertingkat tinggi dan struktur lainnya. Sistem *seismic isolation* ini akan memisahkan struktur dari komponen horizontal pergerakan tanah dengan menyisipkan *base isolator* yang memiliki kekakuan horizontal yang relatif besar, antara struktur atas dan bawah (Kunde & Jangid, 2003). Gedung bertingkat tinggi dengan *base isolator* memiliki frekuensi getaran yang jauh lebih kecil dibandingkan dengan gedung bertingkat tinggi konvensional dan frekuensi dominan dari gerakan tanah. Akibatnya percepatan gempa yang bekerja pada gedung menjadi lebih kecil.

Base isolator mereduksi kekuatan gempa mendekati kapasitas batas elastis dari elemen struktur untuk menghindari atau membatasi deformasi plastis dan kerusakan gedung. Bangunan tingkat tinggi yang menggunakan *base isolator*, menderita gaya geser yang ditransmisikan dari substruktur ke superstruktur dapat dikurangi dengan menggeser periode alami dari gedung.

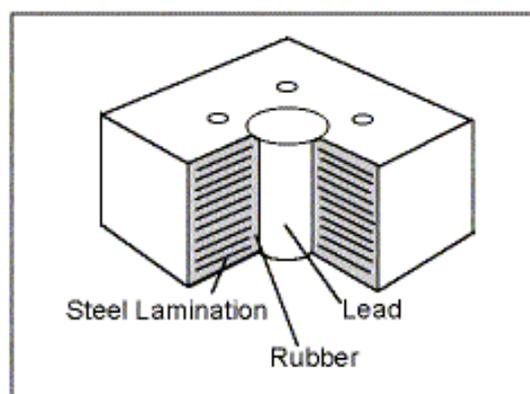


Gambar 9. Perilaku struktur bangunan dengan *base isolation system*
(Sumber: FEMA 451B, 2007)

H. *Lead Rubber Bearing (LBR)*

Lead rubber bearing merupakan *base isolator* yang paling sering digunakan yang merupakan salah satu jenis *laminated rubber bearing*. *Lead rubber bearing* memiliki kapasitas redaman yang tinggi (*high damping capacity*), fleksibilitas horizontal (*horizontal flexibility*) dan kekakuan vertikal yang tinggi (*high vertical stiffness*) (Buckle et al., 2006). *Lead rubber bearing* ditemukan di Selandia Baru pada tahun 1975 dan sudah digunakan secara luas di Selandia Baru, Jepang dan Amerika Serikat.

Lead rubber bearing terbuat dari lapisan karet dan dipadu dengan lapisan baja, tetapi di tengahnya diberi rongga yang diisi dengan *lead* (perunggu) seperti yang ditunjukkan pada Gambar 10. Lapisan karet di vulkanisir sehingga bisa bergerak ke semua arah horizontal dan dilaminasi di antara lapisan baja yang mampu menahan beban aksial. *Lead* (perunggu) yang terletak di tengah berfungsi sebagai tempat penyerapan energi sehingga mampu mengurangi gaya gempa dan perpindahan (Naeim & Kelly, 1999).



Gambar 10. *Lead rubber bearing*
(Sumber: FEMA 451B, 2007)

Penentuan data *lead rubber bearing* berdasarkan International Building Code (IBC) 2000 adalah sebagai berikut ini:

1. Menentukan kekakuan efektif (K_{eff}) dari *lead rubber bearing*

$$K_{eff} = K_d \frac{Q_d}{D} \quad D \geq D_y \quad \dots\dots\dots (2.52)$$

dimana:

K_d = kekakuan sebelum elastis

Q_d = kekakuan karakteristik

D = perpindahan horizontal

D_y = perpindahan setelah leleh

2. Menentukan periode alami (T)

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{W}{K_{eff} \times g}} \quad \dots\dots\dots (2.53)$$

dimana:

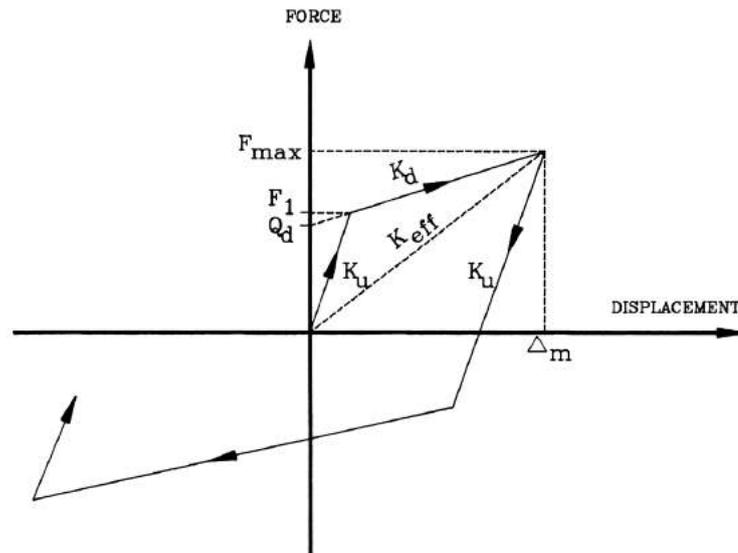
g = percepatan gravitasi (9,81 m/s²)

3. Menentukan kekakuan elastis (K_u)

$$K_u = 10K_d \quad \dots\dots\dots (2.54)$$

4. Menentukan nilai redaman kritis (β_{eff})

$$\beta_{eff} = \frac{4Q_d \left(\frac{D-Q_d}{9K_u} \right)}{2\pi(K_u D - Q_d)D} \quad \dots\dots\dots (2.55)$$



Gambar 11. *Lead rubber bearing hysteresis loops*
(Sumber: IBC-2000)

I. Pembebanan Struktur

Pembebanan merupakan rincian dari beban yang bekerja dalam suatu perencanaan struktur. Dalam perencanaan struktur bangunan gedung ini, adapun beban yang bekerja adalah sebagai berikut:

1. Beban Mati (*Dead Load*)

Beban mati adalah beban yang ditimbulkan akibat berat sendiri struktur gedung tersebut. Elemen-elemen seperti kolom, balok, pelat dan komponen struktur lainnya termasuk ke dalam beban mati. (SNI 1727:2013).

2. Beban Mati Tambahan (*Super Impose Dead Load*)

Beban mati tambahan adalah beban mati yang diakibatkan oleh elemen-elemen tambahan yang ada pada struktur dan bersifat permanen, seperti

plafon, dinding partisi tetap, *finishing*, klading gedung, komponen arsitektural dan struktur lainnya serta peralatan layan terpasang lain termasuk berat keran (SNI 1727:2013).

Tabel 5. Besarnya beban mati tambahan

Beban mati tambahan	Besar beban
Beton bertulang	23,544 kN/m ³
Dinding dan plesteran	
Tebal 15 cm	2,943 kN/m ²
Tebal 10 cm	1,962 kN/m ²
Langit-langit + penggantung	0,176 kN/m ²
Lantai keramik	0,235 kN/m ²
Spesi per cm tebal	0,206 kN/m ²
Mekanikal dan elektrik	0,245 kN/m ²

3. Beban Hidup

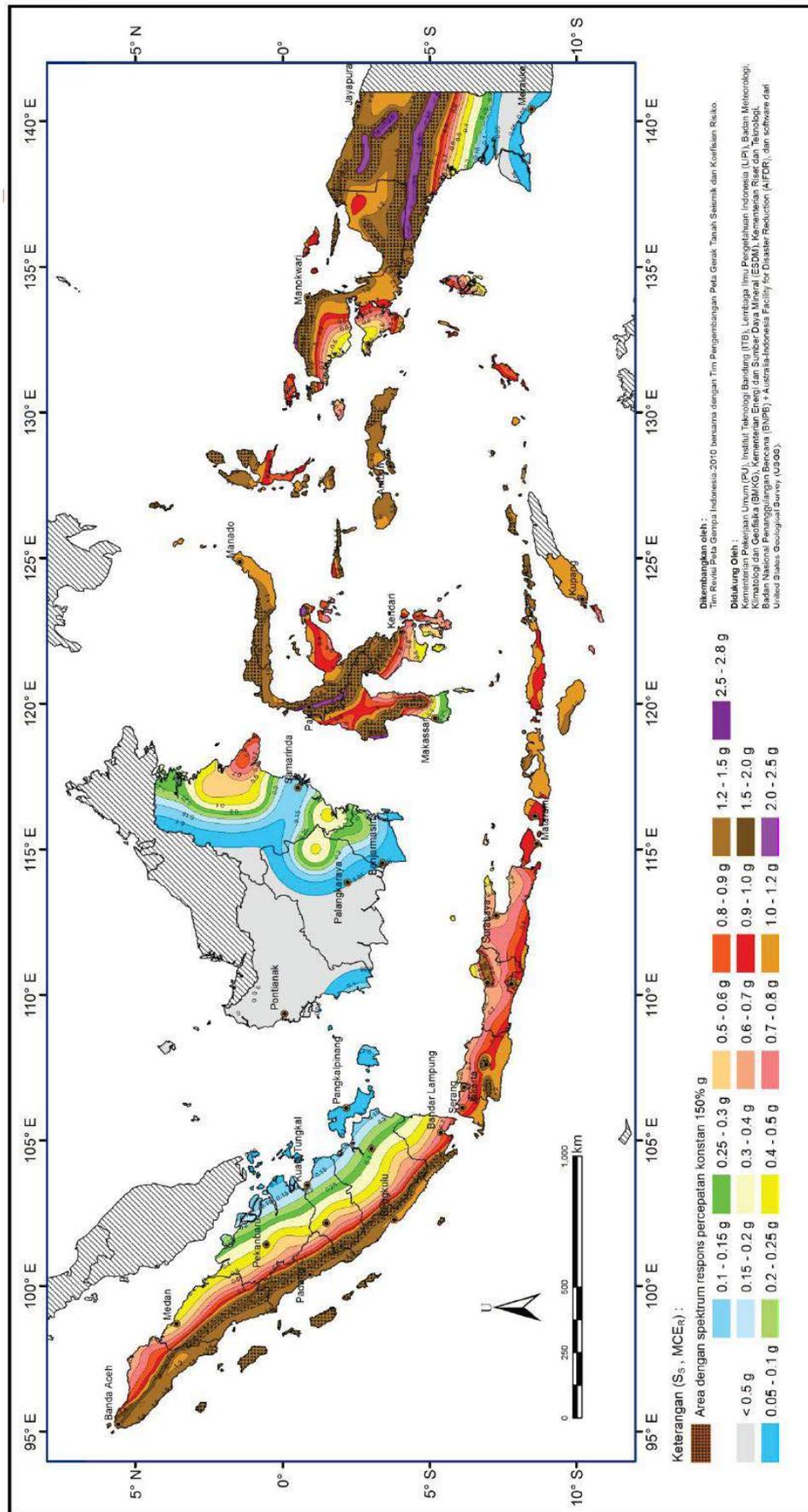
Beban hidup adalah beban yang diakibatkan oleh pengguna dan penghuni bangunan gedung atau struktur lain yang tidak termasuk beban konstruksi dan beban lingkungan, seperti beban angin, beban hujan, beban gempa, beban banjir, atau beban mati (SNI 1727:2013).

4. Beban Gempa

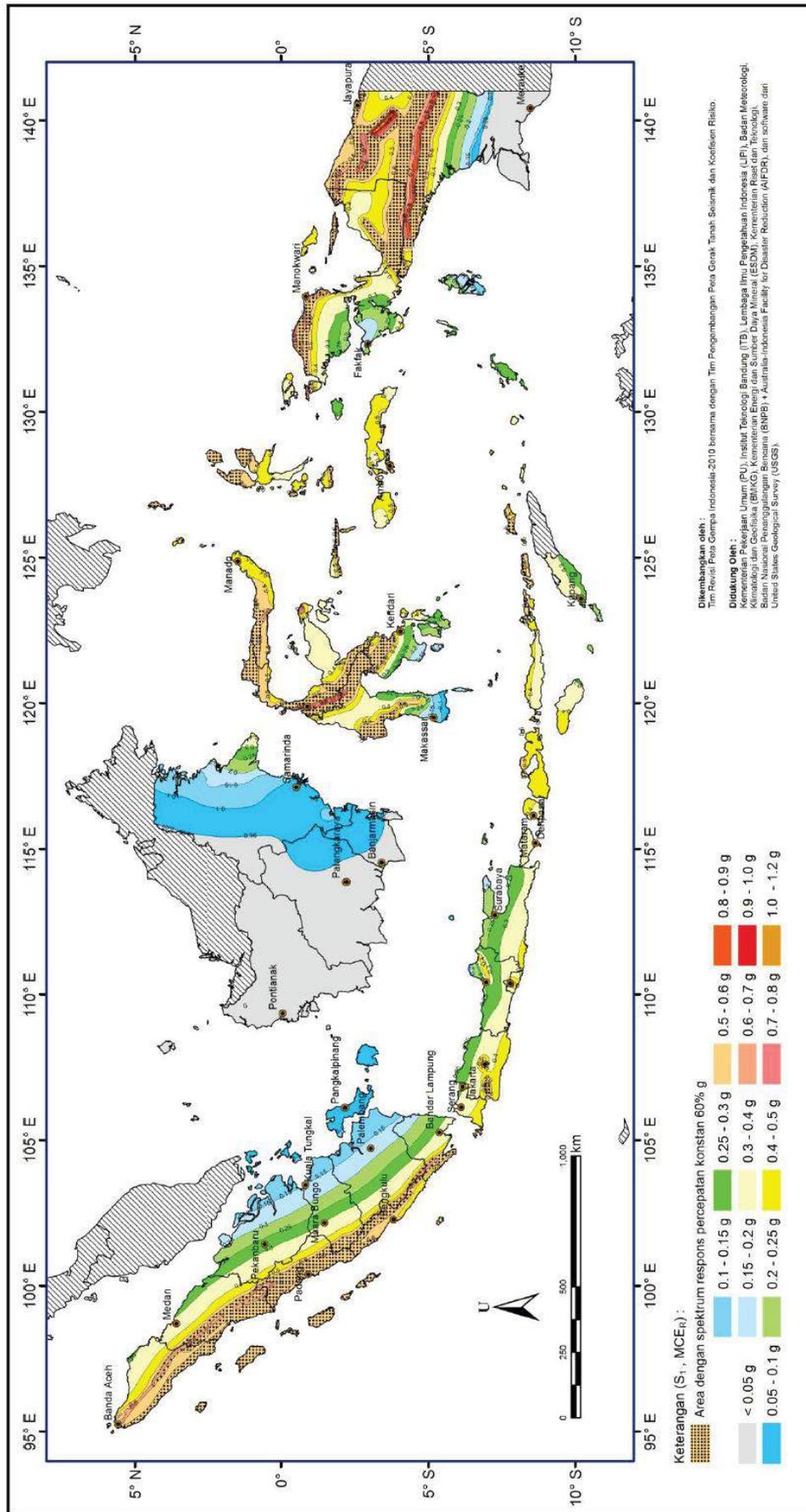
Beban gempa adalah semua beban statik ekuivalen yang bekerja pada gedung atau bagian gedung yang menirukan pengaruh dari gerakan tanah akibat gempa tersebut.

Dalam analisis ini, penggunaan beban gempa mengacu pada peraturan terbaru perencanaan ketahanan gempa untuk gedung yaitu SNI 1726:2012. Analisis beban gempa yang dilakukan menggunakan metode *response spectrum* dengan pembuatan spektrum respon desain secara manual

berdasarkan koefisien-koefisien situs dan parameter-parameter respon spektra percepatan gempa maksimum yang dipertimbangkan risiko-tertarget (MCE_R). Adapun peta koefisien-koefisien situs tersebut adalah sebagai berikut:



Gambar 12. Peta parameter S_s (percepatan batuan dasar pada perioda pendek)
(Sumber : SNI 1726:2012)



Gambar 13. Peta parameter S_1 (percepatan batuan dasar pada perioda 1 detik)
(Sumber : SNI 1726:2012)

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

A. Pendekatan Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif, karena hasil penelitian yang dilakukan berupa angka atau bilangan yaitu merupakan hasil analisis dinamik *response spectrum* suatu struktur bangunan gedung. Pada analisis penelitian ini digunakan *software* Microsoft Excel, MATLAB dan SAP2000.

B. Lokasi Penelitian

Lokasi penelitian merupakan tempat dilakukannya penelitian. Dalam hal ini, penelitian dilakukan menggunakan suatu struktur bangunan gedung di daerah kota Bandar Lampung.

C. Data Penelitian

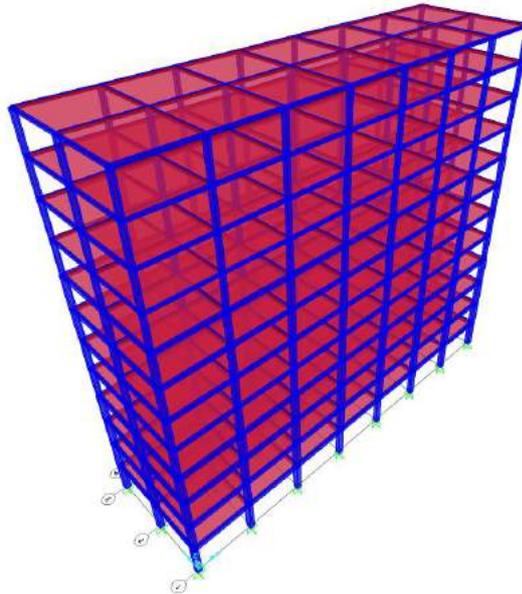
Sebuah struktur gedung beton bertulang yang terdiri dari pelat, balok dan kolom dengan fokus penelitian adalah analisis dinamik *response spectrum* (non-linier) berdasarkan SNI 1726:2012 serta menggunakan salah satu jenis *seismic isolation system* yakni *lead rubber bearing*.

Adapun spesifikasi struktur bangunan gedung tersebut antara lain :

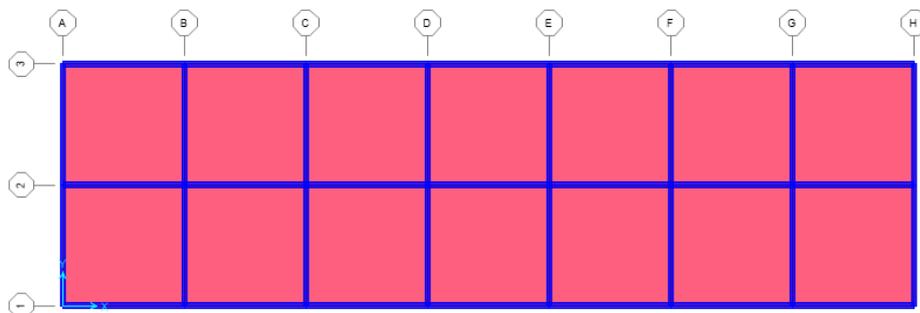
1. Jenis gedung : Perkantoran
2. Jumlah lantai : 12 lantai

3. Dimensi lantai : 49 m x 14 m
4. Tinggi lantai : 3,8 m
5. Mutu bahan
 - a. Beton
 - f_c' (kolom) : 35 MPa (sumber : SNI 2847:2013)
 - f_c' (balok dan pelat) : 25 MPa (sumber : SNI 2847:2013)
 - b. Tulangan Baja
 - BJTD-40 untuk besi tulangan ulir (sumber : SNI 2847:2013)
6. Lokasi bangunan : Bandar Lampung
7. Jenis tanah dasar : Sedang dan lunak
8. Tebal pelat
 - a. Lantai : 120 mm
 - b. Atap : 100 mm
9. Dimensi elemen struktur
 - a. Kolom : 70 x 70 cm
 - b. Balok : 40 x 60 cm
10. *Lead rubber bearing*
 - a. Tegangan leleh *lead* (f_y^{pb}) : 5 MPa
 - b. Modulus geser (G) : 0,4 MPa
 - c. Deformasi desain *lead rubber bearing* : 100 mm
11. Pembebanan
 - a. Beban hidup : 2,4 kN/m² (Tabel 2.6)
 - b. Beban mati tambahan : 1,274 kN/m²
 - c. Beban gempa : Spektrum Respon Desain

Berikut ini merupakan gambar pemodelan struktur bangunan gedung tersebut dibuat menggunakan *software* SAP2000.



Gambar 14. Pemodelan struktur tiga dimensi bangunan gedung dengan SAP2000



Gambar 15. Pemodelan balok dan pelat arah sumbu x-y

D. Prosedur Penelitian

Untuk melakukan penelitian terkait dengan analisis dinamik struktur bangunan gedung menggunakan sistem *seismic isolation lead rubber bearing*, prosedur penelitian yang dilakukan antara lain:

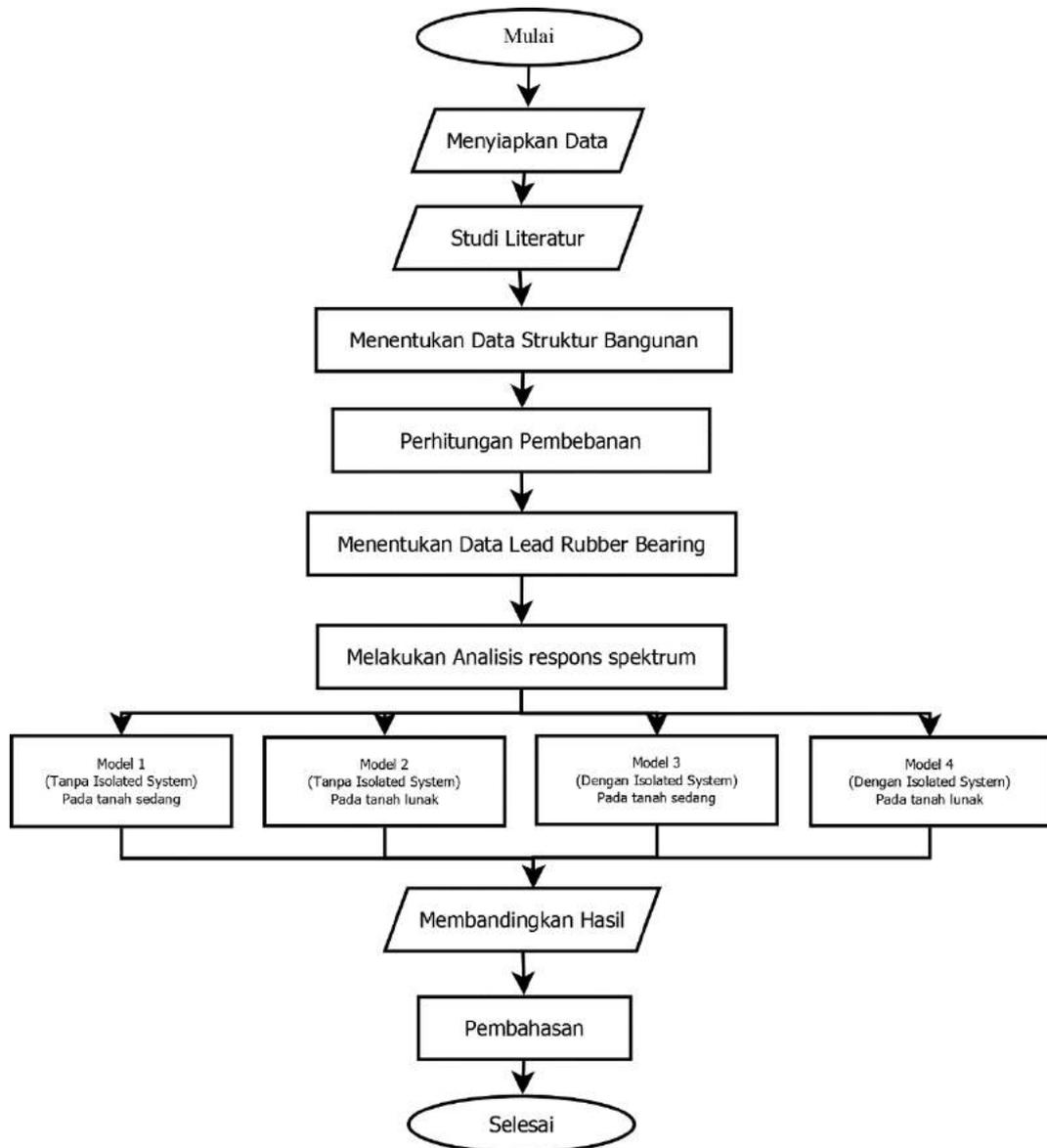
1. Mempersiapkan data penelitian.
2. Melakukan studi literatur.

3. Membuat *preliminary design* struktur bangunan gedung.
4. Menghitung pembebanan struktur, yaitu:
 - a. Beban mati (*dead load*)
 - b. Beban mati tambahan (*super impose dead load*)
 - c. Beban hidup (*live load*)
 - d. Beban gempa (*earthquake load*)
5. Membuat spektrum respon desain untuk kota Bandar Lampung.
6. Menghitung periode alami dan *mode shape* struktur bangunan gedung baik menggunakan rumus empiris maupun software SAP2000.
7. Menganalisis dinamik *response spectrum* struktur bangunan gedung akibat gempa dengan software SAP2000.
8. Menganalisis dinamik *response spectrum* struktur bangunan gedung akibat gempa menggunakan *seismic isolation system* dengan software SAP2000.
9. Menyimpulkan hasil penelitian.

E. Kerangka Penelitian

Adapun langkah-langkah dalam penelitian ini dapat dilihat pada *flow chart*

berikut:



Gambar 16. *Flow chart* penelitian

BAB V PENUTUP

A. Kesimpulan

Berdasarkan uraian dan hasil pembahasan pada penelitian ini dapat disimpulkan bahwa:

1. Penggunaan *lead rubber bearing* pada struktur bangunan gedung memberikan deformasi lateral tiap lantai yang lebih besar dibandingkan pada struktur dengan *fix base*. Akan tetapi terjadi deformasi lateral pada *base floor* untuk struktur gedung dengan *base isolator*, sehingga *interstory drift* akan lebih kecil. *Interstory drift* maksimum masing-masing untuk bangunan tanpa dan dengan menggunakan *lead rubber bearing* sebesar 4,3335 mm dan 0,5741 mm pada tanah sedang, serta 6,8606 mm dan 0,9139 mm pada tanah lunak. Sehingga penggunaan *lead rubber bearing* dapat mereduksi *interstory drift* sampai 91%.
2. Perbedaan hasil analisis *response spectrum* struktur bangunan gedung, pada jenis tanah dasar sedang dan lunak disebabkan karena dua jenis tanah dasar tersebut memiliki karakteristik yang berbeda. Percepatan respon spektra (S_a) pada tanah lunak lebih tinggi sehingga menyebabkan deformasi dan beban kerja yang diperoleh lebih besar.

3. Analisis *response spectrum* dengan menggunakan *software* SAP2000, menunjukkan bahwa periode getar struktur pada bangunan tanpa dan menggunakan *lead rubber bearing* berturut sebesar 2,3940 dan 4,0471 detik. Sehingga dari analisis tersebut diketahui bahwa penggunaan *lead rubber bearing* meningkatkan periode getar struktur mencapai 69%.
4. Beban aksial yang diderita tumpuan sangat berpengaruh dalam perhitungan *lead rubber bearing*. Semakin besar beban aksial yang diderita tumpuan, maka kekakuan efektif (K_{eff}) yang diperlukan semakin besar untuk mencapai periode target (T_b) dan *displacement design* (D_D) yang telah ditetapkan.
5. Deformasi *base floor* pada model struktur menggunakan *lead rubber bearing* pada kelas situs tanah sedang dan tanah lunak masing-masing sebesar 37,5549 mm dan 59,7813 mm. Nilai tersebut tidak melewati deformasi desain pada *lead rubber bearing* yakni sebesar 100 mm.
6. Pemodelan struktur gedung pada lokasi dengan dua kelas situs yang berbeda yakni tanah sedang dan tanah lunak, menunjukkan bahwa deformasi lateral tiap lantai dan *interstory drift* pada tanah sedang lebih kecil dibandingkan pada tanah lunak.
7. Batas kenyamanan suatu struktur gedung harus terpenuhi sesuai dengan SNI 1726:2012 Pasal 7.12.1. Besarnya simpangan antar lantai ijin sesuai ketentuan tersebut sebesar 76 mm. Sehingga berdasarkan analisis yang

telah dilakukan, diperoleh *interstory drift* yang masih memenuhi nilai ijin tersebut.

8. Penggunaan *lead rubber bearing* sebagai *seismic isolation system* pada gedung beton bertulang, akan menurunkan gaya-gaya dalam pada struktur sehingga seolah-olah struktur gedung tersebut terletak di daerah dengan zona gempa yang lebih kecil.

B. Saran

Dengan membandingkan hasil dari analisis menggunakan perhitungan manual dan *software* SAP2000, diperoleh hasil yang sangat berbeda pada *interstory drift*, gaya dalam dan periode getar struktur dikarenakan momen pada *software* SAP2000 ikut diperhitungkan. Untuk itu, pada penelitian selanjutnya diharapkan:

1. Perlu adanya analisis lebih lanjut mengenai penggunaan *lead rubber bearing* pada letak bangunan dengan jenis tanah dasar lainnya.
2. Perlu adanya analisis lebih lanjut mengenai lokasi pemasangan *lead rubber bearing* pada elemen struktur lain, misalnya pemasangan pada tengah kolom.
3. Perlu adanya penelitian lebih lanjut mengenai penggunaan *lead rubber bearing* dengan pembuatan benda uji, tidak hanya dengan pemodelan menggunakan *software*.

DAFTAR PUSTAKA

- American Institute of Steel Construction, Inc. 2005. *Seismic Design Manual (AISC 327-05)*. Chicago
- Badan Standardisasi Nasional. 2012. *Tata Cara Perencanaan Ketahanan Gempa untuk Struktur Bangunan Gedung dan Non Gedung (SNI-1726-2012)*. Jakarta
- Badan Standardisasi Nasional. 2013. *Beban Minimum untuk Perancangan Bangunan Gedung dan Struktur Lain (SNI 03-1727-2013)*. Jakarta
- Badan Standardisasi Nasional. 2013. *Persyaratan Beton Struktural untuk Bangunan Gedung (SNI 03-2847-2013)*. Jakarta
- Bozorgnia, Y., dan Bertero, V. 2004. *Earthquake Engineering, From Engineering Seismology to Performance-Based Engineering*. CRC Press. New York.
- Buckle, I. G., Constantinou, M. C., Diceli, M., & Ghasemi, H. 2006. *Seismic Isolation of Highway Bridges*
- Chopra, A. K. 1995. *Dynamics of Structures: Theory and Applications to Earthquake Engineering*. Prentice Hall, New Jersey
- Clough, R. W., dan Penziens, J. P. 1993. *Dynamics of Structures*. Singapore: Mc Graw Hill Book Company
- FEMA 451B. 2007. *NEHRP Recommended Provisions for New Buildings & Other Structures – Training & Instructional Materials*. Washington
- Hartuti, E. R. 2009. *Buku Pintar Gempa*. Diva Press. Yogyakarta
- Kunde, M., dan Jangid, R. 2003. *Seismic Behavior of Isolated Bridges: A State of The Art Review. Electronic Journal of Structural Engineering*, 3 (2), 140-169
- Naeim, F. 2001. *The Seismic Design Handbook, 2nd ed.* Kluwer Academic Publishers. Boston

- Naeim, F., dan Kelly, J. M. 1999. *Design of Seismic Isolated Structures: From Theory to Practice*: John Wiley & Sons
- Priastiwi, Y. A. 2005. *Studi Komparasi Antara Analisis Statis dan Dinamis 3D Pada Bangunan Gedung Beraturan dan Tidak Beraturan*. Universitas Diponegoro. Semarang
- Taranath, B. S. 2010. *Reinforced Concrete Design of Tall Buildings*. CRC Press. New York
- White, R. N. 1987. *Building Structural Design Handbook*. Print Book. English
- Widodo. 2001. *Respon Dinamik Struktur Elastik*. Jurusan Teknik Sipil, FTSP, Universitas Islam Indonesia. Yogyakarta