

**ANALISIS PERBANDINGAN PENGGUNAAN *SINGLE FRICTION*
PENDULUM SYSTEM (SFPS) DAN NON SFPS PADA
BANGUNAN BETON BERTULANG
(Studi Kasus: Gedung B Rumah Sakit Umum Muhammadiyah Metro)**

Oleh

HASTARI AGNESTIANANDA TRANGGONO

Skripsi

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

Pada

**Program Studi S1 Teknik Sipil
Jurusan Teknik Sipil
Fakultas Teknik Universitas Lampung**



**FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2024**

ABSTRACT

COMPARATIVE ANALYSIS OF THE USE OF SINGLE FRICTION PENDULUM SYSTEM (SFPS) AND NON SFPS IN REINFORCED CONCRETE BUILDINGS

(Case Study: Building B of Muhammadiyah Metro General Hospital)

By

HASTARI AGNESTIANANDA TRANGGONO

Judging from its geographical location, Indonesia is a country that is often hit by earthquakes. Conventionally, building damage due to earthquake forces can be prevented by strengthening the building structure. The use of a damping system is specifically for buildings that are at risk of experiencing large acceleration and lateral displacement when subjected to earthquake loads. The concept of using an isolation system (base isolator) is to increase the natural period of the structure and provide additional damping. One type of isolation system is the Single Friction Pendulum System (SFPS). The purpose of this study was to determine the influence, period, interstory drift, and base shear force received by buildings with SFPS base isolators compared to non-SFPS buildings. Based on the analysis calculations, the results showed that buildings with SFPS ($T = 2.7410$ seconds; base shear force in the X direction = 909.6857 kN; Y direction = 916.9172 kN) experienced greater displacement compared to buildings without base isolators ($T = 2.1426$ seconds; base shear force in the X direction = 1045, 9049 kN; Y direction = 2017.4889 kN). For interstory drift and earthquake acceleration, buildings with SFPS are smaller compared to non-SFPS buildings

Key words : Base Isolator, Earthquake, Friction Pendulum System, Structure.

ABSTRAK

ANALISIS PERBANDINGAN PENGGUNAAN *SINGLE FRICTION PENDULUM SYSTEM* (SFPS) DAN NON SFPS PADA BANGUNAN BETON BERTULANG (Studi Kasus : Gedung B Rumah Sakit Umum Muhammadiyah Metro)

Oleh

HASTARI AGNESTIANANDA TRANGGONO

Dilihat dari letak geografis, Indonesia menjadi negara yang kerap dilanda gempa bumi. Secara konvensional, kerusakan bangunan akibat gaya gempa dapat dicegah dengan memperkuat struktur bangunan. Penggunaan sistem peredam dikhususkan untuk bangunan yang beresiko mengalami percepatan dan perpindahan lateral yang besar bila terkena beban gempa. Konsep penggunaan sistem isolasi (*base isolator*) adalah untuk meningkatkan perioda alami struktur dan memberikan tambahan redaman. Salah satu jenis sistem isolasi adalah *Single Friction Pendulum System* (SFPS). Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui pengaruh, periode, simpangan antar lantai (*interstory drift*), gaya geser dasar yang diterima bangunan dengan *base isolator* SFPS dibandingkan dengan bangunan non SFPS. Berdasarkan perhitungan analisis diperoleh hasil bahwa bangunan dengan SFPS ($T = 2,7410$ detik; gaya geser dasar arah X = 909,6857 kN; arah Y = 916,9172 kN) mengalami perpindahan yang lebih besar dibandingkan dengan bangunan tanpa *base isolator* ($T = 2,1426$ detik; gaya geser dasar arah X = 1045,9049 kN; arah Y = 2017,4889 kN). Untuk *interstory drift* dan percepatan gempa bangunan dengan SFPS lebih kecil dibandingkan dengan bangunan non SFPS.

Kata kunci : *Base Isolator*, *Friction Pendulum System*, Gempa, Struktur.

Judul Skripsi : **ANALISIS PERBANDINGAN PENGGUNAAN SINGLE FRICTION PENDULUM SYSTEM (SFPS) DAN NON SFPS PADA BANGUNAN BETON BERTULANG (Studi Kasus: Gedung B Rumah Sakit Umum Muhammadiyah Metro)**

Nama Mahasiswa : **Hastari Agnestiananda Tranggono**

Nomor Pokok Mahasiswa : 1715011045

Program Studi : S1 Teknik Sipil

Fakultas : Teknik



Dr. Mohd. Isneini, S.T., M.T.
NIP 19721026 200003 1 001

Hasti Riakara Husni, S.T., M.T.
NIP 19740530 200012 2 001

2. Ketua Jurusan Teknik Sipil

3. Ketua Program Studi S1 Teknik Sipil


Sasana Putra, S.T., M.T.
NIP 19691111 200003 1 002

Suyadi, S.T., M.T.
NIP 19741225 200501 1 003

MENGESAHKAN

1. Tim Penguji

Ketua : **Dr. Mohd. Isneini, S.T., M.T.**

.....


Sekretaris : **Hasti Riakara Husni, S.T., M.T.**

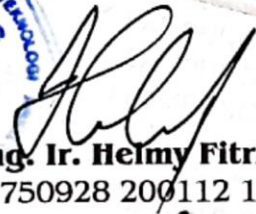
.....


Penguji
Bukan Pembimbing : **Fikri Alami, S.T., M.Sc., M.Phil.**

.....


2. Dekan Fakultas Teknik




Dr. Eng. Ir. Helmy Fitriawan, S.T., M.Sc.)
NIP 19750928 200112 1 002

Tanggal Lulus Ujian Skripsi : **13 Juni 2024**

SURAT PERNYATAAN

Saya yang bertanda tangan dibawah ini, adalah:

Nama : Hastari Agnestiananda Tranggono

NPM : 1715011045

Prodi/jurusan : S1/Teknik Sipil

Fakultas : Teknik Universitas Lampung

Dengan ini saya menyatakan bahwa dalam skripsi ini tidak terdapat karya yang pernah diajukan untuk memperoleh gelar kesarjanaan di suatu perguruan tinggi, dan sepanjang pengetahuan saya juga tidak terdapat karya atau pendapat yang pernah ditulis atau diterbitkan orang lain, kecuali yang secara tertulis diacu dalam naskah ini dan disebut dalam daftar pustaka.

Atas pernyataan ini, apabila dikemudian hari ternyata ditemukan adanya ketidakbenaran, saya bersedia menanggung akibat dan sanksi sesuai hukum yang berlaku.

Bandar Lampung, Juni 2024



Hastari Agnestiananda Tranggono
Hastari Agnestiananda Tranggono
NPM. 1715011045

RIWAYAT HIDUP



Penulis dilahirkan di Way Mili pada tanggal 26 Agustus 2000, merupakan anak tunggal dari pasangan Bapak Anang Djoko Tranggono dan Ibu Rubiyem.. Penulis memulai jenjang pendidikan tingkat dasar di SD Negeri 1 Budidaya yang diselesaikan pada tahun 2011, lalu dilanjutkan pendidikan tingkat pertama di SMP Negeri 1 Sidomulyo yang diselesaikan pada tahun 2014, dan dilanjutkan menempuh pendidikan tingkat atas di SMA Negeri 1 Kalianda. Semasa SMA penulis berperan aktif sebagai anggota dari Sanggar Seni SMA Negeri 1 Kalianda yang tergabung dalam *Theater Club* sampai penulis lulus dari SMA Negeri 1 Kalianda pada tahun 2017.

Penulis diterima di Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Lampung melalui jalur SBMPTN (Seleksi Bersama Masuk Perguruan Tinggi Negeri) pada tahun 2017. Selama menjadi mahasiswa, penulis berperan aktif di dalam organisasi Himpunan Mahasiswa Teknik Sipil Universitas Lampung (HIMATEKS UNILA) sebagai anggota Departemen Medinfo (Media Informasi) selama dua periode yaitu pada periode 2018-2019 dan pada 2019-2020 HIMATEKS UNILA. Pada periode 2019-2020 penulis pernah menjadi panitia inti yaitu Koordinator Publikasi Dekorasi dan Dokumentasi pada acara *Workshop* Nasional yang bertema *Rigging Engineering “Increase Knowledge and Skills in Rigging Study & Lifting Study for Heavy Lifting”* Lalu pada tahun 2020 penulis menjadi panitia inti Seminar Nasional pada acara *The Biggest Event of Civil Engineering Lampung University The 6th Civil Brings Revolution* yang bertema *“Build Your Nation For Your Generation”*.

Pada tahun 2020, penulis telah mengikuti Kuliah Kerja Nyata (KKN) periode II di Desa Sidowaluyo, Kecamatan Sidomulyo, Kabupaten Lampung-Selatan selama 40 hari, Juli-Agustus 2020. Di tahun yang sama, penulis juga telah melakukan kerja praktik di Proyek Pembangunan Gedung B Rumah Sakit Muhammadiyah Metro selama 3 bulan.

Penulis pernah menjadi asisten dosen pada mata kuliah Analisis Statis Tertentu, dan Mekanika Bahan. Selain itu, penulis pernah menjadi finalis 5 besar lomba kuat tekan beton tingkat nasional pada acara ECIVE 2019 yang diadakan di ITN Malang membawa nama Tim Civilla mewakili Teknik Sipil Universitas Lampung.

Penulis mengambil tugas akhir dengan judul “Analisis Perbandingan Penggunaan *Single Friction Pendulum System (SFPS)* Dan Non SFPS Pada Bangunan Beton Bertulang (Studi Kasus: Gedung B Rumah Sakit Umum Muhammadiyah Metro)”

Persembahan

Bismillahirrahmanirrahim

Alhamdulillahirabbil'alamin dengan ridho-Mu ya Allah akhirnya skripsi ini dapat terselesaikan. Semoga dengan terselesainya skripsi ini dapat menjadikanku insan yang berguna dan bermanfaat. Aku persembahkan skripsi ini untuk:

Kedua orangtuaku tercinta, Bapak Anang Djoko Tranggono dan Ibu Rubiyem yang selalu tanpa henti memberikan doanya serta memberikan nasihat, dukungan, dan motivasi dalam segala hal sejak aku kecil hingga aku dapat menyelesaikan perkuliahanku.

Dosen Pembimbing dan Penguji yang sangat berjasa dan selalu memberikan bantuan berupa ilmu dan motivasi dalam penyelesaian skripsi ini.

Seluruh dosen yang telah mengajarkan banyak hal. Terima kasih untuk ilmu, pengetahuan dan pelajaran hidup yang sudah diberikan.

Sahabat-sahabatku, Rekan Seperjuangan Teknik Sipil Angkatan 2017, yang selalu menemani dalam suka maupun duka, yang berjuang bersama serta berbagi kenangan, dan pengalaman-pengalaman berharga selama perkuliahanku.

Motto

“Allah tidak membebani seseorang melainkan sesuai dengan kesanggupannya”
(QS. Al-Baqarah : 286)

“Sebaik-baik manusia adalah yang paling bermanfaat bagi manusia lain”
(HR. Ahmad, Ath-Thabrani, Ad-Daruqutni)

“Yakinlah, ada sesuatu yang menantimu selepas banyak kesabaran yang kau jalani, yang akan membuatmu terpana hingga kau lupa betapa pedihnya rasa sakit”
(Ali bin Abi Thalib)

“Hatiku tenang karena mengetahui bahwa apa yang melewatkanmu tidak akan menjadi takdirku, dan apa yang ditakdirkan untukku tidak akan pernah melewatkanmu”
(Umar bin Khatab)

“Beri aku 1.000 orang tua, niscaya akan kucabut semeru dari akarnya. Beri aku 10 pemuda niscaya akan kuguncangkan dunia.”
(Bung Soekarno)

“Kadang kita terlalu sibuk memikirkan kesulitan-kesulitan, sehingga kita tidak punya waktu untuk mensyukuri rahmat Tuhan”
(Jenderal Soedirman)

SANWACANA

Puji syukur kehadiran Tuhan Yang Maha Esa yang telah memberikan karunia serta ridho-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul “**Analisis Perbandingan Penggunaan *Single Friction Pendulum System (SFPS)* Dan Non SFPS Pada Bangunan Beton Bertulang (Studi Kasus: Gedung B Rumah Sakit Umum Muhammadiyah Metro)**” yang dimaksudkan untuk memenuhi salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik di Universitas Lampung.

Penulis menyadari bahwa dalam proses penyelesaian tugas akhir ini tidak terlepas dari berbagai macam dukungan, bantuan serta bimbingan dari pihak-pihak yang sangat berjasa. Oleh karenanya, penulis ingin menyampaikan ucapan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada pihak-pihak yang berperan penting yaitu :

1. Tuhan Yang Maha Esa yang senantiasa memudahkan segala urusan dan memberikan berkah ilmu kepada setiap hamba-Nya.
2. Bapak Dr. Eng. Ir. Helmy Fitriawan, S.T., M.Sc.. selaku Dekan Fakultas Teknik, Universitas Lampung.
3. Bapak Sasana Putra, S.T., M.T., selaku Ketua Jurusan Teknik Sipil Universitas Lampung.
4. Bapak Suyadi, S.T., M.T., selaku Ketua Program Studi S-1 Teknik Sipil Universitas Lampung.
5. Bapak Dr. Mohd. Isneini, S.T., M.T., selaku Dosen Pembimbing Utama atas kesediaannya untuk memberikan bimbingan dalam proses penyelesaian skripsi ini.
6. Ibu Hasti Riakara Husni, S.T., M.T., selaku Dosen Pembimbing Kedua atas kesediaannya memberikan bimbingan penyelesaian skripsi ini.
7. Bapak Fikri Alami, S.T., M.Sc., M.Phil., selaku Dosen Penguji yang telah memberikan saran dan pengarahan kepada penulis.
8. Bapak Dr. Eng. Mohd. Isneini, S.T., M.T., selaku Dosen Pembimbing Akademik yang telah banyak membantu penulis selama perkuliahan.

9. Seluruh Dosen Jurusan Teknik Sipil yang telah memberikan banyak bantuan berupa ilmu pengetahuan kepada penulis, serta seluruh karyawan jurusan atas bantuannya kepada penulis selama menjadi mahasiswa di Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Lampung.
10. Keluargaku tercinta, terutama orang tuaku tersayang, Bapak Anang Djoko Tranggono dan Ibu Rubiyem, yang selalu tanpa henti memberikan doanya serta memberikan nasihat, dukungan, dan motivasi dalam segala urusan perkuliahan di Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik Universitas Lampung.
11. Sepupu-sepupuku tersayang Eky Khoiril Ulama dan Gesang Alsis Prayogo yang sudah aku anggap sebagai saudara kandungku sendiri yang selalu menemani dalam setiap senang dan sedihku.
12. Sahabat-sahabatku tercinta Thitania Ade Putri, Agnez Ridha Zatafatila, Erika Berliana, Desi Suciawati, Raafi Nugraha Pratama, Alm Andika Ade Setiawan, dan lainnya yang selalu menemani dalam keadaan suka dan duka, serta mendengarkan segala keluh kesahku.
13. Saudara-saudaraku Teknik Sipil Universitas Lampung angkatan 2017 yang berjuang bersama serta berbagi kenangan, pengalaman dan membuat kesan yang tak terlupakan, serta kakak tingkat penulis yang telah memberikan dukungan dan arahnya.

Penulis menyadari bahwa skripsi ini masih jauh dari kesempurnaan, oleh karena itu, penulis sangat mengharapkan kritik dan saran yang membangun dari pembaca sekalian. Namun penulis berharap semoga skripsi ini dapat berguna dan bermanfaat bagi semua pihak yang memerlukan, khususnya bagi penulis pribadi, Aamiin. Akhir kata penulis mengucapkan terima kasih. Penulis berharap semoga laporan Tugas Akhir ini bermanfaat bagi para pembaca.

Bandar Lampung, Juni 2024
Penulis,

Hastari Agnestiannada Tranggono

DAFTAR ISI

	Halaman
DAFTAR GAMBAR	vi
DAFTAR TABEL	viii
I. PENDAHULUAN	
A. Latar Belakang	1
B. Rumusan Masalah	6
C. Batasan Masalah	6
D. Tujuan Penelitian	7
E. Manfaat Penelitian	7
II. TINJAUAN PUSTAKA	
A. Umum	8
B. Dinamik Karakteristik Struktur Bangunan	11
1. Massa.....	11
2. Kekakuan.....	13
3. Redaman.....	14
C. Simpangan Akibat Gaya Gempa.....	15
D. Derajat Kebebasan	16
1. Persamaan Differensial pada Struktur SDOF.....	17
2. Persamaan Differensial pada Struktur MDOF	18
E. Perpindahan <i>Single Friction Pendulum System</i>	19
F. Peraturan Kegempaan	21
1. Faktor Keutamaan	21
2. Klasifikasi Situs.....	24
3. Wilayah Gempa.....	24
4. Parameter Percepatan Gempa.....	25
5. Parameter Percepatan Spektral Desain.....	27
6. Spektrum Respon Desain	27
7. Kategori Desain Seismik	28
8. Sistem Struktur dan Parameter Struktur.....	29
G. Gaya Statik.....	30
1. Analisis Gaya	30
2. Beban Gravitasi dan Kombinasi Pembebanan	33
H. Program Pemodelan Struktur	34

III. METODOLOGI PENELITIAN

A. Tahapan Perencanaan	36
B. Lokasi Penelitian.....	36
C. Data Penelitian	37
1. Luas Bangunan	39
2. Ketinggian Bangunan	40
3. <i>Pile Cap</i>	40
4. Balok	40
5. Kolom	41
6. Pelat	41
7. Nilai N-SPT	42
D. Prosedur Penelitian	43
1. Studi Literatur	43
2. Pengumpulan Data	44
3. Pemodelan Struktur	45
4. Perhitungan Pembebanan	45
5. Analisis Struktur.....	45
E. Diagram Alir Penelitian	46

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Pemodelan Struktur	47
B. Data Elevasi Gedung.....	48
C. Data Luas Gedung.....	48
D. Spesifikasi Material	49
1. Mutu Beton.....	49
2. Mutu Baja Tulangan.....	49
3. Data Elemen Struktur	49
E. Pembebanan	52
1. Beban Mati	52
2. Beban Hidup (<i>Live Load</i>).....	53
3. Beban Gempa (<i>Quake Load</i>).....	53
4. Kombinasi Pembebanan.....	59
F. Analisis Statik Ekuivalen.....	59
G. Perhitungan <i>Friction Pendulum System</i>	60
H. Hasil dan Pembahasan	65
1. Waktu Getar (Periode)	65
2. Perpindahan Lateral (<i>Displacement</i>).....	67
3. Simpangan Antar Tingkat Bangunan (<i>Interstory Drift</i>).....	69
4. Gaya Geser Dasar (<i>Base Shear</i>)	72
5. Percepatan Gempa	73

V. PENUTUP

A. Kesimpulan	75
B. Saran	76

DAFTAR PUSTAKA

LAMPIRAN (PEMODELAN SAP)

LAMPIRAN (SPESIFIKASI PENDAHULUAN)

LAMPIRAN (GAMBAR KERJA)

LAMPIRAN

DAFTAR GAMBAR

Gambar	Halaman
1.1. Jenis-Jenis <i>Friction Pendulum System</i>	3
1.2. Perbedaan <i>Single FPS</i> dan <i>Triple FPS</i>	4
1.3. Tampak Gedung	5
2.1. <i>Single Friction Pendulum</i>	10
2.2. Ilustrasi Pendulum pada Kolom	11
2.3. Pemodelan Struktur SDOF	17
2.4. Model Matematika SDOF	17
2.5. Pemodelan Struktur MDOF	18
2.6. Perangkat FPS dan Kurva Histeristik yang Dihasilkan	20
2.7. Parameter Kekauan Efektif (K_{eff}) dan Redaman Efektif ξ_{eff} pada Perangkat FPS	20
2.8. Mekanisme Pergerakan dan Pembentukan Kurva pada Perangkat FPS	21
2.9. Pembagian Wilayah Gempa di Indonesia untuk S1	25
2.10. Pembagian Wilayah Gempa di Indonesia untuk Ss	25
2.11. Spektrum Respons Desain	28
3.1. Lokasi Penelitian	36
3.2. Siteplan RSUD Muhammadiyah Metro	37
3.3. Tampak Depan Gedung yang akan Dianalisis	38
3.4. Tampak Belakang Gedung yang akan Dianalisis	39
3.5. Diagram Aliran	46
4.1. Pemodelan Struktur pada SAP2000	47
4.2. Respon Spektrum Desain Tanah Lokasi Bangunan	56
4.3. Data <i>Link-Property</i> SAP 2000	63
4.4. Data Masukan <i>Single Friction Pendulum</i> U1 dan U2	64
4.5. Data Masukan <i>Single Friction Pendulum</i> U3	64
4.6. Letak <i>Single Friction Pendulum</i>	65
4.7. Waktu Getar Alami Bangunan Tanpa <i>Base Isolator</i>	66

4.8. Waktu Getar Alami Bangunan dengan <i>Base Isolator</i>	66
4.9. Perpindahan Lateral Arah X.....	68
4.10. Perpindahan Lateral Arah Y.....	68
4.11. Percepatan Gempa Arah X.....	74
4.12. Percepatan Gempa Arah Y.....	74

DAFTAR TABEL

Tabel	Halaman
2.1. Simpangan Antar Tingkat Izin, Δa	16
2.2. Kategori Risiko Bangunan Gedung dan Nongedung untuk Beban Gempa.....	22
2.3. Faktor Keutamaan Gempa.....	23
2.4. Klasifikasi Situs.	24
2.5. Koefisien Situs, F_a	26
2.6. Koefisien Situs, F_v	26
2.7. Kategori Desain Seismik Berdasarkan Parameter Respons Percepatan pada Periode Pendek (SDS).....	28
2.8. Kategori Desain Seismik Berdasarkan Parameter Respons Percepatan pada Periode 1 Detik (SD1).....	28
2.9. Faktor R, C_d , Ω_0	29
2.10. Nilai Parameter Periode Pendekatan C_t dan x	32
2.11. Koefisien untuk Batas Atas pada Periode yang Dihitung.	33
3.1. Dimensi Balok.....	41
3.2. Dimensi Kolom.....	41
3.3. Dimensi dan Tulangan Pelat Lantai.....	41
3.4. Nilai N-SPT Pada BH-01.....	42
3.5. Nilai N-SPT Pada BH-02.....	43
4.1. Data Elevasi Gedung.....	48
4.2. Mutu Beton Struktur Bangunan.....	49
4.3. Tebal Pelat Tiap Lantai.....	50
4.4. Tipe dan Dimensi Balok.....	50
4.5. Tipe dan Dimensi Kolom.....	52
4.6. Faktor R, C_d , dan Ω_0	57
4.7. Spesifikasi Pendulum.....	61
4.8. Waktu Getar Alami (Periode).	67
4.9. Perpindahan Lateral Arah X.....	67
4.10. Perpindahan Lateral Arah Y.....	67

4.11. Simpangan Antar Tingkat Bangunan Tanpa Base Isolator Arah X	69
4.12. Simpangan Antar Tingkat Bangunan Tanpa Base Isolator Arah Y	70
4.13. Simpangan Antar Tingkat Bangunan SFPS Arah X	71
4.14. Simpangan Antar Tingkat Bangunan SFPS Arah Y	72
4.15. Gaya Geser Bangunan.....	72
4.16. Percepatan Gempa Pada Bangunan.....	73

I. PENDAHULUAN

A. Latar Belakang

Indonesia merupakan sebuah negara kepulauan dengan wilayah yang begitu menarik. Dikatakan sebagai negara yang menarik karena wilayah tersebut terbentuk oleh pertemuan 3 lempeng tektonik utama yakni: Samudera Hindia – Australia di sebelah Selatan, Samudera Pasifik di sebelah Timur dan Eurasia. Ketiga lempeng tektonik tersebut mengalami pergerakan relatif yang mengakibatkan terjadinya gempa bumi di daerah perbatasan pertemuan antar lempeng dan juga menimbulkan terjadinya sesar-sesar regional yang akan menjadi daerah pusat sumber gempa juga. Dilihat dari letak geografis Indonesia yang sedemikian rupa, Indonesia menjadi negara yang kerap dilanda gempa bumi.

Pada perencanaan pembangunan sebuah bangunan, parameter gempa bumi yang mempengaruhi perencanaan adalah percepatan tanah yang menimbulkan gelombang *seismic* yang bekerja pada bangunan. Besarnya tergantung pada beberapa faktor, antara lain besarnya kekuatan gempa, jarak episenter ke daerah tempat bangunan berdiri, kedalaman pusat gempa, jenis tanah, sistem pondasi, massa, geometri bangunan seperti dimensi, kekakuan dan *massiveness* struktur bangunan dan sebagainya.

Secara konvensional, kerusakan bangunan akibat gaya gempa dapat dicegah dengan memperkuat struktur bangunan. Kerusakan elemen baik struktural maupun non struktural umumnya diakibatkan karena adanya *interstory drift* (perbedaan simpangan antar tingkat). Untuk memperkecil *interstory drift* dapat dilakukan dengan memperkaku bangunan dalam arah lateral. Konsekuensinya, pada bangunan dimana kekakuan lateralnya cukup besar akan mengalami percepatan lantai yang besar, sementara pada bangunan fleksibel

akan mengalami perpindahan lateral yang besar sehingga jika terjadi gempa kuat, struktur akan mengalami kerusakan yang signifikan.

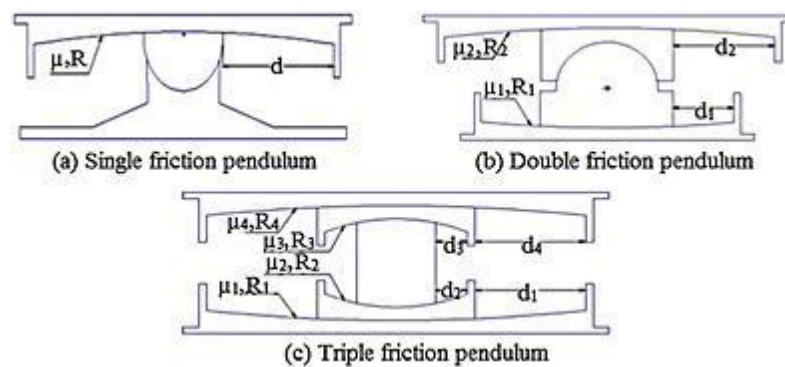
Terkait dengan upaya untuk mengantisipasi dampak dari risiko bencana gempa bumi di Indonesia, langkah utama yang terpenting yakni melakukan pemetaan risiko bencana gempa bumi di seluruh wilayah Indonesia. Peta ini digunakan untuk mengidentifikasi wilayah-wilayah dengan risiko gempa yang tinggi hingga rendah. Dengan begitu, dampak bencana yang dapat timbul di wilayah-wilayah tersebut dapat diantisipasi sedini mungkin (Buku RBI, 2016). Salah satu yang bisa dilakukan ialah memenuhi kebutuhan akan bangunan tahan gempa. Bangunan harus direncanakan agar dapat memberikan kinerja minimal *life safety*, di mana bangunan diperbolehkan mengalami kerusakan tetapi tidak mengalami keruntuhan. Dengan begitu, kemungkinan timbulnya korban jiwa dapat diminimalisasi.

Penggunaan sistem peredam dikhususkan untuk bangunan bertingkat tinggi, jembatan dengan bentang panjang, dan menara yang beresiko mengalami percepatan dan perpindahan lateral yang besar bila terkena beban dinamis. Dengan kata lain ini merupakan salah satu perkembangan dan alternatif dalam bidang rekayasa teknik sipil sebagai sistem kontrol pasif yang dapat menjaga integritas struktur. Konsep penggunaan sistem isolasi adalah untuk meningkatkan perioda alami struktur dan memberikan tambahan redaman. (Bambang Budiono, 2015)

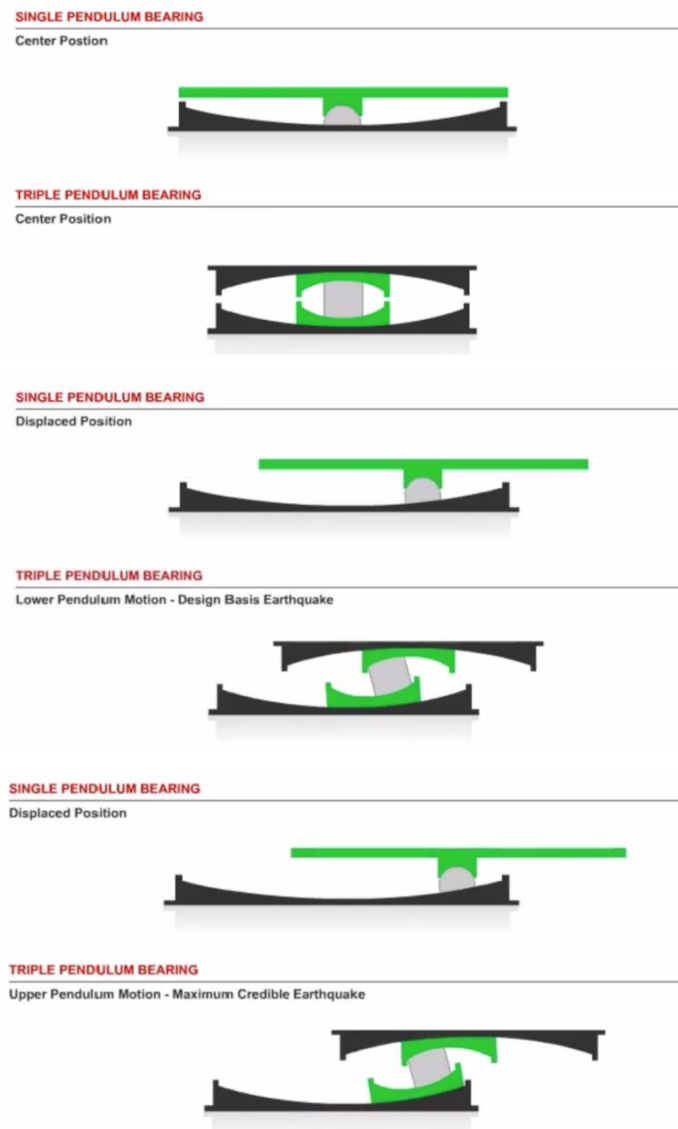
Kontrol pada struktur diklarifikasi dalam beberapa jenis yaitu tipe pasif, tipe aktif, dan tipe *hybrid* yang merupakan tipe kombinasi. Metode pengendali aktif menggunakan sensor pengukur percepatan struktur, *actuator* pembangkit gaya luar dan controller mengatur pemberian energi luar. Metode pasif tidak memerlukan energi luar. Metode *hybrid* merupakan kombinasi dari kedua metode tersebut. Kelebihan kontrol aktif adalah karakteristik dinamik struktur dapat beradaptasi dengan beban dinamis yang timbul, sedangkan kelebihan kontrol pasif adalah karena kesederhaan dalam desain, pemasangan, dan terutama pemeliharannya (W.F.Tjong).

Salah satu alat kontrol pasif pada struktur yang tergolong dalam *System Energy Disappation* adalah *Friction Pendulum System* (FPS) yang berguna memberikan dampak terhadap struktur dalam mereduksi gempa terhadap kerusakan struktur. Tujuan pemasangan FPS adalah untuk memperkecil respon simpangan struktur dan getaran yang timbul karena adanya beban dinamis yang bekerja. FPS umumnya diletakan serendah mungkin agar dapat melindungi struktur sebanyak mungkin dan terletak pada lantai dasar di *basement*. Beban dinamis yang dimaksud dapat berupa gempa, angin, dan getaran mesin. (Mayes, 1984)

Sampai saat ini sudah ada tiga jenis FPS yang dikenal, yaitu *Single FPS*, *Double FPS*, dan *Triple FPS*. Pengelompokkan ini didasarkan pada jumlah permukaan yang dapat mengantisipasi energi.



Gambar 1.1. Jenis-Jenis *Friction Pendulum System*.



Gambar 1.2. Perbedaan *Single* FPS dan *Triple* FPS.

Penelitian ini akan mengambil studi kasus pada gedung Rumah Sakit Umum yaitu Gedung B Rumah Sakit Umum Muhammadiyah Metro yang merupakan bangunan beton bertulang.

Beton sendiri adalah material konstruksi yang diperoleh dari pencampuran pasir, kerikil atau batu pecah, semen serta air. Bahan tambahan terkadang dicampurkan ke dalam campuran tersebut dengan tujuan memperbaiki sifat-sifat dari beton. Campuran beton tersebut seiring dengan bertambahnya waktu akan menjadi keras seperti batuan dan memiliki kuat tekan yang tinggi namun kuat tariknya rendah. Beton bertulang adalah kombinasi dari beton serta

tulangan baja yang bekerja secara bersama-sama untuk memikul beban yang ada. Tulangan baja akan memberikan kuat tarik yang tidak dimiliki oleh beton. Selain itu tulangan baja juga mampu memikul beban tekan seperti yang digunakan pada kolom beton. Beton bertulang sebagai salah satu material konstruksi dapat diaplikasikan dalam banyak bentuk atau tipe struktur. Pada suatu struktur beton bertulang, dikenal beberapa jenis elemen yang sering digunakan yaitu elemen pelat lantai, balok, kolom, dinding dan pondasi. (Buku Perancangan Struktur Beton Bertulang, 2016).

Gedung B Rumah Sakit Umum Muhammadiyah Metro adalah gedung dengan struktur beton bertulang dengan 7 lantai dan memiliki 1 *basement*. Bangunan ini terletak di Jl. Soekarno Hatta No.42, Mulyojati, Kec. Metro Barat, Kota Metro, Lampung. Mengacu pada peraturan keagamaan SNI 1726-2019, percepatan gempa rencana untuk Kota Metro mengalami peningkatan yang cukup berarti dibandingkan pada SNI 1726-2012. Sehingga diperkirakan gedung B Rumah Sakit Umum Muhammadiyah Metro pada kondisi eksisting akan menunjukkan tingkat kerawanan yang lebih tinggi. Maka dari itu bangunan gedung tersebut akan menarik bila dianalisis dengan menerapkan pemasangan SFPS (*Single Friction Pendulum System*).



Gambar 1.3. Tampak Gedung.

B. Rumusan Masalah

Bagaimana dampak positif penggunaan isolasi dasar FPS, perilaku struktur non isolasi maupun struktur berisolasi terhadap waktu periode gempa dan percepatan gempa antar lantai, dan perbandingan gaya geser dasar yang diterima struktur non isolasi maupun berisolasi dengan bantuan program pemodelan struktur pada bangunan Gedung B Rumah Sakit Umum Muhammadiyah Metro?

C. Batasan Masalah

Dalam penelitian ini dilakukan analisis perbandingan penggunaan SFPS (*Single Friction Pendulum System*) dan Non-SFPS. Oleh karena itu, penelitian ini memiliki beberapa batasan masalah sebagai berikut

1. Lokasi penelitian dilakukan pada Gedung B Rumah Sakit Umum Muhammadiyah Metro yang merupakan struktur gedung beton bertulang.
2. Tidak menganalisis pondasi.
3. Analisis struktur menggunakan respon spektrum.
4. Analisis struktur tidak mengubah desain bila terdapat persyaratan tidak memenuhi.
5. Perhitungan dan pemodelan struktur menggunakan bantuan program SAP2000.
6. Pembebanan gedung meliputi:
 - a. Beban mati berupa berat sendiri struktur.
 - b. Beban hidup berupa beban akibat fungsi bangunan.
 - c. Beban lateral berupa beban gempa sesuai dengan SNI 1726-2019 tentang Tata Cara Perencanaan Ketahanan Gempa untuk Struktur Bangunan Gedung dan Non Gedung.
 - d. Peraturan pembebanan berdasarkan peraturan pembebanan Indonesia SNI 1727-2020 tentang Beban Desain Minimum dan Kriteria Terkait untuk Bangunan Gedung dan Struktur Lain.

D. Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah:

1. Mengetahui pengaruh SFPS (*Single Friction Pendulum System*) dibandingkan Non-SFPS pada bangunan beton bertulang, Gedung B Rumah Sakit Muhammadiyah Metro.
2. Mengetahui perbandingan waktu periode dan simpangan antar lantai Gedung B Rumah Sakit Umum Muhammadiyah Metro dengan SFPS (*Single Friction Pendulum System*) dan Non-SFPS.
3. Mengetahui perbandingan gaya geser dasar yang diterima struktur non isolasi dengan yang dilengkapi SFPS pada struktur beton bertulang Gedung B Rumah Sakit Muhammadiyah Metro.

E. Manfaat Penelitian

Tugas akhir ini diharapkan dapat memberikan manfaat untuk:

1. Memberikan wawasan mengenai sistem isolasi dasar yaitu SFPS (*Single Friction Pendulum System*).
2. Menilai hasil dari penelitian perbandingan kinerja *respon seismic* bangunan beton bertulang dapat mempertimbangkan dalam mendesain gedung beton bertulang kedepannya.

II. TINJAUAN PUSTAKA

A. Umum

Beban dinamis merupakan suatu beban yang berubah-ubah menurut waktu, arah, maupun posisinya. Beban dinamis dikategorikan dalam dua hal yaitu beban *periodic* maupun beban *non periodic*. Dalam hal ini beban dinamis yang dimaksud adalah beban gempa.

Beban gempa tidak dapat diprediksi kapan akan terjadi, sehingga ketika gempa terjadi pada struktur bangunan maka dapat terjadi beberapa kejadian, apakah bangunan itu tetap kokoh tanpa menimbulkan korban jiwa, apakah bangunan rusak tanpa menimbulkan korban jiwa, dan bisa juga bangunan rusak serta menimbulkan korban jiwa. Gaya gempa merupakan guncangan alamiah dimana perambatan energi berwujud gelombang yang berasal dari bumi. Energi gempa bumi yang paling besar terdapat pada pertemuan atau tumbukan lempeng tektonik. Proses saling menekan maupun mendesak pada lempeng-lempeng tektonik dapat berlangsung dalam jangka waktu 30-600 tahun. Terdapat perbedaan siklus gempa berulang dari satu daerah dengan daerah lainnya, terdapat periode gempa bumi 30-50 tahunan, 100 tahun, 200 tahun dan 600 tahun.

Secara konvensional, perencanaan bangunan tahan gempa yang didasarkan pada konsep bagaimana meningkatkan ketahanan struktur terhadap gaya gempa yang bekerja padanya. Diantaranya dengan menggunakan *shearwall*, sistem rangka pemikul momen khusus, sistem rangka dengan *bracing* dan lain sebagainya. Namun sistem ini menyebabkan perpindahan lateral yang besar pada bangunan dengan kekakuan lateral yang tinggi pula, sementara struktur bangunan fleksibel akan mengalami perpindahan lateral yang besar. Oleh karena itu, bangunan akan mengalami kerusakan pada gempa kuat. Kerusakan bangunan akibat gempa bumi sulit dihindari bila digunakan perencanaan

konvensional yang hanya bergantung pada kekuatan komponen struktur itu sendiri, serta perilaku respon pasca elastisnya.

Daerah yang rawan gempa bumi membutuhkan ekstra kewaspadaan dan solusi teknologi tepat guna yang dapat meminimalkan korban jiwa dan harta benda. Oleh karena itu, penting untuk menerapkan teknologi yang tepat guna yang telah mengembangkan pendekatan desain alternatif yang mengurangi resiko kerusakan bangunan tingkat gempa, dan dapat mempertahankan integritas komponen struktural dan non-struktural terhadap gempa kuat. Pendekatan desain ini bukanlah dengan cara memperkuat struktur bangunan tetapi adalah dengan mereduksi gaya gempa yang bekerja pada bangunan atau menambah suatu sistem pada struktur yang dikhususkan untuk menyerap sebagian besar energi gempa yang masuk ke bangunan dan hanya sebagian kecil akan dipikul oleh komponen struktur bangunan itu sendiri dengan salah satu metode yang telah ditemukan para ahli yaitu *system base isolator* untuk memproteksi struktur dari bahaya gempa yang dikenal dengan *Friction Pendulum System (FPS)*.

Friction Pendulum System (FPS) merupakan salah satu sistem *base isolator* jenis geser yang telah terbukti secara efektif untuk mengurangi gaya gempa pada struktur. Sistem ini akan memisahkan bangunan atau struktur dari komponen horizontal pergerakan tanah dengan menyisipkan bahan isolator dengan kekakuan geser yang relatif kecil antara bangunan atas dan pondasinya. Bangunan dengan sistem ini akan memiliki waktu getar yang lebih besar dibandingkan dari bangunan konvensional. Akibatnya percepatan gempa yang bekerja pada bangunan menjadi lebih kecil.

Sistem *Friction Pendulum System (FPS)* pertama kali dikembangkan dengan hanya satu permukaan cekung oleh A. Zayas pada tahun 1987 (Taylor, W.A dan Igusha, T.2004) dengan dilengkapi dengan *articulated slider*. Sistem ini mempunyai kapasitas tahanan terhadap perpindahan besar. Penggunaan *composite teflon* sebagai bahan lapisan permukaan cekung yang memiliki *durabilitas* yang sangat tinggi menyebabkan sistem ini mampu menahan

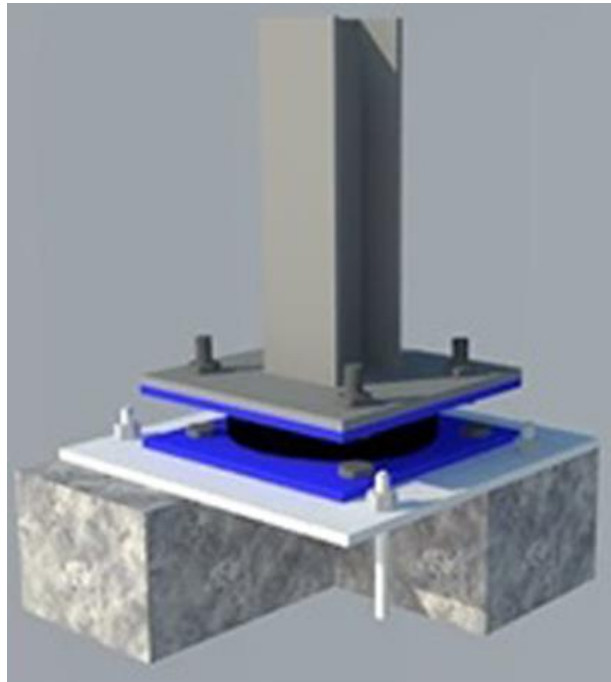
tegangan tekan yang tinggi dan pembebanan siklis sampai ribuan kali tanpa mengalami perubahan/kerusakan secara visual.

Single Friction Pendulum System (SFPS) adalah salah satu dari sistem isolasi dasar yang telah berkembang sejak penemuan bahan *composite teflon* sebagai lapisan permukaan dengan tingkat durabilitas yang tinggi serta koefisien gesekan yang kecil. Penggunaan *base isolator* baik secara teoritis maupun eksperimental telah terbukti efektif untuk mereduksi gaya gempa yang bekerja pada struktur bangunan. Hasil percobaan yang pernah dilakukan beberapa ahli sebelumnya, menunjukkan energi gempa dapat diisolasi oleh kekakuan geser yang kecil dari isolator. Dengan adanya redaman gesekan yang dihasilkan oleh mekanisme gesekan dari pergeseran antar muka dapat mereduksi perpindahan isolator secara efektif. Berhubung kekakuan struktur bangunan atas jauh lebih besar dari isolator dasar, maka bangunan atas dapat dimodelkan sebagai *rigid body* akibat gaya gempa. Jadi ragam pertama hanya menimbulkan *deformasi lateral* pada sistem isolasi dasar.



Gambar 2.1. *Single Friction Pendulum*.

Penggunaan isolasi *seismic* pada bangunan penting seperti rumah sakit, telekomunikasi, pusat *computer*, *apartement*, bangunan kantor, gedung perkuliahan, bangunan komersial, bangunan berbahaya seperti instalasi nuklir, bahan kimia dan bangunan bersejarah terus meningkat sejak gempa Kobe dan Northridge. Untuk bangunan rumah sakit, pembangkit listrik, telekomunikasi harus diberi perhatian lebih khusus, karena bagaimana pun juga bangunan ini harus tetap berfungsi bila terjadi gempa.



Gambar 2.2. Ilustrasi *Pendulum* Pada Kolom.

B. Dinamik Karakteristik Struktur Bangunan

Persamaan diferensial melibatkan tiga properti utama suatu struktur yaitu massa, kekakuan dan redaman. Ketiga properti struktur itu umumnya disebut dinamik karakteristik struktur. Kekakuan elemen/struktur adalah salah satu-satunya karakteristik yang dipakai pada *problem static*, sedangkan karakteristik yang lainnya yaitu massa dan redaman tidak dipakai.

1. Massa

Suatu struktur yang kompleks memungkinannya mempunyai banyak derajat kebebasan karena banyaknya massa yang dapat ditentukan. Banyaknya derajat kebebasan umumnya berasosiasi dengan jumlah massa tersebut akan menimbulkan kesulitan. Hal ini terjadi karena banyaknya persamaan differensial yang ada.

Terdapat dua pemodelan pokok yang umumnya dilakukan untuk mendeskripsikan massa struktur yaitu *Model Lumped Mass* dan *Model Consistant Mass Matris*.

a) *Model Lumped Mass*

Pada model ini massa dianggap menggumpal pada tempat-tempat (*lumped mass*) *join* atau tempat-tempat tertentu. Dalam hal ini gerakan/*degree of freedom* suatu *join* sudah ditentukan. Untuk titik nodal yang hanya mempunyai satu derajat kebebasan/satu translasi maka nantinya elemen atau struktur yang bersangkutan akan mempunyai matriks yang isinya hanya bagian diagonal saja. Clough dan Penzien (1993) mengatakan bahwa bagian *off-diagonal* akan sama dengan nol karena gaya inersia hanya bekerja pada tiap-tiap massa. Selanjutnya juga dikatakan bahwa apabila terdapat gerakan rotasi massa (*rotation degree of freedom*), maka pada model *lumped mass* ini juga tidak akan ada *rotation moment of inertia*. Hal ini terjadi karena pada model ini massa dianggap menggumpal pada suatu titik yang tidak berdimensi (*mass moment of inertia* dapat dihitung apabila titik tersebut mempunyai dimensi fisik). Dalam kondisi tersebut terdapat matriks massa dengan *diagonal mass of moment inertia* sama dengan nol.

Pada bangunan gedung bertingkat tinggi/banyak, konsentrasi beban akan terpusat pada tiap-tiap lantai tingkat bangunan. Maka dari itu untuk setiap tingkat lantai hanya ada satu tingkat massa yang mewakili tingkat yang bersangkutan. Karena hanya terdapat satu derajat kebebasan yang terjadi pada setiap massa/tingkat, maka jumlah derajat kebebasan pada suatu bangunan bertingkat banyak akan ditunjukkan oleh banyaknya tingkat bangunan yang bersangkutan. Pada kondisi tersebut matriks massa hanya akan berisi pada bagian diagonal saja

b) *Model Consistent Mass Matrix*

Model ini adalah model yang kedua dari kemungkinan pemodelan massa struktur. Pada prinsip *consistent mass matrix* ini, elemen struktur akan berdeformasi menurut bentuk fungsi (*shape function*) tertentu. Pemodelan massa seperti ini akan sangat bermanfaat pada struktur yang distribusi massanya kontinu.

Apabila tiga derajat kebebasan (horizontal, vertikal dan rotasi) diperhitungkan pada setiap node maka *standar consistent mass matrix* akan menghasilkan *fullpopulated consistent matrix* artinya suatu matriks yang *off-diagonal* matriksnya tidak sama dengan nol. Pada *lumped mass model* tidak akan terjadi ketergantungan antar massa (*mass coupling*) karena matriks massa adalah diagonal. Apabila tidak demikian maka *mass moment of inertia* akibat translasi dan rotasi harus diperhitungkan.

Pada bangunan bertingkat banyak yang massanya terkonsentrasi pada tiap-tiap tingkat bangunan, maka penggunaan model *lumped mass* masih cukup akurat. Untuk pembahasan struktur MDOF seterusnya maka model inilah *lumped mass* yang akan dipakai.

2. Kekakuan

Pada prinsip bangunan geser (*shear building*), balok pada lantai tingkat dianggap tetap horizontal baik sebelum maupun sesudah terjadi pergoyangan. Adanya pelat lantai yang menyatu secara kaku dengan balok diharapkan dapat membantu kekakuan balok. Pada prinsip desain bangunan tahan gempa dikehendaki agar kolom lebih kuat dibandingkan dengan balok, namun demikian rasio tersebut tidak selalu linear dengan kekakuannya. Dengan prinsip *shear building* maka dimungkinkan pemakaian *lumped mass* model. Pada prinsip ini, kekakuan setiap kolom dapat dihitung berdasarkan rumus yang telah ada.

Pada prinsipnya, semakin kaku balok maka semakin besar kemampuannya dalam mengekang rotasi ujung kolom, sehingga akan menambah kekuatan kolom. Perhitungan kekakuan kolom akan lebih teliti apabila pengaruh pelat lantai diperhatikan sehingga diperhitungkan sebagai balok T

Kekakuan kolom jepit-jepit dapat dihitung dengan rumus,

$$K = \frac{12EI}{h^3} \dots\dots\dots(1)$$

Sedangkan kekakuan kolom jepit-sendi dapat dihitung dengan rumus

$$K = \frac{3EI}{h^3} \dots\dots\dots(2)$$

Keterangan;

K = kekakuan kolom (kg/cm)

E = elastisitas (kg/cm²)

I = inersia kolom (cm⁴)

H = tinggi kolom (cm)

3. Redaman

Redaman merupakan peristiwa pelepasan energi (*energi dissipation*) oleh struktur akibat adanya berbagai macam sebab. Beberapa penyebab itu antara lain adalah pelepasan energi oleh adanya gerakan antar molekul di dalam material, pelepasan energi oleh gesekan alat penyambung maupun sistem dukungan, pelepasan energi oleh adanya gesekan dengan udara dan pada *respon inelastic*, pelepasan energi juga terjadi akibat adanya sendi plastis. Karena redaman berfungsi melepaskan energi maka hal ini akan mengurangi respon struktur.

Secara umum redaman atau *damping* dapat dikategorikan menurut *damping system* dan *damping types*. Menurut sistem struktur yang dimaksud, terdapat dua sistem disipasi energi yaitu:

a) Damping Klasik (*Classical Damping*)

Apabila dalam sistem struktur memakai bahan yang sama, maka bahan tersebut mempunyai rasio redaman (*damping ratio*) yang relatif kecil dan struktur damping dijepit didasarnya maka sistem struktur tersebut mempunyai damping yang bersifat klasik (*classical damping*). Damping dengan sistem ini akan memenuhi kaidah kondisi orthogonal (*orthogonality condition*).

b) Damping Nonklasik (*Non Classical Damping*)

Damping dengan sistem ini akan terbentuk pada suatu sistem struktur yang memakai bahan yang berlainan dimana bahan-bahan yang bersangkutan mempunyai rasio redaman yang berbeda secara signifikan. Sebagai contoh suatu bangunan yang bagian bawahnya dipakai struktur beton bertulang sedangkan bagian atasnya memakai

struktur baja. Antara keduanya mempunyai kemampuan disipasi energy yang berbeda sehingga keduanya tidak bisa membangun redaman klasik. Adanya interaksi antara tanah dengan struktur juga akan membentuk sistem redaman yang non-klasik, karena tanah mempunyai redaman yang cukup besar misalnya antara 10 – 25 %, sedangkan struktur atasnya mempunyai redaman yang relatif kecil, misalnya 4 – 7 %. Kasus yang lain berlakunya redaman non klasik adalah apabila massa, kekakuan ataupun matriks redaman berubah-ubah menurut frekuensi. Hal ini terjadi pada analisis yang memperhitungkan pengaruh tanah terhadap analisis struktur.

C. Simpangan Akibat Gaya Gempa

Simpangan (*drift*) adalah sebagai perpindahan lateral relatif antara dua tingkat bangunan yang berdekatan atau dapat dikatakan simpangan mendatar tiap-tiap tingkat bangunan (*horizontal story to story deflection*).

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

Simpangan antar tingkat dari suatu titik pada suatu lantai harus ditentukan sebagai simpangan horizontal titik itu, relatif terhadap titik yang sesuai pada lantai yang berada di bawahnya.

Berdasarkan SNI 1726-2019 bahwa simpangan antar tingkat desain (Δ) tidak boleh melebihi simpangan antar tingkat izin (Δ_a). Terlihat pada Tabel 2.1 di bawah.

Tabel 2.1 Simpangan Antar Tingkat Izin, Δ_a .

Struktur	Kategori Risiko		
	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 tingkat.	$0,025h_{sx}^c$	$0,020h_{sx}$	$0,015h_{sx}$
Struktur dinding geser kantilever batu bata ^d	$0,010h_{sx}$	$0,010h_{sx}$	$0,010h_{sx}$
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 1726-2019

Catatan:

(a) h_{sx} adalah tinggi tingkat di bawah tingkat-x.

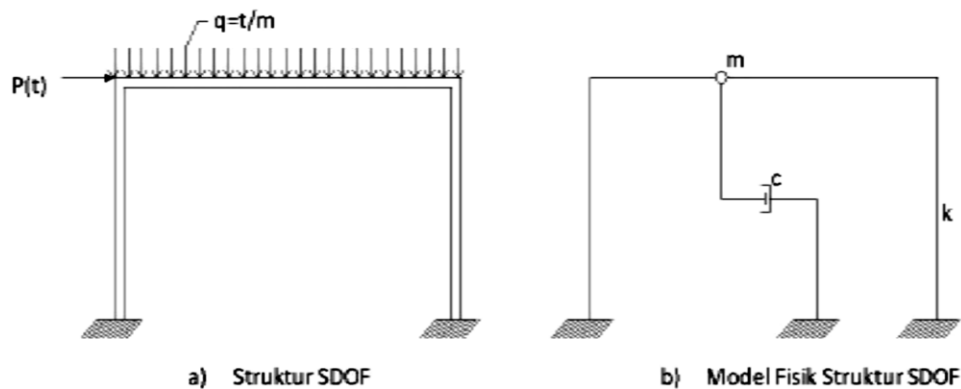
D. Derajat Kebebasan

Derajat kebebasan (*degree of freedom*) adalah derajat independensi yang diperlukan untuk menyatakan posisi suatu sistem pada setiap saat. Pada masalah dinamika, setiap titik atau massa pada umumnya hanya diperhitungkan berpindah tempat dalam satu arah saja yaitu arah horizontal. Karena simpangan yang terjadi hanya terjadi dalam satu bidang atau dua dimensi, maka simpangan suatu massa pada setiap saat hanya mempunyai posisi atau ordinat tertentu baik bertanda negatif ataupun bertanda positif. Pada kondisi dua dimensi tersebut, simpangan suatu massa pada saat t dapat dinyatakan dalam koordinat tunggal yaitu $Y(t)$. Struktur seperti itu dinamakan struktur dengan derajat kebebasan tunggal (SDOF sistem). Dalam model sistem SDOF atau berderajat kebebasan tunggal, setiap massa (m), kekakuan (k), mekanisme kehilangan atau redaman (c), dan gaya luar yang dianggap tertumpu pada elemen fisik tunggal. Struktur yang mempunyai derajat kebebasan atau struktur dengan derajat kebebasan banyak disebut *multi degree of freedom (MDOF)*. Dapat disimpulkan bahwa jumlah derajat kebebasan adalah jumlah koordinat yang diperlukan untuk menyatakan posisi suatu massa pada saat tertentu.

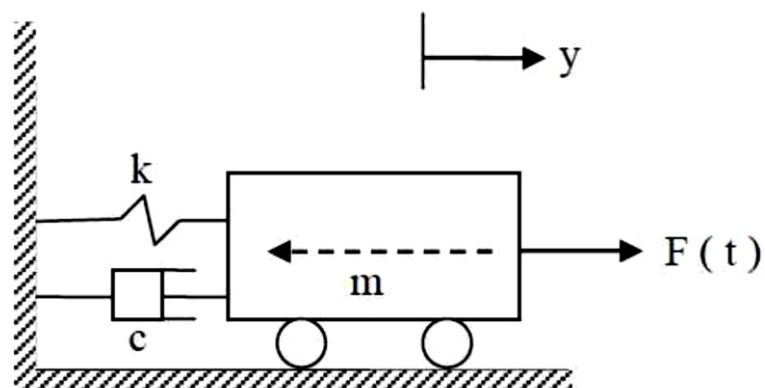
1. Persamaan Differensial pada Struktur SDOF

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.

Pada Gambar 2.1 tampak model matematik untuk SDOF sistem. Tampak bahwa $P(t)$ adalah beban dinamik yaitu beban yang intensitasnya merupakan fungsi dari waktu. Struktur seperti pada Gambar 2.1.a kemudian digambar secara ideal seperti tampak pada Gambar 2.1.b yaitu gambar yang telah dimodelkan. Notasi m , k , dan c seperti yang tampak pada gambar berturut-turut adalah massa, kekakuan kolom dan redaman.



Gambar 2.3. Pemodelan Struktur SDOF.



Gambar 2.4. Model Matematika SDOF.

Berdasarkan model matematika di atas disusun persamaan diferensial untuk sistem derajat tunggal (SDOF) dengan pengaruh beban dinamik $F(t)$ yang diberikan pada persamaan berikut.

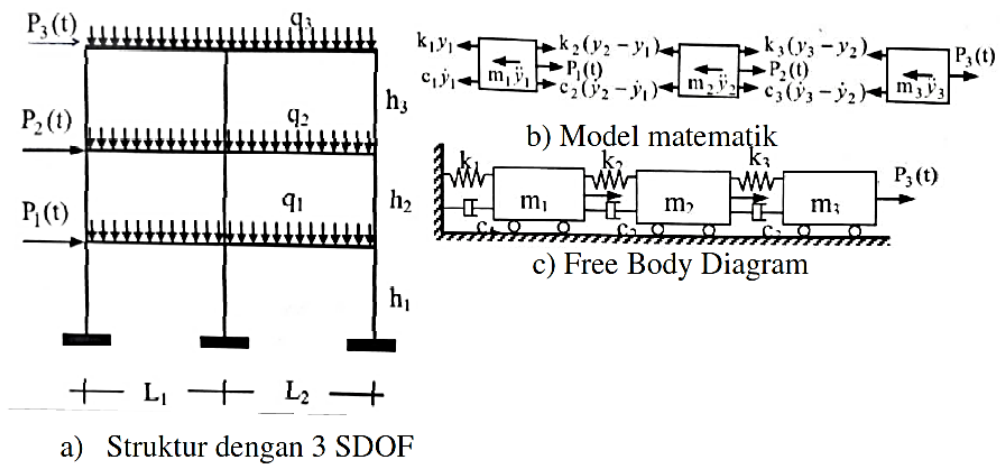
$$m \cdot \ddot{y} + c \cdot \dot{y} + k \cdot y = F(t) \dots\dots\dots(3)$$

Keterangan:

- m = massa struktur
- c = redaman struktur
- K = kekakuan struktur
- \ddot{Y} = percepatan
- \dot{y} = kecepatan
- y = simpangan
- $F(t)$ = beban dinamik

2. Persamaan Diferensial pada Struktur MDOF

Secara umum struktur bangunan gedung tidaklah selalu dapat dinyatakan didalam suatu sistem yang mempunyai derajat kebebasan tunggal (SDOF). Struktur bangunan gedung justru banyak yang mempunyai derajat kebebasan banyak (*multi degree of freedom, MDOF*). Struktur seperti cerobong asap dan sejenisnya merupakan struktur yang mempunyai bentuk fisik kontinu, maka pada struktur-struktur seperti itu akan mempunyai derajat kebebasan yang jumlahnya tak terhingga.



Gambar 2.5. Pemodelan Struktur MDOF.

Berdasarkan pada keseimbangan dinamik pada *free body diagram* gambar diatas maka akan diperoleh:

$$m_1\ddot{y}_1 + k_1y_1 + c_1\dot{y}_1 - k_2(y_2 - y_1) - c_2(\dot{y}_2 - \dot{y}_1) - F_1(t) = 0 \quad \dots\dots\dots(4)$$

$$m_2\ddot{y}_2 + k_2(y_2 - y_1) + c_2(\dot{y}_2 - \dot{y}_1) - k_3(y_3 - y_2) - c_3(\dot{y}_3 - \dot{y}_2) - F_2(t) = 0 \quad \dots\dots\dots(5)$$

$$m_3\ddot{y}_3 + k_3(y_3 - y_2) + c_3(\dot{y}_3 - \dot{y}_2) - F_3(t) = 0 \quad \dots\dots\dots(6)$$

Selanjutnya dengan menyusun persamaan-persamaan di atas menurut parameter yang sama maka akan diperoleh:

$$m_1\ddot{y}_1 + (c_1 + c_2)\dot{y}_1 - c_2\dot{y}_2 + (k_1 + k_2)y_1 - k_2y_2 = F_1(t) = 0 \quad \dots\dots\dots(7)$$

$$m_2\ddot{y}_2 - c_2\dot{y}_1 + (c_2 + c_3)\dot{y}_2 - c_3\dot{y}_3 - k_2y_1 + (k_2 + k_3)y_2 - k_3y_3 = F_2(t) = 0 \quad \dots\dots\dots(8)$$

$$m_3\ddot{y}_3 - c_3\dot{y}_2 + c_3\dot{y}_3 - k_3y_3 + k_3y_3 = F_3(t) = 0 \quad \dots\dots\dots(9)$$

Persamaan-persamaan di atas dapat ditulis dalam bentuk matriks sebagai berikut:

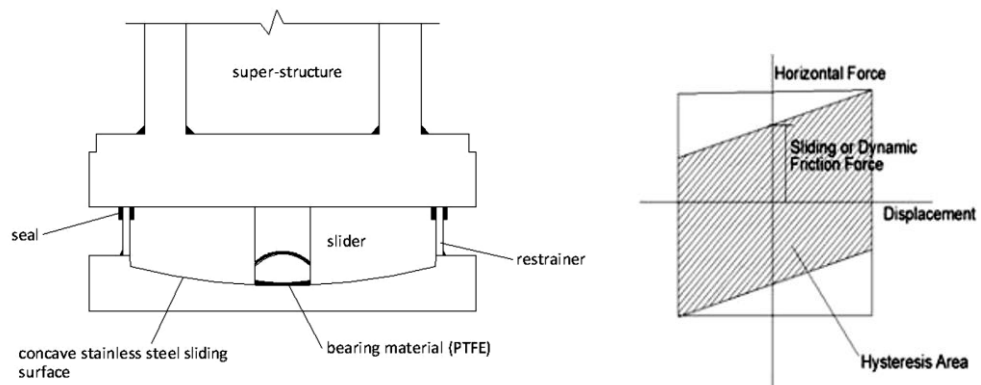
$$\begin{bmatrix} m_1 & 0 & 0 \\ 0 & m_2 & 0 \\ 0 & 0 & m_3 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{y}_1 \\ \ddot{y}_2 \\ \ddot{y}_3 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} c_1 + c_2 & -c_2 & 0 \\ -c_2 & c_2 + c_3 & -c_3 \\ 0 & -c_3 & c_3 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{y}_1 \\ \dot{y}_2 \\ \dot{y}_3 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} k_1 + k_2 & -k_2 & 0 \\ -k_2 & k_2 + k_3 & -k_3 \\ 0 & -k_3 & k_3 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} F_1(t) \\ F_2(t) \\ F_3(t) \end{Bmatrix}$$

Persamaan di atas menjadi;

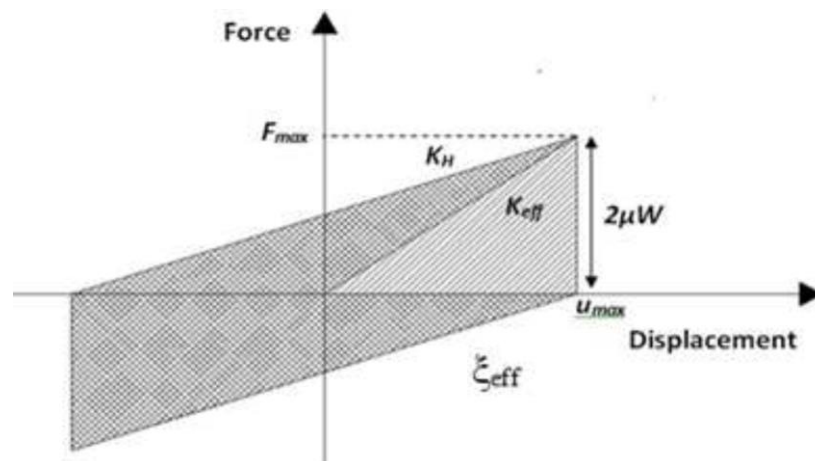
$$[M]|\ddot{y}| + [C]|\dot{y}| + [K]|y| = [0] \quad \dots\dots\dots(10)$$

E. Perpindahan *Single Friction Pendulum System*

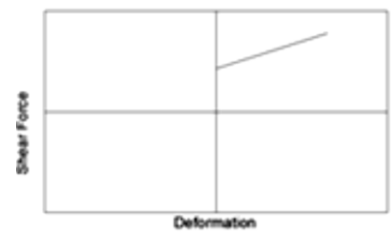
Salah satu kelebihan utama yang dimiliki oleh perangkat *friction pendulum system* adalah kemampuannya untuk mengembalikan struktur pada posisi semula setelah gempa berakhir. Hal ini dapat terjadi karena adanya bagian *articulated slider* yang bergerak pada suatu permukaan *stainless-steel* yang berbentuk cekung dengan nilai kelengkungan tertentu. Dengan adanya tahanan friksi pada kedua permukaan tersebut maka struktur di atas sistem isolasi dasar akan tetap berperilaku layaknya sebuah struktur terjepit (*fixed-base structure*) pada kondisi beban lateral yang ringan.

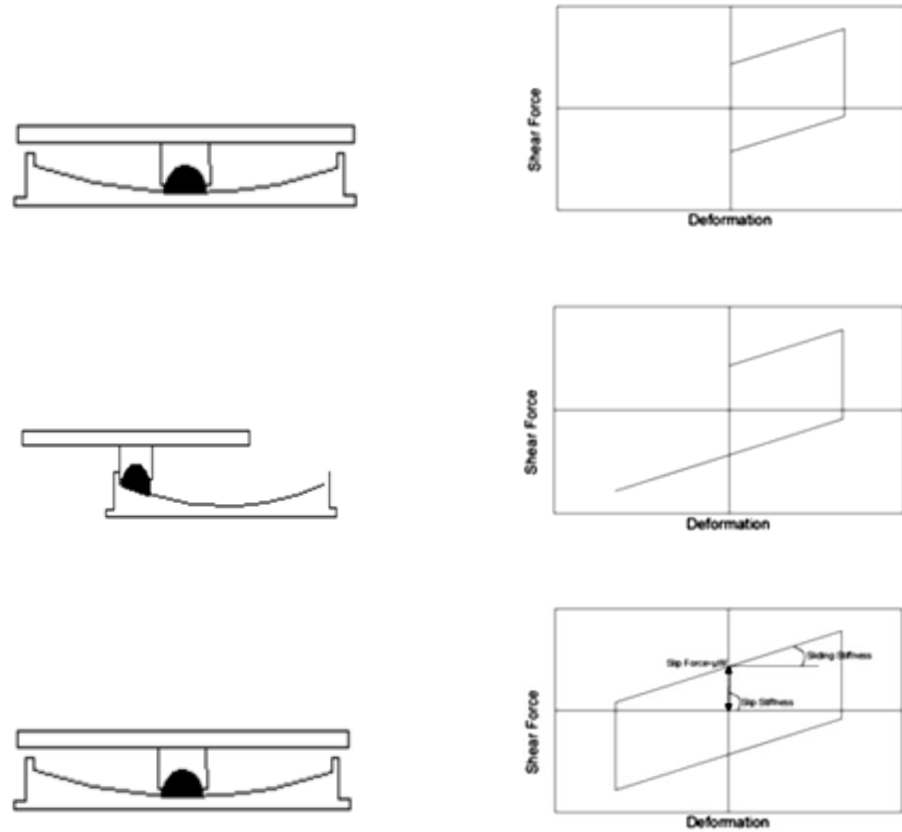


Gambar 2.6. Perangkat FPS dan kurva histeristik yang dihasilkan.



Gambar 2.7. Parameter Kekakuan Efektif (K_{eff}) dan Redaman Efektif ξ_{eff} pada Perangkat FPS.





Gambar 2.8. Mekanisme Pergerakan dan Pembentukan Kurva pada Perangkat FPS.

F. Peraturan Kegempaan Struktur Bangunan dalam SNI 1726-2019

1. Faktor Keutamaan

Untuk jenis-jenis kategori risiko struktur bangunan gedung dan non gedung sesuai Tabel 3 SNI 1726-2019 pengaruh gempa rencana kepadanya harus dikalikan dengan suatu faktor keutamaan gempa I_e merujuk Tabel 4 SNI 1726-2019. Terkhusus pada struktur bangunan yang termasuk kategori risiko IV, jika diperlukan pintu masuk dengan fungsi operasional dari struktur bangunan yang bersebelahan, maka dari itu struktur bangunan yang bersebelahan itu harus didesain menyesuaikan dengan kategori risiko IV.

Tabel 2.2. Kategori Risiko Bangunan Gedung dan Nongedung untuk Beban Gempa.

Jenis Pemanfaatan	Kategori Risiko
<p>Gedung dan nongedung yang memiliki risiko rendah terhadap jiwa manusia pada saat terjadi kegagalan, termasuk, tapi tidak dibatasi untuk, antara lain:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Fasilitas pertanian, perkebunan, perternakan, dan perikanan • Fasilitas sementara • Gudang penyimpanan • Rumah jaga dan struktur kecil lainnya 	I
<p>Semua gedung dan struktur lain, kecuali yang termasuk dalam kategori risiko I,III,IV, termasuk, tapi tidak dibatasi untuk:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Perumahan • Rumah toko dan rumah kantor • Pasar • Gedung perkantoran • Gedung apartemen/ rumah susun • Pusat perbelanjaan/ mall • Bangunan industri • Fasilitas manufaktur • Pabrik 	II
<p>Gedung dan nongedung yang memiliki risiko tinggi terhadap jiwa manusia pada saat terjadi kegagalan, termasuk, tapi tidak dibatasi untuk:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Bioskop • Gedung pertemuan • Stadion • Fasilitas kesehatan yang tidak memiliki unit bedah dan unit gawat darurat • Fasilitas penitipan anak • Penjara • Bangunan untuk orang jompo <p>Gedung dan nongedung, tidak termasuk kedalam kategori risiko IV, yang memiliki potensi untuk menyebabkan dampak ekonomi yang besar dan/atau gangguan massal terhadap kehidupan masyarakat sehari-hari bila terjadi kegagalan, termasuk, tapi tidak dibatasi untuk:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Pusat pembangkit listrik biasa • Fasilitas penanganan air • Fasilitas penanganan limbah • Pusat telekomunikasi 	III

Tabel 2.2. (Lanjutan).

Jenis Pemanfaatan	Kategori Risiko
Gedung dan nongedung yang tidak termasuk dalam kategori risiko IV, (termasuk, tetapi tidak dibatasi untuk fasilitas manufaktur, proses, penanganan, penyimpanan, penggunaan atau tempat pembuangan bahan bakar berbahaya, bahan kimia berbahaya, limbah berbahaya, atau bahan yang mudah meledak) yang mengandung bahan beracun atau peledak di mana jumlah kandungan bahannya melebihi nilai batas yang disyaratkan oleh instansi yang berwenang dan cukup menimbulkan bahaya bagi masyarakat jika terjadi kebocoran.	III
<p>Gedung dan nongedung yang dikategorikan sebagai fasilitas yang penting, termasuk, tetapi tidak dibatasi untuk:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Bangunan-bangunan monumental • Gedung sekolah dan fasilitas pendidikan • Rumah ibadah • Rumah sakit dan fasilitas kesehatan lainnya yang memiliki fasilitas bedah dan unit gawat darurat • Fasilitas pemadam kebakaran, ambulans, dan kantor polisi, serta garasi kendaraan darurat • Tempat perlindungan terhadap gempa bumi, tsunami, angin badai, dan tempat perlindungan darurat lainnya • Fasilitas kesiapan darurat, komunikasi, pusat operasi dan fasilitas lainnya untuk tanggap darurat • Pusat pembangkit energi dan fasilitas publik lainnya yang dibutuhkan pada saat keadaan darurat • Struktur tambahan (termasuk menara telekomunikasi, tangki penyimpanan bahan bakar, menara pendingin, struktur stasiun listrik, tangki air pemadam kebakaran atau struktur rumah atau struktur pendukung air atau material atau peralatan pemadam kebakaran) yang disyaratkan untuk beroperasi pada saat keadaan darurat <p>Gedung dan nongedung yang dibutuhkan untuk mempertahankan fungsi struktur bangunan lain yang masuk ke dalam kategori risiko IV.</p>	IV

Sumber: SNI 1726-2019

Tabel 2.3. Faktor Keutamaan Gempa.

Kategori Risiko	Faktor Keutamaan Gempa, I_e
I dan II	1,0
III	1,25
IV	1,50

Sumber: SNI 1726-2019

2. Klasifikasi Situs

Situs harus digolongkan terlebih dahulu pada klasifikasi situs yang terdapat pada SNI 2726-2019 dalam merumuskan kriteria desain seismik sebuah bangunan di muka tanah atau penentuan amplifikasi besaran percepatan gempa puncak suatu situs dari batuan dasar ke permukaan tanah. Klasifikasi situs dapat dilihat pada Tabel 2.4. berikut.

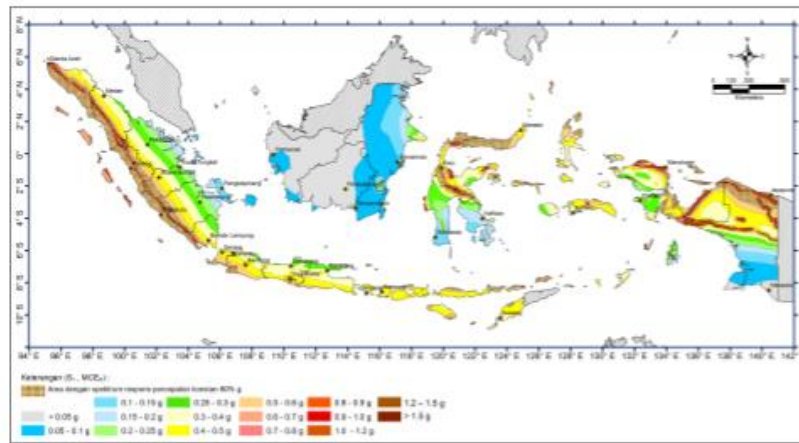
Tabel 2.4. Klasifikasi Situs.

Kelas Situs	\bar{v}_s (m/detik)	\bar{N} atau \bar{N}_{ch}	\bar{s}_u (KPa)
SA (batuan keras)	>1500	N/A	N/A
SB (batuan)	750 sampai 1500	N/A	N/A
SC (tanah keras, sangat padat dan batuan lunak)	350 sampai 750	>50	>100
SD (tanah sedang)	175 sampai 350	15 sampai 50	50 sampai 100
SE (tanah lunak)	< 175	<15	<50
	Atau setiap profil tanah yang mengandung lebih dari 3 m tanah dengan karakteristik sebagai berikut : 1. Indeks plastisitas, $PI > 20$, 2. Kadar air, $w \geq 40\%$, 3. Kuat geser niralir $\bar{s}_u < 25$ kPa		
SF (tanah khusus, yang membutuhkan investigasi geoteknik spesifik dan analisis respons spesifik-situs yang mengikuti 0)	Setiap profil lapisan tanah yang memiliki salah satu atau lebih dari karakteristik berikut: - Rawan dan berpotensi gagal atau runtuh akibat beban gempa seperti mudah likuifaksi, lempung sangat sensitif, tanah tersementasi lemah - Lempung sangat organik dan/atau gambut (ketebalan $H > 3$ m) - Lempung berplastisitas sangat tinggi (ketebalan $H > 7,5$ m dengan indeks plastisitas $PI > 75$) - Lapisan lempung lunak/setengah teguh dengan ketebalan $H > 35$ m dengan $\bar{s}_u < 50$ kPa		

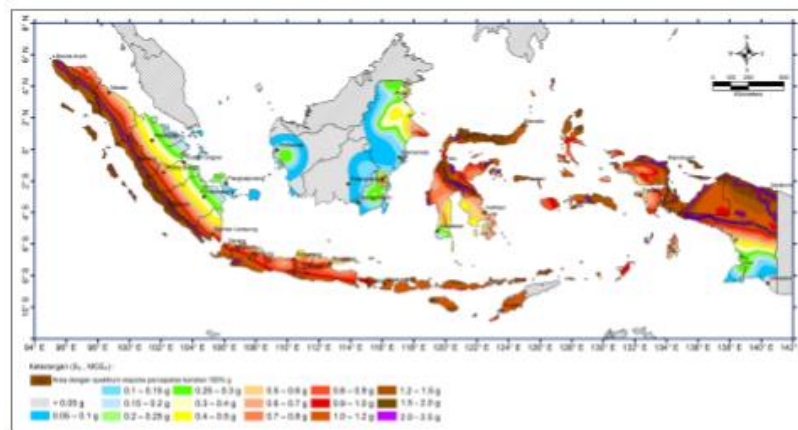
Sumber: SNI 1726-2019

3. Wilayah Gempa

Daerah Indonesia terdiri dari peta percepatan puncak (*Peak Ground Acceleration/PGA*), S_1 , dan S_s yang tercantum pada SNI 1726-2019. Peta-peta tersebut diperlukan untuk menerapkan ketentuan-ketentuan beban gempa. Peta-peta gerak tanah seismik serta koefisien risiko dari gempa maksimum yang dipertimbangkan (*Maximum Considered Earthquake/MCE*) seperti ditunjukkan pada Gambar 2.9. dan 2.10.



Gambar 2.9. Pembagian Wilayah Gempa di Indonesia untuk S_I . (SNI 1726-2019)



Gambar 2.10. Pembagian Wilayah Gempa di Indonesia untuk S_s . (SNI 1726-2019)

4. Parameter Percepatan Gempa (Respon Spektra)

Untuk penentuan respon spektral percepatan seismik tanah MCE_R , dibutuhkan nilai amplifikasi seismik untuk periode 0,2 detik dan 1 detik yang terdapat pada Pasal 6.2 SNI 1726-2019. Faktor amplifikasi terdiri dari faktor amplifikasi getaran terkait percepatan dalam getaran periode pendek (F_a) serta faktor amplifikasi terkait percepatan yang mewakili getaran periode 1 detik (F_v). Parameter respon spektrum percepatan periode pendek (S_{MS}) dan periode 1 detik (S_{M1}) yang disesuaikan dengan efek klasifikasi situs ditentukan menggunakan rumus sebagai berikut:

$$S_{MS} = F_a \times S_s \dots\dots\dots(14)$$

$$S_{M1} = F_v \times S_I \dots\dots\dots(15)$$

Keterangan :

S_s = Parameter respon spektral percepatan gempa MCE_R terpetakan untuk periode pendek.

S_1 = Parameter respon spektral percepatan gempa MCE_R terpetakan untuk periode 1 detik.

Penentuan koefisien situs disesuaikan dengan jenis tanah yang berada di daerah penelitian. Untuk nilai koefisien situs F_a dan F_v disajikan dalam Tabel 2.5. dan Tabel 2.6.

Tabel 2.5. Koefisien Situs, F_a .

Kelas situs	Parameter respons spektral percepatan gempa maksimum yang dipertimbangkan risiko-tertarget (MCE_R) terpetakan pada periode pendek, $T = 0,2$ detik, S_s					
	$S_s \leq 0,25$	$S_s = 0,5$	$S_s = 0,75$	$S_s = 1,0$	$S_s = 1,25$	$S_s \geq 1,5$
SA	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
SB	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9
SC	1,3	1,3	1,2	1,2	1,2	1,2
SD	1,6	1,4	1,2	1,1	1,1	1,1
SE	2,4	1,7	1,3	1,1	0,9	0,8
SF	$SS^{(a)}$					

Sumber: SNI 1726-2019

Catatan:

(a) SS yaitu situs yang memerlukan investigasi geoteknik spesifik dan analisis respons situs-spesifik

Tabel 2.6. Koefisien Situs, F_v .

Kelas situs	Parameter respons spektral percepatan gempa maksimum yang dipertimbangkan risiko-tertarget (MCE_R) terpetakan pada periode pendek, $T = 1$ detik, S_1					
	$S_1 \leq 0,1$	$S_1 = 0,2$	$S_1 = 0,3$	$S_1 = 0,4$	$S_1 = 0,5$	$S_1 \geq 0,6$
SA	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
SB	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
SC	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,4
SD	2,4	2,2	2,0	1,9	1,8	1,7
SE	4,2	3,3	2,8	2,4	2,2	2,0
SF	$SS^{(a)}$					

Sumber: SNI 1726-2019

Catatan:

- (a) SS yaitu situs yang memerlukan investigasi geoteknik spesifik dan analisis respons situs-spesifik

5. Parameter Percepatan Spektral Desain

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

$$S_{DS} = \frac{2}{3}S_{MS} \dots\dots\dots(16)$$

$$S_{D1} = \frac{2}{3}S_{M1} \dots\dots\dots(17)$$

6. Spektrum Respon Desain

Merujuk pada SNI 1726-2019 Grafik respon spektrum dapat dilihat pada Gambar 3 SNI 1726-2019 dengan mengikuti ketentuan sebagai berikut :

- A. Untuk periode yang kurang dari T_0 , spektrum respons percepatan desain (S_a), harus dihitung berdasarkan persamaan:

$$S_a = S_{DS} \left(0,4 + 0,6 \frac{T}{T_0} \right) \dots\dots\dots(18)$$

- B. Untuk periode tidak kurang dari atau sama dengan T_0 serta lebih kecil dari atau sama dengan T_s , spektrum respons percepatan desain (S_a) sama dengan S_{DS}

- C. Untuk periode lebih besar dari T_s namun kurang dari atau sama dengan T_L , respons spektral percepatan desain (S_a) dihitung menggunakan persamaan:

$$S_a = \frac{S_{D1}}{T} \dots\dots\dots(19)$$

- D. Untuk periode tidak kurang dari T_L , respons spektral percepatan desain (S_a) diambil berdasarkan persamaan:

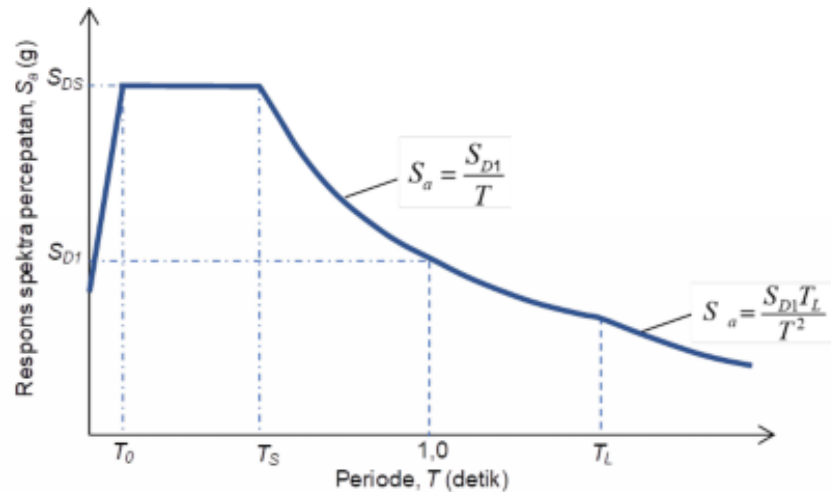
$$S_a = \frac{S_{D1}T_L}{T^2} \dots\dots\dots(20)$$

Keterangan:

S_{DS} = Parameter respons spektral percepatan desain pada periode pendek.

S_{D1} = Parameter respons spektral percepatan desain pada periode 1 detik.

T = Periode getar fundamental struktur.



Gambar 2.11. Spektrum Respons Desain.

7. Kategori Desain Seismik

Struktur harus ditentukan menurut pasal 6.5 SNI 1726-2019 berdasar pada kategori resiko serta parameter-parameter respon spektra percepatan desainnya. Kategori desain seismik dapat dilihat pada tabel berikut.

Tabel 2.7. Kategori Desain Seismik Berdasarkan Parameter Respons Percepatan pada Periode Pendek (S_{DS}).

Nilai S_{DS}	Kategori Risiko	
	I atau II atau III	IV
$S_{DS} < 0,167$	A	A
$0,167 \leq S_{DS} < 0,33$	B	C
$0,33 \leq S_{DS} < 0,50$	C	D
$0,50 \leq S_{DS}$	D	D

Sumber: SNI 1726-2019

Tabel 2.8. Kategori Desain Seismik Berdasarkan Parameter Respons Percepatan pada Periode 1 Detik (S_{D1}).

Nilai S_{D1}	Kategori Risiko	
	I atau II atau III	IV
$S_{D1} < 0,067$	A	A
$0,067 \leq S_{D1} < 0,133$	B	C
$0,133 \leq S_{D1} < 0,20$	C	D
$0,20 \leq S_{D1}$	D	D

Sumber: SNI 1726-2019

8. Sistem Struktur dan Parameter Struktur

Sistem struktur yang dipilih harus sesuai dengan batasan dan memperhatikan koefisien dalam jenis sistem struktur tersebut. Dapat dilihat pada Tabel 12 SNI 1726-2019.

Tabel 2.9. Faktor R, Cd, Ω_0 .

Sistem penahan gaya seismik	Koefisien modifikasi respons, R^a	Faktor kuat-lebih sistem, Ω_0^b	Faktor pembesaran defleksi, C_d^o	Batasan system struktur dan batasan tinggi struktur, h_n (m) ^c				
				Kategori desain seismik				
				B	C	D ^d	E ^d	F ^e
C.Sistem rangka pemikul momen								
1. Rangka baja pemikul momen khusus	8	3	5½	TB	TB	TB	TB	TB
2. Rangka batang baja pemikul momen khusus	7	3	5½	TB	TB	48	30	TI
3. Rangka baja pemikul momen menengah	4½	3	4	TB	TB	10 ^k	TI ^k	TI ^k
4. Rangka baja pemikul momen biasa	3½	3	3	TB	TB	TI ^l	TI ^l	TI ^l
5. Rangka beton bertulang pemikul momen khusus ^m	8	3	5½	TB	TB	TB	TB	TB
6. Rangka beton bertulang pemikul momen menengah	5	3	4½	TB	TB	TI	TI	TI
7. Rangka beton bertulang pemikul momen biasa	3	3	2½	TB	TI	TI	TI	TI
8. Rangka baja dan beton komposit pemikul momen khusus	8	3	5½	TB	TB	TB	TB	TB
9. Rangka baja dan beton komposit pemikul momen menengah	5	3	4½	TB	TB	TI	TI	TI
10. Rangka baja dan beton komposit terkekang parsial pemikul momen	6	3	5½	48	48	30	TI	TI
11. Rangka baja dan beton komposit pemikul momen biasa	3	3	2½	TB	TI	TI	TI	TI
12. Rangka baja canai dingin pemikul momen khusus dengan pembautan ⁿ	3½	3 ^o	3½	10	10	10	10	10

Keterangan:

TB = tidak dibatasi

TI = Tidak diijinkan

G. Gaya Statik

1. Analisis Gaya

Menurut SNI 1726-2019 yang membahas tentang perencanaan struktur terhadap ketahanan gempa baik untuk bangunan gedung maupun nongedung, arah pemberian beban gempa dalam perencanaannya harus ditetapkan sedemikian rupa agar mampu memberikan pengaruh pada struktur secara keseluruhan. Gaya geser dasar dihitung menggunakan persamaan berikut:

$$V = C_s W \quad \dots\dots\dots(21)$$

Keterangan :

C_s = koefisien respon seismik

W = berat seismik efektif

Untuk nilai C_s dapat ditentukan dengan persamaan :

$$C_s = \frac{S_{DS}}{\left(\frac{R}{I}\right)} \quad \dots\dots\dots(22)$$

Nilai C_s tidak boleh melebihi persamaan :

Untuk $T \leq T_L$

$$C_s = \frac{S_{D1}}{T \left(\frac{R}{I}\right)} \quad \dots\dots\dots(23)$$

Untuk $T \geq T_L$

$$C_s = \frac{S_{D1} \cdot T_L}{T^2 \left(\frac{R}{I}\right)} \quad \dots\dots\dots(24)$$

C_s harus tidak kurang dari :

$$C_s = 0,044 S_{DS} I_e \geq 0,01$$

Untuk struktur yang berlokasi di daerah dengan nilai $S_1 \geq 0,6$ g, maka C_s tidak boleh kurang dari :

$$C_s = \frac{0,5S_1}{\left(\frac{R}{I}\right)} \dots\dots\dots(25)$$

Keterangan :

S_{DS} = Parameter percepatan respons spektral desain dalam rentang periode pendek.

R = Koefisien modifikasi respons.

I_e = Faktor keutamaan gempa.

Adapun distribusi vertikal gaya gempa ditentukan dengan persamaan berikut:

$$F_x = C_{V_x} \cdot V \dots\dots\dots(26)$$

$$C_{V_x} = \frac{W_x \cdot h_x^k}{\sum_{i=1}^n W_x \cdot h_x^k} \dots\dots\dots(27)$$

Keterangan:

C_{V_x} = Faktor distribusi vertikal.

V = Gaya lateral desain total atau geser di dasar struktur (kN).

W_i & W_x = Berat tingkat struktur.

h_i & h_x = Tinggi sampai tingkat i (m).

k = Eksponen terkait dengan periode struktur

Untuk $T \leq 0,5$ maka $k = 1$; $T \geq 2,5$ maka $k = 2$; dan untuk $0,5 < T < 2,5$ maka $k = 2$ atau ditentukan dengan interpolasi linear antara 1 dan 2.

Menurut SNI 1726-2019, periode fundamental (T_a) ditentukan melalui persamaan berikut:

$$T_a = C_t h_n^x \dots\dots\dots(28)$$

Keterangan :

h_n = Ketinggian struktur (m), di atas dasar sampai tingkat tertinggi struktur.

Untuk koefisien C_t dan x dapat dilihat pada Tabel 2.10.

Tabel 2.10. Nilai Parameter Periode Pendekatan C_t dan x .

Tipe struktur	C	x
Sistem rangka pemikul momen di mana rangka memikul 100 % gaya seismik yang disyaratkan dan tidak dilingkupi atau dihubungkan dengan komponen yang lebih kaku dan akan mencegah rangka dari defleksi jika dikenai gaya seismik.		
•Rangka baja pemikul momen	0,0724	0,8
• Rangka beton pemikul momen	0,0466	0,9
Rangka baja dengan bresing eksentris	0,0731	0,75
Rangka baja dengan bresing terkekang terhadap tekuk	0,0731	0,75
Semua sistem struktur lainnya	0,0488	0,75

Sumber: SNI 1726-2019

Untuk alternatif penentuan nilai periode fundamental pendekatan (T_a), melihat pada Pasal 7.8.2 SNI 1726-2019, struktur dengan ketinggian kurang dari 12 tingkat dengan sistem pemikul gaya seismik meliputi rangka pemikul momen yang seluruhnya beton atau seluruhnya baja serta rata-rata tinggi tingkat minimal 3 m, nilai periode fundamental bisa ditentukan berdasarkan persamaan berikut:

$$T_a = 0,1 N \dots\dots\dots(29)$$

Keterangan :

N = Jumlah lantai

Adapun periode fundamental maksimum dapat dihitung dari persamaan berikut:

$$T_{max} = C_u \cdot T_a \dots\dots\dots(32)$$

Kemudian untuk menganalisis perilaku struktur, pembatasan terhadap nilai periode ditetapkan dengan menghitung batas atas periode struktur dengan mengalikan periode fundamental pendekatan dengan koefisien C_u . Koefisien nilai C_u dapat ditentukan dari tabel berikut.

Tabel 2.11. Koefisien untuk Batas Atas pada Periode yang Dihitung.

Parameter percepatan respons spektral desain pada 1 detik, (S_{DI})	Koefisien (C_u)
$\geq 0,4$	1,4
0,3	1,4
0,2	1,5
0,1	1,6
$\leq 0,1$	1,7

Sumber: SNI 1726-2019

2. Beban Gravitasi dan Kombinasi Pembebanan

a. Beban hidup (LL/Live Load)

Beban hidup merupakan beban yang tidak membebani struktur secara tetap, beban hidup disesuaikan dengan fungsi bangunan yang bisa dilihat pada Peraturan Pembebanan SNI 1727-2020.

b. Beban mati akibat berat sendiri (DL/Dead Load)

Beban mati merupakan beban yang timbul akibat elemen-elemen struktur bangunan itu sendiri seperti balok, kolom, dan pelat lantai. Beban ini akan dihitung secara otomatis oleh program pemodelan struktur dimana pada tugas akhir ini menggunakan SAP2000.

c. Beban mati tambahan (SDL/Super Dead Load)

Beban mati tambahan merupakan beban mati yang timbul akibat berat dari elemen tambahan yang sifatnya permanen.

d. Beban lateral

Beban lateral merupakan beban horizontal yang salah satunya terdiri dari beban gempa. Beban gempa meliputi seluruh beban statik ekuivalen yang bekerja pada bangunan atau bagian bangunan dari pergerakan tanah akibat gempa itu. Untuk menetapkan pengaruh gempa pada struktur didasarkan dengan analisis dinamik, maka yang disebut dengan beban gempa yakni gaya-gaya di dalam struktur yang terjadi oleh tanah akibat gempa itu sendiri. Beban gempa yang dimaksud meliputi:

- Beban statik ekuivalen
- Beban respon spektrum

e. Kombinasi pembebanan

Untuk memprediksi besarnya beban yang mungkin dapat terjadi, diperlukan kombinasi pembebanan karena di lapangan beban-beban di atas dapat bekerja pada waktu yang bersamaan. Kombinasi pembebanan yang digunakan mengacu pada SNI 1727-2020. Berikut adalah kombinasi-kombinasi pembebanan yang digunakan:

- 1) Kombinasi 1 = $1,4D$
- 2) Kombinasi 2 = $1,2D + 1,6L + 0,5(Lr \text{ atau } S \text{ atau } R)$
- 3) Kombinasi 3 = $1,2D + 1,6(Lr \text{ atau } S \text{ atau } R) + (L \text{ atau } 0,5W)$
- 4) Kombinasi 4 = $1,2D + 1,0W + L + 0,5(Lr \text{ atau } S \text{ atau } R)$
- 5) Kombinasi 5 = $0,9D + 1,0W$
- 6) Kombinasi 6 = $1,2D + E_v + E_h + L + 0,2S$
- 7) Kombinasi 7 = $0,9 D - E_v + E_h$

Keterangan:

- | | |
|-------------------------|--------------------|
| D (<i>dead</i>) | = beban mati |
| L (<i>live</i>) | = beban hidup |
| Lr (<i>live roof</i>) | = beban hidup atap |
| S (<i>snow</i>) | = beban salju |
| R (<i>rain</i>) | = beban hujan |
| W (<i>wind</i>) | = beban angin |
| E (<i>earthquake</i>) | = beban gempa |

H. Program Pemodelan Struktur

Pada perhitungan struktur yang kompleks dan rumit perlu adanya alat bantu perhitungan guna mempermudah pengerjaan dan memperkecil resiko kesalahan. Alat bantu yang dimaksud di sini tak lain adalah program komputer dengan kemampuan dan fasilitas yang mampu mengerjakan perhitungan dengan cepat dan tepat. Berapa pun jumlah bentangan atau jumlah lantai akan dapat ditangani dengan mudah dengan proses perhitungan lewat komputer. (Buku Belajar SAP2000 Edisi Kedua, 2012).

Seiring perkembangan zaman, perencanaan serta analisis penentuan kinerja struktur bangunan dapat disederhanakan dengan kemajuan teknologi yakni menggunakan bantuan program salah satunya SAP2000. Seri Program SAP merupakan salah satu program analisis dan perancangan struktur yang telah dipakai secara luas di seluruh dunia, dimana program ini adalah hasil penelitian dan pengembangan oleh tim dari University of California, Berkeley di bawah pimpinan Prof. Edward L. Wilson selama lebih dari 25 tahun.

Model struktur pada SAP2000 dapat diidealisasikan dalam berbagai macam elemen, antara lain elemen *joint* (titik), *frame* (batang), *shell* (pelat), sampai pada elemen *solid* (pias elemen 3 dimensi untuk pemodelan elemen hingga *I finite element*), sebagai aktualisasi elemen sebenarnya. Misalnya balok dan kolom pada bangunan bertingkat dimodelkan sebagai elemen *frame*, pelat jembatan atau dinding geser sebagai *shell*, tubuh bendungan dibagi-bagi dalam pias-pias kecil elemen *solid*, dan lain-lain. (Buku Belajar SAP2000 Edisi Kedua, 2012)

Program ini jauh lebih membantu jika dibandingkan dengan pengerjaan menggunakan metode konvensional yang masih menghasilkan bentuk pemodelan yang begitu kompleks. Program ini menyederhanakan masalah dalam pemodelan struktur sehingga sangat membantu pekerjaan *civil engineer*.

III. METODOLOGI PENELITIAN

A. Tahapan Perencanaan

Pendekatan penelitian yang digunakan oleh penulis adalah pendekatan kuantitatif. Dipilihnya pendekatan ini karena penelitian yang dikerjakan melibatkan angka atau bilangan. Data kuantitatif yang dipakai adalah data yang diperoleh dari hasil analisis struktur gedung dengan bantuan program SAP2000. Tahapan perencanaan dimulai dari penentuan data *properties* struktur, dan data *properties damper SFPS (Single Friction Pendulum System)*. Analisis dilakukan secara dengan menggunakan bantuan program SAP2000.

B. Lokasi Penelitian

Penelitian dilakukan pada Gedung B Rumah Sakit Umum Muhammadiyah Metro yang berada di Jl. Soekarno Hatta No.42, Mulyojati, Kec. Metro Barat, Kota Metro, Lampung.



Gambar 3.1. Lokasi Penelitian.

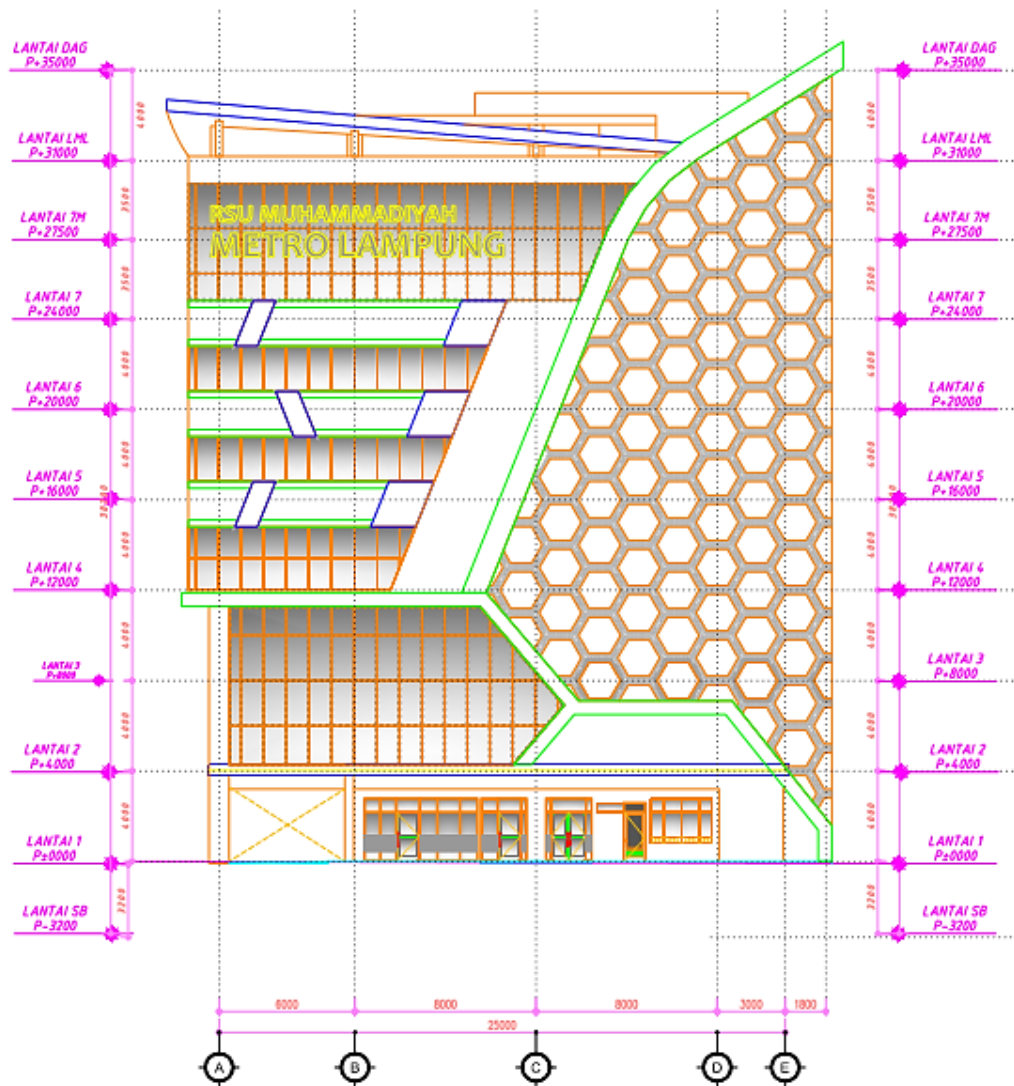
C. Data Penelitian

Siteplan Gedung B Rumah Sakit Umum Muhammadiyah Metro sesuai dengan Gambar 3.2. di mana Gedung B terletak di samping kiri Gedung A.

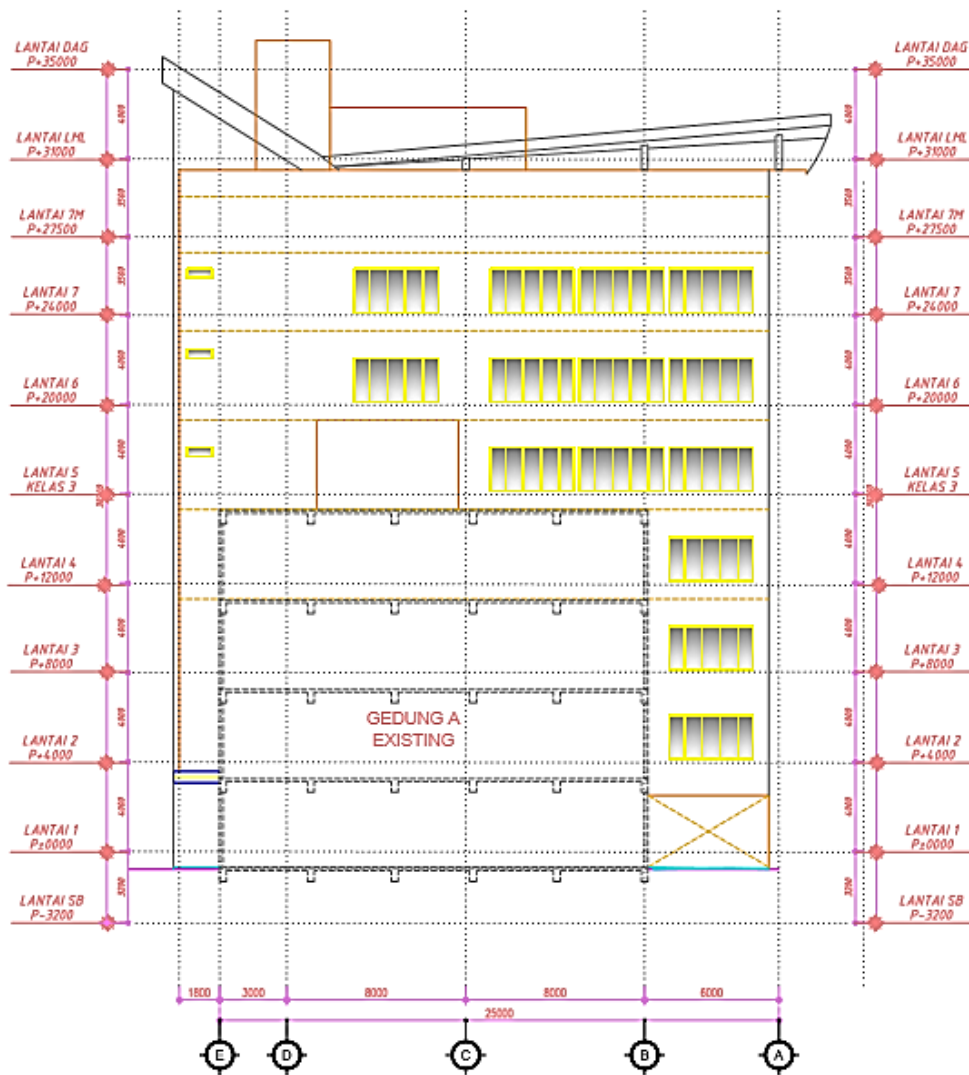


Gambar 3.2. *Siteplan* RSU Muhammadiyah Metro.

Gedung B Rumah Sakit Umum Muhammadiyah Metro mempunyai 7 lantai dengan 1 *basement*. Letak gedung tepat berada di depan gedung A Rumah Sakit Umum Muhammadiyah Metro, dan bersebelahan dengan *Ramp* Pasien yang rencananya akan dibangun di sebelah kiri Gedung B RSU Muhammadiyah Metro. Adapun tampak gedung B Rumah Sakit Umum Muhammadiyah Metro dapat dilihat pada Gambar 3.3 dan Gambar 3.4.



Gambar 3.3. Tampak Depan Gedung yang akan Dianalisis.



Gambar 3.4. Tampak Belakang Gedung yang akan Dianalisis.

1. Luas Bangunan

Luas bangunan pada Gedung B Rumah Sakit Umum Muhammadiyah Metro adalah $\pm 7.467 \text{ m}^2$, dengan luas lahan yaitu $\pm 10.312 \text{ m}^2$. Struktur terdiri dari 7 lantai dengan luas per lantai sebagai berikut:

- a. Luas Basement $\pm 725 \text{ m}^2$
- b. Luas lantai 1 $\pm 905 \text{ m}^2$
- c. Luas lantai 2 $\pm 950 \text{ m}^2$
- d. Luas lantai 3 $\pm 950 \text{ m}^2$
- e. Luas lantai 4 $\pm 951 \text{ m}^2$
- f. Luas lantai 5 $\pm 881 \text{ m}^2$

- g. Luas lantai 6 $\pm 881 \text{ m}^2$
- h. Luas lantai 7 + MEZ $\pm 1170 \text{ m}^2$

2. Ketinggian Bangunan

Ketinggian bangunan adalah sebagai berikut:

- a. *Basement* ke lantai 1 3.2 meter
- b. Lantai 1 ke lantai 2 4 meter
- c. Lantai 2 ke lantai 3 4 meter
- d. Lantai 3 ke lantai 4 4 meter
- e. Lantai 4 ke lantai 5 4 meter
- f. Lantai 5 ke lantai 6 4 meter
- g. Lantai 6 ke lantai 7 4 meter
- h. Lantai 7 ke lantai 7 MEZ 3,5 meter
- i. Lantai 7 MEZ ke lantai atap 3,5 meter

3. *Pile Cap*

Gedung B Rumah Sakit Umum Muhammadiyah Metro menggunakan *pile cap* dengan dimensi yang berbeda-beda yaitu ada 10 dimensi *pile cap* dengan ketebalan 1000 mm. Penggunaan tulangan untuk *pile cap* yaitu tulangan baja D25, D22, D19, D16 dengan jarak 150 mm. Mutu beton yang digunakan adalah K-350.

4. Balok

Pada Gedung B Rumah Sakit Umum Muhammadiyah Metro menggunakan balok struktur dengan dimensi yang berbeda-beda. Terdapat balok anak dan balok induk dalam struktur ini. Mutu beton yang digunakan adalah K-300. Secara umum diameter tulangan utama yang digunakan adalah D13, D16, D25, dengan sengkang D10. Jarak sengkang yang digunakan adalah 100 mm pada daerah tumpuan dan 150 mm pada daerah lapangan.

Tabel 3.1. Dimensi Balok.

No	Tipe Balok	Dimensi Balk(mm)
1.	TB1	400 x 700
2.	TB2	200 x 400
3.	B1	400 x 700
4.	B2	250 x 550
5.	B3	200 x 400
6.	B4	150 x 300

5. Kolom

Pada Gedung B Rumah Sakit Umum Muhammadiyah Metro menggunakan kolom struktur dengan dimensi yang berbeda-beda. Digunakan tulangan baja D25, D19, dan D16 dengan mutu beton yang digunakan adalah K-350, sedangkan diameter tulangan sengkang kolom struktur dan kolom praktis yang digunakan adalah D13-150 dan D13-100.

Tabel 3.2. Dimensi Kolom.

No	Tipe Kolom	Dimensi (mm)
1.	K1	800 x 800
2.	K2	300 x 800
3.	K3	600 x 600
4.	K5	450 x 500
5.	K6	300 x 500

6. Pelat

Pada Gedung B Rumah Sakit Umum Muhammadiyah Metro memiliki tebal 300 mm untuk *groundfloor* (lantai *basement*), 130 mm untuk lantai 1-7 Mazanine, dan 120 mm untuk lantai atap. Tulangan yang digunakan adalah D16-200 untuk tebal pelat 300 mm, dan D10-150 mm untuk tebal pelat 130 mm dan 120 mm. Mutu beton yang direncanakan untuk pelat lantai adalah K-300.

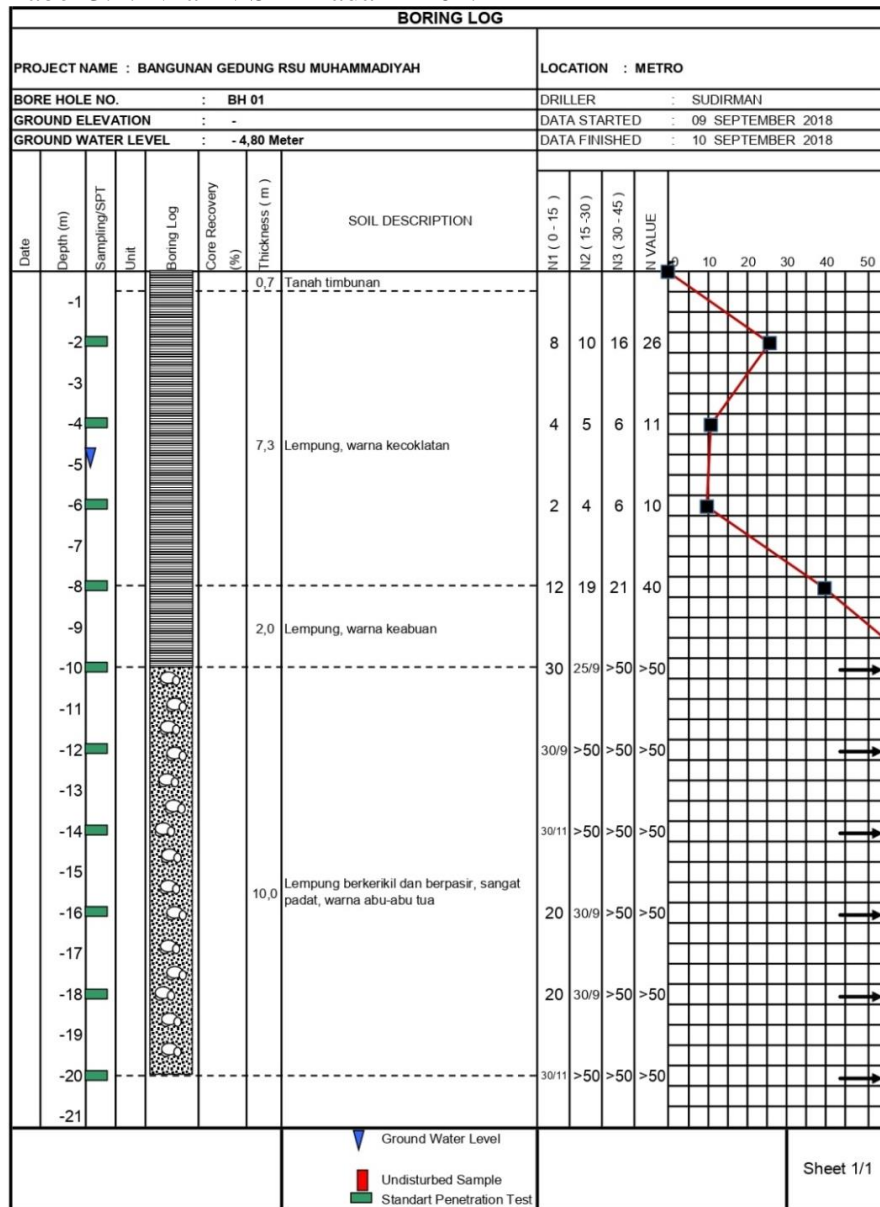
Tabel 3.3. Dimensi dan Tulangan Pelat Lantai.

No	Tipe Pelat	Dimensi (mm)	Tulangan X	Tulangan Y
1.	S1	T = 130	D10-150	D10-150
2.	S2	T = 120	D10-150	D10-150
2.	S2'	T = 120	D10-200	D10-200
3.	S3	T = 150	D10-100	D10-100
3.	S3'	T = 150	D10-150	D10-150
4.	S4	T = 300	D16-200	D16-200

7. Nilai N-SPT

Nilai SPT pada Tabel 3.4 dan 3.5 didapat dari hasil pengujian yang terlampir pada lampiran laporan fondasi (*bored pile*) proyek pembangunan Gedung B Rumah Sakit Umum Muhammadiyah Metro.

Tabel 3.4. Nilai N-SPT Pada BH-01.



Tabel 3.5. Nilai N-SPT Pada BH-02.

BORING LOG										
PROJECT NAME : BANGUNAN GEDUNG RSU MUHAMMADIYAH						LOCATION : METRO				
BORE HOLE NO. : BH 02						DRILLER : SUDIRMAN				
GROUND ELEVATION : -						DATA STARTED : 11 SEPTEMBER 2018				
GROUND WATER LEVEL : -4,75 Meter						DATA FINISHED : 12 SEPTEMBER 2018				
Date	Depth (m)	Sampling/SPT Unit	Boring Log	Core Recovery (%)	Thickness (m)	SOIL DESCRIPTION	N1 (0 - 15)	N2 (15 - 30)	N3 (30 - 45)	N VALUE
	-0.7				0,7	Tanah timbunan				5
	-2						10	10	15	25
	-5,3				5,3	Lempung, warna kecoklatan	2	2	3	5
	-6						4	4	5	9
	-8				6,0	Lempung berpasir, padat, warna keabuan	30/10	>50	>50	>50
	-10						30/7	>50	>50	>50
	-12						21	24	27	>50
	-14				8,0	Lempung berpasir dan berkerkil, warna abu-abu tua	30/8	>50	>50	>50
	-16						30/11	>50	>50	>50
	-18						30/7	>50	>50	>50
	-20						30/6	>50	>50	>50
						Ground Water Level				
						Undisturbed Sample				
						Standart Penetration Test				Sheet 1/1

D. Prosedur Penelitian

1. Studi Literatur

- SNI 1727-2020 tentang Beban Desain Minimum Dan Kriteria Terkait untuk Bangunan Gedung dan Struktur Lain.
- SNI 1726-2019 tentang Tata Cara Perencanaan Ketahanan Gempa untuk Struktur Bangunan Gedung dan Non-gedung.

- c) *Applied Technology Council for Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings* volume-1 (ATC-40, 1996).
- d) Berbagai buku, jurnal-jurnal, dan sumber literatur lainnya mengenai SFPS (*Single Friction Pendulum System*).

2. Pengumpulan Data

Data penelitian dapat dibedakan ke dalam dua kategori, yaitu data primer dan data sekunder. Pengumpulan data serta informasi Gedung B Rumah Sakit Umum Muhammadiyah Metro, baik data sekunder maupun data primer dilakukan dengan teliti. Data yang diperoleh adalah *Shop Drawing* Rumah Sakit. Data ini dipakai untuk pemodelan struktur 3D yang kemudian dianalisis dengan bantuan aplikasi SAP2000.

Shop Drawing digunakan untuk tahapan pemodelan yang sesuai dengan gambar yang ada sehingga analisis ini tidak menyimpang dari gambar yang ada. Semua struktur yang dimodelkan disesuaikan dengan *Shop Drawing*, untuk bangunan non struktural tidak dimodelkan karena tidak memiliki pengaruh yang signifikan pada pemodelan 3D ini.

Data tanah yang dipakai berdasarkan data tanah yang sudah ada (data perancangan rumah sakit). Data tanah digunakan untuk penentuan besarnya gaya tanah yang menekan dinding *basement*.

Data gempa yang dipakai adalah dengan metode *respons spectra* yaitu dimana *file input*-nya diambil dari data gempa nasional. Pada *define* dipilih *function* dan pilih *respons spectrum* sesuai dengan perhitungan yang telah direncanakan.

Data-data alat *base isolator single friction pendulum system* (SFPS) didapatkan setelah mengetahui beban aksial P_{maks} yang terjadi pada kolom bangunan akibat kombinasi beban mati dan hidup, Berdasarkan kapasitas *base isolator* tersebut dalam menahan beban aksial, akan diperoleh dimensi serta properti desain dari *base isolator*.

3. Pemodelan Struktur

Struktur dimodelkan dalam pemodelan 3D dengan memasukkan elemen-elemen struktur berupa balok, kolom, dan pelat. Pembuatan model struktur bangunan dilakukan dengan bantuan program SAP2000 sesuai dengan data dan informasi dari *shop drawing*.

4. Perhitungan Pembebanan

Perhitungan beban-beban yang bekerja pada struktur antara lain beban mati, beban hidup serta beban lateral. Beban mati yang dihitung berdasarkan pemodelan yang ada dimana beban sendiri di dalam program SAP2000 dimasukkan dalam *load case dead*, sedangkan berat sendiri tambahan yang tidak bisa dimodelkan dalam program SAP2000 dimasukkan dalam *load case super dead*. Adapun perhitungan berat sendiri dalam program SAP2000 untuk *dead* adalah 1, sedangkan *super dead* adalah 0, dimana beban untuk *dead* sudah otomatis terhitung oleh program SAP2000, sedangkan untuk beban *super dead* perlu dimasukkan secara manual sesuai dengan data yang ada.

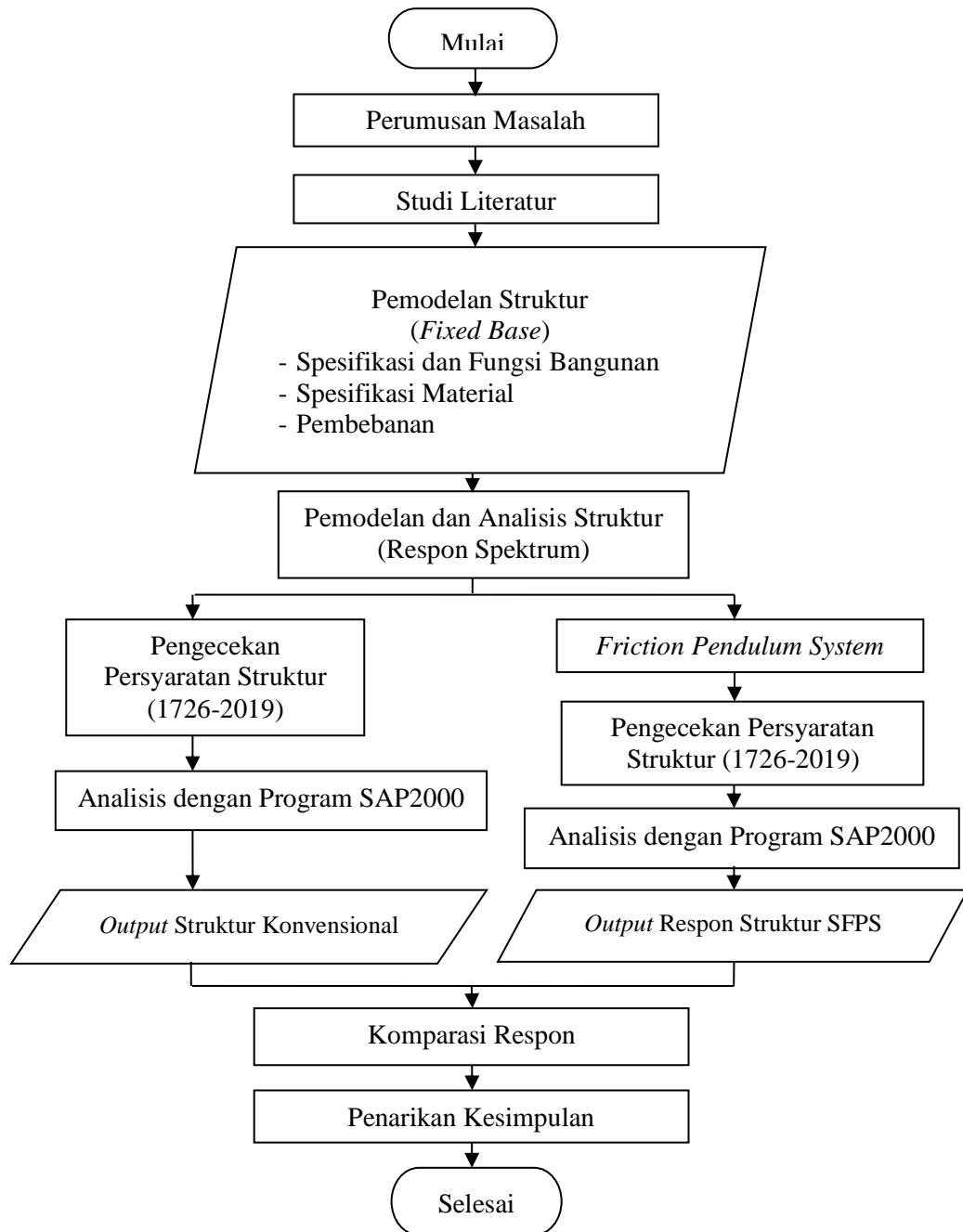
Beban hidup yang dimasukkan pada program SAP2000 dinotasikan dalam *live*. Beban hidup ini memperoleh reduksi beban gempa. Beban hidup disesuaikan dengan peraturan yang ada. Adapun perhitungan beban hidup pada program SAP2000 untuk *live* adalah 0, di mana beban hidup perlu dimasukkan secara manual sesuai dengan data yang ada.

5. Analisis Struktur

Analisis struktur dilakukan dengan menggunakan bantuan program SAP2000. Data struktur, data gempa, redaman dan *friction isolator* harus dimasukan dengan teliti. Setelah semua data *terinput* maka langkah selanjutnya adalah melakukan *run analisis*. Setelah itu maka perhitungan telah selesai, namun harus diperhatikan ada atau tidaknya *error* atau *warning* pada *SAP Analisis Monitor*. Jika tidak *error* atau *warning* maka pekerjaan analisis SAP2000 telah selesai dengan benar.

E. Diagram Alir Penelitian

Tahapan penelitian pada tugas akhir ini tercantum pada diagram aliran berikut, dimana pada tugas akhir ini berisi perbandingan antara bangunan tanpa *base isolator* dan bangunan menggunakan *base isolator* jenis *Single Friction Pendulum System*.



Gambar 3.5 Diagram Aliran.

V. PENUTUP

A. Kesimpulan

Dari hasil analisis dan evaluasi yang dilakukan pada Gedung B Rumah Sakit Umum Muhammadiyah Metro, diperoleh kesimpulan sebagai berikut:

1. Bangunan dengan *base isolator Single Friction Pendulum System* mengalami perpindahan lateral (*displacement*) yang lebih besar dibandingkan dengan bangunan tanpa *base isolator*. Dimana untuk bangunan tanpa *base isolator displacement maximum* arah X = 37,9885 mm dan arah Y = 23,5410 mm; sedangkan bangunan dengan *base isolator displacement maximum* arah X = 47,4988 mm dan arah Y = 30,0408 mm.

Lalu saat terjadi gaya gempa, berdasarkan analisis yang sudah dilakukan bangunan yang menggunakan *base isolator SFPS* mengalami percepatan yang lebih kecil dibandingkan dengan bangunan tanpa *base isolator*.

2. Bangunan yang menggunakan *base isolator* dalam hal ini jenis *Single Friction Pendulum System* memiliki waktu getar alami (periode) sebesar 2,7410 detik dimana lebih panjang dibandingkan dengan bangunan tanpa *base isolator* yaitu sebesar 2,1426 detik.

Untuk simpangan antar tingkat (*interstory drift*) yang terjadi pada bangunan yang menggunakan *Single Friction Pendulum System* masih memenuhi persyaratan simpangan antar tingkat izin (0,015hsx) berdasarkan SNI 1726-2019. Dan simpangan antar tingkat (*interstory drift*) yang terjadi pada bangunan dengan *base isolator SFPS* lebih kecil dibandingkan dengan simpangan antar tingkat bangunan tanpa *base isolator*.

3. Gaya geser bangunan dengan *base isolator SFPS* arah X = 909,6857 kN; arah Y = 916,9172 kN lebih kecil dibandingkan dengan gaya geser bangunan yang tidak menggunakan *base isolator* arah X = 1045, 9049 kN; arah Y = 2017,4889 kN.

B. Saran

Berdasarkan analisis yang telah dilakukan, maka terdapat beberapa saran antara lain:

1. Untuk tugas akhir ini dimana mengambil studi kasus Gedung B Rumah Sakit Umum Muhammadiyah Metro akan menarik jika kembali dilakukan analisis menggunakan jenis *friction pendulum* yang berbeda, baik *double* maupun *triple pendulum*.
2. Sistem peredam (*base isolator*) dapat digunakan pada struktur yang lebih kompleks dengan berbagai bentuk yang bervariasi dan tingkatan yang lebih tinggi.

DAFTAR PUSTAKA

- Amri, M. R., dkk. 2016. *Risiko Bencana Indonesia (RBI)*. Jakarta: Badan Nasional Penanggulangan Bencana.
- ATC-40. 1996. *Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings, Volume 1*. California: Seismic Safety Commission State of California.
- Budiono, B dan Andri Setiawan. 2014. *Studi Komparasi Sistem Isolasi Dasar High-Damping Rubber Bearing dan Friction Pendulum System pada Bangunan Beton Bertulang*. Bandung: Institut Teknologi Bandung. Jurnal Teknik Sipil, Vol. 21 No. 3 Desember 2014. ISSN 0853-2982.
- Budiono, B dan Cella Adelia. 2015. *Penggunaan Isolasi Dasar Single Friction Pendulum dan Triple Friction Pendulum pada Bangunan Beton Bertulang*. Bandung : Institut Teknologi Bandung. Jurnal Teknik Sipil, Vol. 22 No. 2 Agustus 2015. ISSN 0853-2982.
- Setiawan, A. 2016. *Perancangan Struktur Beton Bertulang*. Jakarta: Erlangga.
- Satyarno, Imam. Purbolaras Nawangalam. R Indra Pratomo P. 2012. *Belajar SAP2000 Edisi Kedua*. Yogyakarta: Zamil Publishing.
- SNI 1726-2019. 2019. *Tata Cara Perencanaan Ketahanan Gempa untuk Struktur Bangunan Gedung dan Non Gedung*. Jakarta: Badan Standarisasi Nasional.
- SNI 1727-2020. 2020. *Beban Desain Minimum dan Kriteria Terkait untuk Bangunan Gedung dan Struktur Lain*. Jakarta: Badan Standarisasi Nasional.
- SNI 2847-2019. 2019. *Persyaratan Beton Struktural untuk Bangunan Gedung*. Jakarta: Badan Standarisasi Nasional.
- <https://rsa.ciptakarya.pu.go.id/2021/index.php?pga=0.3163&ss=0.6930&s1=0.3763&tl=20&kelas=2#grafik>. akses tanggal 1 September 2023