

**PERBANDINGAN RESPONS SEISMIK STRUKTUR GEDUNG
SISTEM KONVENSIONAL (*FIXED BASE*) DENGAN SISTEM
ISOLASI DASAR *DOUBLE FRICTION PENDULUM*
(Studi Kasus: Gedung Kuliah Terpadu Institut Agama Islam
Negeri Metro)**

(SKRIPSI)

Oleh

**VIVIAN CHEN
NPM 2015011051**



**FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2024**

ABSTRACT

COMPARISON OF SEISMIC RESPONSE OF CONVENTIONAL BUILDING STRUCTURE (FIXED BASE) WITH SEISMIC ISOLATION TYPE DOUBLE FRICTION PENDULUM SYSTEM (Case Study: Integrated Lecture Building of the State Institute of Islam Metro)

By

VIVIAN CHEN

Building design must consider resistance to earthquakes, as earthquakes frequently destabilize multi-storey buildings. One strategy devised to mitigate earthquake forces is using seismic isolation. This study investigates the seismic response of a college building using a double friction pendulum type seismic isolation system. It compares this system with a conventional approach to assess its effectiveness in reducing earthquake impacts such as base shear force, period, and inter-story drift.

This research takes a case study of the Integrated Lecture Building of the State Institute of Islam (IAIN) Metro using data from 7 earthquake records (accelerograms) including: Morgan Hill (California, 1984), Chi-chi (Taiwan, 1999), Hamadori (Japan, 2011), Iwate-oki (Japan, 2011), KushiroAs (Japan, 2004), Hyuganada (Japan, 1996), and Toakchi-oki (Japan, 2008). Structural analysis was calculated using a commercial structural analysis program in a three-dimensional model. The friction pendulum system utilized the NS-SSB (Nippon Steel-Spherical Sliding Bearing) brochure type NSSSB-M(L)-45-350-700.

The research result obtained that the structure with seismic isolation has a period of 2,06 times longer than the fixed base structure model. The use of seismic isolation of double friction pendulum in the structure reduces the average interstory drift by 33.31% in the X direction and 38.74% in the Y direction.

Keyword : seismic isolation, seismic response, time history analysis

ABSTRAK

PERBANDINGAN RESPONS SEISMIK STRUKTUR GEDUNG SISTEM KONVENSIONAL (*FIXED BASE*) DENGAN SISTEM ISOLASI DASAR *DOUBLE FRICTION PENDULUM* (Studi Kasus: Gedung Kuliah Terpadu Institut Agama Islam Metro)

Oleh

VIVIAN CHEN

Desain gedung harus mempertimbangkan ketahanan terhadap gempa bumi, yang sering kali mengganggu stabilitas bangunan bertingkat. Salah satu strategi yang dikembangkan untuk mereduksi gaya gempa adalah penggunaan *seismic isolation*. Penelitian ini mengkaji respons seismik gedung kuliah menggunakan sistem isolasi dasar tipe *double friction pendulum*, membandingkannya dengan sistem konvensional, untuk mengevaluasi efektivitas struktur dalam mengurangi energi gempa seperti gaya geser dasar, periode, dan *drift* antar lantai.

Penelitian ini mengambil studi kasus pada Gedung Kuliah Terpadu Institut Agama Islam Negeri (IAIN) Metro menggunakan data 7 rekaman gempa (akselerogram) antara lain: Morgan Hill (California, 1984), Chi-chi (Taiwan, 1999), Hamadori (Japan, 2011), Iwate-oki (Japan, 2011), KushiroAs (Japan, 2004), Hyuganada (Japan, 1996), dan Toakchi-oki (Japan, 2008). Analisis struktur dihitung menggunakan program analisis struktur komersial dalam model tiga dimensi. Perencanaan *friction pendulum* menggunakan brosur NS-SSB (*Nippon Steel-Spherical Sliding Bearing*) tipe NSSSB-M(L)-45-350-700R.

Dari analisis dan perhitungan struktur dengan *seismic isolation* diperoleh periode struktur 2,06 kali lebih besar dibandingkan dengan model struktur *fixed base*. Struktur dengan *seismic isolation* memiliki gaya geser dasar yang lebih kecil dari struktur *fixed base* dengan selisih sebesar 33,33%. Penggunaan *seismic isolation* tipe *double friction pendulum* pada struktur mereduksi *interstory drift* rata-rata dari penggunaan sebesar 33,31% pada arah X dan 38,74% pada arah Y.

Kata kunci : analisis riwayat waktu, isolasi dasar, respons seismik

**PERBANDINGAN RESPONS SEISMIK STRUKTUR
GEDUNG SISTEM KONVENSIONAL (*FIXED BASE*)
DENGAN SISTEM ISOLASI DASAR
*DOUBLE FRICTION PENDULUM***

Oleh

VIVIAN CHEN

Skripsi

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

Pada

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



**PROGRAM STUDI TEKNIK SIPIL
JURUSAN TEKNIK SIPIL
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDARLAMPUNG
2024**

Judul Skripsi : **PERBANDINGAN RESPONS SEISMIK STRUKTUR GEDUNG SISTEM KONVENSIONAL (*FIXED BASE*) DENGAN SISTEM ISOLASI DASAR *DOUBLE FRICTION PENDULUM* (Studi Kasus: Gedung Kuliah Terpadu Institut Agama Islam Negeri Metro)**


Nama Mahasiswa : **Oivian Chen**


Nomor Pokok Mahasiswa : 2015011051

Program Studi : 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 Teknik Sipil

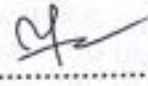

Sasana Putra, S.T., M.T.
NIP 19691111 200003 1 002


Dr. 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 : **Suyadi, S.T., M.T.**



.....

2. Dekan Fakultas Teknik



Dr. Eng. Ir. Henny Fitriawan, S.T., M.Sc.}
NIP 19750928 200112 1 002

Tanggal Lulus Ujian Skripsi : **7 Agustus 2024**

LEMBAR PERNYATAAN

Saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Vivian Chen

Nomor Pokok Mahasiswa : 2015011051

Judul Skripsi : PERBANDINGAN RESPONS SEISMIKSTRUKTUR
GEDUNG SISTEM KONVENSIONAL (*FIXED
BASE*) DENGAN SISTEM ISOLASI DASAR
DOUBLE FRICTION PENDULUM
(Studi Kasus: Gedung Kuliah Terpadu Institut
Agama Islam Negeri Metro)

Jurusan : Teknik Sipil

Fakultas : Teknik

Dengan ini menyatakan bahwa skripsi adalah hasil pekerjaan saya sendiri dan semua tulisan yang tertuang dalam skripsi ini telah mengikuti Kaidah Penulisan Karya Ilmiah Universitas Lampung.

Bandar Lampung, 7 Agustus 2024

Penulis



Vivian Chen
2015011051

RIWAYAT HIDUP



Penulis dilahirkan di Kota Bandar Lampung pada tanggal 30 Oktober 2001. Penulis merupakan anak pertama dari tiga bersaudara, putri dari Bapak Darmadi dan Ibu Ichi Wahyuni. Penulis merupakan tiga bersaudara dengan memiliki 2 (dua) orang adik kembar bernama Devan Aprillio dan Devin Aprillio.

Penulis memulai pendidikan di TK Sandhy Putra Telkom dan melanjutkan pendidikan sekolah dasar di SDN 2 Sukabumi yang diselesaikan pada tahun 2013. Pada tahun 2016, penulis menyelesaikan pendidikan Sekolah Menengah Pertama di SMPN 4 Bandar Lampung dan melanjutkan Sekolah Menengah Atas di SMAN 2 Bandar Lampung yang diselesaikan pada tahun 2019. Penulis diterima sebagai mahasiswa Jurusan Teknik Sipil, Universitas Lampung pada tahun 2020.

Pada Januari 2023, penulis mengikuti Kuliah Kerja Nyata (KKN) di Desa Bima Sakti, Kecamatan Negeri Besar, Way Kanan selama 40 hari, 4 Januari – 10 Februari 2023. Di tahun yang sama, penulis juga telah melakukan Kerja Praktik di Proyek Pembangunan Gedung *Training Center* Institut Teknologi Sumatera selama 3 bulan. Penulis pernah menjadi asisten dosen mata kuliah Statika dan Hidrolika. Penulis juga tercatat sebagai Pembimbing Mahasiswa Baru pada pengakderan Himpunan Mahasiswa Teknik Sipil (HIMATEKS) Universitas Lampung pada periode 2022/2023.

Pada tahun 2023, penulis pernah diangkat menjadi Sekretaris Koordinator Konsumsi pada acara *Civil Brings Revolution* (CBR) yang kedelepan. Selanjutnya, penulis mengambil tugas akhir pada tahun 2024, dengan judul “Perbandingan Respons Seismik Struktur Gedung Sistem Konvensional (*Fixed Base*) dengan Sistem Isolasi Dasar (*Double Friction Pendulum*)” (Studi Kasus: Gedung Kuliah Terpadu Institut Agama Islam Negeri Metro).

PERSEMBAHAN

Alhamdulillahirabbilalamin

Puji dan syukur berkat rahmat-Nya, penulis mampu menyelesaikan tugas akhir ini. Shalawat serta salam selalu tercurahkan kepada Nabi Muhammad Shallallahu Alaihi

Wassalam

Kupersembahkan karya ini kepada:

Kedua Orang Tuaku Tercinta

Yang membuat segalanya menjadi mungkin sehingga aku sampai pada tahap ini, kepada dua orang hebat dalam hidupku, Papa dan Mama. Terima kasih atas segala pengorbanan, nasihat, serta doa yang tidak pernah terhenti untuk menyertaiku.

Adikku Tersayang

Yang selalu memberikan semangat, hiburan, doa dan dukungan.

Sahabatku

Yang senantiasa menemani, menjadi pendengar, memberikan semangat, motivasi dan mengajarku dalam hal-hal baik dihidup ini.

Dosen Teknik Sipil

Yang sangat berjasa dalam memberikan ilmu dan petunjuk selama proses belajar mengajar serta membimbing dalam penyelesaian skripsi ini.

Diri Sendiri

Yang sudah kuat, pantang menyerah, dan berusaha keras untuk bertahan sejauh ini.

Keluarga Besar Teknik Sipil 2020 (BRINGAS)

Yang selalu membantu, memberikan semangat, selalu memberikan dukungan.

MOTTO

“Allah tidak membebani seseorang melainkan sesuai dengan kesanggupannya.”

(QS. Al-Baqarah: 286)

“Ayo lebih banyak lagi bersyukur”

(Dimas Prayuda)

“Love what you do and do what you love.”

(Ray Bradbury)

“Kalau kamu sendiri kurang yakin, gimana Tuhan mau memberikan kepercayaan?”

(Vivian Chen)

PRAKATA

Puji dan syukur penulis panjatkan kepada Allah SWT yang telah memberikan rahmat dan anugerah-Nya kepada penulis, sehingga penulis mampu menyelesaikan skripsi yang berjudul “Perbandingan Respons Seismik Struktur Gedung Sistem Konvensional (*Fixed Base*) dengan Sistem Isolasi Dasar (*Double Friction Pendulum*) (Studi Kasus: Gedung Kuliah Terpadu Institut Agama Islam Negeri Metro)” dalam rangka memenuhi salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik di Universitas Lampung.

Pada kesempatan ini penulis menyampaikan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada berbagai pihak yang telah berkontribusi dalam penulisan skripsi ini, yaitu:

1. Prof. Dr. Ir. Lusmeilia Afriani, D.E.A., I.P.M, selaku Rektor Universitas Lampung sekaligus Dosen Teknik Sipil.
2. Dr. Eng. 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, Fakultas Teknik, Universitas Lampung.
4. Bapak Amril Ma'ruf Siregar, S.T., M.T., selaku Dosen Pembimbing Akademik.
5. Bapak Dr. Mohd. Isneini, S.T., M.T., selaku Dosen Pembimbing Utama atas kesediannya meluangkan waktu untuk memberikan bimbingan, dukungan, saran serta kritik dalam proses perkuliahan terutama selama penyusunan skripsi ini.
6. Ibu Hasti Riakara Husni, S.T., M.T., selaku Dosen Pembimbing Kedua atas kesediannya meluangkan waktu untuk memberikan bimbingan, dukungan, saran serta kritik dalam proses perkuliahan terutama selama penyusunan skripsi ini.
7. Bapak Dr. Suyadi, S.T., M.T., selaku Dosen Penguji yang telah memberikan saran dan arahan kepada penulis guna penyempurnaan skripsi ini.

8. Kedua orang tuaku tercinta, Papa Darmadi dan Mama Ichi Wahyuni, serta Oma Asei, Kuku Rini, dan adik kembarku yang selalu tulus, penuh kasih sayang, dan kesabaran dalam memberikan dukungan, dorongan baik materildan spiritual sehingga penulis dapat menyelesaikan segala proses perkuliahan.
9. Dimas Prayuda yang senantiasa memberikan motivasi, kasih sayang, serta dukungan dan bantuan untuk terus belajar. Terima kasih karena selalu menjadi pendengar yang baik, memberikan warna dalam kehidupan dan selalu menemani dalam suka dan duka.
10. Tim *Hoes Mad*, (ael, aqila, eneng, lala, rere dan repita), yaitu teman-teman lincah penulis yang selalu menghibur dan memberikan dukungan baik dibidang akademik dan non akademik.
11. Tim FWB Tobat, (ael, aqila, eneng, lala, rere, repita, nuri, pirki, bima, erja, ammar, jon dan jeje), yaitu teman kuliah dari semester satu dan selalu memenuhi keinginan penulis untuk berjalan-jalan ke air terjun dan pantai.
12. Tim *Kewpie* Dadakan (dp, jeje, nababan, alif dan erja) yang selalu memberikan dukungan dibidang kuliner, terimakasih karena selalu mengikutsertakan penulis untuk hadir dalam setiap acara dadakannya.
13. Tim *Chasing* ST 2024, Mujahidah Fathimah Zahra dan I Nyoman Wahyu Widhiasta tim skripsi yang selalu baik tidak pernah marah dan selalu sabar menghadapi sifat penulis.
14. Tim Ayok Sukses, Fathia Radinda, Lionie Natasha, dan Nadia Mariam yang selalu menemani dan memberikan bantuan kepada penulis selama *gap year*.

Penulis menyadari bahwa penulisan skripsi ini masih terdapat banyak kekurangan baik dari segi penulisan maupun isi, sehingga saran dan masukan membangun diperlukan oleh penulis agar laporan sempurna di kemudian hari. Akhir kata, penulis berharap semoga skripsi ini dapat bermanfaat dan berguna.

Bandar Lampung, Agustus 2024

Penulis,

Vivian Chen

DAFTAR ISI

	Halaman
DAFTAR GAMBAR	vi
DAFTAR TABEL	ix
DAFTAR NOTASI	xiii
I. PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	3
1.3 Batasan Masalah.....	4
1.4 Tujuan Penelitian.....	5
1.5 Manfaat Penelitian	5
II. TINJAUAN PUSTAKA	6
2.1 Bangunan Gedung Tahan Gempa.....	6
2.2 <i>Base Isolation</i>	8
2.3 Jenis <i>Base Isolation</i>	9
2.3.1 <i>Natural Rubber Bearing</i>	9
2.3.2 <i>Lead Rubber Bearing</i>	9
2.3.3 <i>High Damping Rubber Bearing</i>	10
2.3.4 <i>Friction Pendulum System</i>	11
2.4 <i>Double Friction Pendulum</i>	12
2.5 Pemodelan <i>Double Friction Pendulum System</i>	13
2.6 Metode Analisis Gempa	15
2.7 Analisis Riwayat Waktu Percepatan Gempa (<i>Time History</i>)	16
2.8 Pembebanan Struktur	17
2.9 Kombinasi Pembebanan.....	18
2.10 Tinjauan Struktur Terhadap Gempa Berdasarkan SNI 1726:2019.....	19
2.10.1 Gempa Rencana	19
2.10.2 Faktor Keutamaan Gempa dan Kategori Risiko Struktur Bangunan	20
2.10.3 Klasifikasi Situs	23
2.10.4 Wilayah Gempa.....	24
2.10.5 Koefisien Situs	26

2.10.6	Parameter Percepatan Spektral Desain.....	27
2.10.7	Spektrum Respon Desain	27
2.10.8	Kategori Desain Seismik.....	28
2.10.9	Sistem Pemikul Gaya Seismik	29
2.11	Respon Seismik.....	30
2.11.1	Gaya Geser Dasar Seismik.....	30
2.11.2	Koefisien Respon Seismik Statik Ekuivalen.....	31
2.11.3	Penentuan Periode.....	31
2.11.4	Simpangan Antar Tingkat.....	33
2.12	Pengecekan Ketidakberaturan Struktur.....	35
2.13	Persyaratan Umum Bangunan dengan Sistem Isolasi Dasar.....	38
2.13.1	Faktor Keutamaan Gempa.....	38
2.13.2	Faktor Redudansi dan Faktor Pembesaran Lateral.....	38
2.13.3	Batas Simpangan Antar Tingkat.....	38
2.14	Penelitian Terdahulu.....	38
III. METODOLOGI PENELITIAN		42
3.1	Objek Penelitian	42
3.2	Data Penelitian	42
3.2.1	Data Umum	47
3.2.2	Spesifikasi Material.....	48
3.2.3	Kolom.....	48
3.2.4	Balok	49
3.2.5	Pelat.....	49
3.2.6	Data Tanah.....	49
3.2.7	Data Beban Gravitasi	51
3.2.8	Data Beban Gempa	52
3.3	Diagram Alir Penelitian.....	53
3.4	Prosedur Penelitian.....	55
3.4.1	Studi Literatur	55
3.4.2	Pengumpulan Data	55
3.4.3	Pemodelan 3D	56
3.4.4	Penginputan Pembebanan	57
3.4.5	Pemodelan Bangunan Dengan Isolasi Dasar Tipe <i>Double Friction Pendulum</i>	58
3.4.6	Analisis Struktur Metode Linear Riwayat Waktu (<i>Time History Analysis</i>).....	58
3.4.7	Respons Seismik Struktur Menurut SNI 1726:2019.....	67
IV. HASIL DAN PEMBAHASAN		68
4.1	Umum.....	68
4.2	Analisis Respon Spektrum Gedung <i>Fixed Base</i>	72
4.2.1	Gerak Dominan Gedung	72
4.2.2	Periode Fundamental Struktur <i>Fixed Base</i>	73

4.2.3	Koefisien Respon Seismik Struktur <i>Fixed Base</i>	73
4.2.4	Ragam Getar dan Periode Getar Struktur <i>Fixed Base</i>	74
4.2.5	Pengecekan Ketidakberaturan Horizontal.....	75
4.2.6	Pengecekan Ketidakberaturan Vertikal	77
4.2.7	Pengecekan Gaya Aksial Kolom Terbesar	80
4.3	Analisis <i>Linier Time History</i> Gedung <i>Fixed Base</i>	81
4.3.1	Berat Struktur Bangunan tiap Lantai.....	81
4.3.2	Periode Getar.....	81
4.3.3	Kontrol Gaya Geser Dasar (<i>Base Shear</i>)	82
4.3.4	Kontrol Simpangan Antar Tingkat (<i>Interstory Drift</i>)	85
4.4	Penentuan Dimensi <i>Double Friction Pendulum</i>	91
4.5	Penginputan <i>Double Friction Pendulum</i> pada ETABS.....	94
4.6	Analisis <i>Linier Time History</i> Gedung dengan <i>Double Friction Pendulum</i>	97
4.6.1	Ragam Getar dan Periode Getar.....	98
4.6.2	Koefisien Respon Seismik	99
4.6.3	Kontrol Gaya Geser Dasar (<i>Base Shear</i>)	100
4.6.4	Kontrol Simpangan Antar Tingkat (<i>Interstory Drift</i>)	103
4.7	Perbandingan Struktur <i>Fixed Base</i> dan <i>Seismic Isolation</i>	108
4.7.1	Periode Struktur	108
4.7.2	Gaya Geser Dasar (<i>Base Shear</i>).....	109
4.7.3	Simpangan Antar Tingkat (<i>Interstory Drift</i>)	114
V.	KESIMPULAN DAN SARAN	125
5.1	Kesimpulan	125
5.2	Saran.....	126
	DAFTAR PUSTAKA.....	127
	LAMPIRAN A (Tahapan dan Hasil Output ETABS)	
	LAMPIRAN B (Gambar Kerja)	
	LAMPIRAN C (Brosur NSSS-B)	
	LAMPIRAN D (Lembar Asistensi)	

DAFTAR GAMBAR

Gambar	Halaman
2.1. Level-level kerusakan bangunan.....	7
2.2. Perilaku Struktur Bangunan dengan <i>Base Isolation</i>	8
2.3. <i>Natural Rubber Bearing</i>	9
2.4. <i>Lead Rubber Bearing</i>	10
2.5. <i>High Damping Rubber Bearing</i>	11
2.6. <i>Friction Pendulum Systems</i>	12
2.7. Detail <i>Double Friction Pendulum</i>	13
2.8. Parameter spektral percepatan gempa untuk periode 1 detik (S_1).....	25
2.9. Parameter spektral percepatan gempa untuk periode pendek.....	25
2.10. Respon spektrum rancang.....	28
2.11. Penentuan simpangan antar tingkat.....	33
3.1. Denah lokasi objek penelitian.....	42
3.2. Tampak depan Gedung Kuliah Terpadu IAIN Metro.....	43
3.3. Tampak belakang Gedung Kuliah Terpadu IAIN Metro.....	44
3.4. Tampak samping kanan Gedung Kuliah Terpadu IAIN Metro.....	45
3.5. Tampak samping kiri Gedung Kuliah Terpadu IAIN Metro.....	46
3.6. Grafik spektrum respons desain yang digunakan.....	52
3.7. Diagram alir penelitian.....	53
3.8. Diagram alir analisis riwayat waktu.....	54
3.9. Rekaman gempa Morgan Hill arah X.....	61
3.10. Rekaman gempa Morgan Hill arah Y.....	61
3.11. Rekaman gempa Hyuganada arah X.....	62
3.12. Rekaman gempa Hyuganada arah Y.....	62
3.13. Rekaman gempa Chi-chi arah X.....	63
3.14. Rekaman gempa Chi-chi arah Y.....	63
3.15. Rekaman gempa Kushiro As arah X.....	64

3.16. Rekaman gempa Kushiro As arah Y.....	64
3.17. Rekaman gempa Toakchi Oki arah X.....	65
3.18. Rekaman gempa Toakchi Oki arah Y.....	65
3.19. Rekaman gempa Hamadori arah X.....	66
3.20. Rekaman gempa Hamadori arah Y.....	66
3.21. Rekaman gempa Iwate Oki arah X.....	67
3.22. Rekaman gempa Iwate Oki arah Y.....	67
4.1. Tampak depan pemodelan gedung.....	68
4.2. Tampak kanan pemodelan gedung.....	69
4.3. Tampak kiri pemodelan gedung.....	69
4.4. Tampak belakang pemodelan gedung.....	69
4.5. Denah lantai 2.....	70
4.6. Denah lantai 3.....	70
4.7. Lantai atap.....	71
4.8. Penyesuaian tipe rangka struktur beton SRPMM.....	71
4.9. Penyesuaian desain struktur.....	72
4.10. Properti <i>Double Friction Pendulum</i>	91
4.11. Penginputan kekakuan dan redaman arah vertikal FPS.....	95
4.12. Penginputan kekakuan dan redaman arah horizontal FPS.....	95
4.13. Penginputan data <i>spring</i>	96
4.14. Pemodelan <i>double friction pendulum</i> pada ETABS.....	97
4.15. Penginputan nilai I_e dan C_d pada struktur terisolasi.....	97
4.16. Grafik perbandingan periode struktur.....	109
4.17. Grafik perbandingan <i>base shear</i> Morgan Hill.....	111
4.18. Grafik perbandingan <i>base shear</i> Hyuganada.....	111
4.19. Grafik perbandingan <i>base shear</i> Chi-chi.....	112
4.20. Grafik perbandingan <i>base shear</i> Kushiro As.....	112
4.21. Grafik perbandingan <i>base shear</i> Toakchi-oki.....	113
4.22. Grafik perbandingan <i>base shear</i> Hamadori.....	113
4.23. Grafik perbandingan <i>base shear</i> Iwate-oki.....	114
4.24. Grafik perbandingan <i>interstory drift</i> Morgan Hill.....	115
4.25. Grafik perbandingan <i>interstory drift</i> Hyuganada.....	116

4.26. Grafik perbandingan <i>interstory drift</i> Chi-chi.	117
4.27. Grafik perbandingan <i>interstory drift</i> Kushiro As.	118
4.28. Grafik perbandingan <i>interstory drift</i> Toakchi-Oki.	119
4.29. Grafik perbandingan <i>interstory drift</i> Hamadori.	120
4.30. Grafik perbandingan <i>interstory drift</i> Iwate-Oki.	121
4.31. Simpangan antar tingkat <i>fixed base</i> gabungan arah X.	122
4.32. Simpangan antar tingkat <i>fixed base</i> gabungan arah Y.	123
4.33. Simpangan antar tingkat DFPS gabungan arah X.	123
4.34. Simpangan antar tingkat DFPS gabungan arah Y.	124

DAFTAR TABEL

Tabel	Halaman
2.1. Pergerakan <i>Double Friction Pendulum</i>	13
2.2. Kategori Risiko Bangunan Gedung dan Non Gedung untuk Beban Gempa.....	20
2.3. Faktor Keutamaan Gempa.....	23
2.4. Klasifikasi Situs	23
2.5. Koefisien Situs, F_a	26
2.6. Koefisien Situs, F_v	27
2.7. Kategori Desain Seismik Berdasarkan Parameter Respon Percepatan pada Periode Pendek (S_{DS})	29
2.8. Kategori Desain Seismik Berdasarkan Parameter Respon Percepatan pada Periode 1 Detik (S_{D1})	29
2.9. Faktor R , Ω_0 , C_d untuk Sistem Pemikul Gaya Seismik	29
2.10. Koefisien untuk Batas Atas pada Periode yang Dihitung	32
2.11. Nilai Parameter Periode Pendekatan C_t dan x	32
2.12. Batasan Simpangan Antar Lantai.....	34
2.13. Ketidakberaturan Horizontal	35
2.14. Ketidakberaturan Vertikal.....	36
2.15. Perbandingan Penelitian yang akan Dilakukan dengan Penelitian Terdahulu	39
3.1. Data Elevasi Bangunan	47
3.2. Detail Kolom.....	50
3.3. Beban Mati Dinding.....	51
3.4. Beban Mati Tambahan Pelat Lantai yang Digunakan.....	51
3.5. Beban Mati Tambahan Pelat Atap yang Digunakan	51
3.6. Beban Hidup yang Digunakan	51
3.7. Beban Hidup di Atap yang Digunakan	51
3.8. Parameter yang Digunakan untuk Membuat Grafik Spektrum Respons Desain.....	52

3.9. Rekaman Gempa yang Digunakan.....	52
4.1. Ragam Getar dan Periode Getar Model Gedung <i>Fixed Base</i>	75
4.2. Pengecekan Ketidakberaturan Horizontal Tipe 1A dan 1B.....	76
4.3. Pengecekan Ketidakberaturan Horizontal Tipe 3.....	76
4.4. Pengecekan Ketidakberaturan Vertikal 1A arah X.....	77
4.5. Pengecekan Ketidakberaturan Vertikal 1A arah Y.....	78
4.6. Pengecekan Ketidakberaturan Vertikal 1B arah X.....	78
4.7. Pengecekan Ketidakberaturan Vertikal 1B arah Y.....	78
4.8. Pengecekan Ketidakberaturan Massa.....	78
4.9. Pengecekan Ketidakberaturan Vertikal 5a dan 5b Arah X.....	79
4.10. Pengecekan Ketidakberaturan Vertikal 5a dan 5b Arah Y.....	80
4.11. Gaya Aksial Kolom Terbesar.....	80
4.12. Berat Bangunan.....	81
4.13. Periode Getar Struktur <i>Fixed Base</i>	81
4.14. Gaya Geser Dasar dengan Riwayat Waktu.....	82
4.15. Perbandingan Gaya Geser Dasar (<i>Base Shear</i>) Statik Arah X.....	83
4.16. Perbandingan Gaya Geser Dasar (<i>Base Shear</i>) Statik Arah Y.....	84
4.17. Simpangan Antar Tingkat Izin.....	85
4.18. Kontrol Simpangan Antar Tingkat Arah X terhadap Gempa Morgan Hill.....	86
4.19. Kontrol Simpangan Antar Tingkat Arah Y terhadap Gempa Morgan Hill.....	86
4.20. Kontrol Simpangan Antar Tingkat Arah X terhadap Gempa Hyuganada.....	87
4.21. Kontrol Simpangan Antar Tingkat Arah Y terhadap Gempa Hyuganada.....	87
4.22. Kontrol Simpangan Antar Tingkat Arah X terhadap Gempa Chi-chi.....	87
4.23. Kontrol Simpangan Antar Tingkat Arah Y terhadap Gempa Chi-chi.....	88
4.24. Kontrol Simpangan Antar Tingkat Arah X terhadap Gempa Kushiro As.....	88
4.25. Kontrol Simpangan Antar Tingkat Arah Y terhadap Gempa Kushiro As.....	88

4.26. Kontrol Simpangan Antar Tingkat Arah X terhadap Gempa Toakchi-Oki	89
4.27. Kontrol Simpangan Antar Tingkat Arah Y terhadap Gempa Toakchi-Oki	89
4.28. Kontrol Simpangan Antar Tingkat Arah X terhadap Gempa Hamadori.....	89
4.29. Kontrol Simpangan Antar Tingkat Arah Y terhadap Gempa Hamadori.....	90
4.30. Kontrol Simpangan Antar Tingkat Arah X terhadap Gempa Iwate-Oki.....	90
4.31. Kontrol Simpangan Antar Tingkat Arah Y terhadap Gempa Iwate-Oki.....	90
4.32. Spesifikasi <i>Double Friction Pendulum System</i>	92
4.33. Pengiterasian Properti <i>Double Friction Pendulum</i>	94
4.34. Ragam Getar dan Periode Getar Gedung dengan <i>Double Friction Pendulum</i>	98
4.35. Gaya Geser Dasar Struktur dengan DFPS menggunakan Riwayat Waktu.....	100
4.36. Perbandingan Gaya Geser Dasar (<i>Base Shear</i>) Statik Ekuivalen dan Riwayat Waktu.....	101
4.37. Perbandingan Gaya Geser Dasar (<i>Base Shear</i>) Statik Ekuivalen dan Riwayat Waktu Setelah <i>Scale Factor</i>	102
4.38. Kontrol Simpangan Antar Tingkat Arah X terhadap Gempa Morgan Hill.....	103
4.39. Kontrol Simpangan Antar Tingkat Arah Y terhadap Gempa Morgan Hill.....	104
4.40. Kontrol Simpangan Antar Tingkat Arah X terhadap Gempa Hyuganada.....	104
4.41. Kontrol Simpangan Antar Tingkat Arah Y terhadap Gempa Hyuganada.....	104
4.42. Kontrol Simpangan Antar Tingkat Arah X terhadap Gempa Chi-chi.....	105
4.43. Kontrol Simpangan Antar Tingkat Arah Y terhadap Gempa Chi-chi.....	105
4.44. Kontrol Simpangan Antar Tingkat Arah X terhadap Gempa Kushiro As	105
4.45. Kontrol Simpangan Antar Tingkat Arah Y terhadap Gempa Kushiro As	106

4.46. Kontrol Simpangan Antar Tingkat Arah X terhadap Gempa Toakchi Oki.....	106
4.47. Kontrol Simpangan Antar Tingkat Arah Y terhadap Gempa Toakchi Oki.....	106
4.48. Kontrol Simpangan Antar Tingkat Arah X terhadap Gempa Hamadori.....	107
4.49. Kontrol Simpangan Antar Tingkat Arah Y terhadap Gempa Hamadori.....	107
4.50. Kontrol Simpangan Antar Tingkat Arah X terhadap Gempa Iwate Oki.....	107
4.51. Kontrol Simpangan Antar Tingkat Arah Y terhadap Gempa Iwate Oki.....	108
4.52. Perbandingan Nilai Periode Struktur	108
4.53. Perbandingan Nilai Gaya Geser Dasar (<i>Base Shear</i>).....	109
4.54. Perbandingan Nilai Simpangan Antar Lantai Gempa Morgan Hill.....	115
4.55. Perbandingan Nilai Simpangan Antar Lantai Gempa Hyuganada.....	116
4.56. Perbandingan Nilai Simpangan Antar Lantai Gempa Chi-chi.....	117
4.57. Perbandingan Nilai Simpangan Antar Lantai Gempa Kushiro As.....	118
4.58. Perbandingan Nilai Simpangan Antar Lantai Gempa Toakchi-Oki	119
4.59. Perbandingan Nilai Simpangan Antar Lantai Gempa Hamadori.....	120
4.60. Perbandingan Nilai Simpangan Antar Lantai Gempa Iwate-Oki.....	121

DAFTAR NOTASI

C_d	= Faktor pembesaran simpangan lateral
C_s	= Koefisien respons seismik
C_u	= Koefisien untuk batasan atas pada periode yang dihitung
D	= Pengaruh dari beban mati
D_0	= Perpindahan awal yang terjadi pada sistem isolasi dasar
D_M	= Perpindahan maksimum
E	= Pengaruh beban seismik
E_H	= Pengaruh beban seismik horizontal
E_V	= Pengaruh beban seismik vertikal
F_a	= Parameter percepatan respons spektral pada periode 1 detik, redaman 5 Persen
F_V	= Koefisien situs untuk periode panjang (pada periode 1 detik)
F_x	= Gaya seismik lateral
h_n	= Ketinggian struktur, di atas dasar sampai tingkat tertinggi struktur
h_{sx}	= Ketinggian tingkat di bawah tingkat x
I_e	= Faktor keutamaan gempa
K_{eff}	= Kekakuan efektif sistem isolasi dasar
L	= Pengaruh dari beban hidup
L_r	= Pengaruh dari beban hidup atap
MCE_R	= Gempa maksimum yang dipertimbangkan risiko-tertarget
PGA	= Percepatan muka tanah puncak dari nilai tengah geometri gempa tertimbang maksimum
R	= Koefisien modifikasi respon
R	= Pengaruh dari beban hujan
R	= Jari-jari permukaan lengkung FPS
S_{DS}	= Parameter percepatan respons spektral pada periode pendek, redaman 5 persen

S_{D1}	= Parameter percepatan respons spektral pada periode 1 detik, redaman 5 persen
S_{MS}	= Parameter percepatan respons spektral MCE pada periode pendek yang sudah disesuaikan terhadap pengaruh kelas situs
S_{M1}	= Parameter percepatan respons spektral MCE pada periode 1 detik yang sudah disesuaikan terhadap pengaruh kelas situs
S_s	= Parameter percepatan respons spektral MCE dari peta gempa pada periode pendek, redaman 5 persen
S_1	= Parameter percepatan respons spektral MCE dari peta gempa pada periode 1 detik, redaman 5 persen
T	= Periode fundamental bangunan
T_a	= Periode fundamental pendekatan
T_{eff}	= Periode efektif sistem isolasi dasar
T_M	= Target maksimum periode fundamental struktur isolasi
T_0	= $0,2 \frac{S_{D1}}{S_{DS}}$
T_s	= $\frac{S_{D1}}{S_{DS}}$
UX	= Perpindahan dalam arah horizontal X
UY	= Perpindahan dalam arah horizontal Y
RX	= Rotasi atau momen puntir di sekitar sumbu X
RY	= Rotasi atau momen puntir di sekitar sumbu Y
RZ	= Rotasi atau momen puntir di sekitar sumbu Z
V	= Geser lateral desain total atau geser di dasar struktur
w	= Gaya Maksimum yang diterima Kolom
W	= Berat seismik efektif
α	= Percepatan pada sistem isolasi dasar
δ_x	= Simpangan maksimum di tingkat x
η	= Koefisien redaman
μ	= Koefisien gesek
ξ	= Rasio redaman (%)
ρ	= Faktor redudansi

I. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Perguruan tinggi merupakan salah satu lembaga pendidikan yang bertujuan untuk meningkatkan kualitas akademik sumber daya manusia. Seiring berkembangnya zaman yang semakin modern, kualitas sumber daya manusia memang sangat dibutuhkan. Sarana dan prasarana penunjang pendidikan berperan sangat penting dalam upaya perguruan tinggi untuk mencapai tujuannya. Salah satu sarana dan prasarana itu adalah gedung kuliah. Gedung kuliah berperan dalam menyediakan ruang untuk proses belajar mengajar (PBM) dan meningkatkan serta mengembangkan kompetensi mahasiswa dalam keterampilan dan keahlian.

Perancangan gedung kuliah wajib untuk memiliki ketahanan dan kekuatan yang tinggi terhadap muatan eksternal, termasuk paparan beban seismik. Terutama Indonesia yang merupakan salah satu negara dengan aktivitas gempa yang tinggi di dunia, lebih dari 10 kali lipat tingkat kegempaan di Amerika Serikat (Arnold, 1986). Hal ini dikarenakan Indonesia berlokasi pada pertemuan tiga pelat tektonik yaitu lempeng Eurasia, lempeng Pasifik, dan lempeng Indo-Australia yang tidak akan lepas dari ancaman gempa bumi (Pawirodikromo, 2012). Gempa bumi menghasilkan gaya lateral yang mampu menyebabkan perubahan dan ketidakstabilan struktur (Dina Septiana dkk., 2022). Hal inilah yang menjadi perhatian khusus dalam perencanaan suatu struktur, terutama pada struktur gedung bertingkat.

Struktur gedung vertikal atau bertingkat dinilai rawan terhadap beban lateral terutama beban gempa (Jaglien dkk., 2020). Ketika bangunan bertingkat

terkena gaya gempa, deformasi yang terjadi cukup besar pada lantai bangunan sehingga dapat mengakibatkan kerusakan struktural (Tanauma dkk., 2023). Untuk itu, penelitian di bidang Teknik Sipil perlu memahami sifat dinamik struktur bangunan gempa melalui respon seismik struktur bangunan sehingga perancangannya harus mementingkan kekuatan dan ketahanan yang tinggi terhadap muatan eksternal, termasuk mereduksi paparan beban seismik (Simanjuntak dkk., 2022).

Kerusakan bangunan konvensional akibat gempa dapat diminimalisir dengan memperkuat struktur bangunan terhadap gaya gempa. Meskipun demikian, sering kali hasilnya tidak memuaskan karena kerusakan elemen baik struktural maupun non-struktural umumnya disebabkan oleh perbedaan simpangan antar tingkat, yang dikenal sebagai *interstory drift*. Upaya yang dilakukan untuk mengurangi nilai *interstory drift* pada struktur konvensional adalah dengan memperkuat bangunan dalam arah lateral, seperti menambahkan *shearwall* dan *bracing*. Namun, langkah ini dapat memperbesar gaya gempa yang bekerja pada bangunan (Teruna, 2005).

Seiring dengan meningkatnya perkembangan teknologi, upaya untuk meningkatkan ketahanan bangunan terhadap gempa telah menghasilkan metode alternatif yang sangat baik dalam meredam energi gempa yaitu dengan menggunakan *seismic isolation* (Tio dkk., 2022). Penggunaan *seismic isolation* akan memisahkan struktur atas dengan struktur bawah menggunakan alat mekanis atau isolasi, sehingga getaran tanah akibat gempa yang masuk ke struktur akan didisipasikan. Sistem isolasi ini akan mereduksi gaya gempa dan memperkecil nilai *drift* pada setiap lantai struktur bangunan (Budiono dkk., 2015).

Penelitian ini akan membahas lebih dalam mengenai respon seismik dari struktur dengan *base isolation* terhadap gaya-gaya gempa. Tipe *seismic isolator* yang digunakan adalah *double friction pendulum system*.

Berdasarkan studi yang telah dilakukan pada gedung beton bertulang 25 lantai dengan sistem isolasi dasar tipe *double friction pendulum system* menambah fleksibilitas lateral struktur dan memberikan tambahan redaman yang cukup besar sehingga gaya gempa yang mengenai struktur akan berkurang (Budiono dkk., 2015). Hal ini juga didukung dengan penelitian yang dilakukan (Imran dkk., 2021) bahwa penggunaan *seismic isolation* tipe *double pendulum friction* memiliki performa lebih baik dibandingkan struktur *fixed-base* (jepit) pada gaya geser dasar, percepatan lantai atap dan simpangan antar lantai.

Pada penelitian ini lokasi yang digunakan yaitu Gedung Kuliah Terpadu IAIN Metro yang terdiri dari 3 lantai dengan struktur beton bertulang. Penelitian ini dilakukan untuk membandingkan respon seismik struktur sistem konvensional (*fixed-based*) dan *seismic isolation* tipe *double friction pendulum* menggunakan analisis linier riwayat waktu (*Linear Time History Analysis*) yang telah diskalakan terhadap respon spektra Metro menggunakan program ETABS. Penelitian ini menggunakan *seismic isolation* tipe *double friction pendulum* karena terjadinya simpangan struktur yang melebihi batas izin, sehingga diperlukannya *seismic isolation* untuk mereduksi simpangan antar lantai (*interstory drift*) dari gedung konvensional. Kedua model akan dibandingkan respon seismik strukturnya, berupa gaya geser dasar, periode dan simpangan antar tingkat (*interstory drift*).

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang diatas, rumusan masalah dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana respon struktur struktur berupa gaya geser dasar, periode natural, simpangan antar tingkat pada Gedung Kuliah Terpadu IAIN Metro sebagai gedung dengan struktur *fixed-base*?
2. Bagaimana respon struktur berupa gaya geser dasar, periode natural, simpangan antar tingkat pada Gedung Kuliah Terpadu IAIN Metro dengan sistem struktur *base isolation* tipe *double friction pendulum*?

3. Bagaimana perbandingan respon seismik gedung yang menggunakan struktur *fixed-base* dengan *base isolation* tipe *double friction pendulum* pada Gedung Kuliah Terpadu IAIN Metro?

1.3 Batasan Masalah

Adapun batasan masalah pada penelitian ini adalah:

1. Data gedung menggunakan data dari Gedung Kuliah Terpadu IAIN Metro.
2. Model struktur yang digunakan adalah struktur beton bertulang dengan 3 lantai, tidak memodelkan pondasi serta *sloof*.
3. Pemodelan struktur gedung yang ditinjau adalah pemodelan struktur eksisting dan pemodelan struktur dengan *base isolator double friction pendulum*.
4. Perencanaan *double friction pendulum* sesuai dengan brosur NS-SSB (*Nippon Steel-Spherical Sliding Bearing*).
5. Lokasi gedung berada di Kota Metro dengan lokasi tanahnya tipe SE (tanah lunak).
6. Analisis perencanaan gempa mengacu pada SNI 1726:2019 tanpa memperhitungkan beban angin.
7. Sistem struktur merupakan sistem rangka beton pemikul momen menengan (SPRMM).
8. Peraturan pembebanan mengacu pada SNI 1727:2020 dan PPPURG 1987.
9. Analisis struktur terhadap pengaruh beban gempa menggunakan analisis riwayat waktu dengan aplikasi ETABS v21.
10. Rekaman gempa (akselerogram) yang digunakan berasal dari penentuan magnitudo dan jarak sumber terhadap gempa sesuai peta deagregasi Indonesia dengan lokasi kota Metro. Ini mencakup gempa Morgan Hill (California, 1984), Chi-chi (Taiwan, 1999), Hamadori (Japan, 2011), Iwate-oki (Japan, 2011), KushiroAs (Japan, 2004), Hyuganada (Japan1996), dan Toakchi-oki (Japan, 2008).

1.4 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah:

1. Mengetahui perbandingan periode natural dari Gedung Kuliah Terpadu IAIN Metro dengan DFPS (*double friction pendulum system*) dan struktur *fixed base* dengan bantuan program struktur komersial.
2. Mengetahui perbandingan gaya geser dasar (*base shear*) yang diterima struktur *fixed base* dengan struktur yang dilengkapi *base isolator* tipe *double friction pendulum* pada bangunan Gedung Kuliah Terpadu IAIN Metro dengan bantuan program struktur komersial.
3. Mengetahui perbandingan simpangan antar tingkat (*interstory drift*) Gedung Kuliah Terpadu IAIN Metro dengan DFPS (*double friction pendulum system*) dan struktur *fixed base* dengan bantuan program struktur komersial.

1.5 Manfaat Penelitian

Manfaat dari penelitian ini adalah:

1. Mengetahui perbandingan periode, gaya geser dan simpangan antar tingkat dari hasil analisis program komersial struktur pada struktur *fixed-based* dan *seismic isolation* tipe *friction pendulum* akibat beban gempa.
2. Memberikan manfaat terhadap proses pengembangan dan pembelajaran khususnya dalam perencanaan struktur gedung bertingkat yang tahan gempa menggunakan *seismic isolator* tipe *Double Friction Pendulum System*.

II. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Bangunan Gedung Tahan Gempa

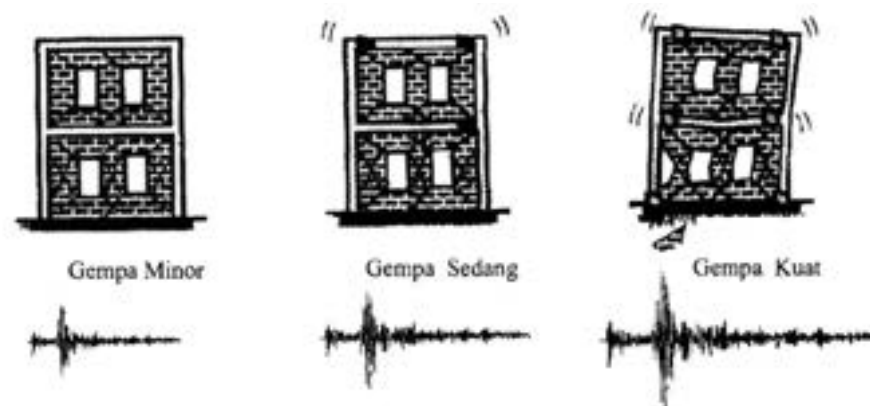
Gempa bumi merupakan getaran asli yang bersumber dari dalam bumi yang kemudian merambat ke permukaan bumi akibat rekahan bumi yang pecah dan bergeser dengan keras (Nur, 2010). Gempa bumi terjadi karena adanya pelepasan energi yang dihasilkan oleh tekanan akibat lempengan yang bergerak. Penyebab gempa bumi juga dapat berupa aktivitas gunung api, meteor jatuh, longsoran di bawah muka air laut, serta ledakan bom nuklir (Huwaida Qothrunnada dkk., 2022). Getaran gempa bumi disederhanakan menjadi gaya geser dasar (*base shear*) yang bekerja disisi dasar suatu struktur bangunan yang kemudian akan didistribusikan secara vertikal sebagai gaya lateral pada tiap lantai (Cornelis dkk., 2014).

Gaya gempa atau gaya lateral inilah yang dapat menyebabkan simpangan horizontal pada struktur bangunan. Jika nilai simpangan ini melebihi batas aman, maka resiko keruntuhan bangunan akan meningkat (Asoma, 2016). Oleh karena itu, desain bangunan yang tahan gempa menjadi faktor utama dalam mengurangi dampak potensial dari gaya gempa.

Konsep bangunan tahan gempa merupakan bentuk antisipasi kerugian akibat terjadinya gempa bumi dengan peningkatan kapasitas tahanan struktur yang telah diatur dalam SNI 1726:2019 Pasal 7 tentang Persyaratan Desain Seismik Struktur Bangunan Gedung. Untuk meredam beban gempa, struktur konvensional mengijinkan perilaku inelastik pada struktur saat terkena gempa kuat (Muliadi dkk., 2014). Hal ini menyebabkan elemen struktur boleh mengalami kerusakan tetapi tidak boleh mengalami keruntuhan. Berikut

filosofi bangunan tahan gempa menurut (Pawirodikromo, 2012):

1. Dalam kasus gempa kecil (*light* atau *minor earthquake*) yang sering terjadi, struktur utama bangunan harus didukung dengan baik untuk menghindari rusaknya. Kerusakan kecil pada elemen non-struktur masih dapat ditoleransi (dinding retak, genting dan langit-langit jatuh, kaca pecah dan sebagainya).
2. Dalam kasus gempa menengah (*moderate earthquake*) yang jarang terjadi, struktur utama bangunan boleh rusak atau retak ringan tetapi masih dapat diperbaiki.
3. Dalam kasus gempa kuat (*strong earthquake*) yang jarang terjadi, struktur bangunan boleh mengalami kerusakan tetapi tidak boleh runtuh total sehingga setidaknya korban jiwa dapat diminimalisir.



Sumber: *Seismologi Teknik dan Rekayasa Kegempaan, Widodo Pawirodikromo, hlm 424*

Gambar 2.1. Level-level kerusakan bangunan.

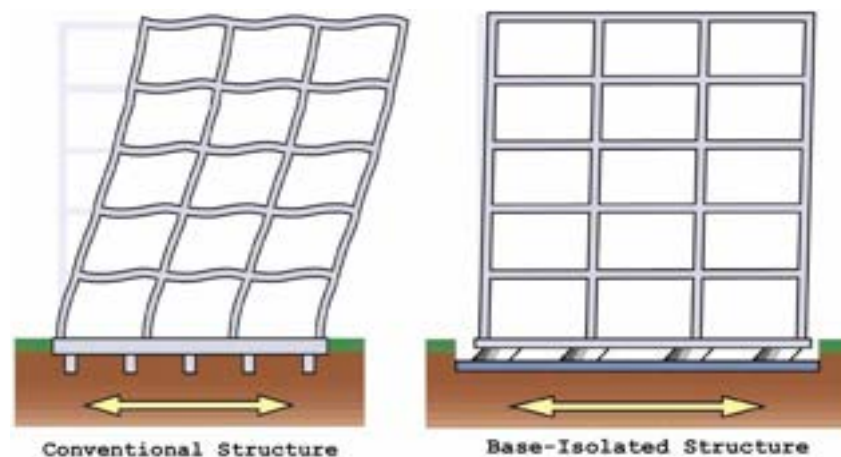
Akan tetapi, desain struktur konvensional tahan gempa masih kurang memuaskan dan memberikan dampak kerusakan pada komponen struktural dan non struktural. Desain struktur konvensional tahan gempa didasarkan pada konsep daktilitas, yaitu dengan mengaplikasikan *strong column weak beam*, penggunaan dinding geser dan bresing (*bracing*). Struktur dengan sistem seperti ini apabila terkena gempa kuat akan mengalami plastisitas yang menyebabkan terjadinya simpangan antar lantai yang besar sehingga dapat menyebabkan kerusakan dan keruntuhan pada struktur (Arifin dkk., 2019).

2.2 *Base Isolation*

Salah satu alternatif dalam meningkatkan performa struktur terhadap gempa serta meminimalkan kerusakan secara signifikan atau dapat dihindari adalah penggunaan sistem isolasi dasar (Budiono dkk., 2015). Sistem ini dapat melindungi bangunan dari kerusakan parah selama gempa besar terjadi.

Struktur dengan *base isolation*, akan memiliki frekuensi yang relatif lebih kecil dibandingkan dengan bangunan konvensional. Hal ini akan menyebabkan percepatan gempa yang bekerja pada bangunan menjadi lebih kecil (Suryawidodo dkk., 2023). Ragam getar pertama hanya akan menyebabkan deformasi lateral pada sistem isolator, sedangkan struktur atas akan berperilaku sebagai *rigid body motion*. Sehingga gaya gempa yang diterima oleh struktur akan lebih kecil (Muliadi dkk., 2014).

Pada Gambar 2.2 ditunjukkan bahwa struktur yang menggunakan *base isolation* akan menyebabkan struktur berdeformasi dengan tetap mempertahankan bentuknya, sehingga *drift* yang terjadi akan jauh lebih kecil karena gaya gempa akan diredam (Rahmawati dkk., 2019).



Sumber: Webinar Studi Kinerja Struktur Gedung dengan Base Isolation, Midas Indonesia, 2022

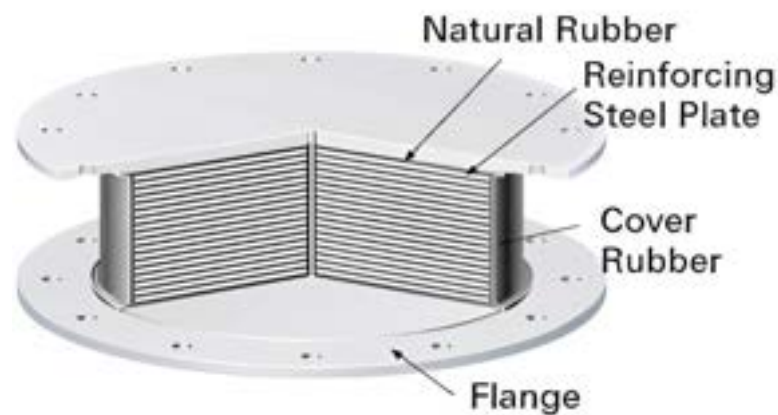
Gambar 2.2. Perilaku Struktur Bangunan dengan *Base Isolation*.

2.3 Jenis *Base Isolation*

Umumnya, *base isolation* diklasifikasikan menjadi dua jenis, yaitu *elastomeric bearing* (berbahan dasar karet dan pelat baja) dan *sliding system* (berbahan pelat dengan sistem penggeser). Berikut merupakan perbedaan karakteristik, keuntungan, dan kekurangan dalam penggunaannya.

2.3.1 *Natural Rubber Bearing*

Natural rubber bearing terbuat dari karet alam dengan redaman berkisar 2-3% dari redaman kritis sehingga menghasilkan *displacement* yang cukup besar. Keuntungan dari *natural rubber bearing* adalah mudah dalam pembuatan, pemasangan serta permodelannya. Kelemahan dari tipe ini adalah memerlukan sistem redaman tambahan guna mereduksi gaya gempa secara maksimal. Berikut adalah gambar dari penampang *natural rubber bearing*.



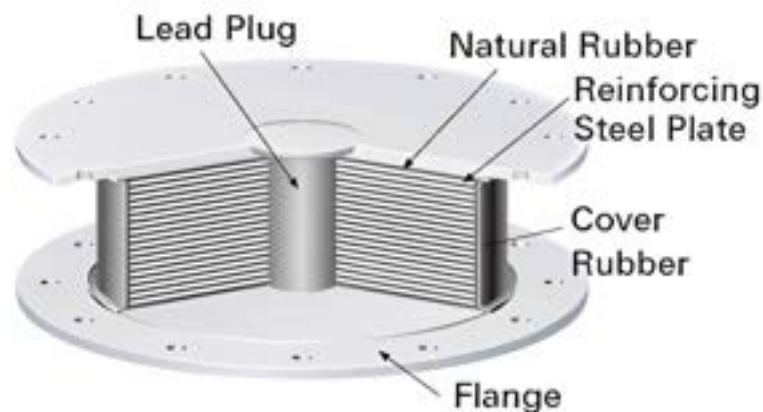
Sumber: <https://www.bridgestone.com/>

Gambar 2.3. *Natural Rubber Bearing*.

2.3.2 *Lead Rubber Bearing*

Lead rubber bearing merupakan pengembangan dari *natural rubber bearing* dengan penambahan timah (*lead core*) pada bagian dalamnya.

Tujuan penambahan timah ini adalah untuk memperkaku serta meningkatkan kemampuan dalam menahan beban vertikal dan lateral secara signifikan. Material LRB terdiri dari kombinasi lempengan karet alam dan lempengan baja, dimana karet alam berperan dalam meredam getaran gempa bumi dan lempengan baja memberikan kekakuan tambahan pada bantalan karet. Pada inti tengahnya, terdapat batang bulat dari timah yang berfungsi untuk meningkatkan daya redaman (Naeim dan Kelly, 1999). Berikut adalah gambar dari penampang *lead rubber bearing*.



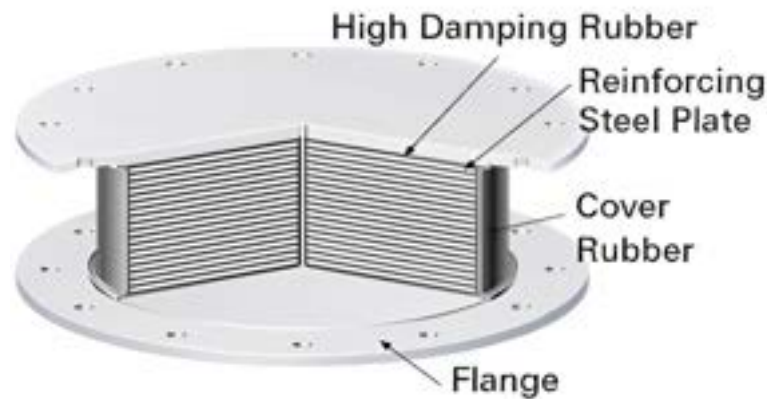
Sumber: <https://www.bridgestone.com/>

Gambar 2.4. *Lead Rubber Bearing*.

2.3.3 *High Damping Rubber Bearing*

High damping rubber bearing merupakan perkembangan dari *natural rubber bearing* dimana lapisan karetnya dicampur dengan material karbon yang sangat halus, minyak atau resin, dan bahan filler lainnya untuk meningkatkan redaman tanpa memerlukan peredam tambahan. Campuran karet ini memiliki nilai redaman kritis antara 10% hingga 20% jauh lebih tinggi dibandingkan karet alam yang hanya memiliki redaman kritis sekitar 2-3%. Hal ini berarti kekakuan dalam arah lateral meningkat dan perpindahan dapat berkurang. *High damping rubber bearing* juga memiliki kekakuan awal yang tinggi sehingga

mampu mengakomodasi gaya angin dan gempa ringan tanpa berdeformasi secara signifikan. Berikut adalah gambar dari penampang *high damping rubber bearing*.



Sumber: <https://www.bridgestone.com/>

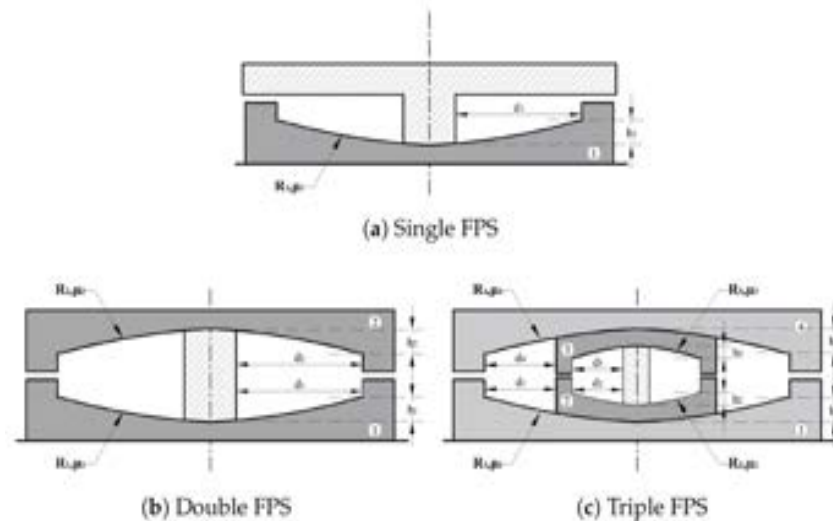
Gambar 2.5. *High Damping Rubber Bearing*.

2.3.4 *Friction Pendulum System*

Friction pendulum system memiliki kemampuan meredam gaya gempa melalui friksi (gesekan) yang terdapat pada permukaannya sehingga mampu mendisipasikan energi dari gempa yang terjadi. Menurut (Wang, 2002) *friction pendulum system* (FPS) memiliki keunggulan dari tipe *elastomeric bearing* lainnya yaitu memiliki kekuatan dan stabilitas yang melebihi *elastomeric bearing*, sifat propertinya tidak dipengaruhi oleh umur dan temperatur, serta biaya instalasi yang lebih murah.

Sampai saat ini ada tiga jenis FPS yang sudah dikenal, yaitu *single friction pendulum system*, *double friction pendulum system*, dan *triple friction pendulum system*. Pengelompokan ini didasarkan pada jumlah permukaan yang dapat mendisipasikan energi. Adanya *double friction pendulum system*, dan *triple friction pendulum system* diharapkan mampu memiliki kapasitas perpindahan relatif besar

daripada *single friction pendulum system* (Budiono dkk., 2015). Berikut adalah gambar dari penampang *friction pendulum system*.



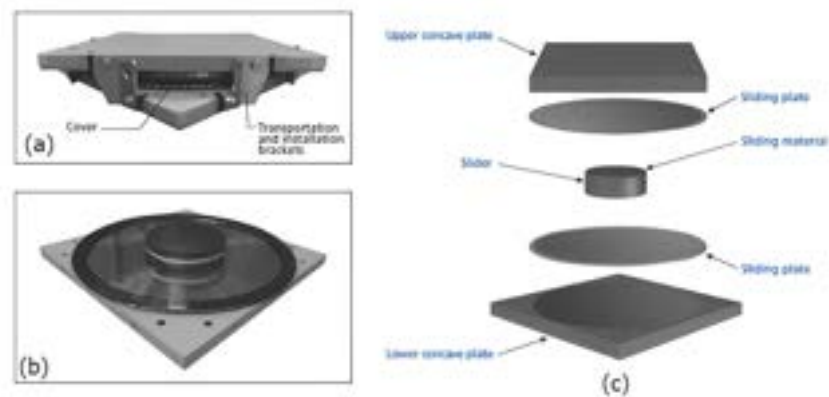
Sumber: *Alternatif Desain Struktur Gedung Rumah Sakit Universitas Islam Malang dengan Base Isolator Tipe Friction Pendulum System (FPS)*, Wiku Suryawidodo, 2023.

Gambar 2.6. *Friction Pendulum Systems*.

2.4 *Double Friction Pendulum*

Double friction pendulum memiliki dua permukaan cekung yang kapasitas gesekan dan kekakuannya dua kali lebih besar dibandingkan dengan tipe *single friction pendulum*. Sehingga kapasitas perpindahan bantalannya pun lebih besar (Suryawidodo dkk., 2023). *Double friction pendulum* memiliki empat elemen utama yaitu pelat cekung, pelat geser, penggeser, dan *sliding material* yang ditunjukkan pada Gambar 2.7.

Selama gempa bumi terjadi, perpindahan lateral struktur akan menyebabkan pergeseran pada tingkat dasar, dan ini menyebabkan *slider* bergerak di sepanjang permukaan pelat geser atas dan bawah seperti yang ditunjukkan pada Tabel 2.1.



Sumber: Nippon Steel Engineering Co. Ltd

Gambar 2.7. Detail *Double Friction Pendulum*.

Tabel 2.1. Pergerakan *Double Friction Pendulum*

Fase	Deskripsi
<p>(a)</p>	<i>Double friction pendulum</i> dalam keadaan statis.
<p>(b)</p>	Terjadi pergeseran pada <i>slider</i> akibat beban gempa.

Sumber: *Seismic Performance of Reinforced Concrete Buildings with Double Concave Friction Pendulum Base Isolation System by Indonesian Code*, Iswandi Imran, 2021.

2.5 Pemodelan *Double Friction Pendulum System*

Penentuan data *double friction pendulum system* berdasarkan besarnya beban vertikal pada titik isolator menggunakan katalog NS-SSB. Langkah-langkah dari penentuan desain properti *friction pendulum system* adalah sebagai berikut:

1. Menentukan beban vertikal maksimum pada titik isolator (w).
2. Menentukan tipe *friction pendulum system* berdasarkan beban vertikal terbesar untuk titik isolator.
3. Menentukan perpindahan awal yang terjadi pada sistem isolasi dasar (D_0).

4. Menghitung kekakuan efektif dari sistem isolasi dasar dengan persamaan:

$$K_{eff} = w \times \left(\frac{1}{R} + \frac{\mu}{D_0} \right) \quad (2.1)$$

Keterangan:

K_{eff} = Kekakuan efektif sistem isolasi dasar (kN/mm)

w = Berat struktur pada titik yang ditinjau (kN)

R = Jari-jari permukaan lengkung FPS (mm)

μ = Koefisien gesek

D_0 = Perpindahan awal FPS (mm)

5. Menghitung periode efektif sistem isolasi dasar (T_{eff}) dengan persamaan:

$$T_{eff} = 2 \times \pi \times \sqrt{\frac{w}{K_{eff} \times g}} \quad (2.2)$$

Keterangan:

T_{eff} = Periode efektif sistem isolasi dasar (s)

w = Berat struktur pada titik yang ditinjau (kN)

K_{eff} = Kekakuan efektif sistem isolasi dasar (kN/mm)

g = Percepatan gravitasi (m/s^2)

6. Menghitung rasio redaman (ξ) dengan persamaan:

$$\xi = \frac{2}{\pi} \times \left(\frac{\mu}{\mu + \frac{D_0}{R}} \right) \times 100\% \quad (2.3)$$

Keterangan:

ξ = Rasio redaman (%)

μ = Koefisien gesek

D_0 = Perpindahan awal FPS (mm)

R = Jari-jari permukaan lengkung FPS (mm)

7. Menghitung koefisien redaman sistem isolasi dasar (η) dengan persamaan:

$$\eta = \sqrt{\frac{10}{5+\xi}} \quad (2.4)$$

Keterangan:

η = Koefisien redaman

ξ = Rasio redaman (%)

8. Menghitung percepatan gempa yang terjadi pada sistem isolasi dasar (α) dengan persamaan:

$$\alpha = \frac{g \times \eta \times S_{D1}}{T_{eff}} \quad (2.5)$$

Keterangan:

α = Percepatan pada sistem isolasi dasar (mm/s^2)

g = Percepatan gravitasi (m/s^2)

η = Koefisien redaman

S_{D1} = Parameter percepatan spektral desain pada periode 1 detik (s)

9. Menghitung perpindahan akibat percepatan gempa (D) dengan persamaan:

$$D = \alpha \times \left(\frac{T_{eff}}{2 \times \pi} \right)^2 \quad (2.6)$$

Keterangan:

D = Perpindahan iterasi (mm)

α = Percepatan pada sistem isolasi dasar (mm/s^2)

T_{eff} = Periode efektif sistem isolasi dasar (s)

2.6 Metode Analisis Gempa

Analisis struktur terhadap beban gempa secara umum terbagi menjadi dua macam (Zebua, 2018) yaitu:

1. Analisis beban statik merupakan suatu perencanaan struktur bangunan yang dipengaruhi oleh beban gempa secara statis yang prinsipnya sebagai pengganti gaya horizontal yang bekerja pada struktur akibat pergerakan tanah oleh gaya-gaya statis yang ekuivalen. Metode ini disebut metode gaya lateral ekuivalen (*equivalent lateral force method*), di mana diasumsikan bahwa gaya horizontal akibat gempa yang bekerja pada suatu elemen struktur ditentukan berdasarkan hasil perkalian antara suatu konstanta berat atau massa dari elemen struktur tersebut.
2. Analisis beban dinamik merupakan analisis struktur dimana pembagian gaya geser gempa di seluruh tingkat diperoleh dengan memperhitungkan

pengaruh dinamis gerakan tanah terhadap struktur. Analisis dinamik mampu mengetahui perilaku dari struktur akibat pengaruh gempa. Menurut SNI 1726:2019 analisis dinamik terbagi menjadi 2, yaitu:

- a. Analisis respon spektrum (*spectrum response analysis*) memberikan pembagian gaya geser tingkat yang lebih teliti disepanjang tinggi gedung dibandingkan dengan analisis statik ekuivalen. Respon spektrum menyajikan suatu spektrum dalam bentuk kurva antara periode struktur (T), dengan respon-respon maksimum berdasarkan rasio redaman dan gempa.
- b. Analisis riwayat waktu (*time history*) adalah analisis dinamis dimana pada model struktur diberikan suatu catatan rekaman gempa dan respon struktur dihitung langkah demi langkah pada interval tertentu. Pada analisis ragam riwayat waktu diperlukan rekaman percepatan gempa dan analisis ragam spektrum respon, dimana pada cara ini respon maksimum dari tiap ragam getar yang terjadi didapat dari spektrum respon rencana (*design spectra*).

Analisis dinamik dilakukan untuk mendapatkan evaluasi yang lebih akurat mengenai gaya-gaya gempa yang bekerja pada struktur, serta mengetahui perilaku dari struktur akibat pengaruh gempa.

2.7 Analisis Riwayat Waktu Percepatan Gempa (*Time History*)

Getaran gempa dengan tingkat kekuatan tertentu dapat mengakibatkan kerusakan dan keruntuhan pada struktur. Perubahan intensitas gaya gempa seiring waktu juga dapat menyebabkan perubahan terhadap struktur (Fitri Hasdanita, 2014). Analisis riwayat waktu merupakan analisis yang menggambarkan respon dinamik suatu struktur bangunan dimana beban berupa percepatan getaran tanah dikerjakan secara bertahap dan besarnya berubah-ubah menurut waktu (I Gede Wiryadi dkk., 2021).

Dalam memperoleh respon struktur akibat pembebanan gempa melalui analisis riwayat waktu akan digunakan rekam *accelerograms*. *Accelerograms* merupakan rekaman akselerasi gerakan dasar bumi selama gempa terjadi yang diperoleh di suatu lokasi dengan keadaan geologi, topografi serta seismotektoniknya hampir menyerupai lokasi yang akan dianalisis dan kemudian dicocokkan dengan respon spektra desain di lokasi penelitian. Analisis riwayat waktu linier harus terdiri dari analisis model matematis linear dari struktur untuk memastikan responnya melalui metode-metode integrasi numerik terhadap rangkaian riwayat percepatan yang kompatibel dengan respon spektra desain di lokasi yang ditinjau (SNI 1726:2019 Pasal 7.9.2.1).

2.8 Pembebanan Struktur

Dalam perencanaan pembebanan pada struktur bangunan gedung, perlu memperhatikan penggunaan beban-beban yang sesuai dengan ketentuan perencanaan. Ketentuan-ketentuan mengenai beban yang bekerja pada struktur adalah sebagai berikut:

1. Beban Mati

Menurut SNI 1727:2020 pasal 3.1, beban mati ialah berat seluruh bahan konstruksi bangunan gedung yang terpasang, termasuk dinding, lantai, atap, plafon, tangga, dinding partisi tetap, *finishing*, klading gedung dan komponen arsitektural dan struktural lainnya serta peralatan layan terpasang lain termasuk berat derek dan sistem pengangkut material. Beban mati dibedakan menjadi beban mati akibat berat sendiri dan beban mati tambahan.

a. Beban Mati Sendiri (*Dead Load*)

Beban mati sendiri merupakan beban yang timbul akibat elemen-elemen struktural yang terdapat pada suatu konstruksi dan bersifat permanen. Beban mati sendiri bergantung pada jenis dan dimensi elemennya.

b. Beban Mati Tambahan (*Super Dead Load*)

Beban mati tambahan merupakan beban yang timbul akibat adanya

elemen-elemen tambahan dalam suatu struktur yang bersifat permanen, seperti keramik, dinding bata, plafond dan sebagainya.

2. Beban Hidup

Menurut SNI 1727:2020 pasal 4.1, beban hidup ialah beban yang timbul akibat penggunaan atau fungsi suatu bangunan yang bersifat sementara dan tidak termasuk dalam beban konstruksi dan lingkungan, seperti beban angin, beban hujan, beban gempa, beban banjir, atau beban mati. Nilai beban hidup ditetapkan berdasarkan SNI 1727:2020 tabel 4.3 tentang beban hidup terdistribusi merata minimum dan beban hidup terpusat minimum serta Pedoman Perencanaan Pembebanan untuk Rumah dan Gedung 1987.

3. Beban Gempa

Beban gempa merupakan seluruh beban statik ekuivalen yang bekerja pada gedung ataupun bagian gedung yang menirukan pengaruh dari gerakan tanah akibat adanya gempa. Tinjauan struktur terhadap beban gempa diatur oleh SNI 1726:2019.

2.9 Kombinasi Pembebanan

Kombinasi pembebanan yang diterapkan pada analisis ini mengacu pada pedoman SNI 1727:2020 pasal 2.3.

1. $1,4D$
2. $1,2D + 1,6L + 0,5 (Lr \text{ atau } S \text{ atau } R)$
3. $1,2D + 1,6 (Lr \text{ atau } S \text{ atau } R) + (L/0,5W)$
4. $1,2D + 1,0W + 1,0L + 0,5 (Lr \text{ atau } S \text{ atau } R)$
5. $0,9D + 1,0W$
6. $1,2D + 1,0E + 1,0L$
7. $0,9D + 1,0E$

Faktor beban untuk L kombinasi 3 dan 4 dapat diambil sebesar 0,5 untuk semua tingkat hunian, kecuali untuk garasi, tempat parkir, tempat pertemuan umum dan ruangan yang beban hidupnya kurang dari atau sama dengan 4,78 kN/m². Karena struktur mendapat pengaruh dari beban gempa. Berdasarkan SNI 1726-2019 Pasal 7.4.2 maka E harus dihitung sesuai ketentuan sebagai berikut:

Untuk penggunaan kombinasi 6, E harus ditentukan dengan persamaan:

$$E = E_h + E_v \dots\dots\dots(2.7)$$

Untuk penggunaan kombinasi 7, E harus ditentukan dengan persamaan:

$$E = E_h - E_v \dots\dots\dots(2.8)$$

Dimana:

$$E_h = \rho \times Q_e \dots\dots\dots(2.9)$$

$$E_v = 0,2S_{DS} \times D \dots\dots\dots(2.10)$$

Keterangan:

E = Pengaruh beban seismik

E_h = Pengaruh beban seismik horizontal

E_v = Pengaruh beban seismik vertikal

ρ = Faktor redudansi

Q_e = Pengaruh gaya seismik horizontal dari V

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

D = Pengaruh beban mati

2.10 Tinjauan Struktur Terhadap Gempa Berdasarkan SNI 1726:2019

2.10.1 Gempa Rencana

Dalam hal evaluasi perencanaan struktur khususnya di wilayah rawan gempa, ada beberapa kriteria yang dapat digunakan dalam melakukan analisis perhitungan struktur tahan gempa. Menurut SNI 1726-2019 Pasal 4.1.1, gempa rencana ditetapkan sebagai gempa dengan kemungkinan terlewati besarnya selama umur struktur bangunan 50 tahun adalah sebesar 2% dengan kala ulang 2475 tahun.

2.10.2 Faktor Keutamaan Gempa dan Kategori Risiko Struktur Bangunan

Berdasarkan SNI 1726:2019 Tabel 3 terdapat pengklasifikasian kategori resiko struktur bangunan gedung dan non gedung yang dapat dilihat pada Tabel 2.2. Pengaruh gempa rencana terhadapnya akan dikalikan dengan faktor keutamaan gempa (I_e) sesuai dengan pasal 10.3.1.1 yang dapat dilihat pada Tabel 2.3.

Tabel 2.2. Kategori Risiko Bangunan Gedung dan Non Gedung 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

Tabel 2.2. (Lanjutan)

Jenis Pemanfaatan	Kategori Risiko
<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 <p style="text-align: center;">Pabrik</p>	II
<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"> - Bioskop - Gedung pertemuan - Stadion - Fasilitas kesehatan yang tidak memiliki unit bedah dan unit gawat darurat - Fasilitas penitipan anak - Penjara - Bangunan untuk orang jompo 	III
<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
<p>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</p>	

Tabel 2.2. (Lanjutan)

Jenis Pemanfaatan	Kategori Risiko
<p>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.</p>	
<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 	IV
<p>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 gedung dan non gedung yang dibutuhkan untuk mempertahankan fungsi struktur bangunan lain yang masuk ke dalam kategori risiko IV.</p>	

Sumber: SNI 1726:2019

Tabel 2.3. Faktor Keutamaan Gempa

Kategori Risiko	Faktor Keutamaan gempa, I_e
I atau II	1,0
III	1,25
IV	1,50

Sumber: SNI 1726:2019

2.10.3 Klasifikasi Situs

Berdasarkan ketentuan SNI 1726:2019 Pasal 5.1 dijelaskan prosedur dalam mengklasifikasi situs, dan mengatur standar desain seismik berupa faktor-faktor amplifikasi pada struktur bangunan. 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, profil tanah di situs harus diklasifikasikan sesuai dengan Tabel 5, berdasarkan profil tanah lapisan 30 m paling atas. Penetapan kelas situs harus melalui penyelidikan tanah di lapangan dan di laboratorium. Klasifikasi situs dapat dilihat pada Tabel 2.3.

Tabel 2.4. Klasifikasi Situs

Kelas Situs	V_s (m/detik)	N atau N_{ch}	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

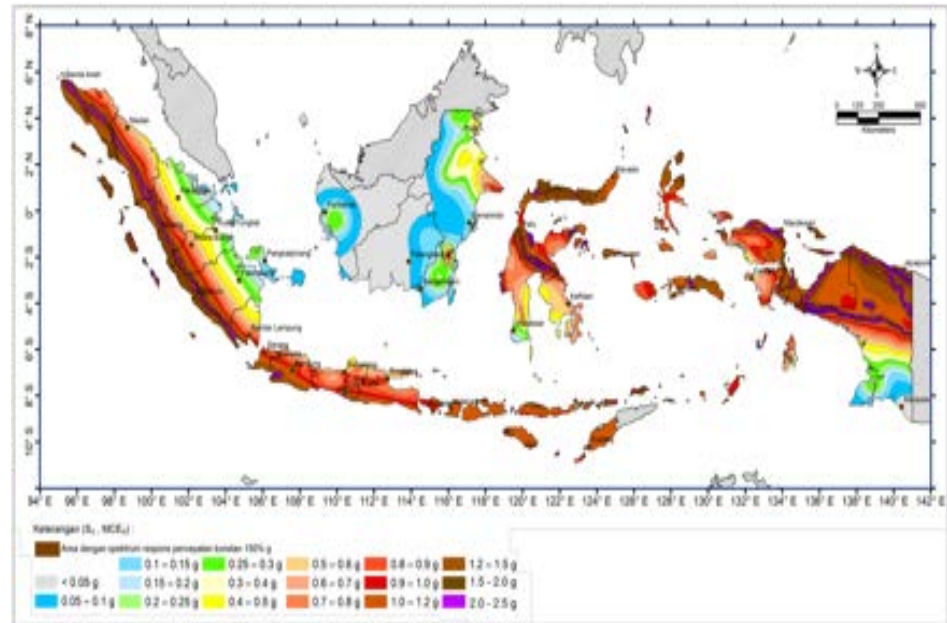
Tabel 2.4. (Lanjutan)

Kelas Situs	V_s (m/detik)	N atau N_{ch}	S_u (kPa)
	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 $su < 25$ 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 plasitisitas $PI > 75$) Lapisan lempung lunak/setengah teguh dengan ketebalan $H > 35$ m dengan $su < 50$ kPa		

Sumber: SNI 1726:2019

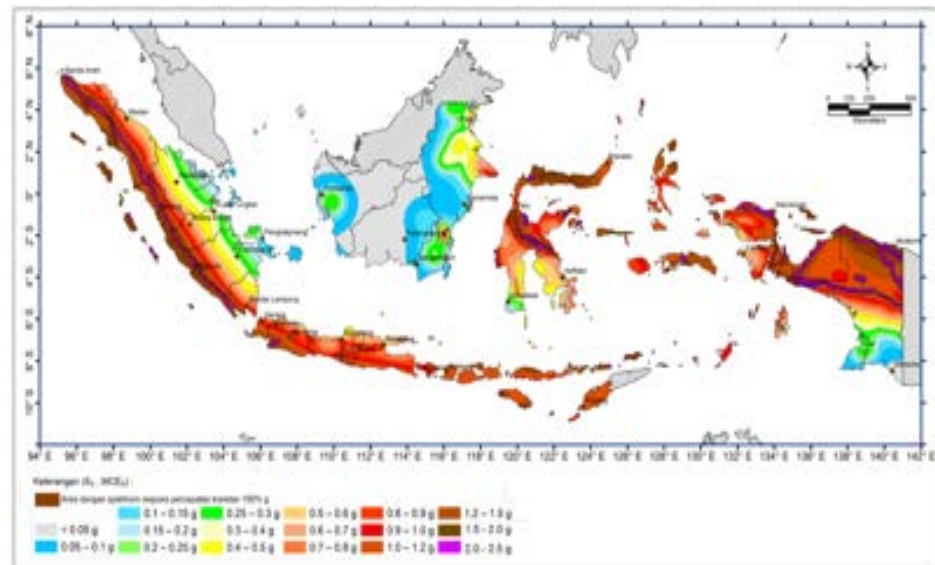
2.10.4 Wilayah Gempa

Faktor wilayah gempa menjadi penentu terhadap besar atau kecilnya beban gempa yang bekerja pada struktur bangunan. Oleh karena itu, besar atau kecilnya beban gempa sangat bergantung pada lokasi dimana struktur bangunan akan didirikan. Menurut SNI 1726:2019 Pasal 15 menyatakan bahwa pasal ini memberikan peta-peta gerak tanah seismik dan koefisien risiko dari gempa maksimum yang dipertimbangkan (*Maximum Considered Earthquake*, MCE). Peta wilayah gempa dapat dilihat pada Gambar 2.8 dan Gambar 2.9.



Sumber: SNI 1726:2019

Gambar 2.8. Parameter spektral percepatan gempa untuk periode 1 detik (S_1).



Sumber: SNI 1726:2019

Gambar 2.9. Parameter spektral percepatan gempa untuk periode pendek 0,2 detik (S_D).

2.10.5 Koefisien Situs

Penentuan respon spektral percepatan gempa MCE_R pada permukaan tanah membutuhkan 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 respons spektral percepatan pada periode pendek (S_{MS}) dan periode 1 detik (S_{M1}) yang disesuaikan dengan pengaruh klasifikasi situs, harus ditentukan dengan perumusan berikut ini:

$$S_{MS} = F_a \times S_s \dots\dots\dots (2.11)$$

$$S_{M1} = F_v \times S_1 \dots\dots\dots (2.12)$$

Keterangan:

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

S_1 = Parameter respons spektral percepatan gempa MCE_R terpetakan untuk periode 1,0 detik.

Dengan koefisien situs F_a dan F_v mengikuti Tabel 2.4 dan Tabel 2.5. Jika kelas situs SE digunakan sebagai kelas, maka nilai F_a harus diambil sebesar 1,0.

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	1,0	1,0
SE	2,4	1,7	1,3	1,1	0,9	0,8
SF	SS					

Sumber: SNI 1726:2019

Tabel 2.6. Koefisien Situs, Fv

Kelas Situs	Parameter respons spektral percepatan gempa maksimum yang dipertimbangkan risiko-tertarget (MCER) terpetakan pada periode pendek, T = 1 detik, S ₁					
	S ₁ ≤ 0,25	S ₁ = 0,5	S ₁ = 0,75	S ₁ = 1,0	S ₁ = 1,25	S ₁ ≥ 1,5
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					

Sumber: SNI 1726:2019

2.10.6 Parameter Percepatan Spektral Desain

Parameter percepatan spektral desain pada periode pendek (S_{DS}) dan pada periode 1 detik (S_{D1}), harus dihitung menggunakan persamaan berikut:

$$S_{DS} = \frac{2}{3} \times S_{MS} \dots\dots\dots(2.13)$$

$$S_{D1} = \frac{2}{3} \times S_{M1} \dots\dots\dots(2.14)$$

Keterangan:

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

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

2.10.7 Spektrum Respon Desain

Berdasarkan SNI 1726:2019 Pasal 6.4, grafik respon spektrum mengacu pada Gambar 2.9 dan mengikuti ketentuan dibawah ini:

1. Untuk periode yang lebih kecil dari T₀, spektrum respons percepatan desain, S_a, harus diambil dari persamaan:

$$S_a = S_{DS} \left(0,4 + 0,6 \frac{T}{T_0} \right) \dots\dots\dots(2.15)$$

2. Untuk periode lebih besar dari atau sama dengan T₀ dan lebih kecil

dari atau sama dengan T_s , spektrum respons percepatan desain (S_a) sama dengan S_{DS} .

- Untuk periode lebih besar dari T_s tetapi lebih kecil dari atau sama dengan T_L , respons spektral percepatan desain (S_a) diambil berdasarkan persamaan:

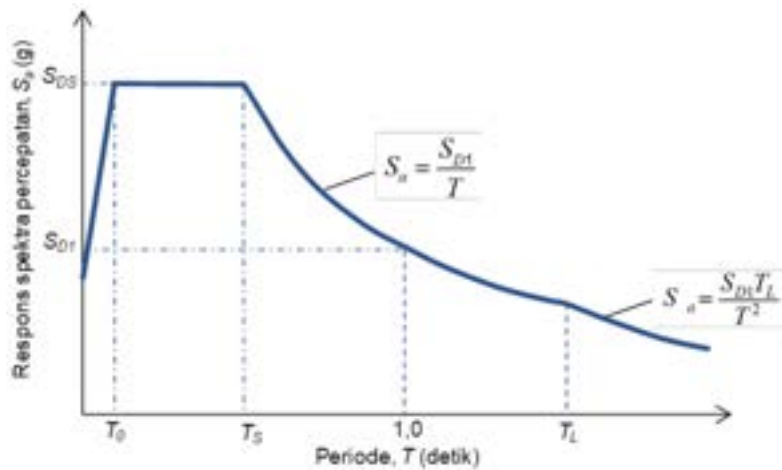
$$S_a = \frac{S_{D1}}{T} \dots\dots\dots(2.16)$$

- Untuk periode lebih besar dari T_L , respons spektral percepatan desain (S_a) diambil berdasarkan persamaan:

$$S_a = \frac{S_{D1}T_L}{T^2} \dots\dots\dots(2.17)$$

Keterangan:

- S_{DS} = Parameter respon spektral percepatan desain pada periode pendek.
- S_{D1} = Parameter respon spektral percepatan desain pada periode 1 detik.
- T = Periode getar fundamental struktur.



Sumber: SNI 1726:2019

Gambar 2. 10. Respon spektrum rancang.

2.10.8 Kategori Desain Seismik

Berdasarkan SNI 1726:2019 Pasal 6.5 struktur harus ditetapkan memiliki sesuatu kategori desain seismik. Dalam menetapkan kategori

desain seismik harus berdasarkan kategori resiko dan parameter percepatan respon spektral percepatan desainnya, yaitu S_{DS} dan S_{D1} . Kategori desain seismik dapat dilihat pada Tabel 2.6 dan Tabel 2.7.

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

Nilai SDS	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 Respon Percepatan pada Periode 1 Detik (S_{D1})

Nilai SDS	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

2.10.9 Sistem Pemikul Gaya Seismik

Parameter struktur seperti koefisien modifikasi respon (R), faktor kuat lebih sistem (Ω_0), dan koefisien amplifikasi defleksi (C_d) ditentukan dalam SNI 1726:2019 Pasal 7.2.2 Tabel 12. Faktor R , Ω_0 , C_d untuk sistem pemikul gaya seismik dapat dilihat pada Tabel 2.8.

Tabel 2.9. Faktor R , Ω_0 , C_d untuk Sistem Pemikul Gaya Seismik

Sistem Penahan Gaya Gempa		R	Ω	C_d
C	Sistem Rangka Pemikul Momen			
1	Rangka baja pemikul momen khusus	8	3	5,5

Tabel 2.9. (Lanjutan)

Sistem Penahan Gaya Gempa		R	Ω	C_d
C	Sistem Rangka Pemikul Momen			
2	Rangka batang baja pemikul momen khusus	7	3	5,5
3	Rangka baja pemikul momen menengah	4,5	3	4
4	Rangka baja pemikul momen biasa	3,5	3	3
5	Rangka beton bertulang pemikul momen khusus	8	3	5,5
6	Rangka beton bertulang pemikul momen menengah	5	3	4,5
7	Rangka beton bertulang pemikul momen biasa	3	3	2,5
8	Rangka baja dan beton komposit pemikul momen khusus	8	3	5,5
9	Rangka baja dan beton komposit pemikul momen menengah	5	3	4,5
10	Rangka baja dan beton komposit terkekang parsial pemikul momen	6	3	5,5
11	Rangka baja dan beton komposit pemikul momen biasa	3	3	2,5
12	Rangka baja canai dingin pemikul momen khusus dengan pembautan	3,5	3	3,5

Sumber: SNI 1726:2019

2.11 Respon Seismik

Respon seismik merupakan reaksi suatu bangunan atau struktur yang mengalami gempa. Respon seismik yang ditinjau pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

2.11.1 Gaya Geser Dasar Seismik

Berdasarkan SNI 1726:2019 Pasal 7.8.1 gaya geser dasar seismik (V) ditentukan dengan persamaan:

$$V = C_s \times W \dots \dots \dots (2.18)$$

Keterangan:

- C_s = Koefisien respon seismik
 W = Berat seismik efektif

2.11.2 Koefisien Respon Seismik Statik Ekuivalen

Berdasarkan SNI 1726:2019 Pasal 7.8.1.1 koefisien respon seismik (C_s) ditentukan dengan persamaan sebagai berikut:

$$C_s = \frac{S_{Ds}}{T^R} \dots\dots\dots(2.19)$$

Nilai C_s tidak boleh melebihi persamaan:

Untuk $T \leq T_L$

$$C_s = \frac{S_{D1}}{T^R} \dots\dots\dots(2.20)$$

Untuk $T \geq T_L$

$$C_s = \frac{S_{D1} \times T_L}{T^2 \left(\frac{R}{T}\right)} \dots\dots\dots(2.21)$$

C_s harus tidak kurang dari:

$$C_s = 0,044 \times S_{Ds} I_e \geq 0,01 \dots\dots\dots(2.22)$$

Untuk struktur yang berlokasi di daerah

$$C_s = \frac{0,5 \times S_1}{T^R} \dots\dots\dots(2.23)$$

Keterangan:

S_{Ds} = Parameter respon spektral percepatan desain pada periode pendek.

R = Koefisien modifikasi respons

I_e = Faktor keutamaan gempa

2.11.3 Penentuan Periode

Berdasarkan SNI 1726:2019 pasal 7.8.2 periode fundamental struktur (T) dalam arah yang ditinjau harus diperoleh menggunakan sifat struktur dan karakteristik deformasi elemen pemikul dalam analisis

yang teruji. Periode fundamental struktur (T) tidak boleh melebihi hasil perkalian koefisien untuk batasan atas pada periode yang dihitung (C_u) dari Tabel 17 dan periode fundamental pendekatan (T_a) yang ditentukan. Berikut merupakan tabel koefisien untuk batas periode yang dihitung.

Tabel 2.10. Koefisien untuk Batas Atas pada Periode yang Dihitung

Parameter Percepatan Respons Spektral Desain pada 1 Detik, S_{D1}	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

Periode pendekatan fundamental (T_a), ditentukan oleh persamaan sebagai berikut:

$$T_a = C_t \times h_n^x \dots \dots \dots (2.24)$$

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 2.11. 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

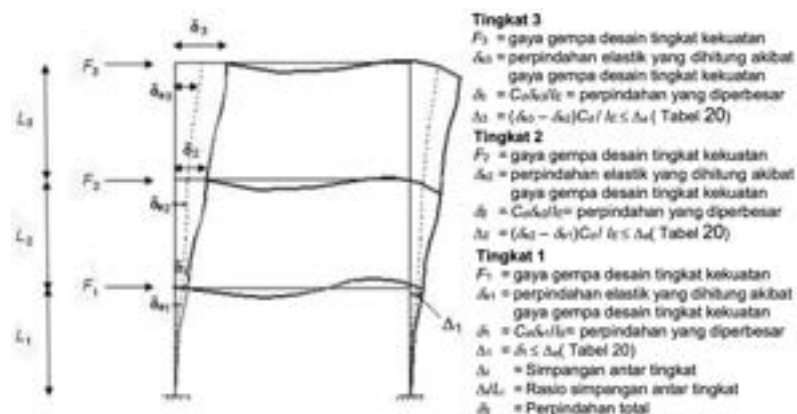
Tabel 2.11. (Lanjutan)

Tipe Struktur	C	x
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

2.11.4 Simpangan Antar Tingkat

Simpangan antar tingkat merupakan evaluasi kinerja struktur dari hasil analisis yang telah dilakukan dan tercantum dalam SNI 1726:2019, sehingga dapat diketahui apakah struktur aman atau tidak. Menentukan batas simpangan antar tingkat gedung melibatkan evaluasi simpangan akibat pengaruh gempa rencana. Hal ini bertujuan untuk menghindari kerusakan struktural seperti pelelehan baja, keretakan beton yang berlebihan, serta untuk mencegah kerusakan pada elemen non-struktural dan mengurangi ketidaknyamanan bagi penghuni. Perhitungan simpangan struktural gedung digunakan untuk meninjau perbedaan simpangan pada pusat massa di atas dan di bawah tingkat struktur bangunan. Nilai dari simpangan ini diperoleh melalui *software* analisis struktur komersil.



Sumber: SNI 1726:2019

Gambar 2.11. Penentuan simpangan antar tingkat.

Berikut penjelasan dari Gambar 2.10:

F_1, F_2, F_3 = Gaya gempa desain tingkat kekuatan

$\delta_{e1}, \delta_{e2}, \delta_{e3}$ = Perpindahan elastik yang dihitung akibat gaya gempa desain tingkat kekuatan

$$\delta_1, \delta_2, \delta_3 = \frac{C_d \times \delta_e}{I_e} \dots\dots\dots(2.25)$$

= Perpindahan yang diperbesar

$$\Delta_1 = \delta_1 \leq \Delta_a \dots\dots\dots(2.26)$$

$$\Delta_2 = (\delta_{e2} - \delta_{e1}) C_d / I_e \leq \Delta_a \dots\dots\dots(2.27)$$

$$\Delta_3 = (\delta_{e3} - \delta_{e1}) C_d / I_e \leq \Delta_a \dots\dots\dots(2.28)$$

Keterangan:

Δ_i = Simpangan antar tingkat

Δ_i / L_i = Rasio simpangan antar tingkat

δ_i = Perpindahan total

Berdasarkan SNI 1726:2019 Pasal 7.8.6 simpangan pusat massa ditingkat harus ditentukan sesuai dengan persamaan berikut ini:

$$\Delta x = \frac{C_d \times \delta_x}{I_e} \dots\dots\dots(2.29)$$

Keterangan:

δ_x = Simpangan maksimum di tingkat x

C_d = Faktor pembesaran simpangan lateral

I_e = Faktor keutamaan gempa

Tabel 2.12. Batasan Simpangan Antar Lantai

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 tingkat.	0,025 h_{sx}	0,020 h_{sx}	0,015 h_{sx}

Tabel 2.12. (Lanjutan)

Struktur	Kategori Resiko		
	I atau II	III	IV
Struktur dinding geser kantilever batu bata	0,010 h_{sx}	0,010 h_{sx}	0,010 h_{sx}
Struktur dinding geser batu bata lainnya	0,007 h_{sx}	0,007 h_{sx}	0,007 h_{sx}
Semua struktur lainnya	0,020 h_{sx}	0,015 h_{sx}	0,010 h_{sx}

Sumber: SNI 1726:2019

2.12 Pengecekan Ketidakberaturan Struktur

Struktur bangunan gedung harus diklasifikasikan sebagai struktur beraturan atau tidak beraturan. Struktur bangunan yang memiliki satu atau lebih tipe ketidakberaturan seperti yang terlampir pada Tabel 2.12 dianggap memiliki ketidakberaturan horizontal dan Tabel 2.13 dianggap memiliki ketidakberaturan vertikal perlu dirancang sesuai dengan persyaratan SNI 1726:2019 Pasal 7.3.3.4.

Tabel 2.13. Ketidakberaturan Horizontal

	Tipe dan penjelasan ketidakberaturan	Pasal referensi	Penerapan kategori desain seismik
1a	Ketidakberaturan torsi didefinisikan ada jika simpangan antar tingkat maksimum, yang dihitung termasuk torsi tak terduga dengan $A_x = 1,0$, di salah satu ujung struktur melintang terhadap suatu sumbu adalah lebih dari 1,2 kali simpangan antar tingkat rata-rata di kedua ujung struktur. Persyaratan ketidakberaturan torsi dalam pasal-pasal referensi berlaku hanya untuk struktur di mana diafragmanya kaku atau setengah kaku.	0	D, E, dan F
		0	B, C, D, E, dan F
		0	F
		0	C, D, E, dan F
		0	C, D, E, dan F
1b	Ketidakberaturan torsi berlebihan didefinisikan ada jika simpangan antar tingkat maksimum yang dihitung termasuk akibat torsi tak terduga dengan $A_x = 1,0$, di salah satu ujung struktur melintang terhadap suatu sumbu adalah lebih dari 1,4 kali simpangan antar tingkat rata-rata di kedua ujung struktur. Persyaratan ketidakberaturan torsi berlebihan dalam pasal-pasal referensi berlaku hanya untuk struktur di mana diafragmanya kaku atau setengah kaku.	Tabel 16	D, E, dan F
		0	B, C, D, E, dan F
		0	F
		0	E dan F
		0	D
		0	B, C, dan D
		0	C dan D
		0	C dan D
0	D		
		Tabel 16	B, C, dan D
		0	

Tabel 2.13. (Lanjutan)

	Tipe dan penjelasan ketidakberaturan	Pasal referensi	Penerapan kategori desain seismik
2	Ketidakberaturan sudut dalam didefinisikan ada jika kedua 0 dimensi proyeksi denah struktur dari lokasi sudut dalam lebih besar	0 Tabel 16	D, E, dan F D, E, dan F
3	Ketidakberaturan diskontinuitas diafragma didefinisikan ada jika terdapat suatu diafragma yang memiliki diskontinuitas atau variasi kekakuan mendadak, termasuk yang mempunyai daerah terpotong atau terbuka lebih besar dari 50 % daerah diafragma bruto yang tertutup, atau perubahan kekakuan diafragma efektif lebih dari 50 % dari suatu tingkat ke tingkat selanjutnya.	0 Tabel 16	D, E, dan F D, E, dan F
4	Ketidakberaturan akibat pergeseran tegak lurus terhadap bidang didefinisikan ada jika terdapat diskontinuitas dalam lintasan tahanan gaya lateral, seperti pergeseran tegak lurus terhadap bidang pada setidaknya satu elemen vertikal pemikul gaya lateral.	0 0 0 Tabel 16 0	B, C, D, E, dan F D, E, dan F B, C, D, E, dan F D, E, dan F B, C, D, E, dan F
5	Ketidakberaturan sistem nonparalel didefinisikan ada jika elemen vertikal pemikul gaya lateral tidak paralel terhadap sumbu- sumbu ortogonal utama sistem pemikul gaya seismik.	0 0 Tabel 16 0	C, D, E, dan F B, C, D, E, dan F D, E, dan F B, C, D, E, dan F

Sumber: SNI 1726:2019

Tabel 2.14. Ketidakberaturan Vertikal

	Tipe dan penjelasan ketidakberaturan	Pasal referensi	Penerapan kategori desain seismik
1a	Ketidakberaturan Kekakuan Tingkat Lunak didefinisikan ada jika terdapat suatu tingkat yang kekakuan lateralnya kurang dari 70 % kekakuan lateral tingkat di atasnya atau kurang dari 80 % kekakuan rata-rata tiga tingkat di atasnya.	Tabel 16	D, E, dan F

Tabel 2.14. (Lanjutan)

	Tipe dan penjelasan ketidakberaturan	Pasal referensi	Penerapan kategori desain seismik
1b	Ketidakberaturan Kekakuan Tingkat Lunak Berlebihan didefinisikan ada jika terdapat suatu tingkat yang kekakuan lateralnya kurang dari 60 % kekakuan lateral tingkat di atasnya atau kurang dari 70 % kekakuan rata-rata tiga tingkat di atasnya.	0	E dan F D, E, dan F
2	Ketidakberaturan Berat (Massa) didefinisikan ada jika massa efektif di sebarang tingkat lebih dari 150 % massa efektif tingkat di dekatnya. Atap yang lebih ringan dari lantai di bawahnya tidak perlu ditinjau.	Tabel 16	D, E, dan F
3	Ketidakberaturan Geometri Vertikal didefinisikan ada jika dimensi horizontal sistem pemikul gaya seismik di sebarang tingkat lebih dari 130 % dimensi horizontal sistem pemikul gaya seismik tingkat didekatnya.	Tabel 16	D, E, dan F
4	Ketidakberaturan Akibat Diskontinuitas Bidang pada Elemen Vertikal Pemikul Gaya Lateral didefinisikan ada jika pergeseran arah bidang elemen pemikul gaya lateral lebih besar dari panjang elemen itu atau terdapat reduksi kekakuan elemen pemikul di tingkat di bawahnya.	0	B, C, D, E, dan F
		0	D, E, dan F
		Tabel 16	D, E, dan F
5a	Ketidakberaturan Tingkat Lemah Akibat Diskontinuitas pada Kekuatan Lateral Tingkat didefinisikan ada jika kekuatan lateral suatu tingkat kurang dari 80 % kekuatan lateral tingkat di atasnya. Kekuatan lateral tingkat adalah kekuatan total semua elemen pemikul seismik yang berbagi geser tingkat pada arah yang ditinjau.	0 Tabel 16	E dan F D, E, dan F
5b	Ketidakberaturan Tingkat Lemah Akibat Diskontinuitas pada Kekuatan Lateral Tingkat didefinisikan ada jika kekuatan lateral suatu tingkat kurang dari 80 % kekuatan lateral tingkat di atasnya. Kekuatan lateral tingkat adalah kekuatan total semua elemen pemikul seismik yang berbagi geser tingkat pada arah yang ditinjau.	0	D, E, dan F
		0 Tabel 16	B dan C D, E, dan F

Sumber: SNI 1726:2019

2.13 Persyaratan Umum Bangunan dengan Sistem Isolasi Dasar

2.13.1 Faktor Keutamaan Gempa

Semua bagian struktur, termasuk struktur di atas sistem isolasi, harus didesain dengan kategori risiko sesuai dengan Tabel 2.1. Faktor keutamaan gempa, I_e harus diambil sebesar 1,0 untuk struktur dengan isolasi seismik, tanpa membedakan kategori risiko yang diterapkan.

2.13.2 Faktor Redudansi dan Faktor Pembesaran Lateral

Faktor redundansi (ρ) harus diberikan pada struktur di atas sistem isolasi. Nilai faktor redundansi (ρ) diperbolehkan sama dengan 1,0 untuk struktur dengan isolasi yang tidak memiliki ketidakberaturan struktur. Faktor pembesaran (C_d) dari struktur terisolasi sama dengan nilai faktor R_1 yaitu $\frac{3}{8}$ dari nilai R yang diberikan pada tabel 12 SNI 1726:2019 dengan nilai maksimum tidak lebih besar dari 2,0 dan nilai minimum tidak kurang dari 1,0.

2.13.3 Batas Simpangan Antar Tingkat

Berdasarkan SNI 1726:2019 Pasal 12.6.4.4 simpangan antar tingkat maksimum harus memenuhi persyaratan sebagai berikut:

1. Dalam analisis riwayat waktu, simpangan antar tingkat maksimum tidak boleh melebihi $0,020h_{sx}$.

2.14 Penelitian Terdahulu

Sebelum melakukan penelitian, berbagai referensi dari peneliti terdahulu telah dikumpulkan dan akan digunakan sebagai acuan dalam penelitian yang akan dilakukan. Referensi yang digunakan pada penelitian ini dapat dilihat pada Tabel 2.15.

Tabel 2.15. Perbandingan Penelitian yang akan Dilakukan dengan Penelitian Terdahulu

Parameter Pembanding	Penelitian terdahulu				
Peneliti	(Budiono dan Setiawan, 2014)	(Budiono dan Adelia, 2015)	(Suryawidodo dkk., 2023)	(Adelwin, 2022)	(Tio dkk., 2022)
Judul Penelitian	Studi Komparasi Sistem Isolasi Dasar <i>High-Damping Rubber Bearing</i> (HDRB) dan <i>Friction Pendulum system</i> (FPS) pada Bangunan Beton Bertulang	Penggunaan Isolasi Dasar <i>Single Friction Pendulum</i> dan <i>Triple Friction Pendulum</i> pada Bangunan Beton Bertulang	Alternatif Desain Struktur Gedung Rumah Sakit Universitas Islam Malang dengan <i>Base Isolator Tipe Friction Pendulum System</i> (FPS)	Studi Efektivitas Sistem Isolasi Dasar Tipe <i>Double Friction Pendulum</i> pada Bangunan Beton Bertulang Sistem Ganda	Penerapan <i>Base isolation system</i> sebagai Alternatif Sistem Struktur pada Bangunan RSUD Kota Manado Delapan Tingkat
Objek Penelitian atau model yang digunakan	Gedung perkantoran hipotetikal 25 lantai dengan dinding geser di wilayah Jakarta dengan kelas situs Tanah Sedang	Gedung perkantoran 25 lantai di wilayah Jakarta dengan kelas situs tanah sedang	Gedung rumah sakit 9 lantai di wilayah Kota Malang dengan kelas situs tanah sedang	Gedung perkantoran 20 lantai di wilayah Kota Jakarta dengan kelas situs tanah sedang	Gedung Rumah Sakit 8 lantai di wilayah Kota Manado kondisi tanah lunak

Tabel 2.15. (Lanjutan)

Parameter Pembeding	Penelitian terdahulu				
Peneliti	(Budiono dan Setiawan, 2014)	(Budiono dan Adelia, 2015)	(Suryawidodo dkk., 2023)	(Adelwin, 2022)	(Tio dkk., 2022)
Tujuan Penelitian	Membandingkan respons struktur dan kinerja bangunan gedung dengan dua sistem berbeda yaitu HDRB dan FPS	Membandingkan kinerja dari SFP dan TFP pada bangunan konvensional tanpa isolasi dasar dengan SRPMK dan SRPMM	Mengetahui besar periode fundamental struktur, gaya geser dasar, perpindahan dan simpangan antar lantai dari kinerja DFP	Mengetahui efektivitas penggunaan <i>double friction pendulum</i> terhadap gaya geser dasar, percepatan lantai atap, dan rasio simpangan antar tingkat.	Mempelajari kinerja seismik teknologi perangkat tambahan berupa <i>base isolation</i> (LRB)
Metode Analisis	Analisis dinamik nonlinear riwayat waktu	Analisis dinamik nonlinear riwayat waktu	Analisis dinamik linear riwayat waktu	Analisis dinamik respons spektrum	Analisis dinamik respons spektrum
Program bantuan	CSI Perform 3D	CSI Perform 3D	ETABS v21	ETABS v18	ETABS v20
Peraturan yang digunakan	SNI 2847:2013, SNI 1726:2012, dan SNI 1727 1989	SNI 2847:2013, SNI 1726:2012, dan SNI 1727 1989	SNI 2847:2019; SNI 1727:2020; dan SNI 1726:2019	SNI 2847:2019; SNI 1727:2020; dan SNI 1726:2019	SNI 2847:2019; SNI 1727:2020; dan SNI 1726:2019

Tabel 2.15. (Lanjutan)

Parameter Pembeding	Penelitian terdahulu				
Peneliti	(Budiono dan Setiawan, 2014)	(Budiono dan Adelia, 2015)	(Suryawidodo dkk., 2023)	(Adelwin, 2022)	(Tio dkk., 2022)
Kesimpulan	<p>Struktur <i>isolated-base</i> mengalami penurunan respons struktur yang signifikan baik jika dibandingkan dengan struktur konvensional. Kinerja perangkat FPS memiliki keunggulan di semua parameter jika dibandingkan kinerja perangkat HDRB.</p>	<p>TFPS memberikan respons struktur yang lebih baik daripada SFPS. Perubahan SRPMK dan SRPMM, pada struktur yang terisolasi tidak menyebabkan perubahan berarti pada respons nonlinier pada struktur yang diamati.</p>	<p>Membandingkan struktur <i>fixed-base</i>, penggunaan <i>base isolator</i> pada struktur dapat menambah periode natural bangunan, dan memperkecil <i>interstory drift</i> struktur.</p>	<p>Penggunaan <i>base isolation</i> tipe <i>double friction pendulum</i> pada gedung 20 lantai dapat mereduksi gaya gempa yang diterima oleh struktur sehingga kerusakan yang terjadi akibat gempa dapat diminimalisir serta dapat meningkatkan kenyamanan pengguna gedung</p>	<p>Penggunaan <i>base isolation</i> mempengaruhi baik simpangan antar tingkat, desain penampang dari struktur yang awalnya adalah struktur <i>shear wall</i> yang memiliki perletakkan jepit (<i>fixed-base</i>).</p>

III. METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Objek Penelitian

Objek penelitian ini adalah Gedung Kuliah Terpadu Institut Agama Islam Negeri (IAIN) Metro yang terletak di Jalan Ki. Hajar Dewantara, Kec. Batanghari, Kab. Lampung Timur, Lampung 34381 dengan koordinat $5^{\circ}07'09''\text{S } 105^{\circ}20'25''\text{E}$.

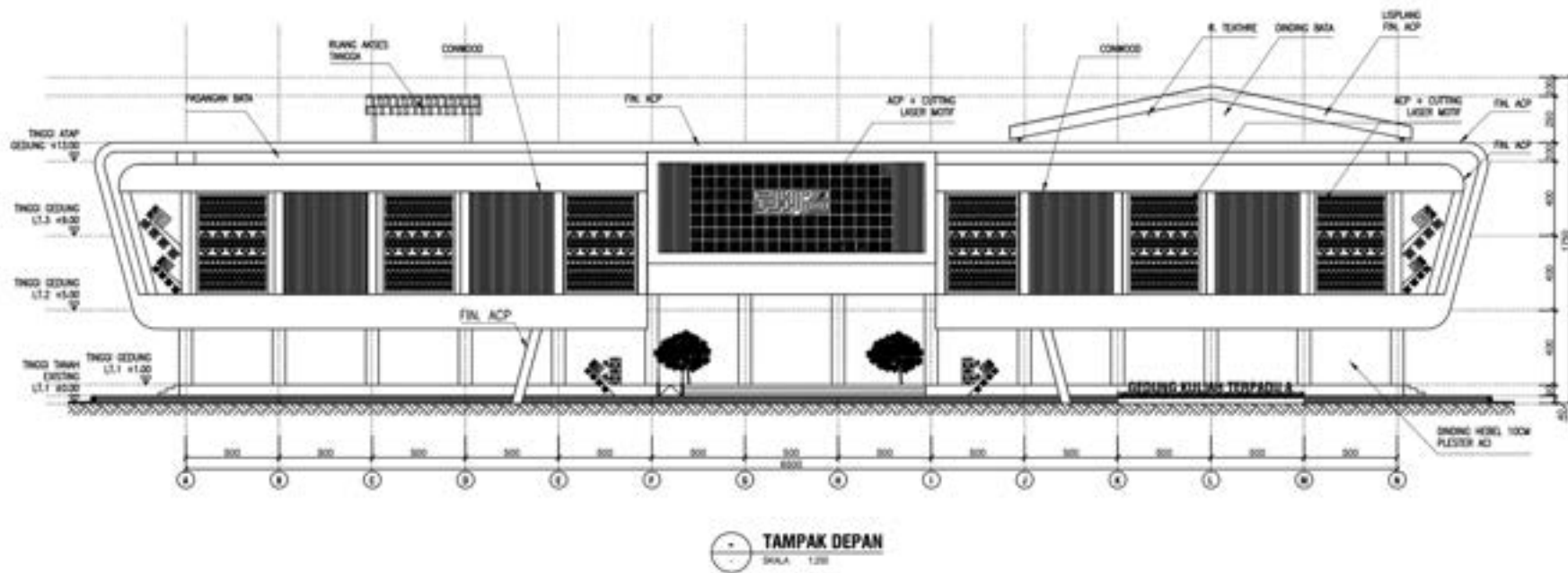


Sumber: Google Earth, 2024

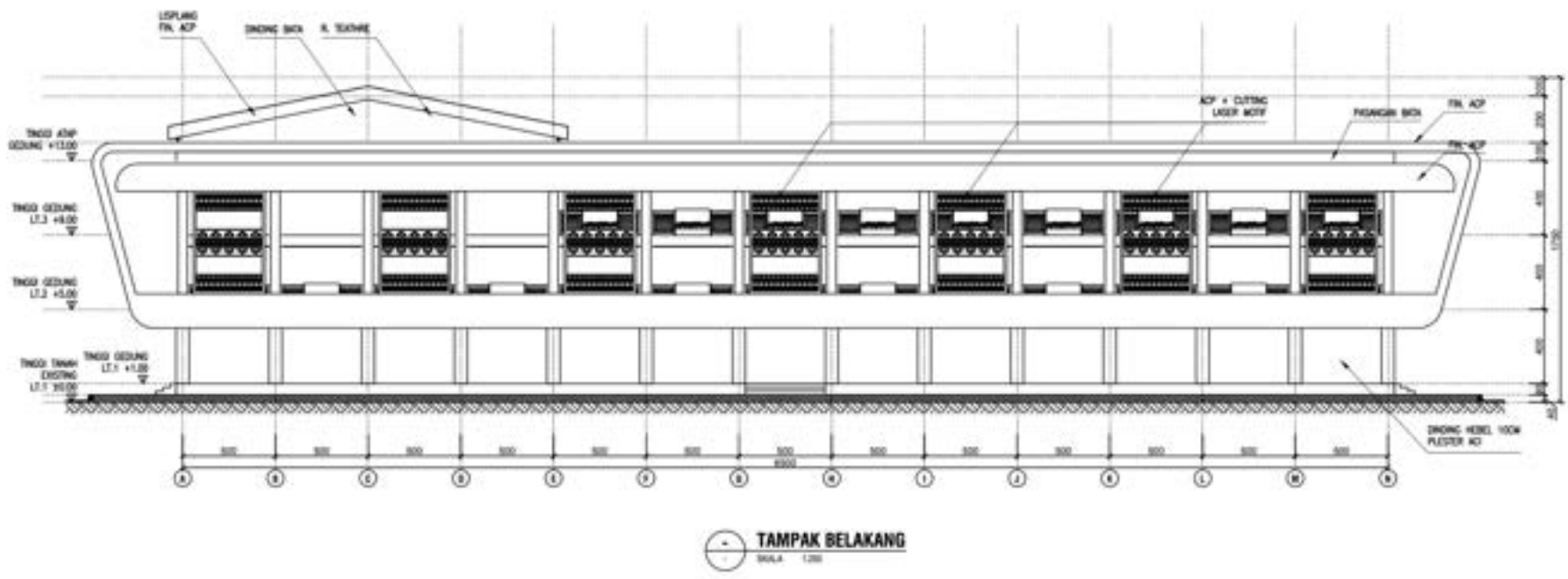
Gambar 3.1. Denah lokasi objek penelitian.

3.2 Data Penelitian

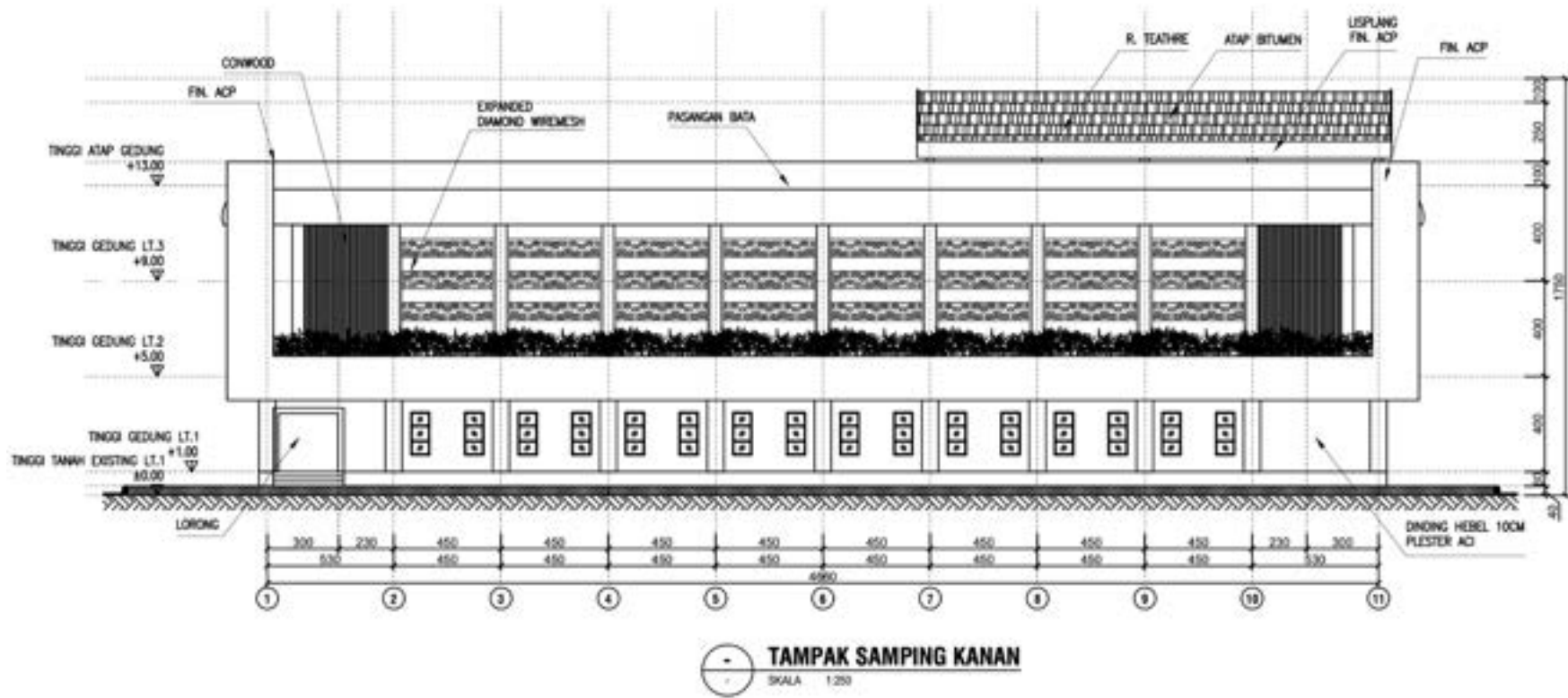
Adapun gambar tampak depan, gambar tampak belakang, gambar tampak samping kanan, dan gambar tampak samping kiri gedung yang termasuk dalam data penelitian disajikan pada Gambar 3.2 – Gambar 3.5.



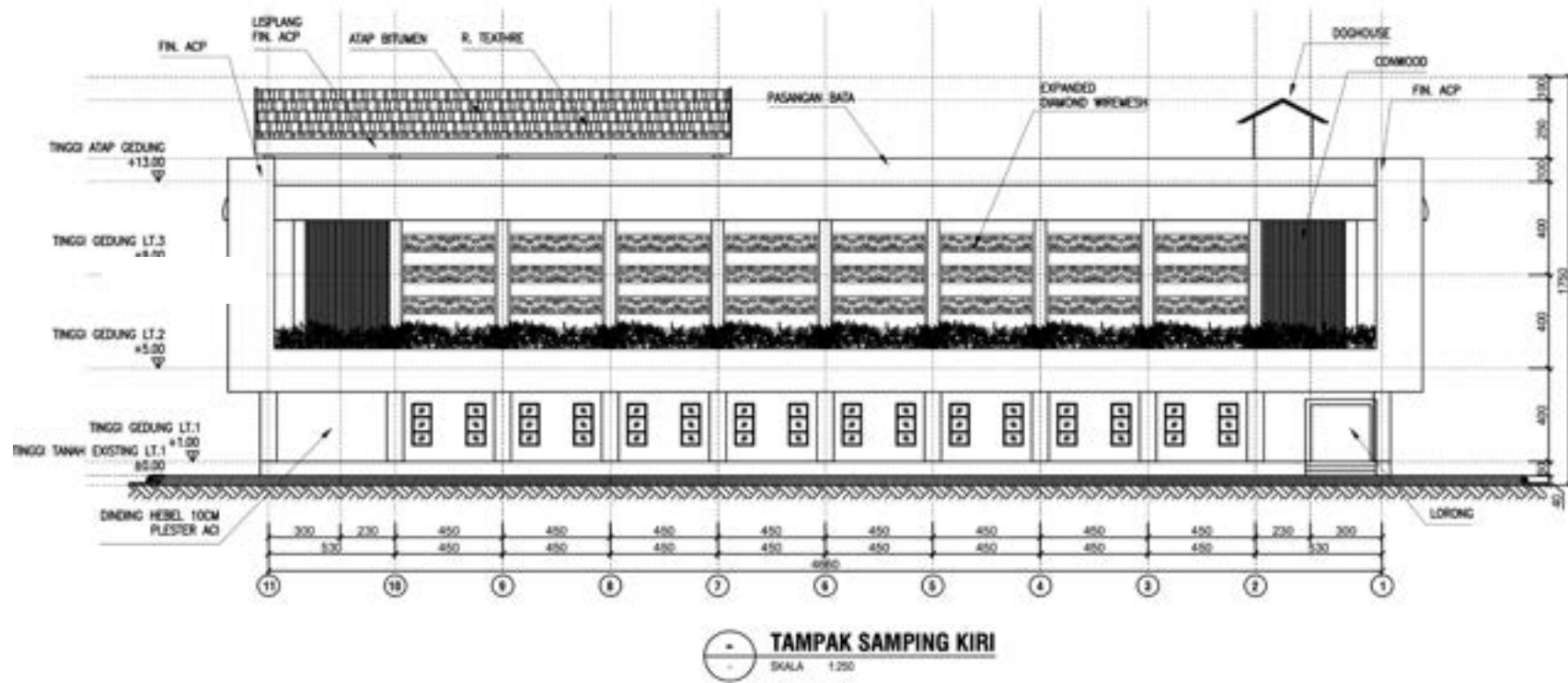
Gambar 3.2. Tampak depan Gedung Kuliah Terpadu IAIN Metro.



Gambar 3.3. Tampak belakang Gedung Kuliah Terpadu IAIN Metro.



Gambar 3.4. Tampak samping kanan Gedung Kuliah Terpadu IAIN Metro.



Gambar 3.5. Tampak samping kiri Gedung Kuliah Terpadu IAIN Metro.

3.2.1 Data Umum

Berikut adalah data-data penelitian pada Gedung Kuliah Terpadu Institut Agama Islam Negeri (IAIN) Metro.

- a. Nama gedung : Gedung Kuliah Terpadu IAIN Metro
- b. Fungsi : Gedung fasilitas pendidikan
- c. Sistem struktur : Sistem rangka beton pemikul momen menengah (SPRMM)
- d. Faktor keutamaan (I_e) : 1,5
- e. Koefisien seismik (R) : 5
- f. Faktor kuat lebih (C_d) : 4,5
- g. Pembesaran defleksi (Ω_0) : 3
- h. Jumlah lantai : 3 (tiga) lantai
- i. Tinggi gedung : 12 m
- j. Luas bangunan : Lantai 1 $\pm 3029 \text{ m}^2$
Lantai 2 $\pm 3029 \text{ m}^2$
Lantai 3 $\pm 3029 \text{ m}^2$
Lantai Atap $\pm 3029 \text{ m}^2$
- k. Koordinat : Latitude (-5.119118669508298);
Longitude (105.34043926697454)

Tabel 3.1. Data Elevasi Bangunan

No	Lantai	Elevasi Tiap Lantai (m)	Tinggi Bangunan (m)	Tebal Lantai (mm)
1	Lantai 1	+ 0,95	4,0	130
2	Lantai 2	+ 4,95	4,0	130
4	Lantai 3	+ 8,95	4,0	130
5	Lantai Atap	+ 12,95	-	130

3.2.2 Spesifikasi Material

Adapun spesifikasi material yang digunakan dalam pemodelan Gedung Kuliah Terpadu Institut Agama Islam Negeri (IAIN) Metro sebagai berikut:

a. Beton

Mutu beton (f_c')	: 30 MPa
Elastisitas beton (E_c)	: 25742.9602 MPa
Berat jenis beton	: 24 kN/m ³
Angka <i>poisson</i> (ν)	: 0,2

b. Baja tulangan

Kuat leleh (f_y)	: 420 MPa
Kuat tarik (f_u)	: 525 MPa
Elastisitas baja (E)	: 200000 MPa
Berat jenis baja	: 78,5 kN/m ³

c. *Double Friction Pendulum Bearing*

Katalog	: NS-SSB (<i>Nippon Steel-Spherical Sliding Bearing</i>)
Tipe	: NSSSB-M(L)-45-350-700R
Jenis friksi	: <i>High Friction</i>
Koefisien friksi	: 0,043
Beban vertikal maksimum	: 5.773 kN
Perpindahan maksimum	: 700 mm

3.2.3 Kolom

Gedung Kuliah Terpadu Institut Agama Islam Negeri (IAIN) Metro menggunakan kolom persegi dengan ukuran yang berbeda-beda. Tiap kolom diberi indeks K dengan mutu beton K350. Detail kolom dapat dilihat pada Tabel 3.2.

3.2.4 Balok

Gedung Kuliah Terpadu Institut Agama Islam Negeri (IAIN) Metro terdiri dari dua struktur balok yaitu balok anak dan balok induk dengan dimensi yang berbeda-beda. Detail dari jenis balok yang digunakan dapat dilihat pada Tabel 3.3.

3.2.5 Pelat

Gedung Kuliah Terpadu Institut Agama Islam Negeri (IAIN) Metro menggunakan pelat dengan ketebalan 130 mm untuk lantai 1-3. Tulangan yang digunakan adalah D13-150 mm untuk arah X dan arah Y.

3.2.6 Data Tanah

Pada penelitian ini data tanah yang diperlukan mengalami kekurangan. Hasil pengujian *bor log* pada lokasi penelitian yang berisikan nilai N-SPT tidak diberikan oleh pihak pelaksana. Nilai N-SPT digunakan dalam menentukan jenis tanah yang ada di lokasi penelitian. Klasifikasi situs menentukan kategori desain seismik dan parameter respon spektral percepatan gempa.

Berdasarkan SNI 1726:2019 Pasal 5.1 Tabel 5 menyebutkan bahwa apabila tidak tersedia data tanah pada situs sampai kedalaman 30 m, maka sifat-sifat tanah harus diestimasi oleh seorang ahli geoteknik yang memiliki sertifikat/izin keahlian dengan menyiapkan laporan penyelidikan tanah berdasarkan kondisi geotekniknya. Jika sifat tanah yang memadai tidak tersedia untuk penentuan kelas situs, maka kelas situs SE harus digunakan. Maka pada penelitian ini, peneliti menggunakan kelas situs tanah lunak (SE) sebagai klasifikasi situs tanah pada lokasi penelitian.

Tabel 3.2. Detail Kolom

Kolom	Dimensi (mm)		Lantai	Tulangan Memanjang	Sengkang (mm)		Tulangan Ikat (mm)	
	B	H			Tumpuan	Lapangan	Tumpuan (arah X, Y)	Lapangan (arah X, Y)
K1	650	650	Lt 1-3	24D16	D10-150	D10-150	D10-150	D10-150
K2	500	500	Lt 1-3	16D16	D10-150	D10-150	D10-150	D10-150
K3	400	400	Lt 1-3	12D16	D10-150	D10-150	-	-

Tabel 3.3. Detail Balok

Balok	Dimensi (mm)		Tul. Lentur Tumpuan			Tul. Lentur Lapangan			Sengkang (mm)	
	B	H	Atas	Bawah	Pinggang	Atas	Bawah	Pinggang	Tumpuan	Lapangan
B1	250	450	5D16	4D16	-	4D16	5D16	-	D10-75	D10-150
B2	400	750	7D19	5D19	2D16	5D19	7D19	2D16	D10-100	D10-150
B3	300	600	6D16	4D16	2D13	4D16	6D16	2D13	D10-75	D10-100
B4	450	850	7D19	5D19	4D16	5D19	7D19	4D16	D10-100	D10-150
BA	200	400	2D16	2D16	-	2D16	2D16	-	D10-75	D10-150

3.2.7 Data Beban Gravitasi

Tabel 3.3. Beban Mati Dinding

Berat Dinding Bata Ringan	=	1,87 kN/m ²
---------------------------	---	------------------------

Sumber: SNI 1727:2020 hlm 281

Tabel 3.4. Beban Mati Tambahan Pelat Lantai yang Digunakan

Berat plafond dan rangka	=	0,18 kN/m ²
Berat plumbing	=	0,30 kN/m ²
Berat mekanikal dan elektrikal	=	0,40 kN/m ²
Berat spesi	2×0,21 kN/m ² =	0,42 kN/m ²
Berat keramik	=	0,24 kN/m ²
Total	=	1,54 kN/m ²

Sumber: PPPURG 1987

Tabel 3.5. Beban Mati Tambahan Pelat Atap yang Digunakan

Berat plafond dan rangka	=	0,18 kN/m ²
Berat plumbing	=	0,30 kN/m ²
Berat mekanikal	=	0,40 kN/m ²
Total	=	0,88 kN/m ²

Sumber: PPPURG 1987

Tabel 3.6. Beban Hidup yang Digunakan

Control room	=	4,79 kN/m ²
Gudang	=	6,00 kN/m ²
Koridor	=	3,83 kN/m ²
Ruang digital	=	4,79 kN/m ²
Ruang kelas	=	1,92 kN/m ²
Ruang laboratorium	=	2,87 kN/m ²
Ruang panel	=	1,92 kN/m ²
Ruang pertemuan lainnya	=	4,79 kN/m ²
Theatre	=	2,87 kN/m ²

Sumber: SNI 1727:2020

Tabel 3.7. Beban Hidup di Atap yang Digunakan

Atap datar atau berbubung	=	0,96 kN/m ²
Kanopi	=	0,24 kN/m ²

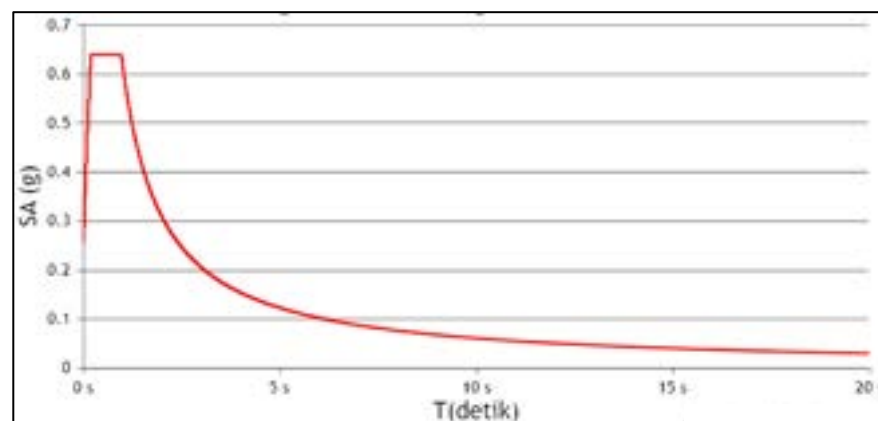
Sumber: SNI 1727:2020

3.2.8 Data Beban Gempa

Tabel 3.8. Parameter yang Digunakan untuk Membuat Grafik Spektrum Respons Desain

Parameter		Nilai	
PGA	=	0,3102	g
S _s	=	0,6740	g
S ₁	=	0,3673	g
T ₀	=	0,1940	detik
T _s	=	0,9702	detik
T _L	=	20,00	detik
S _{DS}	=	0,6388	g
S _{D1}	=	0,6197	g

Sumber: www.rsa.ciptakarya.pu.go.id



Sumber: www.rsa.ciptakarya.pu.go.id

Gambar 3.6. Grafik spektrum respons desain yang digunakan.

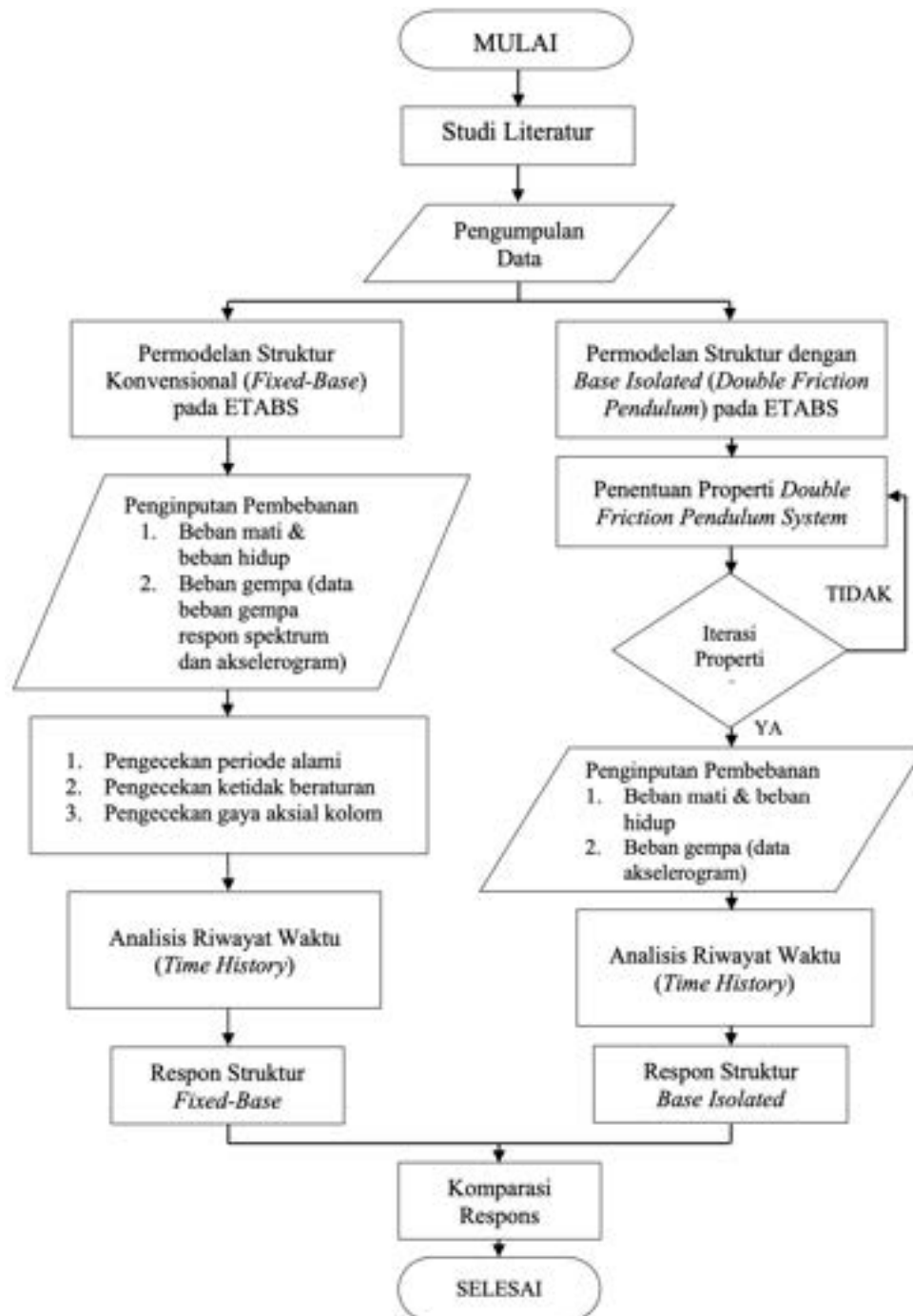
Tabel 3.9. Rekaman Gempa yang Digunakan

No.	Nama Gempa	Nama Stasiun	Tahun	Magnitude
1	Morgan Hill	Foster City - APEEL 1	1984	6,19
2	Chi-Chi	CHY076	1999	6,2
3	Hamadori	Kuki	2011	6,69
4	Iwate-oki	Hachinohe	2011	6,7
5	KushiroAs	Toyokoro	2004	6,74
6	Hyuganada	Ohita	1996	6,77
7	Toakchi-oki	Akkeshi	2008	6,8

Sumber: peer.berkeley.edu; riskscience.ucla.edu

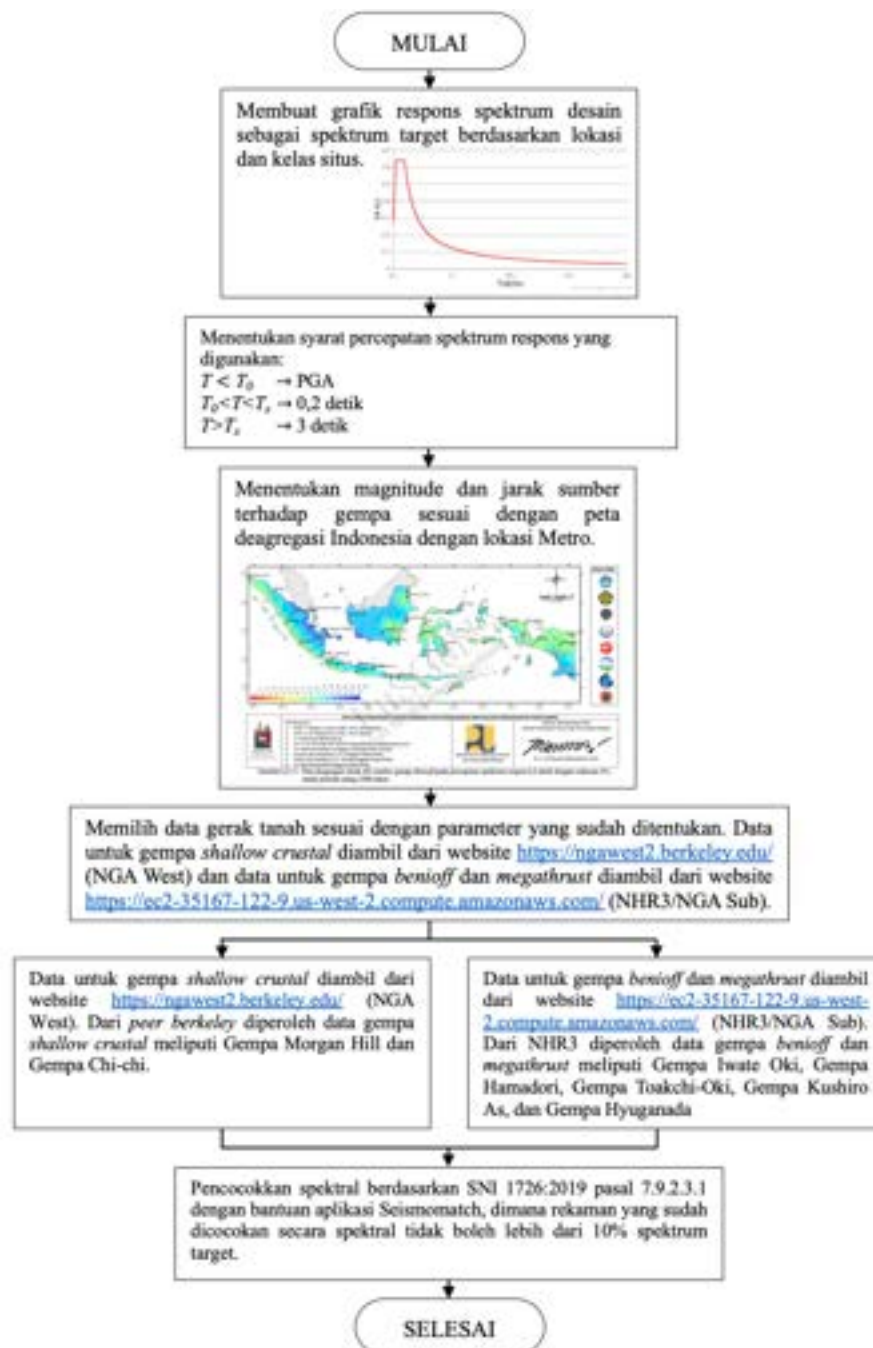
3.3 Diagram Alir Penelitian

Dalam melakukan penelitian ini perlu dilalui beberapa tahapan. Adapun diagram alir penelitian yang dapat dilihat pada Gambar 3.7.



Gambar 3.7. Diagram alir penelitian.

Sebelum memasuki tahap pengecekan respon struktur terhadap gedung yang ditinjau, penting untuk memahami langkah-langkah yang terlibat dalam proses analisis riwayat waktu (*time history*). Gambar 3.8 merupakan diagram alir dari metode analisis riwayat waktu (*time history*).



Gambar 3.8. Diagram alir analisis riwayat waktu.

3.4 Prosedur Penelitian

Untuk melakukan penelitian terkait dengan analisis dinamik struktur bangunan gedung menggunakan sistem *seismic isolation friction pendulum system*, prosedur penelitian yang dilakukan adalah sebagai berikut.

3.4.1 Studi Literatur

Ketentuan analisis dalam prosedur penelitian ini adalah

1. SNI 1726-2019 tentang Tata Cara Perencanaan Ketahanan Gempa untuk Struktur Bangunan Gedung dan Non Gedung.
2. SNI 1727-2020 tentang Beban Desain Minimum dan Kriteria Terkait untuk Bangunan Gedung dan Struktur Lain.
3. SNI 2847-2020 tentang Persyaratan Beton Struktural untuk Bangunan Gedung dan Penjelasan.
4. PPPURG 1987 (Pedoman Perencanaan Pembebanan untuk Rumah dan Gedung) untuk pembebanan yang diijinkan dalam perencanaan gedung.
5. Katalog NS-SSB untuk menentukan properti *Double Friction Pendulum System*.
6. Berbagai jurnal dan sumber literatur mengenai analisis kekuatan struktur dengan menggunakan metode analisis riwayat waktu (*time history*) dan penggunaan *base isolator*.

3.4.2 Pengumpulan Data

Pengumpulan data dan informasi mengenai Gedung Kuliah Terpadu Institut Agama Islam Negeri (IAIN) Metro berupa data primer maupun data sekunder. Adapun data-data yang akan digunakan pada penelitian ini telah dirinci pada subbab 3.2, di mana cara pengumpulan data tersebut adalah sebagai berikut:

- a. Data umum, spesifikasi material, tampak bangunan, dan detail struktur bangunan diperoleh dari perusahaan CMK *Consulting Services*.
- b. Data beban gravitasi diperoleh dari PPURG 1987 dan SNI 1727:2020. Data tersebut dipilah mana yang akan digunakan dan kemudian dikalkulasikan.
- c. Beban gempa statik diperoleh dan direncanakan berdasarkan SNI 1726-2019 sebagai berikut:
 - 1) Pemilihan kategori resiko berdasarkan jenis pemanfaatan bangunan;
 - 2) Penentuan faktor keutamaan gempa (I_e) berdasarkan kategori resiko;
 - 3) Klasifikasi kelas situs;
 - 4) Penentuan koefisien situs (F_a dan F_v);
 - 5) Penentuan parameter percepatan batuan dasar (S_s dan S_1);
 - 6) Perhitungan parameter percepatan desain (S_{Ds} dan S_{D1});
 - 7) Penentuan kategori desain seismik;
 - 8) Penentuan faktor (R , C_d dan Ω);
 - 9) Perhitungan *Time Periode* dari nilai (C_t dan x) berdasarkan tipe struktur;
 - 10) Perhitungan (T_0 , T_S dan S_a);
 - 11) Pembuatan grafik respons spektrum desain sesuai dengan parameternya.

3.4.3 Pemodelan 3D

Pemodelan struktur bangunan dengan pemodelan 3D harus sesuai dengan data yang telah diperoleh. Seluruh komponen struktur baik kolom, balok, pelat lantai dan tulangan dimodelkan pada program ETABS v.21 sesuai dengan spesifikasi yang ada pada *shop drawing*. Dalam penelitian ini terdapat dua model dua model struktur, yaitu:

1. Model konvensional (*fixed-base*)

2. Model dengan *base isolation (double friction pendulum system)*

Prosedur yang dilakukan dalam pembuatan model 3D pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

- a. Pembuatan model baru pada halaman awal ETABS dan atur opsi inisialisasi;
- b. Pemodelan *grid* dan *story system* sesuai dengan data;
- c. Pendefinisian material beton dan baja tulangan yang akan dimodelkan;
- d. Pendefinisian penampang struktur sesuai dengan detail kolom, balok, dan pelat;
- e. Penggambaran elemen struktur dan tumpuan;
- f. Pendefinisian pola pembebanan
- g. Input beban gravitasi
- h. Atur dan asumsi diafragma untuk tiap lantai sebagai kaku (*rigid*);
- i. Pendefinisian *mass source*;
- j. Pendefinisian *modal cases*;
- k. Periksa model, dan *Run* analisis awal;
- l. Analisis *modal cases* dan berat seismik efektif.

3.4.4 Penginputan Pembebanan

Menghitung dan mendefinisikan beban-beban yang bekerja pada struktur yang kemudian diinput kedalam *software* ETABS v.21. Pembebanan dilakukan sesuai dengan SNI 1727:2019 tentang Beban Desain Minimum dan Kriteria Terkait untuk Bangunan Gedung dan Struktur Lain serta PPPURG (Pedoman Perencanaan Pembebanan untuk Rumah dan Gedung) untuk pembebanan yang diijinkan dalam perencanaan gedung. Pembebanan gempa direncanakan berdasarkan SNI 1726:2019 yang telah dijelaskan pada point 3.2.9.

3.4.5 Pemodelan Bangunan Dengan Isolasi Dasar Tipe *Double Friction Pendulum*

Untuk merencanakan desain *double friction pendulum* hal yang harus dilakukan adalah menentukan besarnya perpindahan alat yang akan menjadi target sebagai kontrol simpangan pada *base isolation*. terlebih dahulu. Properti alat ditentukan berdasarkan nilai gaya aksial kolom terbesar. Penentuan data *friction pendulum system* berdasarkan besarnya beban vertikal pada titik isolator menggunakan katalog NS-SSB untuk mengetahui nilai radius kurvatur, koefisien friksi, kekakuan efektif dan rasio redaman efektif.

Dengan properti tersebut, akan diiterasi perpindahan alat hingga hasilnya konvergen. Apabila perpindahan alat yang sudah konvergen belum sesuai dengan target perpindahan, maka properti alat akan diiterasi kembali. Properti alat akan diiterasi sehingga menghasilkan perpindahan sistem isolasi sesuai dengan target. Parameter-parameter linear yang diinput pada model ETABS adalah kekakuan efektif (K_{eff}) dan rasio redaman efektif (ξ) dengan menggunakan analisis respons spektrum.

3.4.6 Analisis Struktur Metode Linear Riwayat Waktu (*Time History Analysis*)

Dalam metode *time history* percepatan gempa masukan (akselerogram) yang dipilih harus merepresentasikan rekaman gerakan tanah akibat gempa yang ditinjau hampir menyerupai lokasi tempat struktur gedung yang ditinjau berada, dengan memperhitungkan penskalaan pada percepatan gempa masukan serta penskalaan geser dasar. Berdasarkan SNI 1726:2019 Pasal 6.10.1.1, setidaknya diperlukan 5 (lima) rekaman atau simulasi riwayat waktu percepatan gerakan tanah horizontal yang harus dipilih dari beberapa

kejadian gempa dengan magnitudo dan jarak sumber gempa (sesar/patahan/subduksi) yang secara konsisten mengontrol gerak tanah gempa MCE_R .

Percepatan gempa yang digunakan pada analisis *time history* dalam penelitian ini digunakan 7 pasang rekaman percepatan gempa yaitu, Morgan Hill (California, 1984), Chi-Chi (Taiwan, 1999), Hamadori (Japan, 2011), Toakchi-Oki (Japan, 2008), Iwate-Oki (Japan, 2011), KushiroAs (Japan, 2004), dan Hyuganada (Japan, 1996)

Beban gempa riwayat waktu diperoleh dan direncanakan dengan bantuan aplikasi Seismomatch berdasarkan SNI 1726-2019 dengan tahapan sebagai berikut:

- 1) Pembuatan grafik respons spektrum desain sebagai spektrum target;
- 2) Penentuan syarat percepatan spektrum respons yang digunakan:

$T < T_0$	→ PGA
$T_0 < T < T_s$	→ 0,2 detik
$T > T_s$	→ 3 detik
- 3) Berdasarkan nilai T_a dan T_{max} maka $T_0 < T < T_s$ sehingga digunakan magnitudo dan jarak sumber terhadap gempa sesuai peta deagregasi Indonesia dengan lokasi kota Metro menggunakan percepatan spektrum respons 0,2 detik dengan redaman 5% untuk periode ulang 2500 tahun.
- 4) Pemilihan data gerak tanah sesuai dengan parameter yang sudah ditentukan. Data untuk gempa *shallow crustal* diambil dari website <https://ngawest2.berkeley.edu/> (NGA West) dan data untuk gempa *benioff* dan *megathrust* diambil dari website <https://ec2-35167-122-9.us-west-2.compute.amazonaws.com/> (NHR3/NGA Sub).

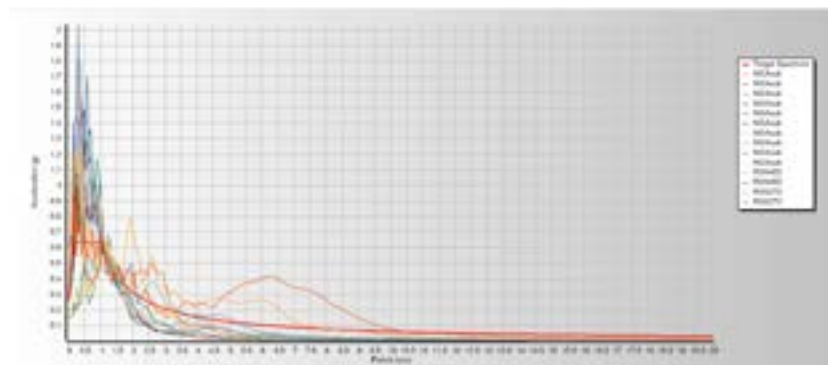
Stasiun	Lat	Long	Depth (km)	Magnitude	Other
0001	0.00	102.00	10.0	5.0	...
0002	0.00	102.00	10.0	5.0	...
0003	0.00	102.00	10.0	5.0	...

Gambar 3.9. Data gerak tanah Gempa *shallow crustal* terpilih.

Stasiun	Lat	Long	Depth (km)	Magnitude	Other
0001	0.00	102.00	10.0	5.0	...
0002	0.00	102.00	10.0	5.0	...
0003	0.00	102.00	10.0	5.0	...

Gambar 3.10. Data gerak tanah Gempa Benioff dan Megathrust terpilih.

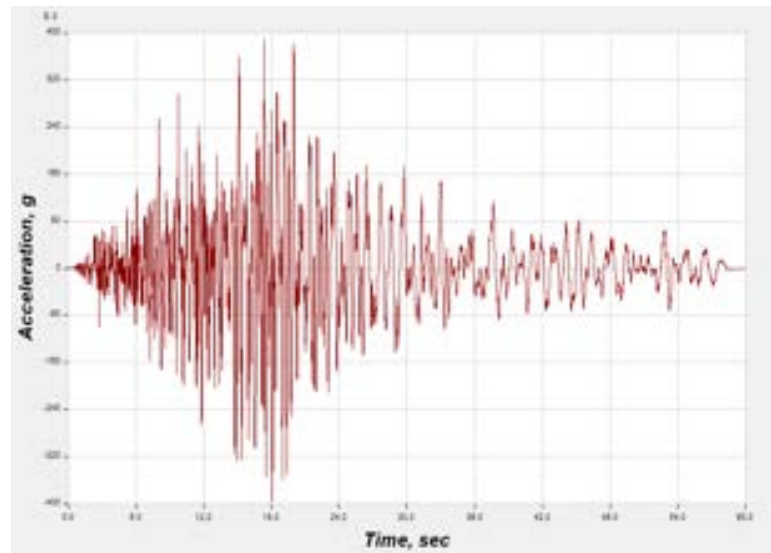
- 5) Pencocokkan spektral berdasarkan SNI 1726:2019 pasal 7.9.2.3.1 dengan bantuan aplikasi Seismomatch.



Gambar 3.11. Pencocokkan spektral menggunakan seismomatch.

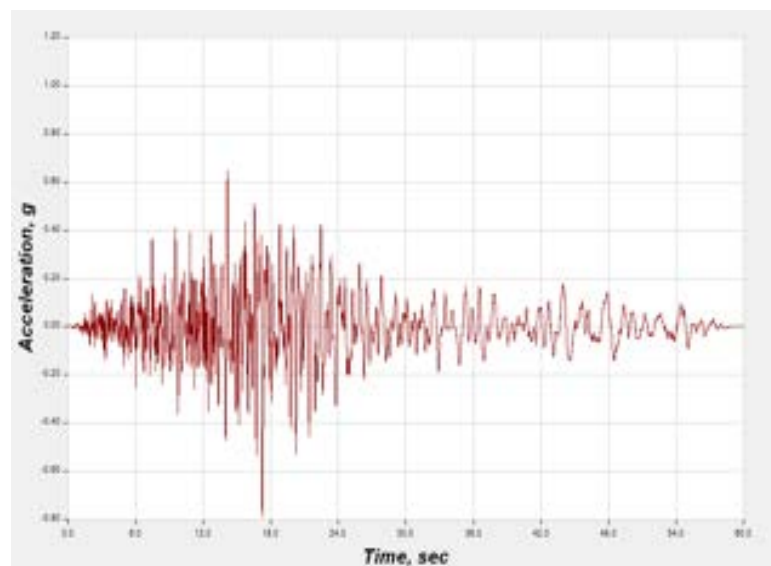
Berikut merupakan rekaman gempa yang digunakan dan telah diskalakan dengan respon spektrum kota Metro.

- 1) Lokasi Gempa : Morgan Hill, California (1984)
Magnitude : 6,9
Durasi : 59,99 detik



Sumber: *peer.berkeley.edu*

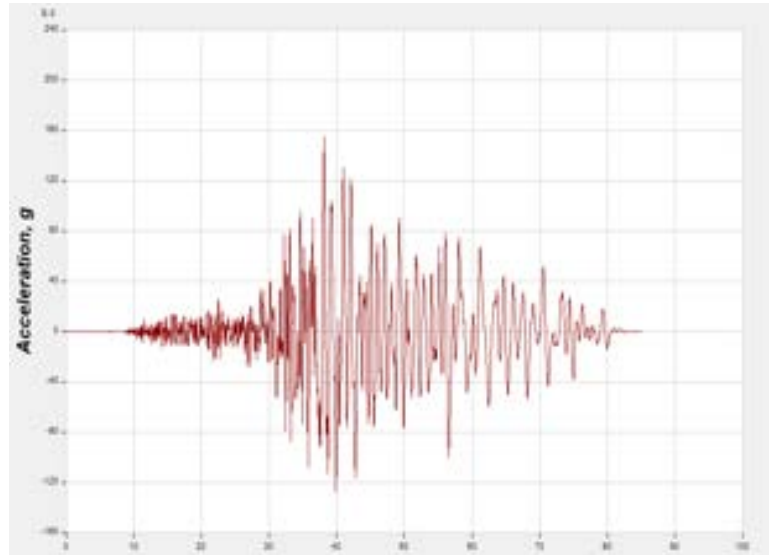
Gambar 3.12. Rekaman gempa Morgan Hill arah X.



Sumber: *peer.berkeley.edu*

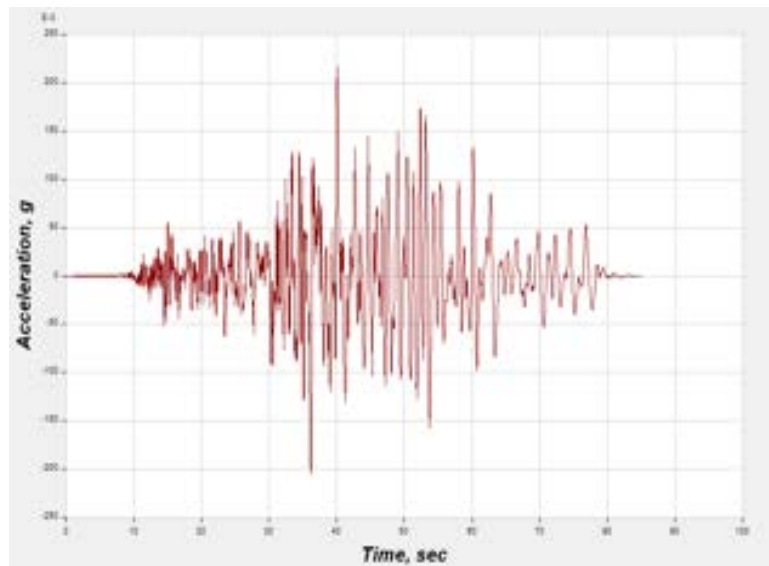
Gambar 3.13. Rekaman gempa Morgan Hill arah Y.

- 2) Lokasi Gempa : Hyuganada, Jepang (1996)
Magnitude : 6,77
Durasi : 85,03 detik



Sumber: riskscience.ucla.edu

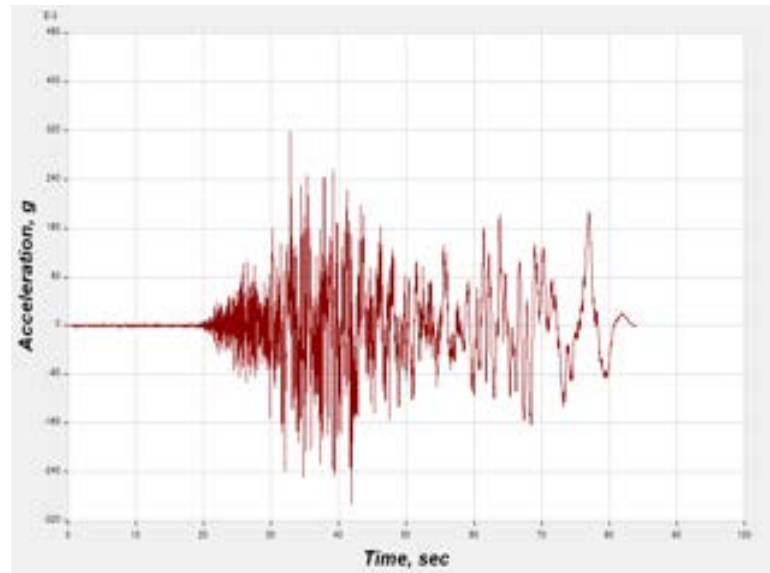
Gambar 3.14. Rekaman gempa Hyuganada arah X.



Sumber: riskscience.ucla.edu

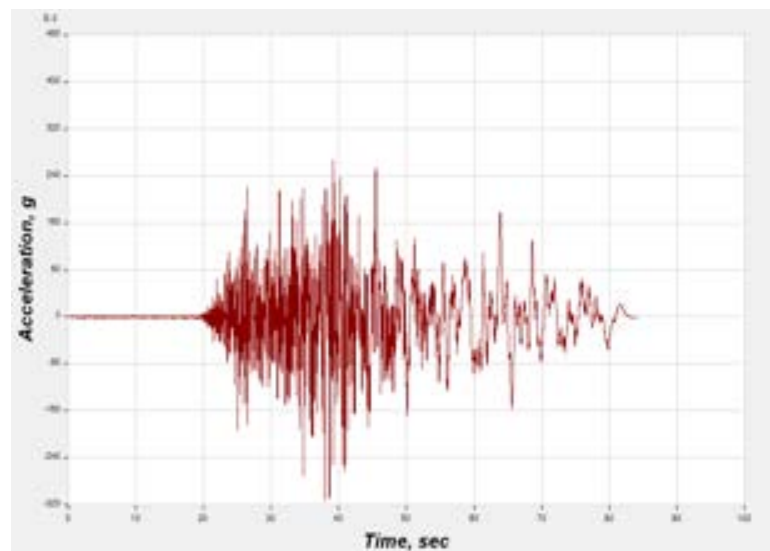
Gambar 3.15. Rekaman gempa Hyuganada arah Y.

- 3) Lokasi Gempa : Chi-chi, Taiwan (1999)
Magnitudo : 6,2
Durasi : 84,16 detik



Sumber: peer.berkeley.edu

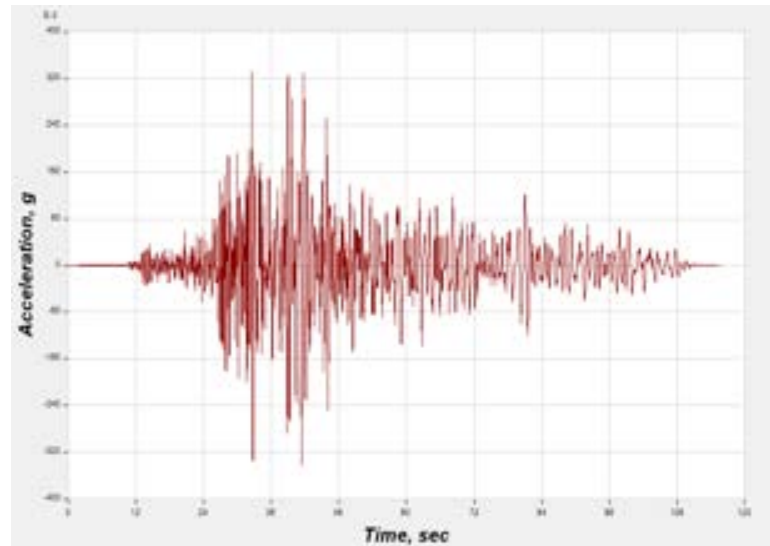
Gambar 3.16. Rekaman gempa Chi-chi arah X.



Sumber: peer.berkeley.edu

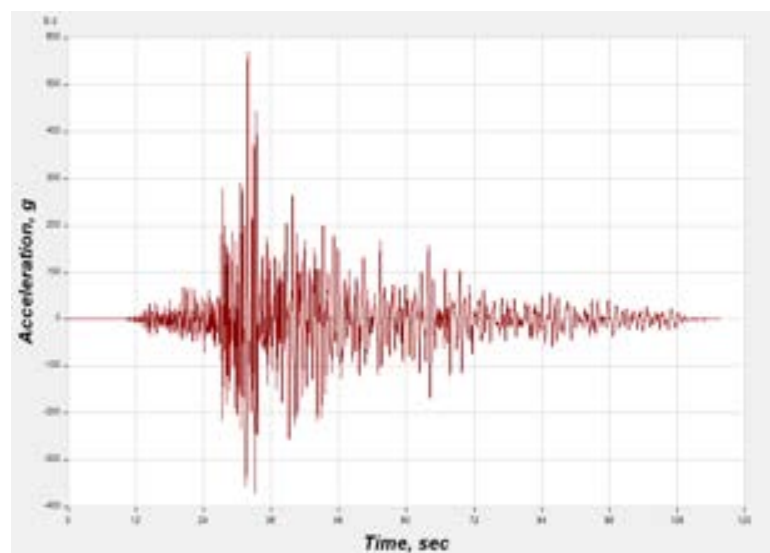
Gambar 3.17. Rekaman gempa Chi-chi arah Y.

- 4) Lokasi Gempa : Kushiro As, Japan (2004)
Magnitude : 6,74
Durasi : 115,51 detik



Sumber: riskscience.ucla.edu

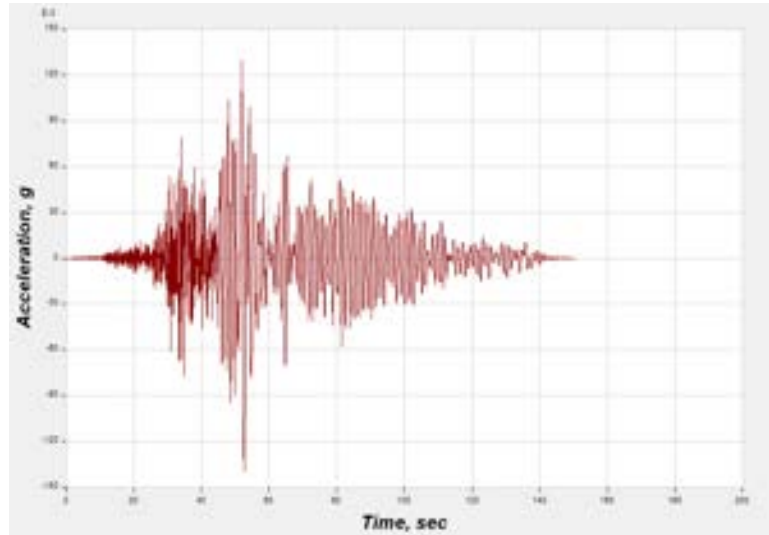
Gambar 3.18. Rekaman gempa Kushiro As arah X.



Sumber: riskscience.ucla.edu

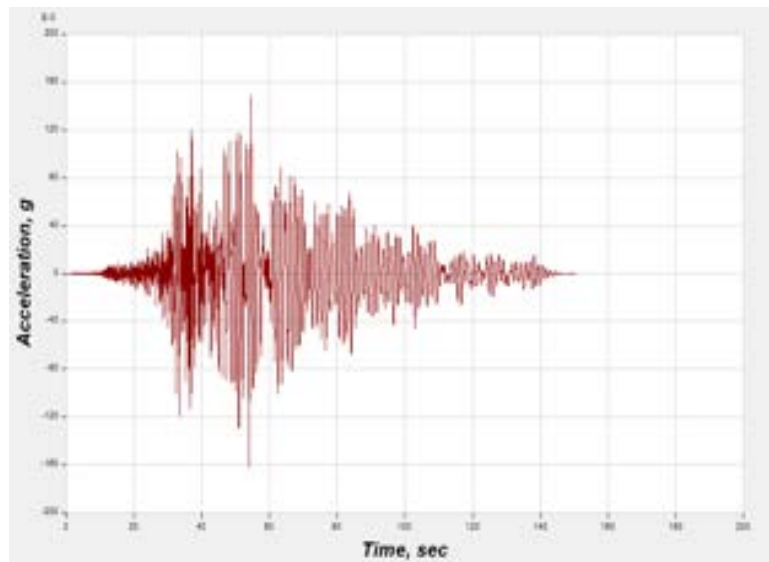
Gambar 3.19. Rekaman gempa Kushiro As arah Y.

- 5) Lokasi Gempa : Toakchi Oki, Japan (2008)
Magnitude : 6,8
Durasi : 149,37 detik



Sumber: riskscience.ucla.edu

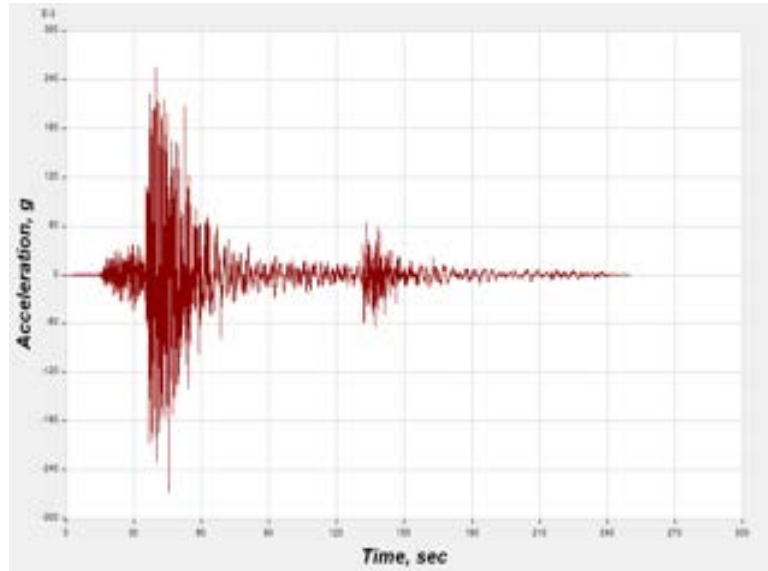
Gambar 3.20. Rekaman gempa Toakchi Oki arah X.



Sumber: riskscience.ucla.edu

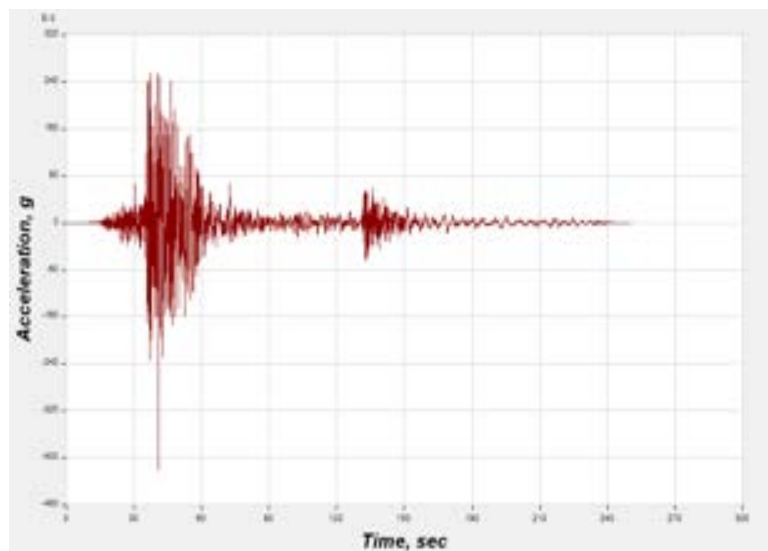
Gambar 3.21. Rekaman gempa Toakchi Oki arah Y.

- 6) Lokasi Gempa : Hamadori, Japan (2011)
Magnitude : 6,69
Durasi : 249,13 detik



Sumber: riskscience.ucla.edu

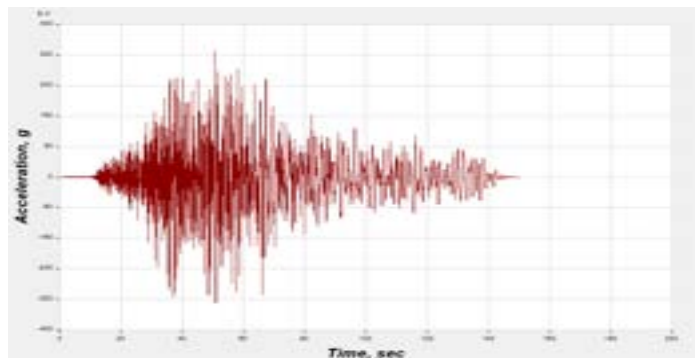
Gambar 3.22. Rekaman gempa Hamadori arah X.



Sumber: riskscience.ucla.edu

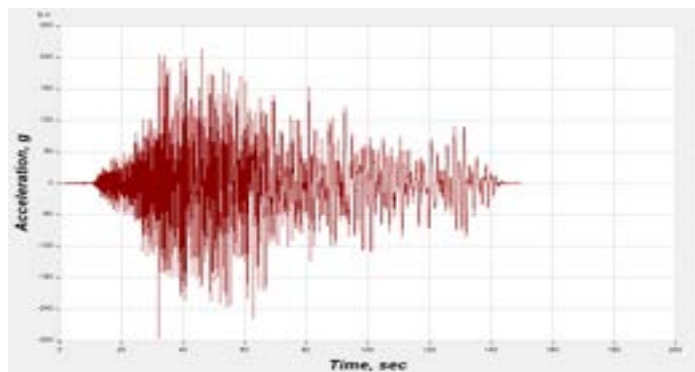
Gambar 3.23. Rekaman gempa Hamadori arah Y.

- 7) Lokasi Gempa : Iwate Oki, Japan (2011)
Magnitude : 6,7
Durasi : 150,12 detik



Sumber: riskscience.ucla.edu

Gambar 3.24. Rekaman gempa Iwate Oki arah X.



Sumber: riskscience.ucla.edu

Gambar 3.25. Rekaman gempa Iwate Oki arah Y.

3.4.7 Respons Seismik Struktur Menurut SNI 1726:2019

Setelah didapatkan hasil dari analisis struktur pada kedua model tersebut, maka hasil tersebut dapat dievaluasi dan dikomparansi. Hasil yang dievaluasi akan dibahas pada bab pembahasan yaitu respons struktur kedua model setelah dilakukan analisis dinamik linier riwayat waktu, di mana parameter respons struktur yang dikomparansi berupa gaya geser dasar (*base shear*), periode dan simpangan antar tingkat (*interstory drift*).

V. KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisis dan pembahasan antara struktur *fixed base* dan struktur dengan *seismic isolation* tipe *double friction pendulum* yang telah dipaparkan, didapatkan kesimpulan sebagai berikut:

1. *Seismic isolator* yang digunakan pada struktur ini berasal dari katalog NS-SSB (*Nippon Steel-Spherical Sliding Bearing*) tipe NSSSB-M(L)-45-350-700R. Nilai periode fundamental alami struktur berdasarkan hasil dari program analisis struktur komersial yaitu arah X sebesar 0,662 detik dan arah Y sebesar 0,622 detik untuk struktur *fixed base*, sedangkan untuk struktur dengan *seismic isolation* yaitu arah X sebesar 1,368 detik dan arah Y sebesar 1,324 detik. Dengan kata lain, struktur yang menggunakan *seismic isolation* tipe *double friction pendulum* memiliki periode 2,066 kali lebih besar dari periode struktur *fixed base*.
2. Berdasarkan hasil kontrol gaya geser dasar (*base shear*), penggunaan *seismic isolation* tipe *double friction pendulum* dapat mereduksi gaya geser dasar (*base shear*) sebesar 33,33%. Nilai gaya geser dasar (*base shear*) ini sudah memenuhi persyaratan pasal 7.9.1.4.1 SNI 1726:2019, dimana nilai gaya geser dasar riwayat waktu (V_t) lebih besar 100% dari nilai gaya geser dasar statik ekuivalen (V). Dimana nilai gaya geser dasar (*base shear*) terbesar untuk arah X terjadi pada Gempa Chi-chi dengan nilai 7237,6110 kN pada waktu 70,07 detik dan untuk arah Y terjadi pada Gempa Toakchi-oki dengan nilai 7237,5967 kN pada waktu 85,44 detik.
3. Hasil kontrol simpangan antar tingkat pada Gedung Kuliah Terpadu IAIN Metro pada struktur dengan *seismic isolation* memiliki nilai simpangan yang lebih kecil dibandingkan struktur *fixed base*. Penggunaan *seismic*

isolation pada struktur mereduksi nilai *interstory drift* dengan selisih rata-rata sebesar 33,31% pada arah X dan 38,74% pada arah Y.

5.2 Saran

Berdasarkan studi dan analisis yang dilakukan, terdapat beberapa saran yang dapat diberikan sebagai berikut:

1. Penggunaan *seismic isolation* tipe *double friction pendulum* pada gedung 3 lantai dapat dipertimbangkan untuk mendesain suatu gedung tahan gempa.
2. Dilakukan perencanaan *seismic isolation* dengan berbagai jenis tanah untuk mengetahui efektivitas penggunaan *seismic isolation* pada bangunan gedung tahan gempa.
3. Dilakukan perencanaan *seismic isolation* dengan membuat kombinasi beberapa tipe dan dimensi *isolator* untuk mendapatkan gaya geser dasar yang paling minimum.
4. Dilakukan perbandingan kinerja struktur *seismic isolation* dengan *fixed base* dengan menggunakan analisis *nonlinier time history* dan *pushover* sehingga dapat diketahui sistem mana yang memiliki kinerja yang paling optimum.
5. Dilakukan perbandingan struktur *seismic isolation* dengan struktur rangka pemikul momen lainnya, dimana tipe struktur pemikul momen lainnya seperti SPRMK dan sistem pemikul momen ganda yang sudah banyak digunakan pada bangunan-bangunan di Indonesia.

DAFTAR PUSTAKA

- Arifin, M., Fransisca, L., & Sagara, A. (2019). Studi Perbandingan Gedung dengan Iregularitas Horizontal Menggunakan Base Isolation dan Fixed Base Comparative Study of a Horizontally Irregular Building with Base Isolation and Fixed Base. *Dalam Jurnal Manajemen Aset Infrastruktur & Fasilitas* (Vol. 3, Nomor 2). <http://did.org.tr>
- Arnold, E. P. (1986). *Southeast Asia Association on Seismology and Earthquake Engineering.: Vol. V. Series on Seismology.*
- Asoma, M. T. (2016). Perencanaan Dinding Geser Berdasarkan Tata Cara SNI 03-2847-2002 Pada Gedung FMIPA Universitas Negeri Surabaya. *Rekayasa Teknik Sipil, 03*, 236–241.
- Budiono, B., dan Adelia, C. (2015). Penggunaan Isolasi Dasar Single Friction Pendulum dan Triple Friction Pendulum pada Bangunan Beton Bertulang. *Jurnal Teoritis dan Terapan Bidang Rekayasa Sipil, 22*(2).
- Budiono, B., dan Setiawan, A. (2014). Studi Komparasi Sistem Isolasi Dasar High-Damping Rubber Bearing dan Friction Pendulum System pada Bangunan Beton Bertulang. *Jurnal Teknik Sipil, 21*(3), 179. <https://doi.org/10.5614/jts.2014.21.3.1>
- Cornelis, R., Bunganaen, W., & Tay, B. H. U. (2014). Analisis Perbandingan Gaya Geser Tingkat, Gaya Geser Dasar, Perpindahan Tingkat dan Simpangan Antar Tingkat Akibat Beban Gempa Berdasarkan SNI 1726-2002 dan SNI 1726-2012. *Jurnal Teknik Sipil, III*.
- Dina Septiana, V., Lahita, L., Widiyanto, D., Yuli Mulyanto, Y., Pawiyatan Luhur, J. I., & Dhuwur Semarang, B. (2022). Efek Penggunaan Shear Wall Terhadap Perilaku Dan Level Kinerja Struktur Gedung Pabrik X (The Effect of Shear Wall Usage on Behavior and Performance Based Design of The Structure of Factory Building X). *Jurnal Teknik Sipil Unika Soegijapranata Semarang, 6*, 129.
- Hasdanita, F. (2014). Evaluasi Perilaku Struktur Bangunan Beton Bertulang Akibat Gempa dengan Metode Time History Analysis (Studi Kasus: Gedung Baru DPRK Banda Aceh). Universitas Syiah Kuala.

- Huwaida Qothrunnada, N., Yekti Utami, R., Amanda Rizky, S., Studi Pendidikan Fisika Fakultas Ilmu Tarbiyah dan Keguruan UIN Sunan Kalijaga Yogyakarta, P., & Marsda Adisucipto, J. (2022). Menganalisis Bencana Alam Gempa Bumi dalam Perspektif Al-Quran. *Prosiding Konferensi Integrasi Interkoneksi Islam Dan Sains*, 4, 257–260.
- Imran, I., Michael, J., dan Siringoringo, D. (2021). *Seismic Performance of Reinforced Concrete Buildings with Double Concave Friction Pendulum Base Isolation System: Case Study of Design by Indonesian Code*. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2021.07.084>
- Jaglien, F., Servie, L., Dapas, O., dan Wallah, S. E. (2020). Perencanaan Struktur Beton Bertulang Gedung Kuliah 5 Lantai. *Jurnal Sipil Statik*, 8(4), 471–482.
- Muliadi, Afifuddin, M., dan Aulia, T. B. (2014). Analisis Respon Bangunan Menggunakan Base Isolator Sebagai Pereduksi Beban Gempa Di Wilayah Gempa Kuat. *Jurnal Teknik Sipil Pascasarjana Universitas Syiah Kuala*, 3.
- Naeim, F., dan Kelly, J. M. (1999). *Design of Seismic Isolated Structure: From Theory to Practice* (Vol. 2). John Wiley&Sons.
- Nur, A. M. (2010). *Gempa Bumi, Tsunami dan Mitigasinya*. Geografi, 7.
- Pawirodikromo, W. (2012). *Seismologi Teknik & Rekayasa Kegempaan*. Pustaka Belajar.
- Rahmawati, D., Basri, H., Studi Teknik Sipil, P., Nusa Putra, U., Raya CibolangKaler No, J., & Sukabumi, K. (2019). Sistem Kontrol Base Isolation Untuk Perencanaan Gedung Tahan Gempa. *Jurnal Rekayasa Teknologi Nusa Putra*, 6(1), 19–27.
- Simanjuntak, P., Tampubolon, S. P., dan Amsal, H. P. (2022). Evaluasi Respon Seismik Struktur Bangunan Universitas Terbuka Palu Terhadap Gempa Sulteng 28 September 2018. *Jurnal Rekayasa Teknik Sipil dan Lingkungan*, 3(2), 119–129.
- Suryawidodo, W., Affandhie, R. B. A., dan Rahardjo, I. P. (2023). Alternatif Desain Struktur Gedung Rumah Sakit Universitas Islam Malang dengan Base Isolator Tipe Friction Pendulum System (FPS). *Jurnal Teknik ITS*, 12.
- Tanauma, C., Windah, R. S., dan Wallah, S. E. (2023). Analisa Dinamik Bangunan Bertingkat Yang Memiliki Ketidakberaturan Horisontal Berbentuk T Akibat Gempa Berdasarkan SNI 1726:2019. *TEKNO*, 21.
- Teruna, D. (2005). Analisis Respon Bangunan Dengan Base Isolator Akibat Gaya Gempa. *Jurnal Sistem Teknik Industri*, 6. <https://www.researchgate.net/publication/42362845>

- Tio, J. B., Kandou, C., Julius Tenda, dan, Studi Konstruksi Bangunan gedung, P., Teknik Sipil, J., & Negeri Manado, P. (2022). Penerapan Base Isolation System Sebagai Alternatif Sistem Struktur Pada Bangunan RSUD Kota Manado Delapan Tingkat. *Teknik Sipil Terapan*, 4(1), 18–28. <http://jurnal.polimdo.ac.id/>
- Wang, Y.-P. (2002). *Fundamentals of Seismic Base Isolation*. <https://www.researchgate.net/publication/239556839>
- Wiryadi, I. G. G., Giatmajaya, I. W., Wirawan, I. P. A. P. W., dan Trangipani, N. M. (2021). Analisis Riwayat Waktu Perilaku Struktur Gedung SMA Negeri 9 Denpasar. *Jurnal Ilmiah Kurva Teknik*, 10.
- Zebua, A. W. (2018). Analisis Gaya Gempa Bangunan Rumah Tinggal di Wilayah Gempa Tinggi. *Jurnal Teknik Sipil Siklus*, 4(1).