

**EVALUASI KEKUATAN STRUKTUR GEDUNG BERTINGKAT
TERHADAP PENGARUH BEBAN GEMPA MENGGUNAKAN
ANALISIS DINAMIK RESPON SPEKTRUM
(Studi Kasus: Gedung MAN Insan Cendikia, Serpong)**

(Skripsi)

**Oleh
ARIE DWIE RESTIAWAN
(1815011103)**



**PROGRAM STUDI TEKNIK SIPIL
JURUSAN TEKNIK SIPIL
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2023**

**EVALUASI KEKUATAN STRUKTUR GEDUNG BERTINGKAT
TERHADAP PENGARUH BEBAN GEMPA MENGGUNAKAN
ANALISIS DINAMIK RESPON SPEKTRUM
(Studi Kasus: Gedung MAN Insan Cendikia, Serpong)**

**Oleh
ARIE DWIE RESTIAWAN**

Skripsi

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

Pada

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



**PROGRAM STUDI TEKNIK SIPIL
JURUSAN TEKNIK SIPIL
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2023**

ABSTRACT

EVALUATION OF STRUCTURE STRENGTH OF STORE BUILDING DUE TO THE EFFECT OF EARTHQUAKE LOAD USING SPECTRUM RESPONSE DYNAMIC ANALYSIS

(Studi Kasus: Man Insan Cendekia Building, Serpong)

By

ARIE DWIE RESTIAWAN

Indonesia is a region that is at risk of earthquakes. The impact of an earthquake is bad for the building structure, not only causing damage to the building, but also can cause the building to collapse. Therefore, to reduce the adverse effects obtained from earthquakes, it is necessary to design and evaluate the strength of building structures with resistance to earthquake loads.

The method used in this study is dynamic response spectrum analysis to obtain the magnitude of the earthquake load. Evaluation of the strength of the building structure is carried out using structural analysis software to make it easier to do the analysis. This study aims to determine the ratio of the required strength in conditions without earthquake loads and conditions due to earthquake loads to the designed strength of the structure.

Based on the results of this study, it can be concluded that the required strength obtained in conditions without an earthquake load reaches 8.33% to 90.62% of the designed strength, whereas in conditions due to strong earthquake loads the required strength obtained reaches 12.57% to 153.31% of the designed strength.

Key words : earthquake, structural strength, dynamic analysis, response spectrum

ABSTRAK

EVALUASI KEKUATAN STRUKTUR GEDUNG BERTINGKAT TERHADAP PENGARUH BEBAN GEMPA MENGGUNAKAN ANALISIS DINAMIK RESPON SPEKTRUM

(Studi Kasus: Gedung MAN Insan Cendikia, Serpong)

Oleh

ARIE DWIE RESTIAWAN

Indonesia merupakan suatu negara yang memiliki wilayah dengan risiko bencana gempa bumi yang tinggi. Dampak yang diberikan oleh gempa bumi berakibat buruk bagi struktur bangunan, tidak hanya menyebabkan kerusakan pada struktur bangunan, bahkan dapat menyebabkan keruntuhan pada bangunan. Oleh karena itu, untuk mengurangi dampak buruk yang diperoleh dari gempa bumi dibutuhkan perencanaan dan evaluasi kekuatan struktur gedung dengan ketahanan terhadap beban gempa.

Metode yang digunakan pada penelitian ini adalah analisis dinamik respon spektrum untuk mendapatkan besaran beban gempa. Evaluasi kekuatan struktur gedung yang dilakukan menggunakan bantuan *software* analisis struktur supaya mempermudah dalam melakukan analisis. Adapun tujuan dari penelitian ini, untuk mengetahui perbandingan kekuatan yang diperlukan pada kondisi tanpa beban gempa dan kondisi akibat beban gempa terhadap kekuatan yang direncanakan pada struktur.

Berdasarkan hasil penelitian ini, dapat disimpulkan bahwa kuat perlu yang diperoleh kondisi tanpa beban gempa mencapai 8,33% s.d 90,62% kekuatan rencana, sedangkan pada kondisi akibat beban gempa kuat perlu yang diperoleh mencapai 12,57% s.d 153,31% kekuatan yang direncanakan.

Kata kunci : gempa, kekuatan struktur, analisis dinamik, respon spektrum

Judul Skripsi

: **EVALUASI KEKUATAN STRUKTUR GEDUNG
BERTINGKAT TERHADAP PENGARUH
BEBAN GEMPA MENGGUNAKAN ANALISIS
DINAMIK RESPON SPEKTRUM (Studi Kasus:
Gedung MAN Insan Cendikia, Serpong)**

Nama Mahasiswa

: **Arie Dwie Restiawan**

Nomor Pokok Mahasiswa : 1815011103

Jurusan

: Teknik Sipil

Fakultas

: Teknik



1. Komisi Pembimbing

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

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

2. Ketua Program Studi S1 Teknik Sipil

3. Ketua Jurusan Teknik Sipil

Muhammad Karami, S.T., M.Sc., Ph.D.
NIP 19720829 199802 1 001

Ir. Laksmi Irianti, M.T.
NIP 19620408 198903 2 001

MENGESAHKAN

1. Tim Penguji

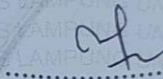
Ketua : Bayzoni, S.T., M.T.



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



**Penguji
Bukan Pembimbing : Dr. Eng. Mohd. Isneini, S.T., M.T.**



2. Dekan Fakultas Teknik



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

Tanggal Lulus Ujian Skripsi : 19 September 2023

SURAT PERNYATAAN SKRIPSI MAHASISWA

Saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : ARIE DWIE RESTIAWAN
Nomor Pokok Mahasiswa : 1815011103
Judul Skripsi : Evaluasi Kekuatan Struktur Gedung Bertingkat
Terhadap Pengaruh Beban Gempa Menggunakan
Analisis Dinamik Respon Spektrum
(Studi Kasus: Gedung MAN Insan Cendikia,
Serpong)
Jurusan : Teknik Sipil

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

Bandar Lampung, 19 September 2023

Penulis



ARIE DWIE RESTIAWAN
NPM 1815011103

RIWAYAT HIDUP



Penulis dilahirkan di Jakarta pada tanggal 31 Januari 2000, merupakan anak kedua dari tiga bersaudara dari pasangan Bapak Gunawan dan Ibu Turisah. Penulis memiliki dua orang saudara, yaitu kakak laki-laki yang bernama Denny Arif Restiawan dan adik laki-laki yang bernama Irfan Fajar Restiawan. Penulis memulai jenjang pendidikan tingkat dasar di SDN 1 Bojongsari yang diselesaikan pada tahun 2012, lalu dilanjutkan pendidikan tingkat pertama di SMPN 1 Sempor yang diselesaikan pada tahun 2015, dan dilanjutkan menempuh pendidikan tingkat atas di SMAN 1 Karanganyar.

Penulis diterima di Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Lampung melalui jalur SBMPTN pada tahun 2018. Selama menjadi mahasiswa, penulis berperan aktif di dalam organisasi Himpunan Mahasiswa Teknik Sipil Universitas Lampung sebagai anggota Departemen Kaderisasi Periode 2019-2020, kemudian pada periode 2020-2022 penulis menjadi anggota Departemen Advokasi Periode 2020-2022.

Penulis telah mengikuti Kuliah Kerja Nyata (KKN) periode I di Kelurahan Cempaka Putih, Kecamatan Ciputat Timur, Tangerang Selatan selama 40 hari, Februari-Maret 2021. Di tahun yang selanjutnya, penulis juga telah melakukan kerja praktik di Proyek Sistem Penyediaan Air Minum (SPAM) Kota Bandar Lampung selama 3 bulan. Penulis mengambil tugas akhir dengan judul “Evaluasi Pengaruh Beban Gempa Menggunakan Metode Analisis Dinamik Respon Spektrum Pada Software ETABS” (Studi Kasus: Gedung MAN Insan Cendikia, Serpong)”.

PERSEMBAHAN

Bismillahirrohmanirrohim

Alhamdulillahil rabbil 'alamin

Skripsi ini merupakan bagian dari ibadahku kepada Allah SWT, karena kepada-Nyalah kami menyembah dan kepada-Nyalah kami mohon pertolongan. Saya persembahkan karya kecil ini dengan kesungguhan cinta kepada:

Dua orang paling berharga bagi hidup saya, Bapak Gunawan dan Ibu Turisah yang selalu mendukung tindakan dalam bentuk apapun untuk hidup saya serta mengiringi saya dengan doa yang selalu bapak dan ibu panjatkan setiap saat sehingga langkah saya selalu dimudahkan hingga saat ini;

Kakakku Denny Arif Restiawan, dan Adikku Irvan Fajar Restiawan, beserta seluruh keluarga besar yang selalu mendukung dan memotivasi selama saya menempuh pendidikan hingga sampai tahap ini;

Bapak Bayzoni, S.T., M.T., dan Ibu Hasti Riakara Husni, S.T., M.T., yang telah membimbing selama di bangku perkuliahan, serta bapak ibu dosen yang telah menjadi orang tua kedua selama saya menempuh pendidikan di kampus yang tak jemu mengajarkan dan membimbing dengan tulus dan ikhlas hingga saya berhasil mencapai gelar sarjana;

Teman-Teman seperjuangan yang telah berjuang bersama dari awal sampai saat ini dan selalu menjaga silaturahmi dimanapun saya berada.

MOTTO

Allah tidak akan merubah nasib (seseorang) suatu kaum apabila ia tidak ingin atau mau merubah nasibnya sendiri.

(QS. Ar-Ra'd : 11).

Wahai orang-orang yang beriman! Mohonlah pertolongan kepada Allah dengan sabar dan salat. Sungguh Allah beserta orang-orang yang sabar.

(QS. Al-Baqarah:153)

Barang siapa yang hendak menginginkan dunia, maka hendaklah ia menguasai ilmu. Barangsiapa menginginkan akhirat hendaklah ia menguasai ilmu, dan barangsiapa yang menginginkan keduanya (dunia dan akhirat) hendaklah ia menguasai ilmu.

(HR Ahmad).

Metode *trial & error* mengajarkan untuk terus berjuang menyelesaikan masalah.

(Penulis)

Rahasia kesuksesan adalah melakukan hal yang biasa secara tak terbiasa

(John D. Rockefeller Jr.)

PRAKATA

Puji dan syukur penulis panjatkan kepada Tuhan Yang Maha Esa yang telah senantiasa memberikan rahmat dan anugerah-Nya kepada penulis, sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul **“Evaluasi Kekuatan Struktur Gedung Bertingkat Terhadap Pengaruh Beban Gempa Menggunakan Analisis Dinamik Respon Spektrum (Studi Kasus: Gedung MAN Insan Cendikia, Serpong)”** dalam rangka memenuhi salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik di Universitas Lampung.

Pada kesempatan ini penulis mengucapkan terima kasih kepada:

1. Allah SWT yang selalu memberikan petunjuk, kekuatan, kesabaran, dan pertolongan yang tiada henti, serta senantiasa memberikan berkah ilmu kepada setiap hamba-Nya.
2. Bapak Dr. Ir. Eng. Helmy Fitriawan, S.T., M.Sc., selaku Dekan Fakultas Teknik Universitas Lampung.
3. Ibu Ir. Laksmi Irianti, M.T., selaku Ketua Jurusan Teknik Sipil Universitas Lampung.
4. Bapak Muhammad Karami, S.T., M.Sc., Ph.D., selaku Ketua Program Studi Teknik Sipil Universitas Lampung.
5. Bapak Bayzoni, S.T., M.T., selaku Dosen Pembimbing Utama atas kesediannya meluangkan waktu untuk memberikan bimbingan, arahan, ide-ide, dan saran serta kritik dalam proses penyusunan skripsi ini.
6. Ibu Hasti Riakara Husni, S.T., M.T., selaku Dosen Pembimbing Kedua atas kesediannya meluangkan waktu untuk memberikan bimbingan, arahan, ide-ide, dan saran serta kritik dalam proses penyusunan skripsi ini.
7. Bapak Dr. Eng. Mohd. Isneini, S.T., M.T., selaku Dosen Penguji yang telah memberikan saran dan arahan kepada penulis guna penyempurnaan skripsi ini.

8. Dr. Ofik Taufik Purwadi, S.T., M.T., selaku Dosen Pembimbing Akademik yang telah membantu penulis selama perkuliahan.
9. Seluruh Bapak dan Ibu Dosen Jurusan Teknik Sipil yang telah memberikan bekal ilmu pengetahuan kepada penulis, serta seluruh karyawan jurusan atas bantuannya kepada penulis selama menjadi mahasiswa di Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Lampung.
10. Kedua orang tua tercinta, Ibu Turisah dan Bapak Gunawan yang telah dengan tulus, penuh kasih sayang, dan kesabaran dalam memberikan motivasi, dukungan, nasihat serta doa yang tidak pernah putus sehingga penulis dapat menyelesaikan segala masalah hidupnya.
11. Kakak tersayang Denny Arif Restiawan dan adik tersayang Irvan Fajar Restiawan yang selalu menemani, mengingatkan, menghibur dan memberi dukungan untuk penulis.
12. Seluruh anggota keluarga besar PPM Baitusshodiq yang telah memberikan nasihat, motivasi, dan doa demi lancarnya penulisan skripsi ini.
13. Mba Suci yang selalu memberikan semangat, dukungan, dan doa kepada penulis dalam menyelesaikan skripsi ini.
14. Teman-teman seperjuangan LBB Assemble mas Rian, mas Beni, mas Sholeh, mas Faizal, mas Falah, mas Andika, mas Husen, mas Rosyid, mas Fadli, mas Jamus, mas Bima, mas Wahyu, mas Rozak, mas Zaki, mas Alfian, mas Restu, dan mas Sabili sebagai tempat berbagi keluh-kesah dan berdiskusi.
15. Teman-teman BPJS yang selalu menemani penulis dan menjadi pendengar yang baik bagi penulis.

Penulis menyadari bahwa skripsi ini masih terdapat banyak kekurangan, namun penulis berharap semoga skripsi ini dapat berguna dan bermanfaat bagi semua pihak yang memerlukan, khususnya bagi penulis pribadi.

Bandar Lampung, 19 September 2023

Penulis

Arie Dwie Restiawan

DAFTAR ISI

	Halaman
DAFTAR ISI	i
DAFTAR GAMBAR	iv
DAFTAR TABEL	vi
DAFTAR NOTASI	x
I. PENDAHULUAN	1
1.1. Latar Belakang	1
1.2. Rumusan Masalah	2
1.3. Batasan Masalah.....	2
1.4. Tujuan Penelitian.....	3
1.5. Manfaat Penelitian.....	3
II. TINJAUAN PUSTAKA	4
2.1. Uraian Umum.....	4
2.2. Elemen Struktur.....	5
2.2.1. Pelat.....	5
2.2.2. Balok	5
2.2.3. Kolom.....	6
2.3. Sistem Struktur.....	6
2.4. Pembebanan Struktur	7
2.4.1. Beban Mati	7
2.4.2. Beban Hidup.....	7
2.4.3. Beban Gempa	7
2.4.4. Kombinasi Pembebanan.....	8
2.5. Analisis Dinamik.....	8
2.6. Ketentuan Struktur Terhadap Pengaruh Gempa.....	9
2.7. Pemeriksaan Dinamis Struktur.....	17

2.8.	Faktor Reduksi Kekuatan	21
2.9.	Evaluasi Kekuatan Struktur.....	23
2.9.1.	Asumsi-Asumsi dalam Perhitungan	23
2.9.2.	Evaluasi Struktur Pelat	24
2.9.3.	Evaluasi Struktur Balok.....	24
2.9.4.	Evaluasi Struktur Kolom.....	26
2.10.	Sistem Rangka Pemikul Momen.....	28
2.10.1.	Sistem Rangka Pemikul Momen Biasa (SRPMB)	28
2.10.2.	Sistem Rangka Pemikul Momen Menengah (SRPMM)	29
2.10.3.	Sistem Rangka Pemikul Momen Khusus (SRPMK).....	30
III.	METODOLOGI PENELITIAN.....	33
3.1.	Pendekatan Penelitian	33
3.2.	Objek Penelitian	33
3.3.	Data Penelitian	34
3.3.1.	Luas Bangunan.....	36
3.3.2.	Elevasi Bangunan.....	36
3.3.3.	Struktur Balok	36
3.3.4.	Struktur Kolom.....	37
3.3.5.	Struktur Pelat.....	37
3.3.6.	Data Tanah	38
3.4.	Prosedur Penelitian.....	38
3.4.1.	Studi Literatur	38
3.4.2.	Pengumpulan Data	39
3.4.3.	Analisis Data	40
3.5.	Diagram Alir Penelitian	42
IV.	HASIL DAN PEMBAHASAN.....	44
4.1.	Data Struktur Gedung.....	44
4.1.1.	Spesifikasi Material.....	44
4.1.2.	Spesifikasi Elemen Struktur	44
4.2.	Pemodelan Struktur	47
4.3.	Pembebanan Struktur	47
4.3.1.	Beban Mati	47

4.3.2. Beban Hidup.....	48
4.3.3. Beban Gempa	49
4.4. Kombinasi Pembebanan	54
4.5. Analisis Struktur.....	55
4.6. Pemeriksaan Respon Dinamis Struktur.....	64
4.6.1. Pemeriksaan Rasio Partisipasi Massa	64
4.6.2. Pemeriksaan Periode Fundamental	65
4.6.3. Pemeriksaan Gaya Geser Dasar	66
4.6.4. Pemeriksaan Simpangan Antar Tingkat.....	68
4.7. Evaluasi Kekuatan Struktur Balok	70
4.7.1. Pemeriksaan Kuat Rancang Struktur Balok	70
4.7.2. Pemeriksaan Persyaratan Balok SRPMK.....	101
4.7.3. Kebutuhan Tulangan Balok.....	110
4.8. Evaluasi Kekuatan Struktur Kolom.....	127
4.8.1. Pemeriksaan Kapasitas Beban Aksial pada Kolom.....	127
4.8.2. Pemeriksaan Penulangan Kolom.....	128
4.8.3. Pemeriksaan Syarat Kolom SRPMK	138
4.8.4. Perbandingan Kebeutuhan Tulangan Kolom Desain dengan Tulangan Kolom Perlu	140
4.9. Evaluasi Kekuatan Struktur Pelat.....	142
4.9.1. Pembebanan pada Struktur Pelat.....	142
4.9.2. Pemeriksaan Jenis Struktur Pelat	142
4.9.3. Pemeriksaan Ketebalan Struktur Pelat	143
4.9.4. Pemeriksaan Kapasitas Lentur Pada Struktur Pelat	144
V. KESIMPULAN DAN SARAN.....	151
5.1. Kesimpulan.....	151
5.2. Saran.....	152
DAFTAR PUSTAKA.....	153
LAMPIRAN	155

DAFTAR GAMBAR

Gambar	Halaman
2.1. Parameter spektral percepatan gempa untuk periode 1 detik (S_1).....	13
2.2. Parameter spektral percepatan gempa untuk periode pendek 0,2 detik	14
2.3. Respon Spektrum Desain.....	16
2.4. Penentuan Simpangan Antar Tingkat.	20
2.5. Nilai faktor reduksi kekuatan (ϕ) regangan tarik netto pada tulangan tarik terjauh (ϵ_t).....	22
2.6. Diagram Interaksi Kolom.	26
3.1. Objek Penelitian.....	33
3.2. <i>Site Plan</i>	34
3.3. Tampak Samping Kanan dan Samping Kiri Gedung	35
3.4. Tampak Depan dan Belakang Gedung.	35
3.5. Diagram Alir	42
3.5. (Lanjutan)	43
4.1. Penulangan Balok B1.1.	45
4.2. Penulangan Kolom K1.....	46
4.3. Penulangan Pelat S1.	46
4.4. Pemodelan Struktur.	47
4.5. Kurva Respon Spektrum.....	52
4.6. Diagram Gaya Dalam Balok B1.1 Kondisi Tanpa Pengaruh Beban Gempa.....	56
4.7. Diagram Gaya Dalam Balok B1.1 Kondisi dengan Pengaruh Beban Gempa.....	57
4.8. Diagram Gaya Dalam Kolom K1 Kondisi Tanpa Pengaruh Beban Gempa.....	58
4.9. Diagram Gaya Dalam Kolom K1 Kondisi dengan Pengaruh Beban Gempa.....	59

4.10. Perbandingan Kuat Rancang dan Kuat Perlu pada Balok B1.1.....	78
4.11. Perbandingan Kuat Rancang dan Kuat Perlu pada Balok B1.2.....	78
4.12. Perbandingan Kuat Rancang dan Kuat Perlu pada Balok B2.1.....	79
4.13. Perbandingan Kuat Rancang dan Kuat Perlu pada Balok B2.2.....	79
4.14. Perbandingan Kuat Rancang dan Kuat Perlu pada Balok B3.1.....	80
4.15. Perbandingan Kuat Rancang dan Kuat Perlu pada Balok B3.2.....	80
4.16. Perbandingan Kuat Rancang dan Kuat Perlu pada Balok B4.1.....	81
4.17. Perbandingan Kuat Rancang dan Kuat Perlu pada Balok B4.2.....	81
4.18. Perbandingan Kekuatan Geser pada Balok B1.1.....	87
4.19. Perbandingan Kekuatan Geser pada Balok B1.2.....	87
4.20. Perbandingan Kekuatan Geser pada Balok B2.1.....	88
4.21. Perbandingan Kekuatan Geser pada Balok B2.2.....	88
4.22. Perbandingan Kekuatan Geser pada Balok B3.1.....	89
4.23. Perbandingan Kekuatan Geser pada Balok B3.2.....	89
4.24. Perbandingan Kekuatan Geser pada Balok B4.1.....	90
4.25. Perbandingan Kekuatan Geser pada Balok B4.2.....	90
4.26. Perbandingan Kebutuhan Tulangan Lentur Total antara As Pakai dengan As Perlu pada Balok B1.1.....	119
4.27. Perbandingan Kebutuhan Tulangan Lentur Total antara As Pakai dengan As Perlu pada Balok B1.2.....	119
4.28. Perbandingan Kebutuhan Tulangan Lentur Total antara As Pakai dengan As Perlu pada Balok B2.1.....	120
4.29. Perbandingan Kebutuhan Tulangan Lentur Total antara As Pakai dengan As Perlu pada Balok B2.2.....	120
4.30. Perbandingan Kebutuhan Tulangan Lentur Total antara As Pakai dengan As Perlu pada Balok B3.1.....	121
4.31. Perbandingan Kebutuhan Tulangan Lentur Total antara As Pakai dengan As Perlu pada Balok B3.2.....	121
4.32. Perbandingan Kebutuhan Tulangan Lentur Total antara As Pakai dengan As Perlu pada Balok B4.1.....	122
4.33. Perbandingan Kebutuhan Tulangan Lentur Total antara As Pakai dengan As Perlu pada Balok B4.2.....	122
4.34. Perbandingan Kebutuhan Tulangan Geser Total antara As Pakai dengan As Perlu pada Balok B1.1.....	123
4.35. Perbandingan Kebutuhan Tulangan Geser Total antara As Pakai dengan As Perlu pada Balok B1.2.....	123

4.36. Perbandingan Kebutuhan Tulangan Geser Total antara As Pakai dengan As Perlu pada Balok B2.1.	124
4.37. Perbandingan Kebutuhan Tulangan Geser Total antara As Pakai dengan As Perlu pada Balok B2.2.	124
4.38. Perbandingan Kebutuhan Tulangan Geser Total antara As Pakai dengan As Perlu pada Balok B3.1.	125
4.39. Perbandingan Kebutuhan Tulangan Geser Total antara As Pakai dengan As Perlu pada Balok B3.2.	125
4.40. Perbandingan Kebutuhan Tulangan Geser Total antara As Pakai dengan As Perlu pada Balok B4.1.	126
4.41. Perbandingan Kebutuhan Tulangan Geser Total antara As Pakai dengan As Perlu pada Balok B4.2.	126
4.42. Diagram Interaksi Kolom K1 Tanpa Pengaruh Beban Gempa.	130
4.43. Diagram Interaksi Kolom K1 dengan Pengaruh Beban Gempa.	130
4.44. Diagram Interaksi Kolom K2 Tanpa Pengaruh Beban Gempa.	132
4.45. Diagram Interaksi Kolom K2 dengan Pengaruh Beban Gempa.	133
4.46. Diagram Interaksi Kolom K3 Tanpa Pengaruh Beban Gempa.	135
4.47. Diagram Interaksi Kolom K3 dengan Pengaruh Beban Gempa.	135
4.48. Perbandingan Luas Tulangan Pakai dengan Luas Tulangan Perlu pada Kolom.	141
4.49. Perbandingan Kekuatan Lentur pada Pelat S1.	150
4.50. Perbandingan Kekuatan Lentur pada Pelat S2.	150

DAFTAR TABEL

Tabel	Halaman
2.1. Kategori Risiko Bangunan Gedung dan Non Gedung untuk Beban Gempa.....	10
2.1. (Lanjutan)	11
2.2. Faktor Keutamaan Gempa	11
2.3. Klasifikasi Situs	12
2.4. Koefisien Situs (F_a).....	15
2.5. Koefisien Situs, F_v	15
2.6. Kategori Desain Seismik Berdasarkan Parameter Respon Percepatan pada Periode Pendek (S_{DS})	16
2.7. Kategori Desain Seismik Berdasarkan Parameter Respon Percepatan pada Periode 1 Detik (S_{D1})	17
2.8. Nilai Parameter Periode Pendekatan C_t dan x	17
2.9. Koefisien untuk Batas Atas pada Periode yang Dihitung.....	18
2.10. Batasan Simpangan Antar Tingkat	21
2.11. Faktor Reduksi Kekuatan	21
2.12. Faktor reduksi kekuatan (ϕ) untuk momen, gaya aksial, atau kombinasi momen dan gaya aksial	22
2.13. Nilai β_1 untuk Distribusi Tegangan Beton Ekuivalen	23
2.14. Ketebalan Minimum Pelat Dua Arah dengan Balok Diantara Tumpuan pada Semua Sisinya.....	24
2.15. Kekuatan Aksial Maksimum	27
3.1. Data Elevasi Bangunan.....	36
3.2. Penulangan Balok	37
3.3. Penulangan Kolom.....	37
3.4. Penulangan Pelat.....	37
3.5. Data Hasil Uji Sondir.....	38
4.1. Spesifikasi Penulangan pada Balok	44
4.1. (Lanjutan)	45

4.2. Spesifikasi Penulangan pada Kolom	45
4.3. Spesifikasi Penulangan Pelat	46
4.4. Hasil Pembacaan Nilai N-SPT	49
4.5. Parameter Percepatan Desain Respon Spektral	52
4.6. Faktor R, C _d , dan Ω_0 untuk Sistem Pemikul Gaya Seismik	53
4.7. Gaya Dalam Balok B1.1	60
4.8. Gaya Dalam Balok B1.2	60
4.9. Gaya Dalam Balok B2.1	60
4.10. Gaya Dalam Balok B2.2	61
4.11. Gaya Dalam Balok B3.1	61
4.12. Gaya Dalam Balok B3.2	61
4.13. Gaya Dalam Balok B4.1	62
4.14. Gaya Dalam Balok B4.2	62
4.15. Gaya Dalam Kolom K1	63
4.16. Gaya Dalam Kolom K2	63
4.17. Gaya Dalam Kolom K3	63
4.18. Rasio Partisipasi Massa	64
4.19. Nilai Koefisien Respon Seismik	67
4.20. Massa dan Berat Bangunan	67
4.21. Gaya Geser Dasar (V_t) Awal	67
4.22. Gaya Geser Dasar (V_t) Koreksi	68
4.23. Simpangan Antar Tingkat Arah X	70
4.24. Simpangan Antar Tingkat Arah Y	70
4.25. Kuat Lentur Nominal Tumpuan Negatif	74
4.26. Kuat Lentur Nominal Tumpuan Positif	74
4.27. Kuat Lentur Nominal Lapangan Negatif	75
4.28. Kuat Lentur Nominal Lapangan Negatif	75
4.29. Pemeriksaan Kuat Rancang Tulangan Lentur Tanpa Pengaruh Beban Gempa	76
4.30. Pemeriksaan Kuat Rancang Tulangan Lentur dengan Pengaruh Beban Gempa	77
4.31. Kuat Geser Nominal Daerah Tumpuan	85
4.32. Kuat Geser Nominal Daerah Lapangan	85

4.33. Pemeriksaan Kapasitas Geser Tanpa Beban Gempa	86
4.34. Pemeriksaan Kapasitas Geser Dengan Beban Gempa.....	86
4.35. Parameter Geometri Penampang	91
4.36. Pemeriksaan Kebutuhan Tulangan Torsi Tanpa Beban Gempa.....	92
4.37. Pemeriksaan Kebutuhan Tulangan Torsi dengan Beban Gempa	92
4.38. Pemeriksaan Kecukupan Dimensi Penampang Tanpa Beban Gempa.....	93
4.39. Pemeriksaan Kecukupan Dimensi Penampang Dengan Beban Gempa.....	94
4.40. Pemeriksaan Kebutuhan Tulangan Torsi Transversal Tumpuan Tanpa Beban Gempa.....	97
4.41. Pemeriksaan Kebutuhan Tulangan Torsi Transversal Lapangan Tanpa Beban Gempa.....	97
4.42. Pemeriksaan Kebutuhan Tulangan Torsi Transversal Tumpuan Pengaruh Beban Gempa	98
4.43. Pemeriksaan Kebutuhan Tulangan Torsi Transversal Lapangan Pengaruh Beban Gempa	98
4.44. Pemeriksaan Tulangan Torsi Longitudinal Tumpuan Tanpa Beban Gempa.....	99
4.45. Pemeriksaan Tulangan Torsi Longitudinal Lapangan Tanpa Beban Gempa.....	99
4.46. Pemeriksaan Tulangan Torsi Longitudinal Tumpuan Pengaruh Beban Gempa.....	100
4.47. Pemeriksaan Tulangan Torsi Longitudinal Lapangan Pengaruh Beban Gempa.....	100
4.48. Pemeriksaan Syarat Gaya dan Geometri Balok.....	107
4.49. Pemeriksaan Syarat SRPMK Tulangan Lentur Daerah Tumpuan	107
4.50. Pemeriksaan Syarat SRPMK Tulangan Lentur Daerah Lapangan	108
4.51. Nilai Gaya Geser Desain Balok SRPMK	108
4.52. Pemeriksaan Penulangan Geser Desain Balok SRPMK.....	109
4.53. Kebutuhan Tulangan Perlu Tanpa Pengaruh Beban Gempa	110
4.54. Kebutuhan Tulangan Perlu dengan Pengaruh Beban Gempa.....	111
4.55. Kebutuhan Tulangan Pakai Tanpa Pengaruh Beban Gempa	111
4.56. Perbandingan Kebutuhan Tulangan Tanpa Pengaruh Beban Gempa dengan Pengaruh Beban Gempa.....	112
4.57. Perbandingan Kebutuhan Tulangan Desain dengan Kebutuhan Tulangan Perlu Tanpa Pengaruh Beban Gempa pada Balok B1.1	113

4.58. Perbandingan Kebutuhan Tulangan Desain dengan Kebutuhan Tulangan Perlu Tanpa Pengaruh Beban Gempa pada Balok B1.2.	113
4.59. Perbandingan Kebutuhan Tulangan Desain dengan Kebutuhan Tulangan Perlu Tanpa Pengaruh Beban Gempa pada Balok B2.1	114
4.60. Perbandingan Kebutuhan Tulangan Desain dengan Kebutuhan Tulangan Perlu Tanpa Pengaruh Beban Gempa pada Balok B2.2	114
4.61. Perbandingan Kebutuhan Tulangan Desain dengan Kebutuhan Tulangan Perlu Tanpa Pengaruh Beban Gempa pada Balok B3.1	114
4.62. Perbandingan Kebutuhan Tulangan Desain dengan Kebutuhan Tulangan Perlu Tanpa Pengaruh Beban Gempa pada Balok B3.2.	115
4.63. Perbandingan Kebutuhan Tulangan Desain dengan Kebutuhan Tulangan Perlu Tanpa Pengaruh Beban Gempa pada Balok B4.1	115
4.64. Perbandingan Kebutuhan Tulangan Desain dengan Kebutuhan Tulangan Perlu Tanpa Pengaruh Beban Gempa pada Balok B4.2	115
4.65. Perbandingan Kebutuhan Tulangan Desain dengan Kebutuhan Tulangan Perlu Pengaruh Beban Gempa pada Balok B1.1	116
4.66. Perbandingan Kebutuhan Tulangan Desain dengan Kebutuhan Tulangan Perlu Pengaruh Beban Gempa pada Balok B1.2.	116
4.67. Perbandingan Kebutuhan Tulangan Desain dengan Kebutuhan Tulangan Perlu Pengaruh Beban Gempa pada Balok B2.1	117
4.68. Perbandingan Kebutuhan Tulangan Desain dengan Kebutuhan Tulangan Perlu Pengaruh Beban Gempa pada Balok B2.2	117
4.69. Perbandingan Kebutuhan Tulangan Desain dengan Kebutuhan Tulangan Perlu Pengaruh Beban Gempa pada Balok B3.1.	117
4.70. Perbandingan Kebutuhan Tulangan Desain dengan Kebutuhan Tulangan Perlu Pengaruh Beban Gempa pada Balok B3.2	118
4.71. Perbandingan Kebutuhan Tulangan Desain dengan Kebutuhan Tulangan Perlu Pengaruh Beban Gempa pada Balok B4.1	118
4.72. Perbandingan Kebutuhan Tulangan Desain dengan Kebutuhan Tulangan Perlu Pengaruh Beban Gempa pada Balok B4.2.	118
4.73. Pemeriksaan Kapasitas Beban Aksial Kolom Tanpa Beban Gempa.....	128
4.74. Pemeriksaan Kapasitas Beban Aksial Kolom dengan Beban Gempa	128
4.75. Gaya Dalam Kolom K1 Tanpa Beban Gempa	128
4.76. Gaya Dalam Kolom K1 dengan Beban Gempa.....	129
4.77. Kuat Lentur Nominal Kolom K1 Tanpa Beban Gempa	129
4.78. Kuat Lentur Nominal Kolom K1 dengan Beban Gempa.....	129
4.79. Gaya Dalam Kolom K2 Tanpa Beban Gempa	131
4.80. Gaya Dalam Kolom K2 dengan Beban Gempa.....	131

4.81. Kuat Lentur Nominal Kolom K2 Tanpa Beban Gempa	131
4.82. Kuat Lentur Nominal Kolom K2 dengan Beban Gempa.....	132
4.83. Gaya Dalam Kolom K3 Tanpa Beban Gempa	133
4.84. Gaya Dalam Kolom K3 dengan Beban Gempa.....	134
4.85. Kuat Lentur Nominal Kolom K3 Tanpa Beban Gempa	134
4.86. Kuat Lentur Nominal Kolom K3 dengan Beban Gempa.....	134
4.87. Pemeriksaan Kuat Rancang Tulangan Lentur pada Kolom Tanpa Pengaruh Beban Gempa	136
4.88. Pemeriksaan Kuat Rancang Tulangan Lentur pada Kolom Akibat Pengaruh Beban Gempa	136
4.89. Pemeriksaan Kuat Geser Kolom Tanpa Beban Gempa.....	138
4.90. Pemeriksaan Kuat Geser Kolom dengan Beban Gempa	138
4.91. Pemeriksaan Syarat Dimensi Kolom SRPMK	139
4.92. Pemeriksaan Kekuatan Lentur Minimum Kolom Akibat Tanpa Beban Gempa.....	139
4.93. Pemeriksaan Kekuatan Lentur Minimum Kolom Akibat Beban Gempa.....	140
4.94. Pemeriksaan Syarat Luas Tulangan Longitudinal Kolom	140
4.95. Perbandingan Kebutuhan Tulangan Perlu Kolom Tanpa Beban Gempa dengan Beban Gempa	140
4.96. Pemeriksaan Syarat Luas Tulangan Longitudinal Kolom	141
4.97. Pemeriksaan Ketebalan Pelat Minimum.....	144
4.98. Pemeriksaan Kebutuhan Tulangan Geser	149
4.99. Pemeriksaan Kuat Nominal Pelat Arah X dan Arah Y.....	149

DAFTAR NOTASI

- a = Tinggi blok tegangan persegi ekuivalen
- A_{cp} = Luas yang dibatasi oleh keliling luar penampang beton
- A_g = Luas bruto penampang beton
- A_l = Luas total tulangan longitudinal untuk menahan torsi
- A_o = Luas bruto yang dilingkupi oleh lintasan alir geser
- A_{oh} = Luas yang dilingkupi oleh garis pusat tulangan torsi transversal tertutup terluar
- A_s = Luas tulangan
- A_t = Luas satu kaki sengkang tertutup yang menahan torsi dalam spasi
- A_v = Luas tulangan geser dalam spasi
- b = Lebar komponen struktur
- c = Jarak dari serat tekan terjauh ke sumbu netral
- C_d = Faktor pembesaran simpangan lateral
- C_s = Koefisien respon seismik
- d = Jarak dari serat tekan terjauh ke pusat tulangan tarik longitudinal
- D = Pengaruh dari beban mati
- d' = Jarak dari serat tekan terjauh ke pusat tulangan tekan longitudinal
- E = Pengaruh beban seismik horizontal dan vertikal
- F = Gaya gempa desain tingkat kekuatan
- F_a = Parameter percepatan respon spektral pada periode 1 detik
- f'_c = Kekuatan tekan beton
- F_v = Koefisien situs untuk periode panjang (pada periode 1 detik)
- f_y = Kekuatan leleh tulangan
- h_n = Batasan tinggi struktur (m)
- I_e = Faktor keutamaan gempa

- L = Pengaruh dari beban hidup
 l_n = Panjang bentang bersih
 L_r = Pengaruh beban hidup di atap
 M_n = Kekuatan lentur nominal
 M_{pr} = Kekuatan lentur mungkin komponen struktur, dengan atau tanpa beban aksial, yang ditentukan menggunakan *property* komponen struktur pada muka *joint* yang mengasumsikan tegangan tarik dalam batang tulangan longitudinal sebesar paling sedikit $1,25f_y$ dan faktor reduksi kekuatan (ϕ) Sebesar 1,0 N.mm
 M_u = Momen terfaktor
 N_u = Gaya aksial terfaktor tegak lurus terhadap penampang
 P = Faktor redudansi
 P_{cp} = Keliling luar penampang beton
 PGA = Percepatan muka tanah puncak MCE_G terpeta
 P_h = Keliling garis pusat tulangan torsi transversal
 P_n = Kuat aksial nominal
 P_o = Kekuatan aksial nominal pada eksentrisitas 0
 P_u = Gaya aksial terfaktor
 Q_E = Pengaruh gaya seismik horizontal
 R = Koefisien modifikasi respon
 s = Spasi
 S_{DS} = Parameter percepatan respon spektral pada periode pendek
 S_{D1} = Parameter percepatan respon spektral pada periode 1 detik
 S_S = Parameter percepatan respon spektral mce dari peta gempa pada periode pendek
 S_{M1} = Parameter percepatan respon spektral mce pada periode 1 detik yang sudah disesuaikan terhadap pengaruh kelas situs
 S_{MS} = Parameter respon
 S_1 = Parameter percepatan respon spektral mce dari peta gempa pada periode 1 detik
 T = Periode fundamental bangunan

- T_a = Periode fundamental pendekatan
- T_{cr} = Momen retak torsi
- T_L = Peta transisi periode panjang
- T_n = Kekuatan momen torsi nominal
- T_{th} = Momen torsi *theresold*
- T_u = Momen torsi terfaktor
- V_c = Kekuatan geser nominal beton
- V_e = Gaya geser desain
- V_n = Kekuatan geser nominal
- V_s = Kekuatan geser nominal yang diberikan oleh tulangan geser
- V_u = Gaya geser terfaktor
- W = Berat seismik efektif
- α_{fm} = Nilai rata-rata α_f
- β = Rasio dimensi panjang terhadap pendek
- β_1 = Faktor yang menghubungkan tinggi blok tegangan tekan persegi ekuivalen dengan tinggi sumbu netral
- δ_x = Defleksi pusat massa di tingkat X
- δ_e = Perpindahan elastik yang dihitung akibat gaya gempa desain tingkat kekuatan
- Δ_i = Simpangan antar tingkat
- ϵ_t = Regangan tarik netto terjauh baja tarik longitudinal
- ρ = Rasio tulangan
- ϕ = Faktor reduksi kekuatan
- Ω_0 = Faktor kuat lebih sistem

I. PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Gempa bumi adalah fenomena bergetarnya permukaan bumi akibat pergerakan lempengan kerak bumi. Pergerakan lempengan kerak bumi ini menghasilkan energi yang dipancarkan kesegala arah berupa gelombang gempa bumi sehingga efeknya dapat dirasakan sampai ke permukaan bumi.

Wilayah Indonesia merupakan negara yang wilayahnya riskan terjadi gempa bumi. Tingginya risiko gempa bumi dikarenakan letak geografis Indonesia yang dilalui oleh jalur pertemuan tiga lempeng tektonik utama, yaitu Lempeng Indo-Australia, Lempeng Pasifik, dan Lempeng Eurasia.

Dalam beberapa tahun terakhir telah tercatat berbagai aktifitas gempa besar di Indonesia, yaitu Gempa Tasikmalaya (6,9 SR) tahun 2017, Gempa Donggala-Sulawesi (7,4 SR) tahun 2018, Gempa Banten (6,9 SR) tahun 2019, Gempa Maluku Utara (6,8 SR) tahun 2020, Gempa Lampung (5,5 SR) tahun 2021, Gempa Banten (6,6 SR) dan Gempa Pasaman-Sumatera Barat (6,1 SR) pada tahun 2022 (BMKG, 2022).

Dengan adanya kejadian gempa bumi di Indonesia, tidak sedikit dari gempa tersebut yang merusak pada infrastruktur dan bangunan, khususnya pada gedung yang bertingkat tinggi. Hal ini gempa yang menyebabkan terjadinya getaran, tidak dapat ditahan oleh struktur gedung. Oleh karena itu, pengaruh gempa harus ditinjau dalam struktur gedung untuk meminimalkan kerusakan terhadap gedung. Dalam hal ini, perencanaan dan evaluasi kinerja struktur gedung harus memenuhi persyaratan gedung tahan gempa, sehingga gedung aman akibat pengaruh gempa.

Evaluasi kinerja gedung didefinisikan sebagai suatu proses dalam memperoleh informasi tentang ketahanan gedung. Evaluasi kinerja berguna untuk

menganalisis perilaku gempa terhadap struktur gedung dan dapat memberikan informasi sejauh mana gempa akan mempengaruhi struktur gedung, sehingga dapat meminimalisir risiko terjadinya kegagalan pada struktur akibat beban gempa.

Secara umum analisis gempa dibagi menjadi dua macam, yaitu analisis gempa statik ekuivalen dan analisis gempa dinamik. Pada bangunan gedung yang tidak beraturan, bertingkat banyak, dan bangunan yang memerlukan ketelitian tinggi lebih cocok menggunakan analisis dinamik. Analisis gempa dinamik meliputi analisis respon spektrum (*response spectrum*) dan analisis riwayat waktu (*time history*).

Dalam penelitian ini menggunakan analisis gempa dinamik dengan metode analisis respon spektrum. Respon spektrum adalah suatu spektrum yang disajikan dalam bentuk grafik/plot antara periode struktur T , lawan respon-respon maksimum berdasarkan rasio redaman dan gempa tertentu. Dalam analisis respon dinamik akibat pengaruh gempa rencana. Gaya-gaya internal dalam unsur struktur gedung didapat dari analisis 3 dimensi berdasarkan beban gempa statik ekuivalen.

1.2. Rumusan Masalah

Rumusan masalah dalam penelitian ini adalah bagaimana hasil evaluasi kekuatan gedung bertingkat terhadap pengaruh pembebanan seismik dan tanpa pengaruh pembebanan seismik dapat dibandingkan dengan metode analisis dinamik respon spektrum.

1.3. Batasan Masalah

Untuk membatasi ruang lingkup penelitian ini, maka diperlukan batasan-batasan masalah sebagai berikut:

1. Bangunan yang menjadi objek penelitian adalah Gedung Laboratorium Olimpiade Sains Terpadu MAN Insan Cendikia, Serpong.
2. Bangunan yang ditinjau adalah bangunan bertingkat 4 yang berfungsi sebagai gedung sekolah.

3. Struktur yang digunakan adalah struktur beton bertulang.
4. Struktur bangunan yang dianalisis adalah struktur atas bangunan.
5. Dimensi struktur dan tulangan menyesuaikan dengan desain perancang.
6. Pembebanan struktur bangunan meliputi beban mati, beban hidup, dan beban gempa.
7. Peraturan gempa mengacu pada SNI 1726-2019 mengenai Tata Cara Perencanaan Ketahanan Gempa untuk Struktur Bangunan Gedung dan Non Gedung.
8. Peraturan analisis kapasitas struktur mengacu pada SNI 2847-2019 mengenai Persyaratan Beton Struktural untuk Bangunan Gedung.
9. Peraturan pembebanan mengacu pada SNI 1727-2020 mengenai Beban Desain Minimum dan Kriteria Terkait untuk Bangunan Gedung.
10. Pemodelan struktur dilakukan menggunakan program analisis struktur.

1.4. Tujuan Penelitian

Adapun tujuan dari penelitian ini adalah sebagai perbandingan hasil evaluasi kekuatan struktur gedung antara pengaruh beban seismik dengan tanpa pengaruh beban seismik yang menggunakan metode analisis dinamik respon spektrum.

1.5. Manfaat Penelitian

Adapun manfaat yang diharapkan dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Mengetahui perbandingan kekuatan struktur gedung antara akibat pengaruh beban gempa dengan tanpa pengaruh beban gempa.
2. Menambah pengetahuan dan referensi tentang evaluasi kinerja kekuatan struktur gedung bertingkat menggunakan metode analisis dinamik respon spektrum.
3. Menambah pengetahuan mengenai penggunaan program analisis struktur khususnya pada analisis kekuatan struktur gedung bertingkat menggunakan metode analisis dinamik respon spektrum.

II. TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Uraian Umum

Gempa bumi adalah getaran yang bersumber dari dalam bumi yang kemudian merambat ke permukaan bumi akibat lempengan bumi pecah dan bergeser dengan keras. Penyebab gempa bumi dapat terjadi karena pergeseran lempengan bumi (tektonik), aktivitas gunung api, jatuhnya meteor, tanah longsor, dan ledakan bom nuklir di bawah permukaan (Nur, 2010).

Menurut Siddiq (2008) Gempa bumi dapat memberikan kerusakan pada bangunan, terutama pada bangunan bertingkat. Semakin tinggi suatu bangunan, maka akan semakin besar resiko kerusakan yang akan dialami oleh bangunan tersebut. Tingkat kerusakan bangunan akibat gempa tergantung dari sebagai berikut:

1. Kekuatan gempa.
2. Intensitas gempa.
3. Durasi atau lamanya gempa berlangsung.
4. Kondisi tanah dan struktur geologi tanah.
5. Banyaknya getaran tanah.
6. Konfigurasi struktur bangunan.
7. Kontinuitas kekakuan struktur dan distribusi massa tingkat.
8. Kekuatan dan daktilitas struktur bangunan.
9. Mutu bahan bangunan.
10. Mutu pengerjaan konstruksi bangunan.

Gempa bumi memang tidak dapat diprediksi dan tidak dapat dicegah, tetapi dapat dilakukan upaya untuk meminimalkan kerusakan pada struktur bangunan dengan memenuhi persyaratan bangunan tahan gempa. Tujuan dari bangunan

tahan gempa yaitu untuk menghindari kegagalan pada struktur bangunan yang nantinya dapat menimbulkan korban jiwa apabila gempa bumi terjadi. Maka dalam perencanaan struktur bangunan tahan gempa, struktur perlu dirancang dapat menahan dari gaya lateral atau gaya gempa yang bersifat bolak-balik atau siklis.

2.2. Elemen Struktur

Suatu bangunan gedung terdiri dari beberapa elemen struktur yang berfungsi untuk memikul beban yang bekerja pada bangunan. Elemen struktur tersebut terbagi menjadi *upper structure* (struktur atas) dan *lower structure* (struktur bawah). Struktur atas adalah bagian dari struktur bangunan yang berada di atas muka tanah yang terdiri dari kolom, balok, dan pelat. Sedangkan struktur bawah adalah bagian dari struktur bangunan yang berada di bawah muka tanah yang pada umumnya yaitu pondasi dan basemen. Elemen-elemen struktur tersebut berkerja sama dalam mendistribusikan beban-beban dari struktur atas menuju ke struktur bawah.

2.2.1. Pelat

Pelat merupakan struktur tipis yang terbuat dari beton bertulang dengan arah bidangnya horizontal, dan beban yang bekerja tegak lurus pada bidang struktur pelat tersebut. Ketebalan suatu pelat ditentukan berdasarkan beban yang bekerja, besar lendutan yang diijinkan, bahan konstruksi dari pelat, dan jarak atau lebar bentangan balok-balok pendukung. Adapun fungsi dari pelat adalah memikul beban mati dan beban hidup kemudian disalurkan pada balok-balok yang bertumpu pada kolom-kolom.

2.2.2. Balok

Balok adalah elemen struktur yang berguna untuk menyangga pelat lantai yang kemudian disalurkan pada struktur kolom. Struktur balok terbagi menjadi dua, yaitu balok anak dan balok induk. Balok anak berfungsi untuk menopang

pelat lantai dan memperkecil ketebalan pada pelat lantai. Balok Induk berfungsi untuk menopang balok anak yang berada di atasnya dan selalu bertumpu langsung pada kolom.

2.2.3. Kolom

Kolom merupakan elemen struktur yang tugas utamanya adalah menahan beban aksial dengan atau tanpa adanya momen lentur akibat pengaruh beban gempa dan beban angin pada struktur. Kolom berperan sangat penting dalam suatu struktur bangunan, apabila kolom tersebut runtuh, maka dapat mengakibatkan seluruh struktur mengalami keruntuhan.

2.3. Sistem Struktur

Berdasarkan SNI 1726-2019 sistem struktur utama yang ditetapkan dalam peraturan perencanaan gempa Indonesia, yaitu:

1. Sistem dinding penumpu, yaitu sistem struktur yang tidak mempunyai rangka ruang pemikul beban gravitasi secara lengkap, sehingga sebagian besar atau seluruh beban gravitasi dipikul oleh dinding penumpu. Adapun beban gempa dipikul oleh dinding-dinding geser atau rangka bresing.
2. Sistem rangka gedung, yaitu sistem struktur yang mempunyai rangka ruang pemikul beban gravitasi secara lengkap, sedangkan tahanan terhadap beban gempa dipikul oleh dinding-dinding geser atau rangka bresing.
3. Sistem Rangka Pemikul Momen (SRPM), yaitu sistem struktur yang mempunyai rangka ruang pemikul beban gravitasi secara lengkap dan mampu menahan beban gempa.
4. Sistem ganda, yaitu sistem struktur yang mengkombinasikan dinding geser dengan sistem rangka pemikul momen atau rangka bresing dengan sistem rangka pemikul momen sebagai tahanan terhadap beban gempa, sedangkan beban gravitasi dipikul rangka ruang lengkap.

5. Sistem rangka ruang, yaitu sistem struktur yang terdiri dari elemen-elemen struktur rangka (selain dinding penumpu) yang saling terhubung, yang mampu menahan beban gravitasi dan beban gempa.
6. Sistem kolom kantilever, yaitu sistem struktur dengan tahanan terhadap beban gempa yang keseluruhan dipikul oleh kolom-kolom yang berperan sebagai kantilever yang terjepit dibagian dasar bangunan.

2.4. Pembebanan Struktur

Pembebanan merupakan unsur penting dalam perancangan suatu struktur, dikarenakan mempengaruhi kekuatan yang dibutuhkan pada struktur tersebut.

2.4.1. Beban Mati

Adapun beban mati terbagi menjadi beban mati akibat berat sendiri (*Dead Load*) dan beban mati tambahan (*Super Dead Load*). Beban mati sendiri yaitu beban atau berat yang diperoleh akibat elemen struktural yang terdapat pada konstruksi dan sifatnya permanen seperti pelat, balok, dan kolom. Sedangkan beban mati tambahan yaitu beban yang diperoleh akibat adanya elemen tambahan pada suatu konstruksi dan sifatnya permanen, seperti plafon, dan keramik.

2.4.2. Beban Hidup

Beban hidup merupakan beban yang bersifat sementara yang diperoleh akibat aktivitas penggunaan suatu bangunan dan tidak termasuk beban konstruksi dan lingkungan. Adapun besaran beban hidup telah ditetapkan dalam SNI 1727-2020.

2.4.3. Beban Gempa

Beban gempa merupakan beban yang berkerja dengan selang waktu yang relatif singkat dan bersifat sementara, namun dampak dari beban tersebut dapat mengakibatkan kerusakan berat dan keruntuhan pada suatu struktur bangunan.

2.4.4. Kombinasi Pembebanan

Beban-beban yang dialami struktur dapat terjadi secara bersamaan. Maka dari itu, dibutuhkan asumsi dan pendekatan kombinasi pembebanan yang mungkin berkerja pada suatu struktur. Kombinasi pembebanan yang digunakan dalam penelitian ini mengacu pada SNI 1727-2020.

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

Berdasarkan SNI 1726-2019 pasal 7.4.2, maka pengaruh beban seismik (E) harus dihitung sesuai ketentuan sebagai berikut:

Untuk penggunaan kombinasi 3, beban E harus ditentukan dengan persamaan:

$$E = E_h + E_v \dots \dots \dots (2.1)$$

Untuk kombinasi 4, maka beban gempa E harus ditentukan dengan persamaan:

$$E = E_h - E_v \dots \dots \dots (2.2)$$

Dimana:

$$E_h = \rho \times Q_E \dots \dots \dots (2.3)$$

$$E_v = 0,2S_{DS} \times D \dots \dots \dots (2.4)$$

Keterangan:

E_h : Pengaruh beban seismik horizontal.

E_v : Pengaruh beban seismik vertikal.

ρ : Faktor redundansi.

Q_E : Pengaruh gaya seismik horizontal dari V.

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

D : Pengaruh beban mati.

2.5. Analisis Dinamik

Analisis dinamik merupakan analisis struktur dimana pembagian gaya geser gempa di seluruh tingkat diperoleh dengan memperhitungkan pengaruh dinamis gerakan tanah terhadap struktur. Analisis dinamik terbagi menjadi dua, yaitu:

1. Analisis riwayat waktu yaitu analisis dinamis pada model struktur diberikan suatu catatan rekaman gempa dan respons struktur dihitung langkah demi langkah pada interval tertentu.
2. Analisis respon spektrum yaitu total respon yang didapat melalui superposisi dari respons masing-masing ragam getar.

Dalam evaluasi kinerja struktur bangunan terhadap pengaruh beban gempa, hal yang perlu diperhatikan yaitu stabilitas dan kemampuannya menahan gaya lateral. Metode analisis dinamik respon spektrum digunakan untuk mengevaluasi terhadap gaya-gaya gempa dan untuk mengetahui perilaku dari struktur akibat beban gempa yang bekerja pada struktur. Metode analisis dinamik respon spektrum lebih cocok digunakan pada bangunan gedung dengan konfigurasi tidak beraturan, bertingkat banyak, dan bangunan yang memerlukan ketelitian tinggi.

2.6. Ketentuan Struktur Terhadap Pengaruh Gempa

Dalam evaluasi ketahanan struktur bangunan terhadap pengaruh gempa, maka perlu menyesuaikan dengan ketentuan-ketentuan yang terdapat pada SNI 1726-2019.

2.6.1. Gempa Rencana

Dalam perencanaan dan evaluasi pada struktur bangunan tahan gempa, harus dilakukan peninjauan terhadap pengaruh gempa rencana. Menurut SNI 1726-2019 pasal 4.1.1, gempa rencana ditetapkan sebagai gempa dengan kemungkinan terlewatinya selama umur struktur bangunan 50 tahun yaitu sebesar 2%.

2.6.2. Kategori Resiko Struktur Bangunan

Menurut SNI 1726-2019 Tabel 3 pembentukan kategori risiko pengaruh gempa pada struktur bangunan berdasarkan jenis atau fungsi pemanfaatan bangunan tersebut. Kategori risiko pengaruh gempa pada struktur bangunan gedung dan non gedung disajikan dalam Tabel 2.1.

Tabel 2.1. Kategori Risiko Bangunan Gedung dan Non Gedung untuk Beban Gempa

Jenis Pemanfaatan	Kategori Risiko
<p>Gedung dan non gedung yang memiliki risiko rendah terhadap jiwa manusia pada saat terjadi kegagalan, termasuk, tetapi 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, tetapi tidak dibatasi untuk :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Perumahan • Rumah took dan rumah kantor • Pasar • Gedung perkantor • Gedung apartemen/rumah susun • Pusat perbelanjaan/mall • Fasilitas manufaktur • Pabrik. 	II
<p>Gedung dan non gedung yang memiliki risiko tinggi terhadap jiwa manusia pada saat terjadi kegagalan, termasuk, tetapi tidak dibatasi untuk:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Bioskop • Gedung pertemuan • Stadion • Fasilitas kesehatan yang tidak memiliki unit bedah dan unit gawat darurat • Fasilitas penitipan anak • Penjara • Bangunan jompo 	III
<p>Gedung dan non gedung, tidak termasuk ke dalam 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, tetapi tidak dibatasi untuk:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Pusat pembangkit listrik biasa • Fasilitas penanganan air • Fasilitas penanganan limbah • Pusat telekomunikasi <p>Gedung dan non gedung yang tidak termasuk ke dalam kategori risiko IV, (termasuk, tetapi tidak dibatasi untuk fasilitas manufaktur, proses, penanganan, penyimpanan, penggunaan atau tempat pembuangan bahan bakar berbahaya, bahan kimia berbahaya, limbah berbahaya, atau bahan yang mudah meledak)</p>	IV

Tabel 2.1. (Lanjutan)

yang mengandung bahan beracun atau peledak di mana jumlah kandungan bahannya melebihi nilai batas yang disyaratkan oleh instansi yang berwenang dan cukup menimbulkan bahaya bagi masyarakat jika terjadi kebocoran.	III
Gedung dan non gedung yang dikategorikan sebagai fasilitas penting, termasuk, tetapi tidak dibatasi untuk: <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 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.	IV

(Sumber: SNI 1726-2019)

2.6.3. Faktor Keutamaan Gempa

Dalam perencanaan dan evaluasi bangunan tahan gempa, pengaruh gempa rencana yang disesuaikan dengan faktor risiko harus dikalikan dengan faktor keutamaan gempa (*I_e*). Nilai faktor keutamaan disajikan dalam Tabel 2.2.

Tabel 2.2. Faktor Keutamaan Gempa

Kategori risiko	Faktor keutamaan gempa, <i>I_e</i>
I atau II	1,0
III	1,25
IV	1,50

(Sumber: SNI 1726-2019)

2.6.4. Klasifikasi Situs

Dalam perencanaan bangunan tahan gempa dibutuhkan percepatan maksimum dan spektra desain yang didapatkan dari jenis lapisan tanah.

Berdasarkan SNI 1726-2019 menerangkan bahwa tata cara klasifikasi situs dan mengatur standar desain seismik berupa faktor amplifikasi pada gedung. Dalam merumuskan standar desain seismik untuk gedung atau menentukan perbesaran puncak percepatan seismik dari batuan dasar ke tanah pada suatu lokasi tertentu, lokasi tersebut harus ditentukan berdasarkan lapisan tanah terdalam yaitu 30 meter. Dalam menentukan kelas situs harus melalui penyelidikan tanah di lapangan dan di laboratorium. Klasifikasi situs disajikan dalam Tabel 2.3.

Tabel 2.3. Klasifikasi Situs

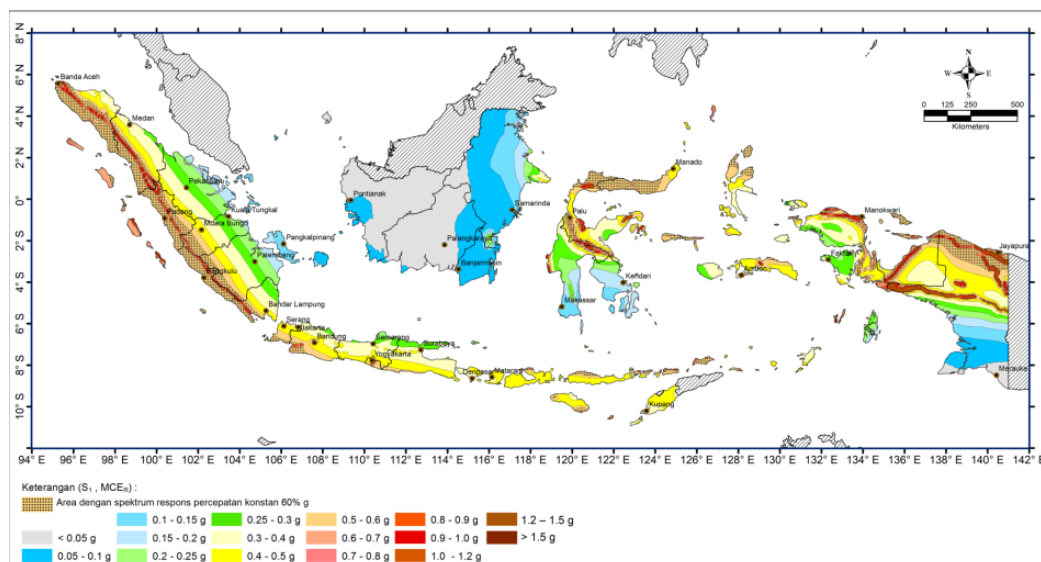
Kelas Situs	\bar{v}_s (m/s)	\bar{N} atau \bar{N}_{ch}	\bar{s}_u (kPa)
SA (batuan keras)	>1500	N/A	N/A
SB (batuan)	750-1500	N/A	N/A
SC (tanah keras, sangat padat, dan batuan lunak)	350-750	>50	>100
SD (tanah sedang)	175-350	15-50	50-100
SE (tanah lunak)	<175	<15	<50
	Atau setiap profil tanah yang mengandung lebih dari 3 m tanah dengan karakteristik sebagai berikut: <ol style="list-style-type: none"> 1. Indeks plastisitas, $PI > 20$ 2. Kadar air, $w \geq 40\%$ 3. Kuat geser niralir $\bar{s}_u < 25$ kPa 		
SF (tanah khusus yang membutuhkan investigasi geoteknik spesifik dan analisis respons spesifik-situs yang mengikuti 0)	Setiap profil lapisan tanah yang memiliki salah satu atau lebih dari karakteristik berikut: <ul style="list-style-type: none"> • Rawan dan berpotensi gagal atau runtuh akibat beban gempa seperti mudah likuifaksi, lempung sangat sensitif, tanah tersementasi lemah • Lempung sangat organik dan/atau gambut (ketebalan $H > 3$ m) • Lempung berplastisitas sangat tinggi (ketebalan $H > 7,5$ m dengan indeks plastisitas $PI > 75$) Lapisan lempung lunak/setengah teguh dengan ketebalan $H > 35$ m dengan $\bar{s}_u < 50$ KPa.		

(Sumber: SNI 1726-2019)

2.6.5. Wilayah Gempa

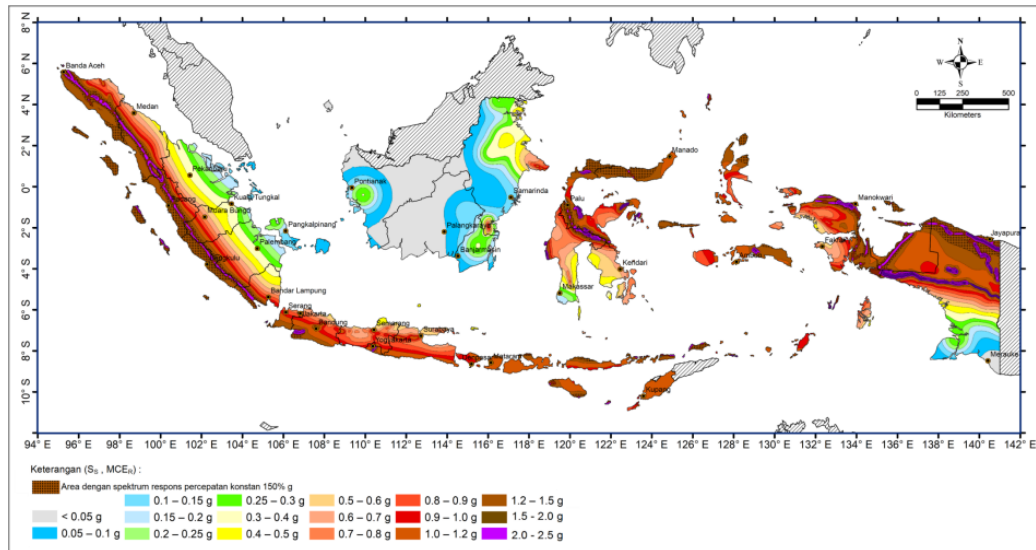
Indonesia merupakan wilayah yang rawan terjadinya gempa bumi, dikarenakan letak geografis Indonesia diantara pertemuan lempeng tektonik utama, yaitu Lempeng Indo-Australia, Lempeng Pasifik, dan Lempeng Pasifik. Dalam perencanaan suatu bangunan tahan gempa, wilayah lokasi struktur bangunan menjadi salah satu faktor besar atau kecilnya pengaruh kekuatan suatu gempa bumi. Maka dari itu, untuk mengetahui tingkatan atau besaran risiko suatu lokasi bangunan terhadap pengaruh bencana gempa diperlukan pemetaan dan peta gempa.

Berdasarkan SNI 1726-2019 Pasal 15, memberikan peta-peta gerak tanah seismik dan koefisien risiko dari gempa maksimum yang dipertimbangkan (*Maximum Considered Earthquake, MCE*), yang digunakan untuk menerapkan ketentuan-ketentuan pengaruh beban gempa. Adapun parameter-parameter percepatan gerak tanah untuk periode 1 detik (S_1) dan periode pendek 0,2 detik (S_s) yang digunakan untuk menentukan gempa rencana ditunjukkan pada peta wilayah gempa maksimum yang dipertimbangkan (MCE) dapat dilihat dalam Gambar 2.1 dan Gambar 2.2.



Gambar 2.1. Parameter spektral percepatan gempa untuk periode 1 detik (S_1).

(Sumber: SNI 1726-2019)



Gambar 2.2. Parameter spektral percepatan gempa untuk periode pendek 0,2 detik (S_s). (Sumber: SNI 1726-2019)

2.6.6. Koefisien Situs

Berdasarkan SNI 1726-2019 Pasal 6.2, dalam menentukan respon spektral percepatan gempa maksimum, maka diperlukan suatu faktor amplifikasi seismik pada periode pendek dan periode 1 detik. Parameter respons spektral percepatan pada periode pendek (S_{MS}) dan periode 1 detik (S_{M1}) yang disesuaikan dengan pengaruh golongan situs, harus ditentukan dengan menggunakan rumus sebagai berikut:

$$S_{MS} = F_a \times S_s \dots\dots\dots (2.5)$$

$$S_{M1} = F_v \times S_1 \dots\dots\dots (2.6)$$

Keterangan :

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

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

Untuk faktor amplifikasi getaran terkait percepatan pada getaran periode pendek (F_a) dan faktor amplifikasi terkait percepatan yang mewakili getaran periode 1 detik (F_v) telah disajikan pada Tabel 2.4 dan Tabel 2.5.

Tabel 2.4. 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 ≤ 0,25	S _s = 0,5	S _s = 0,75	S _s = 1,0	S _s = 1,25	S _s ≥ 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	S _s					

(Sumber: SNI 1726-2019)

Tabel 2.5. Koefisien Situs, F_v

Kelas Situs	Parameter respons spektral percepatan gempa maksimum yang dipertimbangkan risiko-tertarget (MCE _R) terpetakan pada periode pendek, T = 1 detik, S ₁					
	S ₁ ≤ 0,1	S ₁ = 0,2	S ₁ = 0,3	S ₁ = 0,4	S ₁ = 0,5	S ₁ ≥ 0,6
SA	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
SB	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
SC	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,4
SD	2,4	2,2	2,0	1,9	1,8	1,7
SE	4,2	3,3	2,8	2,4	2,2	2,0
SF	S _s					

(Sumber: SNI 1726-2019)

2.6.7. Parameter Percepatan Spektral Desain

Menurut SNI 1726-2019 Pasal 6.3, parameter percepatan spektral desain untuk periode pendek 0,2 detik (SD_s) dan pada periode 1 detik (SD₁), dapat ditentukan melalui persamaan berikut ini:

$$S_{DS} = 2/3 S_{MS} \dots \dots \dots (2.7)$$

$$S_{D1} = 2/3 S_{M1} \dots \dots \dots (2.8)$$

Keterangan:

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

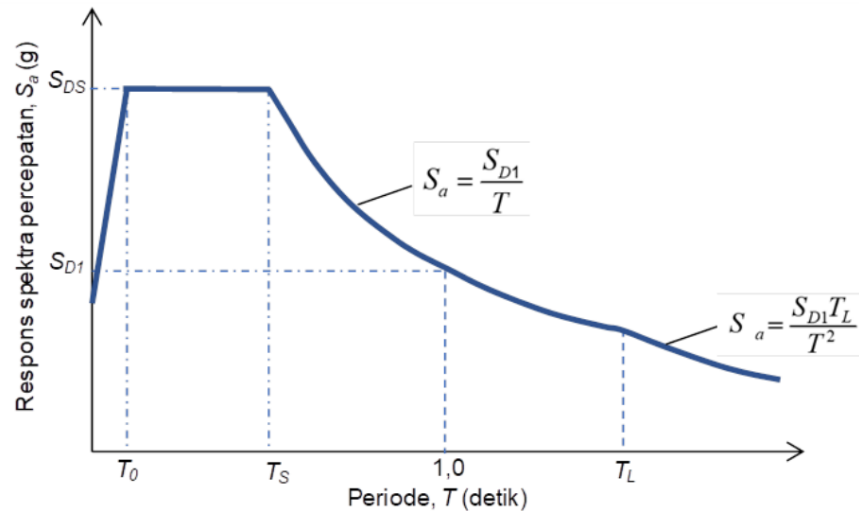
S_{D1} : Parameter respon spektral percepatan desain pada periode 1 detik.

S_{MS} : Parameter respons spektral percepatan pada periode pendek.

S_{M1} : Parameter respons spektral percepatan pada periode 1 detik.

2.6.8. Spektrum Respon Desain

Berdasarkan SNI 1726-2019 Pasal 6.4, adapun grafik respon spektrum merujuk pada Gambar 2.3.



Gambar 2.3. Respon Spektrum Desain.

2.6.9. Kategori Desain Seismik

Suatu struktur bangunan harus memenuhi kategori desain seismik yang mengacu pada SNI 1726-2019 Pasal 6.5, yang menjelaskan tentang ketegori risiko berdasarkan parameter respon percepatan gempa pada periode pendek 0,2 detik (S_{DS}) dan periode 1 detik (S_{D1}). Adapun kategori seismik berdasarkan parameter respon percepatan dapat dilihat pada Tabel 2.6 dan Tabel 2.7 sebagai berikut:

Tabel 2.6. Kategori Desain Seismik Berdasarkan Parameter Respon Percepatan pada Periode Pendek (S_{DS})

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

(Sumber: SNI 1726-2019)

Tabel 2.7. Kategori Desain Seismik Berdasarkan Parameter Respon Percepatan pada Periode 1 Detik (S_{DI})

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

(Sumber; SNI 1726-2019)

2.7. Pemeriksaan Dinamis Struktur

Dalam mendesain ketahanan struktur terhadap pengaruh beban gempa, maka perlu diperiksa berdasarkan batasan-batasan tertentu. Adapun batasan-batasan yang perlu diperiksa yaitu:

1. Pemeriksaan Periode Fundamental

Berdasarkan SNI 1726-2019 Pasal 7.8.2.1, dalam menentukan periode fundamental pendekatan dapat menggunakan persamaan berikut:

$$T_a = C_t \times h_n^x \dots \dots \dots (2.9)$$

Keterangan:

T_a = Periode fundamental pendekatan (detik).

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

Untuk nilai parameter periode pendekatan koefisien C_t dan x dapat dilihat pada Tabel 2.8.

Tabel 2.8. Nilai Parameter Periode Pendekatan C_t dan x

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

(Sumber: SNI 1726-2019)

Dalam penentuan periode fundamental struktur tidak diperbolehkan melebihi hasil perkalian koefisien untuk batasan atas pada periode yang dihitung (C_u). Adapun nilai koefisien C_u dapat dilihat pada Tabel 2.9.

Tabel 2.9. Koefisien untuk Batas Atas pada Periode yang Dihitung

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

(Sumber: SNI 1726-2019)

2. Pemeriksaan Rasio Partisipasi Massa

Menurut SNI 1726-2019 Pasal 7.9.1.1, dalam menentukan ragam getar alami pada struktur, analisis perlu menyertakan jumlah ragam yang cukup untuk mendapatkan partisipasi massa ragam terkombinasi 100% dari massa struktur. Maka untuk mencapai ketentuan ini, ragam satu badan kaku (*single rigid body*) dengan periode 0,05 detik, diizinkan untuk mengambil semua ragam dengan periode di bawah 0,05 detik.

3. Pemeriksaan Gaya Geser Dasar

Berdasarkan SNI 1726-2019 Pasal 7.8.1, gaya geser dasar seismik ditentukan dengan persamaan berikut:

$$V = C_s \times W \dots \dots \dots (2.10)$$

Keterangan:

V : Gaya geser dasar

C_s : Koefisien respon seismik

W : Berat seismik efektif

Apabila hasil dari perhitungan periode fundamental lebih dari nilai periode maksimum, maka periode maksimum harus digunakan sebagai pengganti dari T dalam arah tersebut. Kombinasi respon untuk geser dasar ragam (V_t) lebih kecil dari geser dasar yang dihitung (V) menggunakan prosedur gaya lateral ekuivalen, maka gaya harus dikalikan dengan V/V_t . Untuk menentukan nilai C_s dapat menggunakan persamaan berikut:

$$C_s = \frac{SDS}{\left(\frac{R}{T}\right)} \dots \dots \dots (2.11)$$

Nilai C_s tidak diperkenankan untuk melebihi persamaan berikut:

Untuk $T \leq T_L$

$$C_s = \frac{SD1}{T\left(\frac{R}{T}\right)} \dots \dots \dots (2.12)$$

Untuk $T \geq T_L$

$$C_s = \frac{SD1.TL}{T.T\left(\frac{R}{T}\right)} \dots \dots \dots (2.13)$$

C_s tidak kurang dari:

$$C_s = 0,044 S_{DS} \times I_e \geq 0,01 \dots \dots \dots (2.14)$$

Untuk struktur yang berlokasi di daerah dengan nilai $S_1 \geq 0,6$ g, maka nilai

C_s tidak diperkenankan kurang dari persamaan berikut:

$$C_s = \frac{0,5 S_1}{\left(\frac{R}{T}\right)} \dots \dots \dots (2.15)$$

Keterangan:

S_{DS} : Parameter percepatan respon spektrum desain dalam rentang periode pendek.

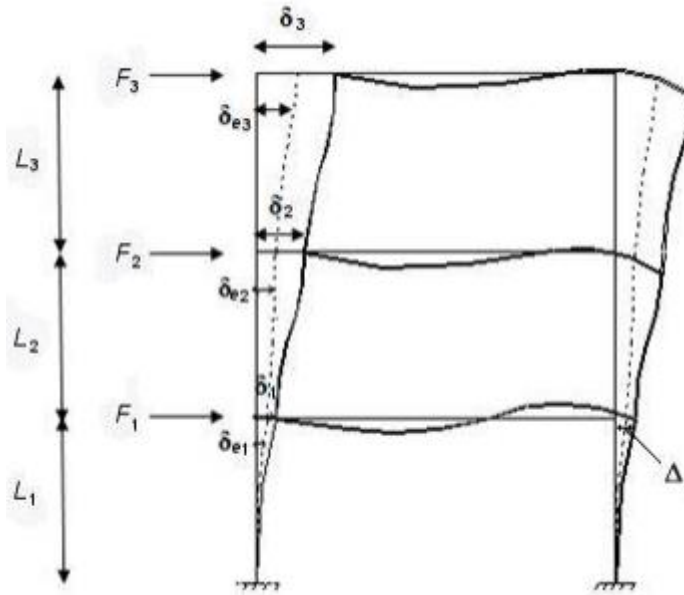
R : Koefisien modifikasi respon.

I_e : Faktor keutamaan gempa.

C_s : Koefisien respon seismik.

4. Pemeriksaan Simpangan Antar Tingkat

Pemeriksaan simpangan dilakukan supaya dapat mengetahui kinerja batas layan dan batas ultimit struktur gedung. Apabila simpangan antar tingkat melebihi taraf pembebanan gempa yang menyebabkan pelelehan pertama, maka dapat mengurangi kenyamanan penghunian dan besar kemungkinan terjadinya kerusakan pada struktur akibat pelelehan baja dan keretakan beton yang berlebihan, maupun kerusakan non struktur. Dalam analisis simpangan antar tingkat harus dihitung sebagai perbedaan simpangan pada pusat massa di atas dan di bawah tingkat yang ditinjau. Apabila pusat massa tidak segaris dalam arah vertikal, maka diizinkan untuk menghitung simpangan di dasar tingkat berdasarkan proyeksi vertikal dari pusat massa tingkat di atasnya. Penentuan simpangan antar tingkat dapat dilihat pada Gambar 2.4.



Gambar 2.4. Penentuan Simpangan Antar Tingkat. (Sumber; SNI 1726-2019)

Adapun penjelasan penentuan simpangan antar tingkat dari gambar 2.4. sebagai berikut:

F_1, F_2, F_3 = Gaya gempa desain tingkat kekuatan

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

$\delta_1, \delta_2, \delta_3$ = $C_d \times \delta_e / I_e$(2.16)
= Perpindahan yang diperbesar

Δ_1 = $\delta_1 \leq \Delta_o$(2.17)

Δ_2 = $(\delta_{e2} - \delta_{e1}) C_d / I_e \leq \Delta_o$(2.18)

Δ_3 = $(\delta_{e3} - \delta_{e2}) C_d / I_e \leq \Delta_o$(2.19)

Keterangan:

Δ_1 = Simpangan antar tingkat.

Δ_i / L_i = Rasio simpangan antar tingkat.

Δ_i = Perpindahan total.

Adapun nilai dari simpangan antar tingkat dihitung dengan aplikasi program bantu analisis struktur, untuk batasan simpangan antar tingkat dapat dilihat pada Tabel 2.10.

Setelah itu simpangan dapat dinyatakan dengan menggunakan rumus yang telah diatur pada SNI 1726-2019 Pasal 7.12.3, adapun rumusnya sebagai berikut:

$$\delta_x = \frac{C_d \cdot \delta_{max}}{I_e} \dots \dots \dots (2.20)$$

Keterangan:

δ_x : Simpangan di tingkat x

δ_{max} : Perpindahan elastik maksimum pada lokasi kritis

C_d : Faktor pembesaran simpangan lateral

Tabel 2.10. Batasan Simpangan Antar Tingkat

Struktur	Kategori Risiko		
	I atau II	III	IV
Struktur, selain dari struktur dinding geser batu bata, 4 tingkat atau kurang dengan dinding interior, pratisi, 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}
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)

2.8. Faktor Reduksi Kekuatan

Berdasarkan SNI 2847-2019 Pasal 22.1.3, dalam menghitung kuat rencana pada penampang dengan cara mengalikan kuat nominal dan faktor reduksi kekuatan (ϕ). Adapun besaran nilai faktor reduksi kekuatan dapat dilihat pada Tabel 2.11.

Tabel 2.11. Faktor Reduksi Kekuatan

Gaya atau elemen struktur	ϕ	Pengecualian
a) Momen, gaya aksial, atau kombinasi momen dan gaya aksial	0,65 – 0,90	Di dekat ujung komponen pratarik (<i>pretension</i>) dimana <i>strand</i> belum sepenuhnya bekerja, ϕ harus sesuai dengan 21.2.3
b) Geser	0,75	Persyaratan tambahan untuk struktur tahan gempa terdapat pada 21.2.4
c) Torsi	0,75	-

(Sumber: SNI 2847-2019)

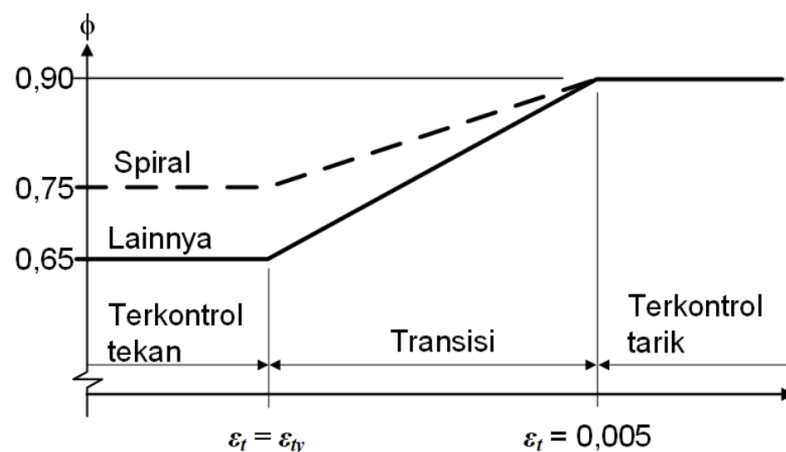
Adapun faktor reduksi kekuatan (ϕ) untuk momen, gaya aksial, atau kombinasi momen dan gaya aksial berdasarkan SNI 2847-2019 Pasal 21.2.2, disajikan dalam Tabel 2.12.

Tabel 2.12. Faktor reduksi kekuatan (ϕ) untuk momen, gaya aksial, atau kombinasi momen dan gaya aksial

No	Regangan tarik netto	Klasifikasi	ϕ	
			Jenis tulangan transversal	
			Spiral	Tulangan lain
1	$\varepsilon_t \leq \varepsilon_{ty}$	Tekanan terkontrol	0,75	0,65
2	$\varepsilon_{ty} < \varepsilon_t < 0,005$	Transisi	$0,75 + 0,15 \frac{\varepsilon_t - \varepsilon_{ty}}{0,05 - \varepsilon_{ty}}$	$0,65 + 0,25 \frac{\varepsilon_t - \varepsilon_{ty}}{0,05 - \varepsilon_{ty}}$
3	$\varepsilon_t \geq 0,005$	Tegangan terkontrol	0,90	0,90

(Sumber: SNI 2847-2019)

Adapun nilai kekuatan nominal elemen struktur yang mengalami momen dan gaya aksial ditentukan oleh kondisi dimana regangan dalam serat tekan terjauh sama dengan 0,003. Regangan tarik netto (ε_t) merupakan regangan tarik dalam tulangan tarik terjauh pada kekuatan nominal. Regangan tarik netto dalam tulangan tarik terjauh diperoleh berdasarkan hasil perbandingan regangan dalam serat tekan terjauh. Adapun variasi nilai faktor reduksi kekuatan (ϕ) regangan tarik netto pada tulangan tarik terjauh dapat dilihat pada Gambar 2.5.



Gambar 2.5. Nilai faktor reduksi kekuatan (ϕ) regangan tarik netto pada tulangan tarik terjauh (Sumber: SNI 2847-2019)

2.9. Evaluasi Kekuatan Struktur

Dalam dunia konstruksi evaluasi kekuatan struktur dilakukan untuk mengetahui dan menilai kelayakan struktur bangunan terhadap beban-beban yang berkerja pada suatu struktur. Evaluasi digunakan untuk menganalisis pengaruh gempa terhadap struktur gedung, sehingga dapat mengetahui risiko yang akan terjadi akibat beban gempa. Berdasarkan SNI 2847-2019 Pasal 4.6.2, kekuatan rencana pada semua penampang harus memenuhi $\phi S_n \geq U$ untuk memenuhi nilai kelayakan dan keamanan pada struktur.

2.9.1. Asumsi-Asumsi dalam Perhitungan

Berdasarkan SNI 2847-2019, adapun asumsi-asumsi desain yang digunakan dalam melakukan perhitungan kekuatan momen aksial dan lentur.

1. Kekuatan lentur dan aksial elemen struktur harus memenuhi persyaratan kesetimbangan dan kompatibilitas regangan.
2. Asumsi desain untuk beton:
 - a. Regangan maksimum untuk serat tekan terjauh pada beton diasumsikan sama dengan 0,003. (SNI 2847-2019 Pasal 22.2.2.1)
 - b. Tegangan beton $0,85f_c'$ diasumsikan terdistribusi rata terhadap zona tekan ekuivalen yang dibatasi ujung penampang dan garis yang paralel terhadap sumbu netral, yang terletak pada jarak a dari serat tekan terjauh, sesuai dengan persamaan berikut:

$$a = \beta_1 \times c \dots \dots \dots (2.20)$$
 - c. Nilai β_1 ditentukan berdasarkan mutu beton yang digunakan. Adapun nilai β_1 dapat dilihat dalam Tabel 2.13.

Tabel 2.13. Nilai β_1 untuk Distribusi Tegangan Beton Ekuivalen

No	f_c' (MPa)	β_1
1	$17 \leq f_c' \leq 28$	0,85
2	$28 < f_c' < 55$	$0,85 - \frac{0,05(f_c' - 28)}{7}$
3	$f_c' \geq 55$	0,65

(Sumber: SNI 2847-2019)

3. Tegangan pada tulangan yang nilainya dibawah dari kuat leleh f_y , maka harus diambil sebesar Es dikalikan regangan baja. Untuk regangan yang nilainya lebih besar dari regangan leleh yang menyebabkan f_y , maka tegangan harus dianggap tidak terpengaruh dengan regangan dan nilainya diambil sama dengan f_y . (SNI 2847-2019 Pasal 20.2.2.1)
4. Berdasarkan SNI 2847-2019 Pasal 20.2.2.2, Modulus elastisitas baja diambil sebesar 200000 MPa.

2.9.2. Evaluasi Struktur Pelat

Dalam perencanaan pelat, ketebalan pelat lantai merupakan aspek penting. Adapun ketebalan minimum pelat dapat dilihat pada Tabel 2.14.

Tabel 2.14. Ketebalan Minimum Pelat Dua Arah dengan Balok Diantara Tumpuan pada Semua Sisinya

αm	h minimum (mm)		
$\alpha m \leq 2,0$	8.3.1.1 berlaku	a	
$0,2 < \alpha m \leq 2,0$	Terbesar dari:	$\frac{\ln(0,8 + \frac{f_y}{1400})}{36 + 5\beta(\alpha m - 2)}$	b
		125	c
$\alpha m > 0,2$	Terbesar dari:	$\frac{\ln(0,8 + \frac{f_y}{1400})}{36 + 9\beta}$	d
		90	e

(Sumber: SNI 2847-2019)

Evaluasi pada elemen struktur pelat bertujuan untuk mengetahui momen lentur yang berkerja pada pelat dan mengevaluasi kapasitas tulangan pelat yang telah terpasang.

2.9.3. Evaluasi Struktur Balok

Dalam desain penulangan balok menggunakan konfigurasi tulangan rangkap sehingga metode perhitungan kapasitas lentur akan dianalisis sesuai metode tulangan rangkap, dan untuk evaluasi kapasitas balok terhadap geser akan

dianalisis sesuai dengan kondisi penampang pada persyaratan mengenai desain tulangan geser.

1. Analisis Kapasitas Balok Terhadap Lentur

Kapasitas nominal penampang balok dihitung dengan prinsip keseimbangan gaya yaitu:

$$M_n = M_{n1} + M_{n2} \dots \dots \dots (2.21)$$

Untuk balok persegi kapasitas momen nominal penampang dapat dihitung dengan persamaan berikut:

$$M_{n1} = 0,85 \times f_c' \times a \times b \dots \dots \dots (2.22)$$

$$M_{n2} = A_s' \times f_y \times (d - d') \dots \dots \dots (2.23)$$

Sehingga kapasitas nominal penampang dapat dinyatakan dalam persamaan berikut:

$$M_n = 0,85 \times f_c' \times a \times b + A_s' \times f_y \times (d - d') \dots \dots \dots (2.24)$$

Untuk menjamin keamanan struktur ditinjau dari aspek kekuatan, maka disyaratkan kapasitas momen nominal harus lebih besar dari kombinasi momen luar yang berkerja (momen ultimit).

2. Analisis Kapasitas Balok Terhadap Geser

Kekuatan geser nominal pada penampang yang bertulangan geser merupakan hasil penjumlahan dari kekuatan geser beton dan kekuatan geser sengkang, dengan persamaan berikut:

$$V_n = V_c + V_s \dots \dots \dots (2.25)$$

Nilai V_c untuk komponen non prategang tanpa gaya aksial dan nilai kekuatan geser tulangan dapat dihitung dengan persamaan sebagai berikut:

$$V_c = 0,17 \times \lambda \times \sqrt{f_c'} \times b_w \times d \dots \dots \dots (2.26)$$

$$V_s = \frac{V_s \times s}{f_y \times d} \dots \dots \dots (2.27)$$

Untuk komponen yang terkena beban gempa, analisis geser pada balok dilakukan berdasarkan hasil peninjauan analisa struktur terhadap gaya-gaya maksimum yang dihasilkan di setiap ujung komponen struktur, sehingga reaksi gaya geser akibat sendi plastis di ujung balok dihitung dengan persamaan berikut:

$$V_{sway} = \frac{M_{pr1} \times M_{pr2}}{l_n} \dots \dots \dots (2.28)$$

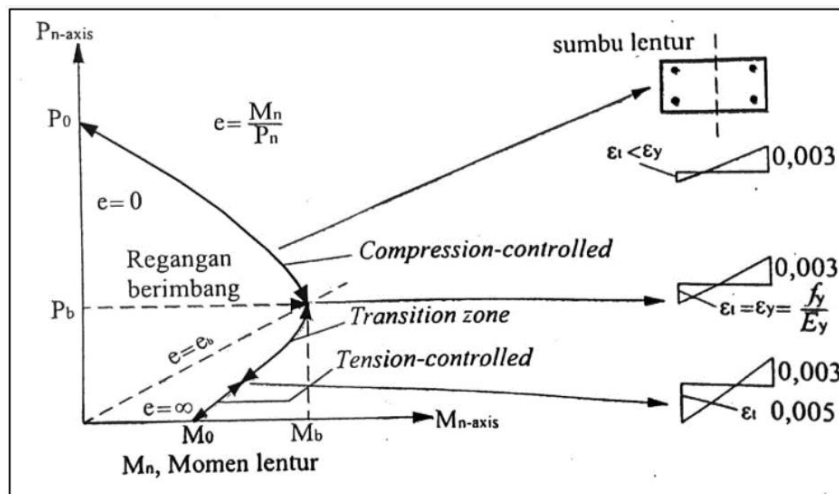
3. Tulangan Torsi

Evaluasi kekuatan torsi dilakukan untuk menjamin kekuatan torsi desain harus sama dengan atau lebih dari momen torsi T_u akibat beban terfaktor. Penggunaan tulangan torsi akan dibutuhkan apabila memenuhi persyaratan berikut:

$$T_u \geq \phi 0,083 \times \lambda \times \sqrt{f'c} \left(\frac{A_{cp} \times A_{cp}}{P_{cp}} \right) \dots \dots \dots (2.29)$$

2.9.4. Evaluasi Struktur Kolom

Kapasitas kolom ditentukan dengan diagram interaksi yang memberikan beban runtuh dan momen runtuh dari suatu penampang kolom, untuk setiap nilai eksentrisitas nol sampai tak hingga. Eksentrisitas yang kecil akan menghasilkan keruntuhan yang ditentukan oleh luluhnya tulangan tarik. Bagian-bagian diagram interaksi dapat dilihat pada Gambar 2.6.



Gambar 2.6. Diagram Interaksi Kolom. (Sumber:Arifin, 2021)

Dalam diagram interaksi memiliki tiga titik acuan utama yaitu kondisi tekan murni, kondisi *balance*, dan kondisi lentur murni. Adapun penjelasannya sebagai berikut:

1. Kondisi Tekan Murni

Kondisi tekan murni adalah kondisi dimana beban aksial maksimum yang dapat ditopang oleh struktur kolom tanpa adanya beban momen yang bekerja pada

waktu yang sama. Adapun nilai kekuatan aksial maksimum berdasarkan SNI 2847-2019 Pasal 22.4.2.1, dapat dilihat pada Tabel 2.15.

Tabel 2.15. Kekuatan Aksial Maksimum

No	Komponen	Tulangan Transversal	Pn max
1	Non Prategang	Sengkang persegi	0,80 Po
2		Sengkang spiral	0,85 Po
3	Prategang	Sengkang persegi	0,80 Po
4		Sengkang spiral	0,85 Po
5	Kolom komposit dan kolom beton	Semua	0,85 Po

(Sumber: SNI 2847-2019)

Adapun nilai kekuatan aksial nominal (P_o) dapat ditentukan menggunakan persamaan berikut:

$$P_o = 0,85f_c'(A_g - A_{st}) + f_y \times A_{st} \dots \dots \dots (2.30)$$

2. Kondisi *Balance*

Kondisi *balance* adalah kondisi dimana kapasitas momen nominal maksimum yang dapat ditahan suatu kolom dengan beban aksial yang bekerja pada waktu yang sama. Kondisi *balance* diperhitungkan saat diagram tegangan dan regangan berkerja pada garis netral penampang kolom.

3. Keruntuhan Tekan

Pada keruntuhan tekan, beton pada bagian tekan akan runtuh terlebih dahulu sedangkan baja tulangan tarik belum leleh. Keruntuhan tekan terjadi apabila gaya tekan lebih besar dari gaya tekan pada kondisi seimbang dan nilai eksentrisitas lebih kecil dari eksentrisitas kondisi seimbang.

Dalam kondisi ini, sebagian besar penampang beton akan berada pada kondisi tekan. Sumbu netral berada dekat dengan tulangan tarik, maka luas daerah tekan beton semakin luas dan jarak sumbu netral dari serat tekan beton akan melebihi jarak pada kondisi seimbang ($c > c_b$).

4. Keruntuhan Tarik

Pada keruntuhan tarik, baja tulangan akan mengalami leleh terlebih dahulu. Hal ini terjadi karena kolom mendapat beban tekan eksentris dengan eksentrisitas yang besar, sehingga kuat tekan nominal penampang lebih kecil dari kuat nominal

kondisi seimbang dan eksentrisitas lebih besar dari eksentrisitas pada kondisi seimbang.

5. Kondisi Lentur Murni

Kondisi lentur murni merupakan kondisi beban momen maksimum yang dapat ditahan oleh penampang kolom, tanpa adanya beban aksial yang bekerja pada waktu yang sama. Dalam kondisi ini, tulangan tekan dapat diabaikan sehingga persamaannya menjadi $C = T$, sehingga kapasitas tekan aksial kolom sebesar 0.

2.10. Sistem Rangka Pemikul Momen

Sistem rangka pemikul momen merupakan suatu sistem rangka yang terdiri dari struktur kolom dan struktur balok yang mampu menahan beban lateral dan beban gravitasi. Berdasarkan SNI 2847-2019, sistem rangka pemikul momen terbagi menjadi Sistem Rangka Pemikul Momen Biasa (SRPMB), Sistem Rangka Pemikul Momen Menengah (SRPMM), dan Sistem Rangka Pemikul Momen Khusus (SRPMK) yang ditentukan berdasarkan nilai kategori desain seismik (KDS).

2.10.1. Sistem Rangka Pemikul Momen Biasa (SRPMB)

Sistem rangka pemikul momen biasa merupakan sistem struktur yang mampu menahan beban lateral yang rendah hingga sedang. Adapun persyaratan sistem rangka pemikul momen biasa pada struktur yaitu:

1. Syarat Struktur Balok SRPMB

Adapun persyaratan pada struktur balok SRPMB adalah sebagai berikut:

- a. Balok harus memiliki minimal 2 tulangan longitudinal yang menerus pada kedua sisi atas dan bawah.
- b. Luas tulangan bawah yang menerus tidak diperbolehkan kurang dari seperempat luas maksimum tulangan bawah.
- c. Tulangan harus diangkur untuk dapat mencapai kekuatan leleh tarik tulangan pada muka tumpuan.

2. Syarat Struktur Kolom SRPMB

Persyaratan sistem rangka pemikul momen biasa pada struktur kolom yang mempunyai panjang tak terumpu harus memiliki gaya geser rencana (ϕV_n) dari nilai terendah sebagai berikut:

- a. Gaya geser yang terjadi akibat kekuatan lentur tertingi pada kolom.
- b. Gaya geser maksimum yang diperoleh dari kombinasi beban desain.

2.10.2. Sistem Rangka Pemikul Momen Menengah (SRPMM)

Sistem rangka ini merupakan sistem struktur yang digunakan untuk menahan risiko gempa menengah hingga tinggi. Adapun syarat pada SRPMM yaitu:

1. Syarat Struktur Balok SRPMM

Adapun persyaratan pada balok SPRMM sebagai berikut:

- a. Kekuatan momen positif minimal kurang dari sepertiga kekuatan momen negatif pada muka *joint*.
- b. Kekuatan momen positif atau kekuatan momen negatif sepanjang bentang tidak boleh kurang dari seperlima kekuatan momen maksimum pada muka salah satu *joint*.
- c. Nilai gaya geser rencana (ϕV_n) diperoleh dari nilai terendah sebagai berikut:
 - 1) Penjumlahan gaya geser akibat momen lentur pada muka *joint* dengan gaya geser akibat beban gravitasi terfaktor.
 - 2) Gaya geser maksimum yang diperoleh dari kombinasi beban desain.
- d. Spasi tulangan transversal harus memenuhi syarat-syarat jarak minimal sebagai berikut:
 - 1) $d/4$
 - 2) $8D$ longitudinal
 - 3) $24D$ transversal
 - 4) 300 mm
- e. Spasi tulangan transversal tidak diperbolehkan lebih dari $d/2$ sepanjang bentang balok.

2. Syarat Struktur Kolom SRPMM

Adapun persyaratan sistem rangka pemikul momen biasa pada struktur kolom sebagai berikut:

- a. Syarat minimal panjang yang diukur dari muka *joint* (l_0), yaitu:
 - 1) $1/6$ tinggi bersih kolom
 - 2) Dimensi maksimum penampang kolom
 - 3) 450 mm
- b. Syarat minimal spasi tulangan transversal sepanjang l_0 , yaitu:
 - 1) 8D longitudinal
 - 2) 24D transversal
 - 3) $1/2$ dimensi penampang kolom
 - 4) 300 mm

2.10.3. Sistem Rangka Pemikul Momen Khusus (SRPMK)

Struktur rangka pemikul momen khusus adalah suatu sistem struktur yang didesain mampu untuk menahan beban gempa yang tinggi. Adapun syarat-syarat struktur balok dan kolom dengan sistem rangka pemikul momen khusus adalah sebagai berikut:

1. Syarat Struktur Balok SRPMK

Adapun beberapa persyaratan untuk balok sistem rangka pemikul momen khusus, antara lain:

a. Persyaratan Umum

Komponen lentur yang merupakan bagian dari SRPMK harus memenuhi kriteria yang ditetapkan dalam SNI 2847-2019 yaitu:

- 1) Gaya tekan aksial terfaktor (P_u) tidak lebih dari $A_g \times f_c' / 10$.
- 2) Panjang bentang bersih l_n , harus lebih besar daripada 4 kali tinggi efektif ($l_n \geq 4d$).
- 3) Lebar komponen, b_w tidak boleh kurang dari yang lebih kecil dari $0,3h$ dan 250 mm.

- 4) Lebar penampang, b_w tidak boleh melebihi lebar kolom pendukung ditambah nilai terkecil dari lebar kolom atau $\frac{3}{4}$ kali dimensi kolom dalam arah sejajar komponen lentur.

b. Persyaratan Tulangan Lentur

- 1) Syarat rasio minimal luasan tulangan lentur pada sisi atas dan sisi bawah kolom harus memenuhi persamaan sesuai SNI 2847-2019 Pasal 9.6.1.2 berikut:

- $A_s \geq \frac{\sqrt{f_c'}}{4f_y} \times b \times d$
- $A_s \geq \frac{1,4}{4f_y} \times b \times d$

- 2) Kuat lentur positif komponen struktur pada muka kolom tidak boleh lebih kecil dari setengah kuat lentur negatifnya.
- 3) Syarat rasio maksimum tulangan lentur adalah sebesar 0,025.
- 4) Kuat lentur negatif maupun positif pada penampang di sepanjang bentang balok tidak boleh kurang dari $\frac{1}{4}$ kuat lentur pada kedua muka kolom tersebut.

c. Persyaratan Tulangan Transversal

- 1) Memenuhi SNI 2847-2019 Pasal 21.6.4.3, spasi tulangan transversal harus memenuhi syarat-syarat jarak minimal sebagai berikut:

- 1) $d/4$
- 2) $6d_b$
- 3) 150 mm

- 2) Tulangan sengkang sistem rangka pemikul momen khusus harus didesain untuk memikul gaya geser rencana (V_e), yang ditimbulkan oleh kuat lentur maksimum dengan arah yang berlawanan pada kedua ujung muka tumpuan, pada saat yang bersamaan, selain itu, komponen struktur itu juga diharuskan untuk menahan gaya gravitasi terfaktor yang bekerja di sepanjang komponen lentur.
- 3) Kuat geser yang dipikul oleh beton (V_c) dapat diambil sama dengan nol apabila gaya geser yang ditimbulkan oleh gaya gempa lebih besar daripada 50% dari kuat geser perlu pada sepanjang bentang,

serta apabila terdapat gaya aksial terfaktor akibat gaya gempa besarnya kurang dari $A_g \times f_c' / 20$.

2. Syarat Struktur Kolom SRPMK

Adapun persyaratan untuk struktur kolom sistem rangka pemikul momen khusus sebagai berikut:

a. Persyaratan Dimensi

Berdasarkan SNI 2847-2019 Pasal 18.7.2.1, dimensi kolom terkecil harus lebih besar dari 300 mm, serta rasio dimensi terpendek dengan yang terpanjang harus lebih besar dari 0,4.

b. Persyaratan Tulangan Lentur

1) Berdasarkan SNI 2847-2019 Pasal 18.7.4, luas tulangan longitudinal tidak boleh kurang dari 1% A_g dan tidak boleh lebih dari 6% A_g .

2) Berdasarkan SNI 2847-2019 18.7.3, kekuatan lentur minimum kolom harus memenuhi syarat: $\sum M_{nc} \geq (1,2) \sum M_{nb}$.

c. Persyaratan Tulangan Transversal

Berdasarkan SNI 2847-2019 Pasal 18.7.5.3, spasi tulangan transversal tidak melebihi nilai terkecil dari sebagai berikut:

1) $\frac{1}{4}$ dimensi terkecil penampang kolom

2) 6 diameter tulangan utama terkecil

3) $S_o = 100 + \left(\frac{350-hx}{3}\right)$, nilai S_o harus kurang dari 150 mm dan lebih dari 100 mm.

III. METODOLOGI PENELITIAN

3.1. Pendekatan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah membandingkan hasil evaluasi kekuatan struktur bangunan bertingkat akibat pengaruh beban gempa dan tanpa pengaruh beban gempa menggunakan metode analisis dinamik respon spectrum. Maka dari itu, pendekatan penelitian yang digunakan yaitu pendekatan kuantitatif, karena dalam penarikan kesimpulan dirumuskan berdasarkan hasil analisis berupa data-data numerik.

3.2. Objek Penelitian

Adapun objek penelitian Gedung Laboratorium Olimpiade Sains Terpadu MAN Insan Cendikia yang berkoordinat $6^{\circ}19'33''$ LS, $106^{\circ}50'42''$ BT dan berada di BSD Sektor XI Jl. Cendikia, Ciater, Kec. Serpong, Kota Tangerang Selatan, Banten. Lokasi objek dapat dilihat pada Gambar 3.1.

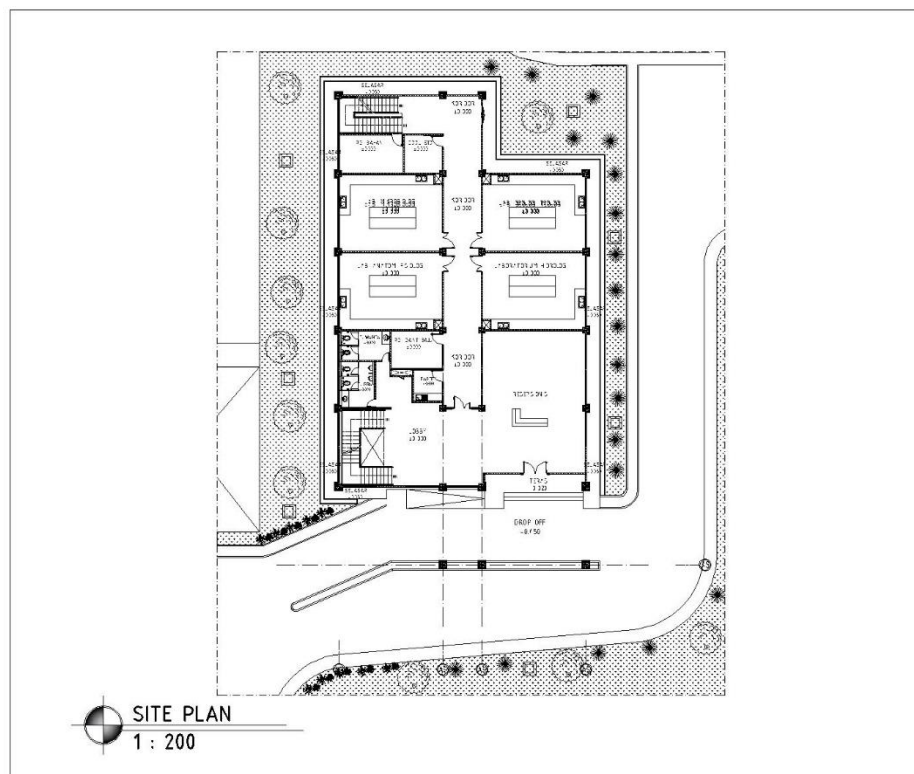


Gambar 3.1. Objek Penelitian. (Sumber: Google Maps, 2022)

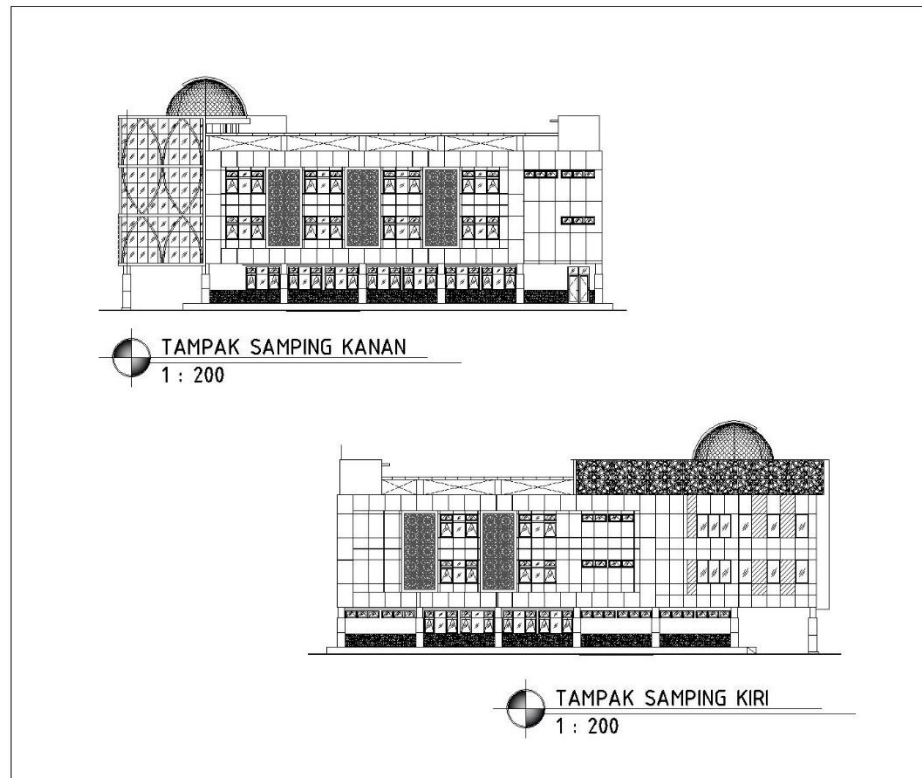
3.3. Data Penelitian

Adapun Gedung Laboratorium Olimpiade Sains Terpadu Man Insan Cendikia, Serpong yang digunakan sebagai studi kasus pada penelitian ini merupakan bangunan yang berfungsi sebagai gedung sekolah. Data yang didapatkan untuk keperluan penelitian merupakan jenis data kuantitatif yang diperoleh dari kontraktor pelaksana. Pengumpulan data dan informasi Gedung Laboratorium Olimpiade Sains Terpadu Man Insan Cendikia, Serpong yang diteliti, baik data primer maupun data sekunder. Data yang didapat adalah data tanah dan gambar rencana Gedung Laboratorium Olimpiade Sains Terpadu Man Insan Cendikia, Serpong. Data ini digunakan untuk pemodelan struktur yang selanjutnya dianalisis menggunakan bantuan program analisis struktur.

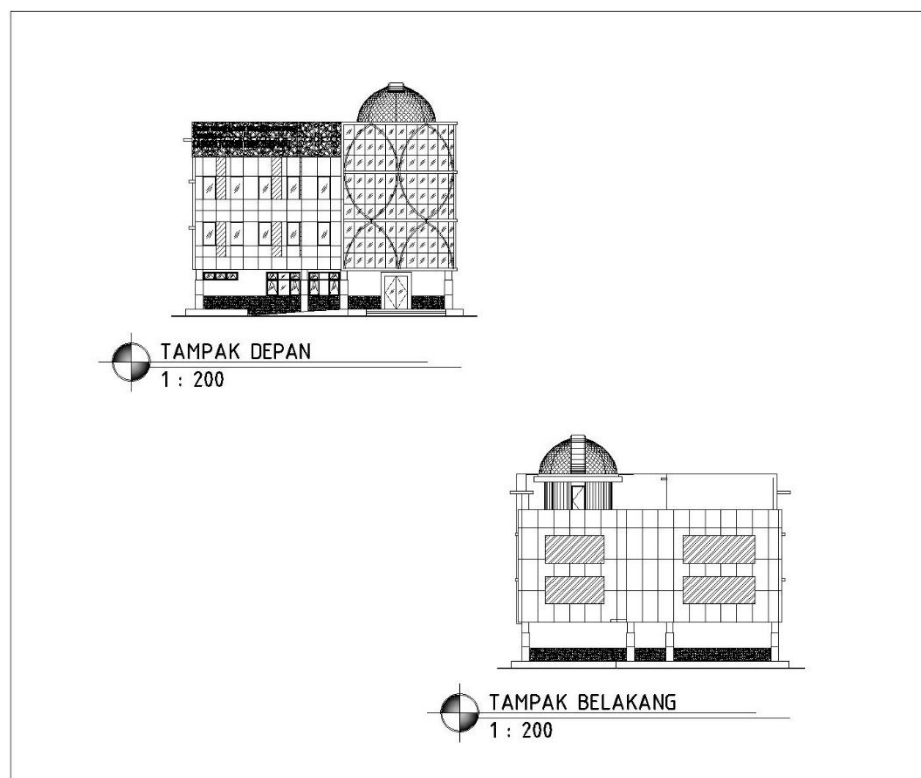
Adapun gambar gambar *site plan*, tampak samping kanan dan kiri, dan tampak depan dan belakang gedung disajikan pada Gambar 3.2, Gambar 3.3, dan Gambar 3.4.



Gambar 3.2. *Site Plan*.



Gambar 3.3. Tampak Samping Kanan dan Samping Kiri Gedung



Gambar 3.4. Tampak Depan dan Belakang Gedung.

Adapun data-data yang menunjang penelitian pada Gedung Laboratorium Olimpiade Sains Terpadu Man Insan Cendikia, Serpong adalah sebagai berikut:

3.3.1. Luas Bangunan

Adapun luas bangunan pada Gedung Laboratorium Man Insan Cendikia, Serpong $\pm 2304 \text{ m}^2$ dan luas lahan $\pm 963,56 \text{ m}^2$. Bangunan tersusun 4 lantai dengan luasan per lantai sebagai berikut:

1. Luas lantai 1 = 540 m^2
2. Luas lantai 2 = 588 m^2
3. Luas lantai 3 = 588 m^2
4. Luas lantai 4 = 588 m^2

3.3.2. Elevasi Bangunan

Adapun data elevasi bangunan dan tinggi bangunan pada Gedung Laboratorium Olimpiade Sains Terpadu Man Insan Cendikia, Serpong disajikan pada Tabel 3.1.

Tabel 3.1. Data Elevasi Bangunan

No.	Lantai	Elevasi Tiap Lantai (m)	Tinggi bangunan (m)
1.	Lantai 1	+0,0	0,0
2.	Lantai 2	+4,0	4,0
3.	Lantai 3	+7,5	3,5
4.	Lantai 4	+11,0	3,5
5.	Atap Dak	+14,3	3,3
6.	Kubah	+17,3	3,0

3.3.3. Struktur Balok

Struktur balok yang digunakan adalah beton bertulangan dengan mutu beton K-300. Adapun jenis balok dan rincian penulangan pada struktur balok disajikan pada Tabel 3.2.

Tabel 3.2. Penulangan Balok

No	Tipe Balok	Dimensi (mm)	Tumpuan			Lapangan		
			Atas	Bawah	Senggang	Atas	Bawah	Senggang
5.	B1.1	400x700	7D19	6D19	D10-100	4D19	6D19	D10-150
6.	B1.2	400x700	8D19	6D19	D10-100	4D19	6D19	D10-150
7.	B2.1	350x600	4D19	3D19	D10-100	3D19	4D19	D10-150
8.	B2.2	350x600	4D19	4D19	D10-100	4D19	4D19	D10-150
9.	B3.1	300x500	3D19	3D19	D10-100	3D19	3D19	D10-150
10.	B3.2	300x500	5D19	3D19	D10-100	3D19	5D19	D10-150
11.	B4.1	300x500	5D16	3D16	D10-100	3D16	5D16	D10-150
12.	B4.2	300x500	6D16	3D16	D10-100	3D16	6D16	D10-150

3.3.4. Struktur Kolom

Jenis kolom yang digunakan yaitu kolom persegi, kolom persegi panjang, dan kolom bulat. Material yang digunakan pada kolom adalah beton bertulangan dengan mutu beton K-300 dan tulangan yang dipakai yaitu tulangan ulir dengan ketebalan selimut beton sebesar 5 cm. Adapun rincian dalam penulangan pada kolom dapat dilihat pada Tabel 3.3.

Tabel 3.3. Penulangan Kolom

No	Tipe Kolom	Dimensi (mm)	Tulangan memanjang	Tumpuan	Lapangan
1.	K1	500x500	16D22	D10-100	D10-150
2.	K2	300x300	8D13	D10-100	D10-150
3.	K3	300x300	10D13	D10-100	D10-150

3.3.5. Struktur Pelat

Elemen struktur pelat pada Gedung Man Insan Cendikia, Serpong terbagi menjadi pelat satu arah dan pelat dua arah. Adapun penulangan pada struktur pelat dapat dilihat pada Tabel 3.4.

Tabel 3.4. Penulangan Pelat

No.	Tipe Pelat	Tebal (mm)	Tulangan Arah X	Tulangan Arah Y
1.	S1	130 mm	D10-150	D10-150
2.	S2	150 mm	D10-150	D10-150

3.3.6. Data Tanah

Data tanah diperoleh dari hasil uji sondir atau *Cone Penetration Test* (CPT). Data tanah digunakan untuk menentukan jenis tanah pada lokasi yang akan dianalisa untuk desain respon spektra. Situs atau jenis tanah pada setiap daerah memiliki situs yang berbeda-beda, oleh karena itu pengklasifikasian situs merupakan hal yang sangat penting dalam perencanaan bangunan tahan gempa. Dalam perencanaan bangunan tahan gempa, klasifikasi kelas situs digunakan untuk menentukan kategori desain seismik dan parameter respon spektral percepatan gempa terpetakan.

Adapun data yang diperoleh dari hasil uji sondir berupa tekanan konus (q_c) dan hambatan pelekak (f_s), serta korelasi dari data tersebut didapatkan jenis tanah. Data hasil uji sondir disajikan pada Tabel 3.5.

Tabel 3.5. Data Hasil Uji Sondir

No.	Kedalaman (m)	q_c (kg/cm ²)	f_s (kg/cm ³)	Jenis Tanah
1.	1,0	25,20	1,13	Lempung
2.	2,0	8,80	0,51	Lempung
3.	3,0	7,80	0,58	Lempung
4.	4,0	10,80	0,91	Lempung
5.	5,0	6,80	0,58	Lempung
6.	6,0	18,40	0,70	Lempung
7.	6,8	145,50	1,386	Lempung Padat

3.4. Prosedur Penelitian

Metode penelitian yang digunakan pada penelitian ini adalah metode analisis dinamik respon spektrum. Analisis dilakukan dengan bantuan program analisis struktur. Adapun tahapan yang akan dilakukan pada penelitian ini yaitu sebagai berikut.

3.4.1. Studi Literatur

Adapun literatur yang digunakan dalam penelitian ini didapatkan dari beberapa jurnal dan SNI, seperti sebagai berikut:

1. SNI 1726-2019 mengenai Tata Cara Perencanaan Ketahanan Gempa untuk Struktur Bangunan Gedung dan Non Gedung.
2. SNI 2847-2019 mengenai Persyaratan Beton Struktural untuk Bangunan Gedung dan Penjelasan.
3. SNI 1727-2020 mengenai Beban Desain Minimum dan Kriteria Terkait untuk Bangunan Gedung dan Struktur Lain.
4. Beberapa jurnal dan sumber literatur mengenai analisis kekuatan struktur dengan menggunakan metode analisis dinamik respon spektrum.

3.4.2. Pengumpulan Data

Adapun data dan informasi mengenai Gedung Laboratorium Olimpiade Sains Man Insan Cendikia, Serpong ini berupa pengumpulan data primer dan data sekunder. Data yang diperoleh seperti:

1. *As Built Drawing*

As Built Drawing merupakan gambar yang dibuat sesuai dengan kondisi yang ada pada lapangan. Data yang diperoleh dari *As Built Drawing* berupa gambar *site plan*, denah kolom, denah balok, denah pelat lantai, tampak depan, tampak belakang, tampak samping kiri, dan tampak atas. Data ini dibutuhkan untuk pemodelan struktur 3D yang selanjutnya dianalisis dengan bantuan analisis struktur. Dalam melakukan pemodelan struktur 3D harus berdasarkan gambar rencana sehingga meminimalisir kurang tepatnya perhitungan dalam analisis struktur.

2. Data Tanah

Data tanah ini digunakan untuk menentukan jenis kelas situs pada saat analisis struktur terhadap pengaruh beban gempa. Setiap daerah memiliki jenis situs tanah yang berbeda-beda, maka dari itu pengklasifikasian situs perlu dilakukan dalam perencanaan bangunan tahan gempa. Data tanah yang digunakan berupa data hasil *Cone Penetration Test* (CPT) atau uji sondir yang kemudian dikonversi menjadi nilai N-SPT dengan menggunakan nilai tekan perlawanan konus (q_c).

3.4.3. Analisis Data

Analisis data dan informasi yang dilakukan dalam penelitian metode analisis dinamik respon spektrum pada Gedung Laboratorium Olimpiade Sains Terpadu Man Insan Cendikia, Serpong dibutuhkan tahapan-tahapan untuk memudahkan pada saat melakukan analisis data. Adapun tahapan-tahapan yang perlu dilakukan yaitu sebagai berikut:

1. Pemodelan Struktur

Pembentukan model struktur bangunan dengan pemodelan 3D sesuai dengan informasi dan data dari gambar rencana. Tahap awal yang perlu dilakukan dalam pemodelan struktur bangunan adalah memasukkan material dan dimensi struktur sesuai dengan gambar rencana, setelah itu menggambar letak kolom, balok, dan pelat.

2. Perhitungan Pembebanan

Dalam merencanakan struktur bangunan membutuhkan asumsi dan pendekatan beban yang bekerja pada struktur bangunan. Adapun dalam perhitungan pembebanan yang bekerja pada struktur bangunan adalah beban mati, beban hidup, dan beban gempa.

Perhitungan beban mati akibat berat sendiri pada program analisis struktur dimasukkan dalam *load case dead*, sedangkan beban mati tambahan dimasukkan dalam *load case super dead*. Beban mati akibat berat sendiri telah dihitung oleh program secara otomatis, sedangkan untuk beban mati tambahan ditambahkan secara manual sesuai dengan data yang ada.

Perhitungan beban hidup yang ditambahkan dalam program analisis struktur dinotasikan dalam *load case live* dengan *self weight multiplier* 0. Beban hidup ditambahkan secara manual pada *assign shell load* dan besarnya beban hidup yang ditambahkan diperoleh berdasarkan peraturan yang digunakan.

3. Analisis Respon Spektrum

Analisis dinamik respon spektrum digunakan untuk memperoleh kurva respon spektrum dengan bantuan program analisis struktur.

Langkah awal yang dilakukan adalah menentukan data parameter respon seismik struktur berdasarkan lokasi bangunan, fungsi bangunan, jenis tanah, dan

tipe struktur. Dalam parameter respon seismik yang perlu ditentukan adalah kategori resiko struktur, nilai percepatan gempa MCE_R , percepatan spektral, kategori desain struktur, koefisien modifikasi respons (R), faktor kuat lebih sistem (Ω), dan faktor pembesaran defleksi (Cd). Setelah itu data tersebut dimasukkan ke dalam program analisis struktur.

Selanjutnya dalam melakukan pemodelan beban gempa respon spektrum pada program analisis struktur, tahap awal yang perlu dilakukan adalah mendefinisikan *function respon spectrum*, *define load pattern* untuk beban gempa, respon spektrum gempa arah x (U_1) dan arah y (U_2) pada *load case data*, dan *mass source*.

4. Analisis Struktur

Analisis struktur dilakukan menggunakan program analisis struktur dengan tujuan untuk memperkirakan gaya dalam dan deformasi pada struktur, sehingga dapat memastikan terpenuhinya persyaratan kekuatan, kemampuan layan, dan stabilitas. Adapun hasil yang didapatkan dari analisis yaitu *story respons* yang berupa gaya geser dasar, periode fundamental, dan simpangan serta gaya-gaya dalam pada struktur. Setelah itu data tersebut digunakan dalam melakukan perhitungan evaluasi kekuatan struktur.

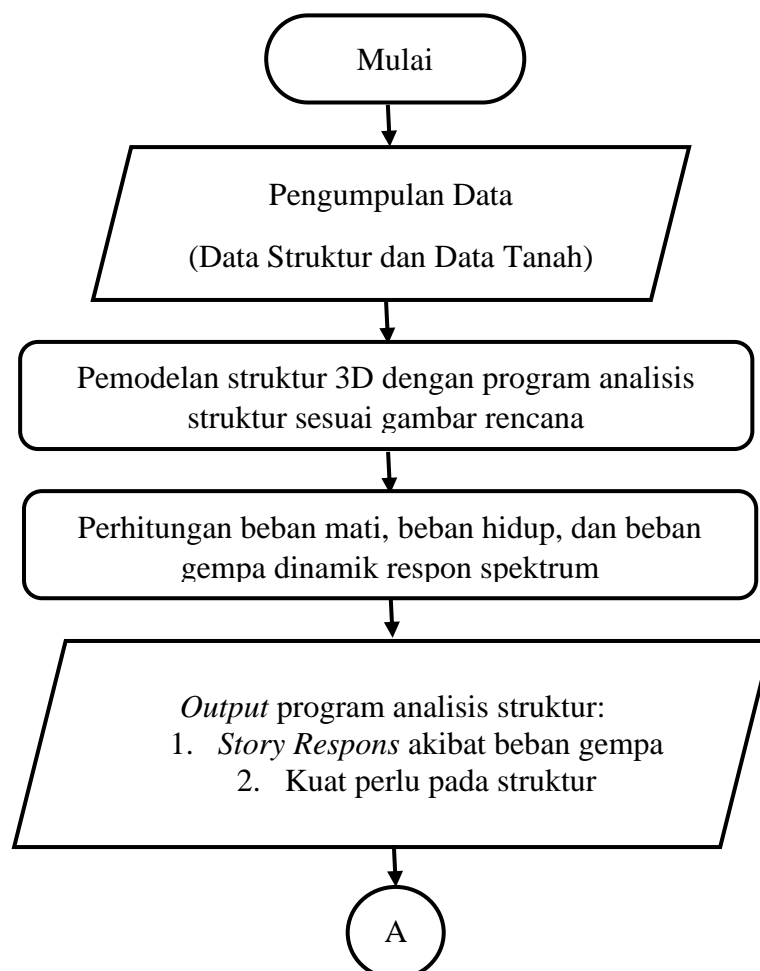
5. Evaluasi Kekuatan Struktur

Evaluasi kekuatan struktur dilakukan untuk mengetahui kelayakan struktur terhadap pengaruh beban gempa. Adapun dalam melakukan evaluasi kekuatan struktur, syarat yang harus terpenuhi adalah kekuatan kapasitas elemen struktur dan stabilitas. Adapun kekuatan kapasitas elemen struktur yaitu kuat kapasitas penampang atau elemen struktur berupa pelat, balok, dan kolom harus melebihi kekuatan minimal yang dibutuhkan elemen struktur tersebut. Evaluasi kuat kapasitas pada struktur pelat dilakukan dengan membedakan jenis pelat satu arah dengan pelat dua arah. Untuk evaluasi pada struktur balok dilakukan peninjauan pada tulangan lentur, tulangan geser, dan tulangan torsi. Sedangkan, dalam melakukan evaluasi pada struktur kolom untuk menentukan kapasitas kolom dibutuhkan diagram interaksi menggunakan *software Structure Point Column* (SP Column).

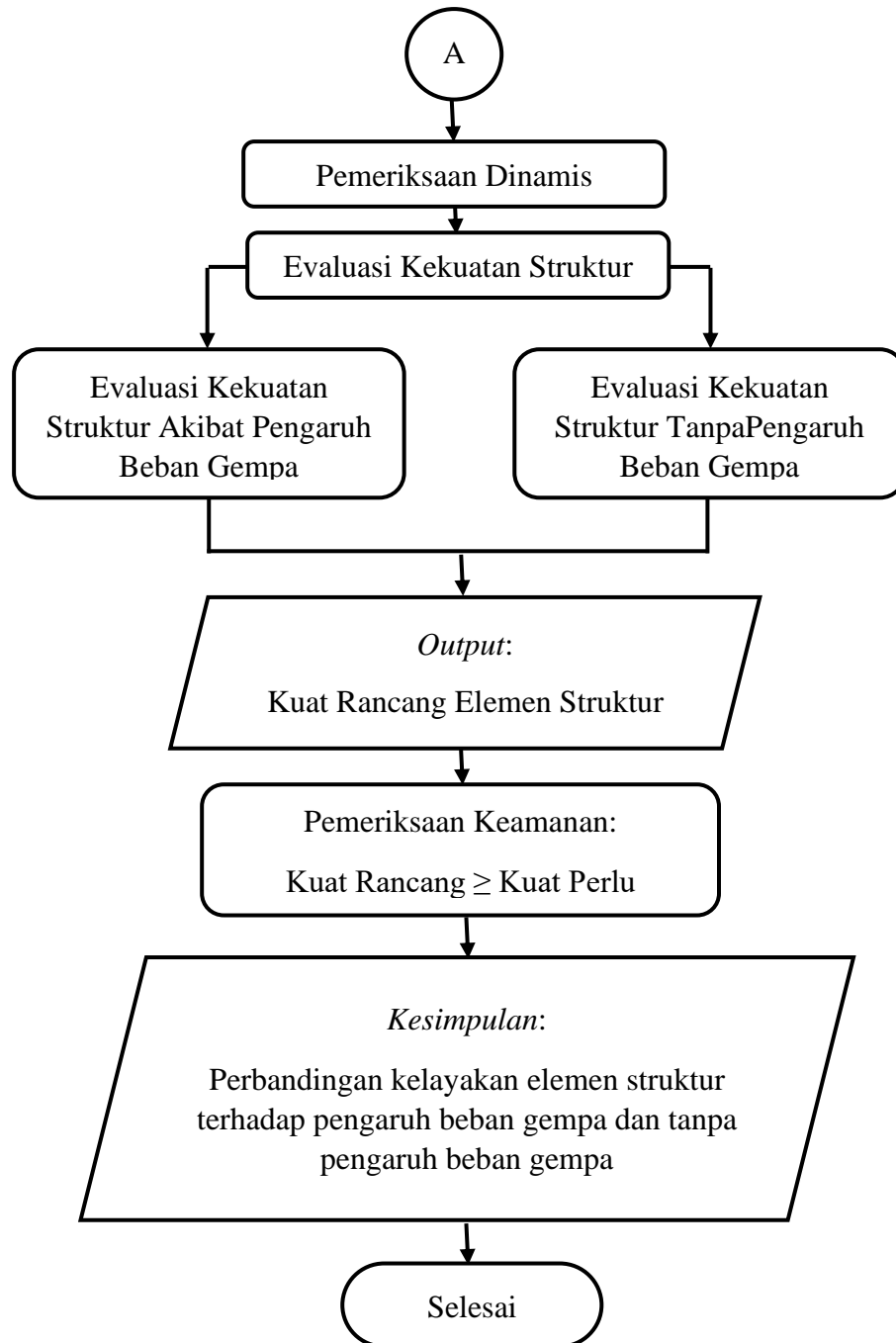
Adapun syarat kedua dalam evaluasi kekuatan struktur adalah kestabilan atau kelayakan elemen struktur dalam menerima pengaruh gaya yang berkerja. Suatu struktur harus memiliki nilai lendutan, retak dan simpangan yang masih berada dalam batas aman. Dalam menerima beban dinamis akibat beban gempa stabilitas struktur ditinjau berdasarkan simpangan antar tingkat, periode getar fundamental struktur, dan syarat-syarat sesuai batas dalam SNI 1726-2019.

3.5. Diagram Alir Penelitian

Adapun langkah-langkah yang dilakukan dalam penelitian ini, dapat dilihat pada *flowchart* yang disajikan dalam Gambar 3.5.



Gambar 3.5. Diagram Alir Penelitian



Gambar 3.5. (Lanjutan)

V. KESIMPULAN DAN SARAN

5.1. Kesimpulan

Berdasarkan evaluasi yang telah dilakukan, maka diperoleh kesimpulan sebagai berikut:

1. Berdasarkan perhitungan beban gempa menggunakan metode analisis dinamik respon spektrum, maka diperoleh hasil pemeriksaan dinamis pada struktur sebagai berikut:
 - a. Rasio partisipasi massa ragam terkombinasi arah X dan arah Y untuk bisa mencapai partisipasi massa 100% yaitu pada *mode* 194.
 - b. Periode fundamental yang diperoleh yaitu 0,665 detik untuk arah X dan 0,686 detik untuk arah Y.
 - c. Gaya geser dasar akibat beban dinamik yang didapatkan sudah lebih besar dari gaya dasar akibat beban statik, sehingga sudah memenuhi persyaratan SNI 1726-2019.
 - d. Berdasarkan SNI 1726-2019 nilai simpangan antar tingkat pada arah X maupun arah Y sudah memenuhi batas izin, sehingga respon dinamis struktur terhadap simpangan antar tingkat memenuhi syarat kelayakan gedung tahan gempa.
2. Berdasarkan perbandingan hasil evaluasi kekuatan pada elemen struktur akibat adanya pengaruh beban gempa dengan akibat tanpa adanya pengaruh gempa, maka diperoleh kesimpulan sebagai berikut:
 - a. Hasil evaluasi pada struktur balok, pada kondisi tanpa pengaruh beban gempa, semua tipe balok memenuhi persyaratan. Sedangkan pada kondisi pengaruh beban gempa, terdapat beberapa tipe balok yang tidak memenuhi persyaratan dikarenakan persentase kuat perlu yang diperoleh

mencapai 101,72% - 119,22% dari kuat yang direncanakan, antara lain yaitu tipe balok B1.1, B1.2, B2.1, B2.2, B3.1, dan B4.1. Maka dari hasil evaluasi tersebut, struktur balok akibat adanya pengaruh beban gempa tidak cukup aman untuk digunakan.

- b. Pada struktur kolom, berdasarkan diagram interaksi P-M pada kolom, akibat tanpa adanya pengaruh beban gempa pada setiap kolom, titik beban terfaktor berada di dalam lingkup kuat rencana, sehingga dapat dikategorikan aman untuk digunakan. Sedangkan akibat adanya pengaruh beban gempa pada tipe kolom K1 dan K2, pada beberapa kondisi titik beban terfaktor berada di luar lingkup kuat rencana dan persentase kuat perlu yang diperoleh mencapai 101,32% - 153,31% dari kuat yang direncanakan, sehingga dapat dikategorikan tidak cukup aman bila digunakan.
 - c. Pada struktur pelat, berdasarkan hasil evaluasi semua tipe pelat diketahui bahwa persentase ketebalan minimum yang diperoleh 40,63% - 46,88% mencapai ketebalan terpasang, dan persentase kuat perlu yang diperoleh 6,61% - 55,40% mencapai kuat yang direncanakan, sehingga semua tipe pelat aman untuk digunakan.
3. Berdasarkan perbandingan kebutuhan tulangan kondisi tanpa beban gempa dengan kondisi dengan beban gempa, terdapat perbedaan yang signifikan, sehingga dapat diketahui bahwa akibat adanya pengaruh beban gempa sangat berpengaruh pada perencanaan kekuatan struktur bangunan.

5.2. Saran

Berdasarkan hasil analisis yang telah dilakukan, maka didapatkan beberapa saran antara lain yaitu:

1. Diperlukan data tanah berupa nilai N-SPT dari pengujian SPT supaya memudahkan perhitungan dan memperoleh hasil yang lebih akurat.
2. Menambahkan hasil evaluasi struktur menggunakan metode analisis dinamik riwayat waktu sebagai pembanding.
3. Perlunya evaluasi lanjutan mengenai pola keruntuhan struktur akibat terjadinya kegagalan elemen struktur bangunan.

DAFTAR PUSTAKA

- Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika. 2022. Data Gempa Bumi. [online] Available at : <https://www.bmkg.go.id/gempabumi/data-gempabumi.bmkg> [Accessed 15 Des 2022].
- Badan Standarisasi Nasional. 2019. *Persyaratan Beton Struktural Untuk Banguna Gedung dan Penjelasan. (SNI 2847-2019)*. Jakarta : BSN.
- Badan Standarisasi Nasional. 2019. *Tata Cara Perencanaan Ketahanan Gempa untuk Struktur Bangunan Gedung dan Non Gedung. (SNI 1726-2019)*. Jakarta : BSN.
- Badan Standarisasi Nasional. 2020. *Beban Desain Minimum dan Kriteria Terkait untuk Bangunan Gedung. (SNI 1727-2020)*. Jakarta : BSN.
- Gunawan, S. 2014. *Korelasi Nilai CPT dan SPT pada Lokasi Ring Road Utara Yogyakarta*. Buku Prosiding Konferensi Nasional Teknik Sipil, Vol.2, No,1, Oktober.2014.
- Marwanto, A., Budi, A. S., & Supriyadi, A. 2014. *Evaluasi Kinerja Struktur Gedung 10 Lantai dengan Analisis Pushover Terhadap Drift dan Displacement. Menggunakan Software Etabs (Studi Kasus Hotel Di Wilayah Surakarta)*. Matriks Teknik Sipil, 2(3).

- Nur, A.M. 2010. *Gempa Bumi, Tsunami Dan Mitigasinya*. Jurnal Media Informasi Pengembangan dan Profesi Kegeografian, 7(1).
- Siddiq, S. 2008. *Bangunan Tahan Gempa Berbasis Standar Nasional Indonesia*. Jurnal Standardisasi, 8(2).
- Simanjuntak, Pinondang. 2020. *Evaluasi Kerusakan Bangunan Akibat Gempa Di Indonesia*. Jakarta Timur : Universitas Kristen Indonesia. Jurnal Centech, 1(1).
- Siswanto, A. B. 2018. *Kriteria Dasar Perencanaan Struktur Bangunan Tahan Gempa*. Jurnal Teknik Sipil, 11.