

TUGAS AKHIR

**PERBANDINGAN RESPONS STRUKTUR GEDUNG DENGAN
VARIASI BENTUK DENAH MENGGUNAKAN METODE
RESPONS SPEKTRUM DAN *TIME HISTORY*
(*COMPARASION OF BUILDING STRUCTURAL RESPONSES
WITH VARIOUS FLOOR PLAN CONFIGURATIONS USING
RESPONS SPECTRUM AND TIME HISTORY METHODE*)**

**Diajukan Kepada Universitas Islam Indonesia Yogyakarta Untuk Memenuhi
Persyaratan Memperoleh Derajat Sarjana Teknik Sipil**



**FIRDAUS SUKMA PUTRA
20511316**

**PROGRAM STUDI SARJANA TEKNIK SIPIL
FAKULTAS TEKNIK SIPIL DAN PERENCANAAN
UNIVERSITAS ISLAM INDONESIA**

2026

TUGAS AKHIR

PERBANDINGAN RESPONS STRUKTUR GEDUNG DENGAN
VARIASI BENTUK DENAH MENGGUNAKAN METODE
RESPONS SPEKTRUM DAN *TIME HISTORY*
(*COMPARASION OF BUILDING STRUCTURAL RESPONSES
WITH VARIOUS FLOOR PLAN CONFIGURATIONS USING
RESPONS SPECTRUM AND TIME HISTORY METHODE*)

Disusun oleh

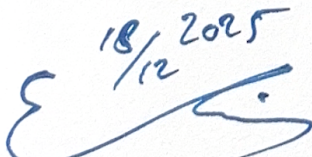
Firdaus Sukma Putra

20511316

Telah diterima sebagai salah satu persyaratan untuk memperoleh derajat Sarjana
Teknik Sipil

Diuji pada tanggal 1 Desember 2025
Oleh Dewan Penguji

Pembimbing

18/12/2025


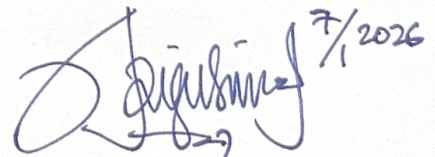
Elvis Saputra, S.T., M.T.
NIK: 205111302

Penguji I

22/12/2025


Prof. Ir. Mochamad Teguh, MSCE., Ph.D.
NIK: 855110201

Penguji II

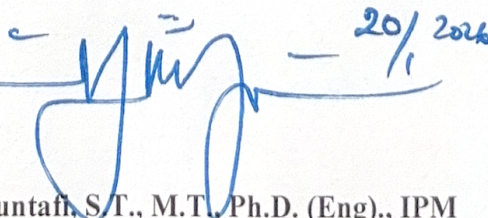
7/1/2026


Anggit Mas Arifudin, S.T., M.T.
NIK: 185111304

Mengesahkan,

Ketua Program Studi Teknik Sipil



20/11/2026


Ir. Yunalia Muntafi, S.T., M.T., Ph.D. (Eng)., IPM
NIK: 095110101

PERNYATAAN BEBAS PLAGIASI

Dengan penuh kesungguhan, saya menyatakan bahwa laporan tugas akhir ini merupakan hasil kerja keras dan pencapaian pribadi dalam memenuhi salah satu syarat kelulusan Program Sarjana Teknik Sipil di Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Islam Indonesia. Seluruh isi dalam laporan ini telah disusun dengan penuh tanggung jawab, berdasarkan penelitian dan analisis yang telah saya lakukan. Bagian tertentu yang dikutip dari karya atau referensi lain telah dicantumkan secara jelas sesuai dengan standar akademik, kaidah ilmiah, serta etika penulisan yang berlaku, guna memastikan keabsahan dan integritas ilmiah dari penelitian yang saya lakukan.

Yogyakarta, 5 Januari 2026
Yang membuat pernyataan,



Firdaus Sukma Putra

KATA PENGANTAR

Puji dan syukur penulis panjatkan ke hadirat Allah SWT, atas rahmat, hidayah, dan karunia-Nya, sehingga tugas akhir dengan judul "Perbandingan Respons Struktur Bangunan Menggunakan Metode Respons Spektrum Dan *Time History* Pada Bangunan Dengan Variasi Geometri Dan Ketinggian" ini dapat diselesaikan tepat waktu. Tugas akhir ini disusun sebagai bagian dari pemenuhan syarat akademik untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik di Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Islam Indonesia.

Penyusunan tugas akhir ini merupakan perjalanan yang penuh tantangan, namun berkat bimbingan, dukungan, serta doa dari berbagai pihak, akhirnya tugas ini dapat terselesaikan dengan baik. Oleh karena itu, dengan penuh rasa hormat dan terima kasih, penulis ingin menyampaikan apresiasi yang sebesar-besarnya kepada:

1. Elvis Saputra, S.T., M.T., selaku dosen pembimbing yang dengan sabar memberikan arahan, bimbingan, serta wawasan yang berharga selama proses penelitian ini.
2. Prof. Ir. Mochamad Teguh, MSCE., Ph.D., selaku dosen penguji I, yang telah memberikan evaluasi serta dorongan akademik yang berarti.
3. Anggit Mas Arifudin, S.T., M.T., selaku dosen penguji II, atas masukan yang kritis dan konstruktif dalam penyempurnaan tugas akhir ini
4. Ir. Yunalia Muntafi, S.T., M.T., Ph.D. (Eng).,IPM., selaku Ketua Program Studi Teknik Sipil Universitas Islam Indonesia, yang telah memberikan dukungan serta fasilitas akademik dalam penyusunan tugas akhir ini.
5. Kedua orang tua dan keluarga tercinta, yang selalu menjadi sumber motivasi, memberikan doa, kasih sayang, serta dukungan tanpa batas dalam setiap langkah perjalanan akademik penulis.
6. Sahabat dan rekan-rekan seperjuangan, yang senantiasa memberikan semangat, bantuan, dan kebersamaan dalam menghadapi tantangan selama masa studi.

7. Seluruh pihak yang tidak dapat disebutkan satu per satu, yang telah memberikan kontribusi dan dukungan dalam berbagai bentuk hingga tugas akhir ini dapat terselesaikan dengan baik.

Penulis menyadari bahwa tugas akhir ini masih memiliki keterbatasan dan kekurangan. Oleh karena itu, saran dan kritik yang membangun sangat diharapkan guna perbaikan dan pengembangan lebih lanjut di masa mendatang. Akhir kata, semoga tugas akhir ini dapat memberikan manfaat bagi dunia akademik serta menjadi referensi yang bermanfaat bagi pengembangan ilmu teknik sipil di masa yang akan datang.

Yogyakarta, Desember 2025
Yang membuat pernyataan,

Firdaus Sukma Putra

DAFTAR ISI

PERNYATAAN BEBAS PLAGIASI	iv
KATA PENGANTAR	v
DAFTAR ISI	vii
DAFTAR GAMBAR	xiii
DAFTAR LAMPIRAN	xv
DAFTAR NOTASI DAN SINGKATAN	xvi
ABSTRAK	xviii
<i>ABSTRACT</i>	xix
BAB I PENDAHULUAN	2
1.1 Latar Belakang	2
1.2 Rumusan Masalah	4
1.3 Tujuan Penelitian	4
1.4 Manfaat Penelitian	4
1.5 Batasan Penelitian	4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	7
2.1 Penelitian Terdahulu	7
2.1.1 Analisis Kinerja Struktur dengan Perbedaan Geometri Bangunan	7
2.1.2 Evaluasi Kinerja Struktur Gedung dengan Metode Analisis <i>Time History</i>	8
2.1.3 Perbandingan Metode RSA dan THA	8
2.2 Perbandingan Penelitian Terdahulu	10
2.3 Keaslian Penelitian	14
BAB III LANDASAN TEORI	15
3.1 Gempa Bumi	15
3.2 Konsep Bangunan Tahan Gempa	16
3.3 Ketentuan Umum Perencanaan Struktur Bangunan Gedung Berdasarkan SNI-1726-2019	17

3.3.1	Kategori Risiko Bangunan Gedung	17
3.3.2	Faktor Keutamaan Gempa	18
3.3.3	Klasifikasi Situs	19
3.3.4	Spektrum Respons Desain	19
3.3.5	Kategori Desain Seismik	21
3.3.6	Pemilihan Sistem Struktur Gedung	22
3.3.7	Periode Fundamental Pendekatan	23
3.3.8	Gaya Geser Dasar Seismik	24
3.3.9	Distribusi Vertikal Gaya Seismik	25
3.3.10	Distribusi Horizontal Gaya Seismik	25
3.3.11	Analisis Beban Gempa	26
3.3.12	Arah Ortogonal	27
3.3.13	<i>Participating Mass Ratio</i>	27
3.3.14	Redundansi	27
3.3.15	Berat Seismik Efektif	28
3.4	Pembebanan Struktur	28
3.4.1	Beban Gravitasi	28
3.4.2	Beban Gempa	29
3.4.2.1	Statik Ekuivalen	29
3.4.2.2	Respons Spektrum	30
3.4.2.3	<i>Pushover</i> Analisis	30
3.4.2.4	<i>Time History</i>	31
3.5	Tata Cara Pemilihan Dan Modifikasi Gerak Tanah Permukaan Untuk Perencanaan Gedung Tahan Gempa (<i>Time History</i>)	31
3.5.1	Target Respons Spektra	31
3.5.2	Pemilihan Gerak Tanah	32

3.5.3	Modifikasi Gerak Tanah	32
3.5.4	Hasil Modifikasi Gerak Tanah	33
3.6	Respons Struktur Akibat Gempa	33
3.6.1	<i>Base Shear</i>	34
3.6.2	Ketidakteraturan	34
3.6.1.1	Ketidakteraturan Horizontal	34
3.6.1.2	Ketidakteraturan Vertikal	36
3.6.3	Simpangan Antar Tingkat	38
BAB IV METODOLOGI PENELITIAN		40
4.1	Umum	40
4.2	Data Penelitian	40
4.2.1	Lokasi Penelitian	41
4.2.2	Data Bangunan	41
4.2.3	Data Gempa	44
4.2.4	Program yang Digunakan	44
4.3	Tahapan Penelitian	45
4.4	Bagan Alir Tahapan Penelitian	49
BAB V ANALISIS DAN PEMBAHASAN		51
5.1	Perhitungan Pembebanan	51
5.1.1	Beban Mati	51
5.1.2	Beban Mati Tambahan	52
5.1.3	Beban Hidup	53
5.2	Validasi Model	53
5.2.1	Pemeriksaan Mode Vibrasi (partisipasi massa)	54
5.2.2	Periode Fundamental	54
5.3	Analisis Model dengan Metode Respon Spektrum	55
5.3.1	Pembuatan Respons spektrum	55

5.3.2	Hasil Analisis Respons Spektrum	59
5.3.2.1	Gaya Geser Dasar	60
5.3.2.2	Ketidakteraturan	62
5.3.2.3	Perpindahan (<i>displacement</i>)	67
5.3.2.4	Simpangan Antar Tingkat (<i>Story drift</i>)	68
5.4	Analisis dengan Metode <i>Time History</i>	71
5.4.1	Pembuatan <i>Time History</i>	71
5.4.1.1	Menentukan Target Spektrum Respons	71
5.4.1.2	Menentukan Magnitudo dan Jarak	72
5.4.1.3	Memilih Rekaman Gempa Acuan	73
5.4.1.4	Proses <i>Matching</i>	76
5.4.1.5	Validasi <i>Time History</i> Buatan	79
5.4.2	Hasil Analisis <i>Time History</i>	84
5.4.2.1	Gaya Geser Dasar	84
5.4.2.2	Ketidakteraturan	85
5.4.2.3	Perpindahan (<i>diplacement</i>)	90
5.4.2.4	Simpangan Antar Tingkat (<i>Story drift</i>)	91
5.5	Perbandingan Hasil Analisis Respons Spektrum dan <i>Time History</i>	93
5.5.1	Pengaruh Bentuk Denah Terhadap Respons Gedung	94
BAB VI KESIMPULAN DAN SARAN		100
6.1	Kesimpulan	100
6.2	Saran	101
DAFTAR PUSTAKA		102

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Perbandingan Penelitian Terdahulu	11
Tabel 3.1 Kategori Risiko Bangunan Gedung dan Non Gedung Untuk Beban Gempa	17
Tabel 3.2 Faktor Keutamaan Gempa	18
Tabel 3.3 Klasifikasi Situs	19
Tabel 3.4 Kategori Desain Seismik Berdasarkan Parameter Respons Percepatan Pada Periode Pendek	21
Tabel 3.5 Kategori Desain Seismik Berdasarkan Parameter Respons Percepatan Pada Periode 1 Detik	22
Tabel 3.6 Faktor R , C_d , dan Ω_0 untuk Sistem Penahan Gaya Gempa	22
Tabel 3.7 Koefisien Untuk Batas Atas Pada Periode Yang Dihitung	23
Tabel 3.8 Nilai Parameter Periode Pendekatan C_t dan x	24
Tabel 3.9 Prosedur Analisis yang Diizinkan	26
Tabel 3.10 Simpangan Antar Tingkat Izin	39
Tabel 5. 1 <i>Modal Participating Mass Ratio</i> Gedung	54
Tabel 5. 2 Nilai Periode Struktur	55
Tabel 5.3 Rekapitulasi Ketidakberaturan Horizontal Tipe 1a dan 1b Menggunakan Beban Gempa Respons Spektrum	63
Tabel 5.4 Rekapitulasi Ketidakberaturan Vertikal Tipe 1a dan 1b menggunakan Beban Gempa Respons Spektrum	66
Tabel 5. 5 Rekapitulasi Ketidakberaturan Vertikal Tipe 5a dan 5b menggunakan Beban Gempa Respons Spektrum	67
Tabel 5. 6 Nilai Magnitudo (M) dan Jarak (R) Wilayah Yogyakarta	73
Tabel 5.7 Rekapitulasi Ketidakberaturan Horizontal Tipe 1a dan 1b Beban Gempa <i>Time History</i>	87
Tabel 5.8 Rekapitulasi Ketidakberaturan Vertikal Tipe 1a dan 1b Beban Gempa <i>Time History</i>	89

Tabel 5.9 Rekapitulasi Ketidakberaturan Vertikal Tipe 5a dan 5b Beban Gempa <i>Time History</i>	90
Tabel 5.10 Perbandingan Ketidakberaturan Horizontal 1a dan 1b RSA dan THA pada Model Gedung Persegi T dan L	95
Tabel 5.11 Perbandingan Ketidakberaturan Vertikal 1a dan 1b RSA dan THA pada Model Gedung Persegi T dan L	96
Tabel 5.12 Perbandingan Ketidakberaturan Vertikal 5a dan 5b RSA dan THA pada Model Gedung Persegi T dan L	97

DAFTAR GAMBAR

Gambar 3.1 Peta Tektonik Wilayah Indonesia Dari Data Geodetik Hingga Tahun 2016, Vektor Kecepatan Pada Referensi Sistem ITRF 2008	16
Gambar 3.2 Spektrum Respons Desain	21
Gambar 3.3 Respons Struktural Akibat Gempa Bumi	34
Gambar 3.4 Ketidakberaturan Horizontal 1a dan 1b	35
Gambar 3.5 Ketidakberaturan Sudut Dalam	36
Gambar 3.6 Ketidakberaturan Vertikal 1a dan 1b	37
Gambar 3.7 Ketidakberaturan Vertikal 5a dan 5b	38
Gambar 3.8 Penentuan Simpangan Antar Tingkat	38
Gambar 4.1 Peta Lokasi Sesar Opak Daerah Istimewa Yogyakarta	41
Gambar 4.2 Denah dan Potongan Melintang Gedung Persegi	43
Gambar 4.3 Denah dan Potongan Melintang Gedung T	43
Gambar 4.4 Denah dan Potongan Melintang Gedung L	44
Gambar 4.5 Pemodelan 3D Gedung Persegi	46
Gambar 4.6 Pemodelan 3D Gedung T	46
Gambar 4.7 Pemodelan 3D Gedung L	46
Gambar 4.8 Tahapan Penelitian	50
Gambar 5.1 Hasil Perhitungan Respon Spektral Desain pada Situs Puskim.go.id (Diakses 2 Februari 2020)	57
Gambar 5.2 Grafik Respons Spektral Wilayah Yogyakarta	59
Gambar 5.3 Diagram Batang Gaya Geser Dasar pada Model Gedung Persegi T dan L Beban Gempa Respons Spektrum	61
Gambar 5.4 Grafik Perpindahan pada Model Gedung Persegi, T dan L Beban Gempa Respons Spektrum	68
Gambar 5.5 Grafik Simpangan Antar Tingkat pada Model Gedung Persegi, T dan L Beban Gempa Respons Spektrum	70
Gambar 5.6 Grafik Respons Spektrum Wilayah Yogyakarta	72

Gambar 5.7 Jarak Hiposenter (R) Untuk Sesar Dangkal (<i>Shallow Crustall</i>) pada Peta Deagregasi Bahaya Gempa Indonesia 2022	72
Gambar 5.8 Magnitudo (M) Untuk Sesar Dangkal (<i>Shallow Crustall</i>) pada Peta Deagregasi Bahaya Gempa Indonesia 2022	73
Gambar 5.9 Halaman Pencarian Data Rekaman Gempa PEER NGA	74
Gambar 5.10 Pemilihan Data Rekaman Gempa	74
Gambar 5.11 Penyimpanan Data Rekaman Gempa	75
Gambar 5.12 Hasil <i>Extract File</i> Rekaman Gempa	75
Gambar 5.13 Kontrol <i>Pseudo-Acceleration Time Histoy</i> Terhadap Respons Spektrum Target	80
Gambar 5.14 <i>Spectral Acceleration</i> Northern Calif-03 X	81
Gambar 5.15 <i>Spectral Acceleration</i> Northern Calif-03 Y	81
Gambar 5.16 <i>Spectral Acceleration</i> Imperial Valley-06 X	81
Gambar 5.17 <i>Spectral Acceleration</i> Imperial Valley-06 Y	82
Gambar 5.18 <i>Spectral Acceleration</i> Superstition Hills-02 X	82
Gambar 5.19 <i>Spectral Acceleration</i> Superstition Hills-02 Y	82
Gambar 5.20 Grafik <i>Normalized Arias Intensity Time History</i> Sebelum dan Setelah <i>Matching</i>	83
Gambar 5.21 Diagram Batang Gaya Geser Dasar Beban Gempa <i>Time History</i>	85
Gambar 5.22 Grafik Perpindahan Beban Gempa <i>Time History</i>	91
Gambar 5.23 Grafik Perpindahan Antar Tingkat Beban Gempa <i>Time History</i>	93
Gambar 5.24 Diagram Batang Perbandingan Nilai Gaya Geser Dasar pada Model Gedung Persegi T dan L Menggunakan Analisis RSA dan THA	94
Gambar 5.25 Grafik Perbandingan Perpindahan RSA dan THA pada Model Gedung Persegi T dan L	98
Gambar 5.26 Grafik Perbandingan Simpangan antar Tingkat RSA dan THA pada Model Gedung Persegi T dan L	99

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1 Hasil Analisis Respons Spektrum	107
Lampiran 2 Hasil Analisis <i>Time History</i>	112

DAFTAR NOTASI DAN SINGKATAN

A	=	Luas Buka
C _d	=	Faktor Pembesaran Defleksi
C _s	=	Koefisien Respons Seismik
C _{vx}	=	Faktor Distribusi Vertikal
F _a	=	Koefisien Situs Periode Pendek
F _i	=	Bagian Dari Gaya Geser Dasar Seismik (V) Yang Timbul Di Tingkat I
F ₁	=	Koefisien Situs Periode 1 Detik
F _x	=	Gaya Seismik Lateral
I _e	=	Faktor Keutamaan Gempa
h _{sx}	=	Tinggi Tingkat
KDS	=	Kategori Desain Seismik
K _n	=	Kekakuan Pada Lantai Ke-N
MCER	=	<i>Risk-Targeted Maximum Considered Earthquake</i>
RSA	=	<i>Response Spectrum Analysis</i>
SMS	=	Parameter Respons Spektral Percepatan Pada Periode Pendek
SMS1	=	Parameter Respons Spektral Percepatan Pada Periode 1 Detik
P _x	=	Beban Desain Vertikal Total Pada Dan Di Atas Tingkat-X
Q _d	=	Beban Mati
Q _l	=	Beban Hidup
Q _m	=	Beban Merata
R	=	Koefisien Modifikasi Respons
R _e	=	Beban Reaksi
S _a	=	Respons Spektral Percepatan
S _{DS}	=	Parameter Respons Spektral Percepatan Gempa Desain Periode Pendek

S_{D1}	=	Parameter Respons Spektral Percepatan Gempa Desain Periode 1 Detik
S_s	=	Parameter Respons Spektral Percepatan Gempa Terpetakan Untuk Periode Pendek
S_1	=	Parameter Respons Spektral Percepatan Gempa Terpetakan Untuk Periode 1 Detik
THA	=	<i>Time History Analysis</i>
TL	=	Periode Panjang Parameter Respons Spektral
T_{lower}	=	Periode Getar Pada Saat 90 % Partisipasi Massa Aktual Telah Terpenuhi Pada Masing-Masing Respons Dua Arah Ortogonal
T_{upper}	=	Periode Yang Lebih Besar Di Antara Dua Nilai Periode Getar Fundamental Ortogonal
T_0	=	Batas Periode Di Mana Respons Spektral Mulai Mencapai Nilai Maksimum
T_s	=	Periode Di Mana Respons Spektral Mulai Berkurang Setelah Mencapai Puncaknya
V	=	Gaya Geser Dasar
V_s	=	Kecepatan Rata-Rata Gelombang Geser
V_x	=	Gaya Geser Pada Lantai Ke-X
W	=	Berat Seismik Efektif
Ω_0	=	Faktor Lebih Kuat Sistem
ρ	=	Faktor Redundansi
δ_{avg}	=	Rata – Rata Perpindahan Di Titik – Titik Terjauh Struktur Di Tingkat X.
δ_{max}	=	Perpindahan Maksimum Di Titik X
δ_x	=	Defleksi Yang Terjadi Pada Tingkat Ke-X
Δ_x	=	Simpangan Antar Tingkat Pada Lantai Ke-X
θ	=	Koefisien Stabilitas

ABSTRAK

Yogyakarta termasuk salah satu wilayah dengan tingkat kerawanan gempa tertinggi di Indonesia, yang terbukti dengan terjadinya gempa bermagnitudo 5,9 SR pada tahun 2006. Oleh karena itu, analisis respons struktur sangat penting dilakukan untuk menjamin keamanan dan kelayakan bangunan di kawasan ini. Dalam merencanakan bangunan tahan gempa, analisis dinamik struktur diperlukan guna memperoleh gambaran respons yang lebih akurat. Penelitian ini bertujuan untuk membandingkan respons struktur bangunan menggunakan metode *Response Spectrum* dan *Time History* pada variasi bentuk denah bangunan. Pemodelan dilakukan dengan perangkat lunak ETABS V22 pada bangunan berbentuk persegi, T, dan L. Beban gempa ditetapkan mengacu pada SNI 1726:2019, dengan rekaman gempa yang telah disesuaikan melalui proses *spectral matching* terhadap respons spektrum target. Parameter yang dianalisis meliputi *Base Shear*, ketidakberaturan, perpindahan (*displacement*), serta simpangan antar tingkat (*Story drift*).

Berdasarkan hasil analisis, *Response Spectrum Analysis* (RSA) menunjukkan perilaku struktur yang lebih konservatif dengan perbedaan gaya geser dasar antar arah yang sangat kecil, yakni rata-rata 0,872%, mengindikasikan respons yang relatif seimbang pada arah X dan Y. Ketidakberaturan horizontal tipe 1a dan 1b hanya teridentifikasi pada gedung T pada arah X, sementara seluruh model tetap tergolong *regular* terhadap ketidakberaturan vertikal. Respons perpindahan pada RSA cenderung lebih dominan pada arah X dengan rerata 194,175 mm dibandingkan arah Y sebesar 179,262 mm, menghasilkan selisih 7,680%, dan pola serupa ditunjukkan oleh *story drift* dengan perbedaan 6,975%. Sebaliknya, *Time History Analysis* (THA) memperlihatkan sensitivitas yang lebih tinggi terhadap arah pembebanan dan karakteristik *input* gempa, tercermin dari selisih gaya geser dasar sebesar 11,040% dengan respons arah X yang lebih besar. Meskipun tidak terdeteksi ketidakberaturan struktur, respons *displacement* THA lebih dominan pada arah Y dengan selisih 14,442%, sementara perbedaan *story drift* relatif kecil, yaitu 0,560%.

Kata Kunci: RSA, THA, gaya geser dasar, ketidakberaturan, simpangan, simpangan antar tingkat.

ABSTRACT

Yogyakarta is one of the regions in Indonesia with a high level of seismic vulnerability, as evidenced by the 2006 earthquake with a magnitude of 5.9. Therefore, structural response analysis is essential to ensure the safety and serviceability of buildings in this area. In the design of earthquake-resistant buildings, dynamic structural analysis is required to obtain a more accurate representation of structural behavior. This study aims to compare the structural responses obtained using the Response Spectrum Analysis (RSA) and Time History Analysis (THA) methods for different building plan configurations. Structural models with square, T-shaped, and L-shaped plans were developed using ETABS V22 software. The evaluated parameters include base shear, structural irregularity, displacement, and story drift.

Based on the results of the analysis, the Response Spectrum Analysis (RSA) showed a more conservative structural behavior with a very small difference in the base shear between directions, which was 0,872% on average, indicating a relatively balanced response in the X and Y directions. The displacement response in RSA tends to be more dominant in the X direction with an average of 194,175 mm compared to the Y direction of 179,262 mm, resulting in a difference of 7,680%, and a similar pattern is shown by the story drift with a difference of 6,975%. In contrast, Time History Analysis (THA) showed a higher sensitivity to the direction of loading and the characteristics of the earthquake input, reflected in the difference in base shear of 11,040% with a greater X-direction response. Although no structural irregularities were detected, the THA displacement response was more dominant in the Y direction with a difference of 14,442%, while the difference in story drift was relatively small, which was 0,560%.

Keywords: RSA, THA, Base Shear, Drift Story, Displacement

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Indonesia merupakan salah satu negara yang terletak di wilayah Cincin Api Pasifik, sehingga sangat rentan terhadap gempa bumi (Rahayu & Pawirodikromo, 2023). Kerentanan ini semakin meningkat karena Indonesia terletak pada zona pertemuan empat lempeng tektonik utama, yaitu Lempeng Indo-Australia, Eurasia, Pasifik, dan Filipina, yang secara aktif memicu proses tektonik di wilayah tersebut. (Hutchings & Mooney, 2021). Interaksi antar lempeng tersebut memicu terjadinya subduksi dan aktivitas patahan aktif, seperti Sesar Opak–Oyo di Yogyakarta yang pernah memicu gempa besar pada 27 Mei 2006 dengan magnitudo 5,9 SR (Wibowo, 2017). Peristiwa tersebut menimbulkan dampak yang sangat besar, kerusakan terkonsentrasi pada sektor perumahan dan bangunan milik swasta. Rumah tinggal mengalami dampak paling signifikan, dengan porsi lebih dari separuh total kerusakan dan kerugian yang diperkirakan mencapai Rp15,3 triliun. Selain itu, bangunan serta aset produktif pada sektor swasta juga mengalami kerusakan yang cukup besar, dengan estimasi kerugian sekitar Rp9 triliun yang tercantum pada *Preliminary Damage and Loss Assessment Yogyakarta and Central Java Natural Disaster* (2006). Fakta ini menunjukkan bahwa bangunan yang tidak didesain secara memadai untuk menahan beban dinamis gempa berisiko tinggi mengalami kerusakan parah yang berakibat pada korban jiwa dan kerugian material yang masif.

Kerusakan bangunan akibat gempa bumi dipengaruhi oleh berbagai faktor, seperti tingkat seismisitas lokasi, jenis tanah, masa layan bangunan, jumlah lantai, elemen non-struktural, hingga ketidakberaturan bentuk struktur (FEMA, 2015). Seiring dengan meningkatnya jumlah penduduk dan kebutuhan lahan, kondisi tersebut mendorong banyak bangunan modern dirancang dengan variasi ketinggian

maupun geometri yang lebih kompleks, sehingga semakin memperbesar potensi kerentanan terhadap gempa.

Bentuk denah bangunan secara signifikan memengaruhi respons seismik struktur. Bangunan dengan denah reguler, seperti denah persegi, menunjukkan perilaku struktur yang lebih stabil dan distribusi respons yang lebih merata saat menerima beban gempa dibandingkan bangunan dengan denah irreguler, seperti denah L (Haque et al., 2016). Temuan ini sejalan dengan penelitian (J & G, 2024) yang menunjukkan bahwa bangunan berdenah persegi memiliki kinerja seismik lebih baik dibandingkan denah T, L, dan H, yang ditunjukkan oleh nilai simpangan dan rasio drift lantai yang lebih kecil serta kekakuan lantai yang lebih tinggi, sehingga meningkatkan ketahanan struktur terhadap beban gempa.

Dalam konteks perencanaan struktur bangunan di wilayah rawan gempa, pemahaman terhadap respons struktur menjadi sangat penting. Hal ini sejalan dengan SNI 1726-2002 pasal 4.2.2 yang mengatur bahwa pada struktur bangunan tidak beraturan, pengaruh gempa rencana harus ditinjau sebagai beban gempa dinamis, sehingga analisisnya wajib dilakukan dengan metode analisis respons dinamik. Oleh karena itu, penelitian ini menggunakan dua metode analisis, yaitu *Response Spectrum Analysis* (RSA) dan *Time History Analysis* (THA). RSA dipilih karena sederhana dan efisien dalam menghitung respons maksimum berdasarkan spektrum respons gempa, meskipun tidak mempertimbangkan urutan waktu maupun interaksi antar mode getar. Sebaliknya, THA mampu menggambarkan respons struktur secara lebih detail menggunakan data akselerogram aktual, meskipun lebih kompleks dan memakan waktu komputasi lebih panjang.

Perbedaan potensial antara hasil analisis *Response Spectrum Analysis* (RSA) dan *Time History Analysis* (THA) pada variasi bangunan tersebut menuntut evaluasi komprehensif terhadap konsistensi kedua metode. Ketika ditemukan disparitas signifikan antara kedua pendekatan analisis, diperlukan pertimbangan khusus dalam memilih metode yang paling representatif, terutama untuk bangunan di wilayah seismik aktif. Hal ini menjadi krusial untuk memastikan keandalan hasil analisis dan optimalisasi desain struktur tahan gempa. Berdasarkan latar belakang tersebut, penelitian ini bertujuan untuk melakukan studi komparatif terhadap

respons struktur bangunan dengan variasi geometri (reguler dan irreguler) serta ketinggian menggunakan metode RSA dan THA. Hasil penelitian diharapkan dapat memberikan kontribusi praktis maupun teoretis dalam perencanaan struktur tahan gempa, sehingga dapat meminimalkan risiko kerusakan, korban jiwa, maupun kerugian material akibat gempa bumi.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang penelitian, rumusan yang dapat diambil adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana pengaruh variasi bentuk denah bangunan terhadap respons struktur jika dianalisis menggunakan metode *Respons Spectrum Analysis* (RSA)?
2. Bagaimana pengaruh variasi bentuk denah bangunan terhadap respons struktur jika dianalisis menggunakan metode *Time History Analysis* (THA)?

1.3 Tujuan Penelitian

Dari rumusan masalah diatas, tujuan dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Mengetahui pengaruh respons struktur berdasarkan variasi bentuk denah menggunakan analisis dinamik *Respons Spectrum Analysis* (RSA).
2. Mengetahui pengaruh respons struktur berdasarkan variasi bentuk denah menggunakan analisis dinamik *Time History Analysis* (THA).

1.4 Manfaat Penelitian

Manfaat dari penelitian yang akan diperoleh nanti adalah sebagai berikut:

1. Memberikan wawasan lebih dalam mengenai pengaruh respons struktur berdasarkan variasi bentuk denah menggunakan analisis dinamik *Respons Spectrum Analysis* (RSA).
2. Memberikan wawasan lebih dalam mengenai pengaruh respons struktur berdasarkan variasi bentuk denah menggunakan analisis dinamik *Time History Analysis* (THA).

1.5 Batasan Penelitian

Batasan masalah dari penelitian tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Model gedung adalah *imager* yang berarti bukan dari data eksisting.

2. Bangunan diasumsikan berfungsi sebagai gedung rumah sakit.
3. Dimensi balok, kolom dan pelat ditentukan, dapat dilihat pada sub bab 4.2.2 tabel 4.1.
4. Bentuk denah gedung yang digunakan yaitu Persegi, T dan L dengan jumlah lantai yaitu 14 lantai dengan ketinggian tiap tingkatnya adalah 4 meter.
5. Karena keterbatasan data tanah, maka penentuan kelas situs ditetapkan sebagai tanah sedang (SD). Penetapan ini didasarkan pada hasil penelitian Zawawi, A.F. dkk (2023) di wilayah Kabupaten Bantul, yang menunjukkan bahwa berdasarkan data MASW, sebagian besar area tergolong tanah sedang (SD), dengan sebagian kecil merupakan tanah keras (SC).
6. Peraturan yang digunakan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut.
 - a. SNI 1726-(2019) tentang Tata cara Perencanaan Ketahanan Gempa untuk Struktur Bangunan Gedung dan Non Gedung.
 - b. Perencanaan beban hidup mengacu pada SNI 1727-2020 tentang Beban Minimum untuk Perancangan Bangunan Gedung dan Struktur Lain.
 - c. SNI 2847- tentang Persyaratan beton struktural untuk bangunan gedung dan penjelasan.
 - d. SNI 8899-2020 tentang Tata cara pemilihan dan modifikasi gerak tanah permukaan untuk perencanaan gedung tahan gempa.
 - e. Peta Deagregasi Bahaya Gempa Indonesia untuk Perencanaan dan Evaluasi Infrastruktur Tahan Gempa Tahun 2022.
7. Rekaman gempa yang digunakan adalah rekaman TH sintetis yang dikembangkan berdasarkan rekaman gempa dunia yang memiliki karakteristik yang sama dengan gempa di Daerah Istimewa Yogyakarta berdasarkan Peta Deagregasi Gempa Tahun (2022) dengan Periode Ulang yaitu 2500 Tahun yang diambil dari *Website PEER NGA-West2*
8. Untuk menghindari kompleksitas berlebihan maka, sumber gempa yang dijadikan acuan dalam pemilihan rekaman gempa adalah tipe *Shallow Crustal*. Hal ini dikarenakan pada wilayah Yogyakarta memiliki potensi gempa dangkal yang bersumber dari sesar opak.

9. Struktur dimodelkan dalam bentuk 3D dan dianalisis dengan bantuan perangkat ETABS V22.
10. Tumpuan yang digunakan diasumsikan menggunakan tumpuan jepit.
11. Beban yang diperhitungkan hanya beban mati, beban hidup, RSA dan *Time History*.
12. Penelitian ini hanya berfokus pada respons struktur yang dilihat berdasarkan pada gaya geser dasar, ketidakberaturan, perpindahan (*displacement*), dan simpangan antar tingkat (*Story drift*).
13. Ketidakberaturan yang ditinjau hanya pada ketidakberaturan horizontal tipe 1a 1b, ketidakberaturan vertikal tipe 1a 1b dan ketidakberaturan vertikal 5a 5b.
14. Perilaku struktur dianalisis menggunakan metode linier dinamik *Respons Spectrum Analysis* (RSA) dan *Time History Analysis* (THA) dengan bantuan program ETABS V22.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitian Terdahulu

Berikut ini beberapa studi terkait yang membahas tentang evaluasi kinerja struktur bangunan Gedung menggunakan metode *Time History*.

2.1.1 Analisis Kinerja Struktur dengan Perbedaan Geometri Bangunan

Dwi Pangestu dkk., (2021) melakukan penelitian dengan judul “Analisis Kinerja Struktur pada Model Bangunan *Setback* menggunakan Metode *Time History Analysis*”. Pada Penelitian ini menganalisis respons struktural bangunan dengan dan tanpa *setback* terhadap beban gempa menggunakan metode *Time History analysis*. Tiga model struktur yang dikaji meliputi bangunan *non-setback* dengan enam lantai, model *setback* 1 dengan *setback* di lantai 6, serta model *setback* 2 dengan *setback* di lantai 5 dan 6. Hasil analisis menunjukkan bahwa bangunan dengan *setback* satu lantai memiliki kapasitas terbesar dalam menahan gempa lateral pada arah timur-barat dengan selisih 1,07%, sedangkan pada arah utara-selatan, bangunan tanpa *setback* memiliki kapasitas lebih tinggi dengan selisih 4,79%. Selain itu, analisis perpindahan dan simpangan antar lantai mengindikasikan bahwa struktur dengan *setback* mengalami perpindahan lebih besar akibat berkurangnya elemen penahan gaya lateral pada lantai atas.

Evaluasi kinerja struktur melalui analisis pushover dan *Time History analysis* menunjukkan bahwa baik bangunan dengan maupun tanpa *setback* memiliki tingkat kinerja yang bervariasi, mulai dari *immediate occupancy* hingga *damage control*, tergantung pada arah dan jenis gempa yang terjadi. Secara keseluruhan, meskipun kapasitas penahan gempa lateral antara model *setback* dan *non-setback* tidak berbeda secara signifikan, keberadaan *setback* memengaruhi pola deformasi struktur. Penelitian ini menegaskan bahwa faktor geometris harus diperhitungkan dalam desain bangunan tahan gempa guna meningkatkan kinerja struktural terhadap beban dinamis.

2.1.2 Evaluasi Kinerja Struktur Gedung dengan Metode Analisis *Time History*

Purnama Putra dkk., (2021) melakukan penelitian dengan judul “Evaluasi Kinerja Struktur Gedung Bertingkat dengan Metode Analisis *Time History* (Studi Kasus: Apartemen Kingland Avenue Serpong)”. Penelitian ini mengkaji kinerja struktur Apartemen Kingland Avenue Serpong terhadap gempa dengan metode analisis riwayat waktu (*Time History*). Tiga data gempa yang digunakan adalah rekaman gempa Chi-Chi, Kobe, dan El Centro. Berdasarkan analisis menggunakan ATC-40, struktur gedung masuk dalam kategori "*Damage Control*" (DC), artinya bangunan hanya akan mengalami kerusakan ringan hingga sedang tanpa risiko runtuh, sehingga risiko korban jiwa sangat rendah. Namun, analisis menggunakan SNI 1726 (2019) menunjukkan bahwa pada lantai 3 arah X, struktur gedung tidak memenuhi batas simpangan antar lantai untuk gempa Kobe, meskipun tetap aman pada arah Y.

Hasil penelitian ini menggarisbawahi pentingnya melakukan analisis gempa berdasarkan data lokal untuk memastikan struktur bangunan dapat menghadapi kondisi gempa dengan optimal. Bangunan dalam kategori "*Damage Control*" tetap bisa digunakan setelah gempa, meski membutuhkan perbaikan akibat kerusakan yang terjadi. Penelitian ini menyoroti perlunya desain dan evaluasi yang teliti agar dampak gempa terhadap infrastruktur di wilayah rawan gempa dapat diminimalkan.

2.1.3 Perbandingan Metode RSA dan THA

Silaban, G.T., dkk (2023) melakukan penelitian yang berjudul "*Performance Evaluation of High-rise Buildings with Respon Spectrum Analysis and Time History Analysis*". Penelitian ini berfokus pada evaluasi kinerja struktur terhadap *displacement*, *drift*, dan stabilitas berdasarkan standar SNI 1726:2019, menggunakan pemodelan 3D dengan software ETABS v.17 serta analisis dinamik linear riwayat waktu dan respon spektrum.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa nilai rata-rata *displacement* pada lantai 4 hingga lantai 12 arah horizontal X melebihi batas *drift* yang diizinkan. Selain itu, analisis koefisien stabilitas struktur terhadap *displacement* menunjukkan adanya pengaruh P-Delta yang signifikan, sehingga diperlukan desain ulang untuk meningkatkan kekakuan kolom atau penambahan dinding geser pada arah

horizontal X. Data gempa yang digunakan dalam analisis riwayat waktu berasal dari rekaman gempa Kobe, California, dan San Francisco, yang disesuaikan dengan respon spektrum. Perbandingan antara kedua metode analisis tersebut memberikan gambaran yang komprehensif dalam mengevaluasi ketahanan struktur bangunan terhadap beban gempa. Dengan demikian, temuan ini dapat menjadi acuan dalam perbaikan desain struktur untuk meningkatkan keselamatan bangunan di wilayah rawan gempa seperti Pulau Jawa.

Saputra & Priastiwi, 2023) telah melakukan penelitian dengan judul “*Comparative Study Of Dynamic Earthquake Analysis With Spectral Design And Time History Methods*”. Penelitian ini membahas perbandingan analisis gempa dinamik dengan metode *Response Spectrum (RS)*, *Response Spectrum Matched (RSM)*, *Time History (TH)*, dan *Time History Matched (THM)*. Tujuannya adalah mengevaluasi kinerja struktur melalui beberapa parameter utama, yaitu periode getar alami, gaya geser dasar (*Base Shear*), partisipasi massa, simpangan (*displacement*), serta deviasi antar lantai (*drift ratio*). Hasil penelitian menunjukkan bahwa nilai periode getar alami untuk semua metode berada dalam rentang yang dipersyaratkan SNI 1726:2019, sehingga struktur memenuhi kriteria standar. Selain itu, analisis *Base Shear* memperlihatkan bahwa nilai gaya geser dinamik lebih besar dibandingkan statik, sesuai ketentuan bahwa $V_{Dynamic} \geq 100\% \times V_{Static}$

Dari sisi partisipasi massa, keempat metode memenuhi syarat dengan nilai lebih dari 90%. Analisis simpangan menunjukkan perbedaan respons pada arah X dan Y, di mana simpangan maksimum tercatat pada metode THM sebesar 41,945 mm untuk arah X dan pada metode TH sebesar 57,330 mm untuk arah Y. Sementara itu, hasil analisis *drift ratio* mengindikasikan bahwa pergeseran antar lantai pada arah Y lebih besar dibandingkan arah X, namun masih dalam batas aman menurut SNI 1726:2019. Secara keseluruhan, penelitian ini menegaskan pentingnya penggunaan metode analisis dinamik untuk memperoleh gambaran yang lebih realistis terhadap perilaku struktur bangunan saat gempa, serta memberikan dasar bagi perencanaan bangunan yang lebih aman dan andal.

Nurkhusnaedi, 2025) melakukan penelitian dengan judul “Perbandingan Respon Struktur Dengan Penerapan Beban Gempa Statik Ekuivalen, Respon

Spektrum, dan *Time History*". Aktivitas tektonik di sekitar wilayah Indonesia menyebabkan sering terjadinya gempa bumi yang dapat mengganggu kestabilan struktur bangunan, terutama pada bangunan bertingkat tinggi. Oleh karena itu, dalam analisis struktur bangunan tinggi diperlukan penerapan analisis gempa secara statik maupun dinamik. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui respons struktur terhadap tiga jenis pembebanan gempa, yaitu Statik Ekuivalen, Respon Spektrum, dan *Time History*, pada bangunan apartemen 12 lantai setinggi 48 meter dengan bentuk geometri tidak beraturan. Analisis dilakukan menggunakan pemodelan 3D di software ETABS, dengan parameter evaluasi meliputi gaya geser dasar, simpangan antar tingkat, ketidakberaturan struktur, dan gaya dalam.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa beban gempa Statik Ekuivalen menghasilkan gaya geser dasar paling besar, diikuti oleh Respon Spektrum dan *Time History* yang masing-masing mengalami penurunan hingga 29%. Simpangan struktur tertinggi terjadi pada tingkat 1–4, dan menurun di tingkat atas. Ketidakberaturan torsi tipe 1a muncul pada arah y untuk beban Statik Ekuivalen dan Respon Spektrum, sedangkan ketidakberaturan tingkat lunak 1a dan 1b hanya terjadi pada *Time History*. Gaya dalam terbesar (momen, gaya geser, dan gaya aksial) muncul akibat Statik Ekuivalen, meskipun perbedaan nilai tersebut mengecil di tingkat 11 dan 12. Kesimpulannya, metode Statik Ekuivalen masih efektif digunakan pada bangunan hingga 10 lantai atau setinggi 40 meter, namun untuk bangunan lebih tinggi disarankan menggunakan metode dinamik seperti Respon Spektrum atau *Time History* untuk hasil analisis yang lebih representatif.

2.2 Perbandingan Penelitian Terdahulu

Penelitian sebelumnya menggunakan metode *Time History* untuk menganalisis struktur bangunan dengan menyoroti aspek berbeda dari kinerja struktur. Perbandingan hasil dan pendekatan dari penelitian-penelitian tersebut disajikan secara rinci pada Tabel 2.1.

Tabel 2.1 Perbandingan Penelitian Terdahulu

No.	Aspek	Dwi Pangestu dkk., (2021)	Purnama Putra dkk., (2021)	Silaban, G.T., dkk (2023)	Saputra, N.E dan Priastiwi, Y.A (2021)	Nurkhusnaedi, R.A (2025)	Firdaus Sukma Putra (2025)
1.	Judul	Analisis Kinerja Struktur pada Model Bangunan <i>Setback</i> menggunakan Metode <i>Time History Analysis</i> .	Evaluasi Kinerja Struktur Gedung Bertingkat dengan Metode Analisis <i>Time History</i> (Studi Kasus: Apartemen Kingland Avenue Serpong)”	<i>Performance Evaluation of High-rise Buildings with Respon Spectrum Analysis and Time History Analysis</i>	<i>Omparative Study Of Dynamic Earthquake Analysis With Spectral Design And Time History Methods</i>	Perbandingan Respon Struktur Dengan Penerapan Beban Gempa Statik Ekuivalen, Respon Spektrum, dan <i>Time History</i>	Perbandingan Respons Struktur Gedung Dengan Variasi Bentuk Denah Menggunakan Metode Respons Spektrum Dan <i>Time History</i>
2.	Tujuan Penelitian	Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis tingkat kinerja sistem struktur dengan dan tanpa <i>setback</i> menggunakan metode <i>Time History analysis</i> .	Tujuan penelitian ini adalah mengetahui kinerja struktur berdasarkan SNI 1726:2019 menggunakan metode <i>Time History</i> pada Gedung Apartemen Kingland Avenue Serpong.	Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui kinerja struktur terhadap <i>displacement, drift</i> dan batas stabilitas struktur terhadap beban gempa berdasarkan peraturan (Badan Standarisasi Nasional, 1726:2019).	Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui perbandingan struktur gempa dengan metode <i>Response Spectrum, Response Spectrum Matched, Time Histories, dan Time Histories Matched</i> terhadap besarnya periode getar alami struktur, gaya geser dasar, partisipasi massa, simpangan, dan simpangan antar tingkat.	Penelitian ini bertujuan mengetahui respon struktur dengan penerapan beban gempa Statik Ekuivalent, Respons Spektrum, dan <i>Time History</i> .	Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui perbandingan respons struktur berdasarkan variasi bentuk bangunan terhadap analisis dinamik Respons Spektrum Analisis (RSA) dan <i>Time History Analysis</i> (THA)
3.	Lokasi	Kota Kupang	Tangerang Selatan	Jakarta Timur	Semarang	Yogyakarta	Yogyakarta

Lanjutan Tabel 2.1 Perbandingan Penelitian Terdahulu

No.	Aspek	Dwi Pangestu dkk., (2021)	Purnama Putra dkk., (2021)	Silaban, G.T., dkk (2023)	Saputra, N.E dan Priastiwi, Y.A (2021)	Nurkhusnaedi, R.A (2025)	Firdaus Sukma Putra (2025)
4.	Metode Penelitian	Pendekatan terbaru dalam perancangan bangunan tahan gempa adalah Metode Desain Berbasis Kinerja (Performance Based Design), yang berfokus pada aspek keamanan, pengendalian deformasi, dan pemenuhan kriteria kinerja tertentu. Pada penelitian ini, analisis kinerja struktur dengan sistem <i>setback</i> dilakukan menggunakan metode <i>Time History analysis</i> , dengan bantuan perangkat lunak ETABS V17 untuk mengevaluasi respons bangunan terhadap gempa.	Data rekaman gempa diunduh dari peer.berkeley.edu dan parameter respons spektrum diperoleh dari SNI 1726 (2019) untuk lokasi penelitian. Model 3D dibuat dengan aplikasi pemodelan struktur, kemudian data rekaman gempa yang telah diskalakan dimasukkan ke dalam model bersama dengan beban mati dan hidup. Analisis <i>drift</i> dilakukan, dan kontrol struktur dilakukan untuk memastikan kesesuaian dengan simpangan antar tingkat izin SNI 1726 (2019) dan kinerja struktur sesuai ATC-40.	Adapun metode yang digunakan di dalam penelitian ini adalah metode analisa dan simulasi berdasarkan analisis linier dinamik respons spektrum dan analisis riwayat waktu dinamik linier gempa terhadap bangunan Rusun Pulo Jahe, Jakarta Timur dengan menggunakan <i>software</i> ETABS V.17.	Pada penelitian ini pemodelan struktur yang dilakukan terdiri dari 4 jenis model beban gempa dengan panjang 28 meter dan lebar 28 meter untuk struktur gedung dan jumlah lantai yang sama yaitu delapan lantai, namun model beban gempa yang berbeda menggunakan metode yang berbeda pula. RS, RSM, TH dan THM. Struktur bangunan dalam studi ini berfungsi sebagai fasilitas hotel.	Objek pada penelitian ini adalah bangunan apartemen 12 lantai setinggi 48 meter dengan bentuk geometri tidak beraturan. Analisis dilakukan menggunakan pemodelan 3D di software ETABS, dengan parameter evaluasi meliputi gaya geser dasar, simpangan antar tingkat, ketidakberaturan struktur, dan gaya dalam.	Penelitian ini menggunakan pendekatan analisis dinamik linear dengan metode respons spektrum (RSA) dan <i>Time History Analysis</i> untuk mengevaluasi perilaku struktur terhadap beban gempa. Pemodelan dilakukan menggunakan ETABS V22 dengan variasi bentuk struktur persegi, T, dan L. Beban gempa ditentukan berdasarkan SNI 1726:2019, dengan rekaman gempa yang disesuaikan menggunakan <i>matching</i> terhadap respons spektral target. Analisis mencakup parameter <i>Base Shear</i> , <i>Drift</i> , <i>Story</i> , <i>Displacement</i> , serta ketidakberaturan struktur.

Lanjutan Tabel 2.1 Perbandingan Penelitian Terdahulu

No.	Aspek	Dwi Pangestu dkk., (2021)	Purnama Putra dkk., (2021)	Silaban, G.T., dkk (2023)	Saputra, N.E dan Priastiw, Y.A (2021)	Nurkhusnaedi, R.A (2025)	Firdaus Sukma Putra (2025)
5.	Hasil Penelitian	Bangunan <i>setback</i> satu lantai memiliki kapasitas penahan gempa lateral terbesar pada arah timur-barat karena massa strukturnya lebih ringan akibat perubahan geometri, sementara kekuatan lateralnya hampir setara dengan bangunan <i>non-setback</i> . Sebaliknya, pada arah utara-selatan, bangunan <i>non-setback</i> menunjukkan kapasitas lebih tinggi karena memiliki lebih banyak elemen penahan gaya lateral. Meskipun terdapat perbedaan kapasitas, selisihnya relatif kecil, yaitu 1,07% untuk arah timur-barat dan 4,79% untuk arah utara-selatan. Analisis <i>pushover</i> menunjukkan bahwa kedua jenis bangunan memiliki tingkat kinerja <i>immediate occupancy</i> , sementara hasil analisis <i>Time History analysis</i> menunjukkan variasi kinerja dari <i>immediate occupancy</i> hingga <i>damage control</i> .	Analisis <i>Time History</i> menunjukkan bahwa gedung aman dengan rekaman gempa Chi-Chi dan El Centro pada arah X dan Y menurut SNI 1726 (2019). Namun, pada gempa Kobe arah X, satu lantai tidak memenuhi simpangan antar tingkat izin, meski aman pada arah Y. Evaluasi ATC-40 menunjukkan tingkat kinerja <i>Damage Control</i> (DC), dengan kerusakan yang bervariasi antara kategori <i>Immediate Occupancy</i> (IO) dan <i>Life Safety</i> (LS). Risiko korban jiwa sangat rendah, meskipun struktur bisa rusak tapi tidak runtuh.	Hasil analisis menunjukkan bahwa perpindahan (<i>displacement</i>) rata-rata pada lantai 4 hingga lantai 12 di arah horizontal X melebihi batas <i>drift</i> yang diizinkan. Selain itu, evaluasi koefisien stabilitas struktur terhadap <i>displacement</i> mengindikasikan bahwa efek P-Delta berpengaruh signifikan, sehingga diperlukan upaya perancangan ulang untuk meningkatkan kekakuan kolom atau penambahan dinding geser pada sumbu X guna memperkuat stabilitas bangunan.	Hasil penelitian ini bahwa periode getar alami struktur dengan metode gempa RS 1,412 detik, RSM 1,453 detik, TH 1,453 detik, dan THM 1,453 detik berada diantara batas bawah 1,054 detik dan batas atas 1,476 detik, sehingga memenuhi persyaratan SNI 1726:2019. Hasil analisis geser dasar menunjukkan bahwa analisis dinamis lebih besar daripada statis dan model struktur memenuhi persyaratan yaitu $V_{Dynamics} > 100\%$. V_{Static} . Hasil analisis perpindahan diperoleh untuk arah x, THM terbesar adalah 41,945 mm dan untuk arah y, TH adalah 57,330 mm. Hasil analisis rasio drift diperoleh untuk hasil drift arah y yang lebih besar daripada drift arah x dan kontrol izin untuk semua metode gempa aman dan memenuhi persyaratan SNI 1726:2019.	Gempa Statik Ekvivalen menghasilkan gaya geser dasar paling besar dibandingkan Respon Spektrum dan <i>Time History</i> , yang masing-masing mengalami penurunan hingga 29%. Simpangan struktur meningkat pada lantai 1-4 dan menurun di lantai 5-12, dengan simpangan maksimum terjadi pada lantai 4 untuk Statik Ekvivalen dan lantai 3 untuk dua metode lainnya. Gaya dalam terbesar, meliputi momen, gaya geser, dan gaya aksial, ditimbulkan oleh Statik Ekvivalen, namun perbedaannya mengecil di lantai atas. Secara keseluruhan, Statik Ekvivalen masih efektif untuk bangunan hingga 10 lantai (40 m), sedangkan untuk bangunan lebih tinggi disarankan menggunakan metode dinamik.	Berdasarkan hasil analisis, RSA menunjukkan respons struktur yang lebih seimbang dan konservatif, ditandai oleh perbedaan gaya geser dasar arah X dan Y yang sangat kecil (rata-rata 0,872%), dominasi simpangan pada arah X, serta ketidakberaturan horizontal yang hanya terjadi pada gedung berdenah T arah X, sementara seluruh model tetap <i>regular</i> terhadap ketidakberaturan vertikal. Sebaliknya, THA memperlihatkan respons yang lebih sensitif terhadap arah pembebanan dan karakteristik input gempa, dengan selisih gaya geser dasar yang signifikan (11,040%) dan pengaruh resonansi, meskipun seluruh model masih tergolong <i>regular</i>

2.3 Keaslian Penelitian

Metode analisis struktur menggunakan *Response Spectrum Analysis* (RSA) dan *Time History Analysis* (THA) telah banyak digunakan dalam penelitian sebelumnya, seperti ditunjukkan pada Tabel 2.1. Namun, belum ditemukan studi yang secara khusus menerapkan kedua metode tersebut pada bangunan dengan variasi bentuk denah (Persegi, T dan L) dengan ketinggian 14 lantai pada wilayah Bantul, Yogyakarta. Oleh karena itu, penelitian ini memiliki keaslian yang dapat dipertanggungjawabkan.

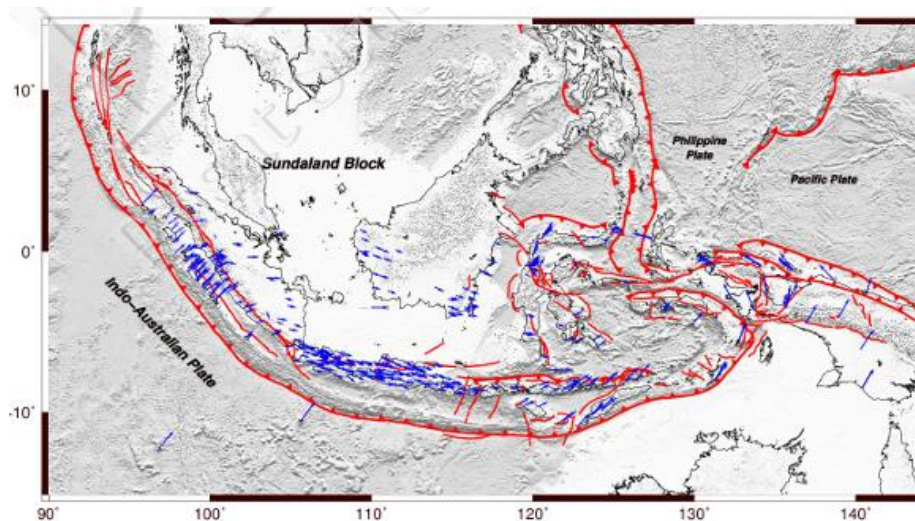
BAB III

LANDASAN TEORI

3.1 Gempa Bumi

Menurut Pawirodikromo (2012), gempa bumi merupakan salah satu fenomena alam yang dapat memicu terjadinya bencana. Disebut sebagai fenomena alam karena proses terjadinya dipengaruhi oleh aktivitas tektonik alami yang berlangsung dalam kurun waktu yang sangat lama, dan tidak secara langsung disebabkan oleh ulah manusia. Meski begitu, tidak semua gempa bumi menimbulkan bencana. Jika magnitudonya kecil, jarak episenternya jauh, atau hiposenternya dalam, dampaknya terhadap kehidupan manusia biasanya tidak signifikan dan tidak sampai mengganggu. Namun, jika kondisi sebaliknya terjadi, gempa bumi dapat berubah menjadi bencana, terutama jika dampaknya sudah mengacaukan aktivitas normal masyarakat, baik di tingkat lokal, regional, maupun nasional.

Indonesia memiliki kondisi tektonik yang berada di antara pertemuan lempeng besar dunia dan beberapa lempeng kecil. Hal ini menjadikan wilayah Indonesia sangat rentan terhadap aktivitas gempa bumi. Negara ini dikelilingi oleh empat lempeng utama, yaitu Lempeng Eurasia, Lempeng Indo-Australia, Lempeng Laut Filipina, dan Lempeng Pasifik. Berdasarkan penelitian lebih lanjut yang menggunakan data geodetik, geologi, dan seismologi, wilayah tektonik Indonesia dapat dibagi menjadi beberapa lempeng kecil, seperti Burma, Sunda, Laut Banda, Laut Maluku, Timor, Kepala Burung, Maoke, dan Woodlark Berikut merupakan peta gempa di Indonesia yang dapat dilihat pada Gambar 3.1



Gambar 3.1 Peta Tektonik Wilayah Indonesia Dari Data Geodetik Hingga Tahun 2016, Vektor Kecepatan Pada Referensi Sistem ITRF 2008

(Sumber : Katalog Pusat Studi Gempa Nasional 2017)

Akibat aktivitas tektonik yang berlangsung, gempa bumi sering terjadi di sebagian besar wilayah Indonesia. Salah satu sumber utama gempa yang telah teridentifikasi dengan jelas adalah zona subduksi aktif yang membentang dari bagian barat hingga timur Indonesia. Selain itu, energi sisa dari tumbukan antar lempeng tersebut juga memicu terbentuknya sesar-sesar di daratan maupun lautan yang tersebar di berbagai pulau dan perairan Indonesia (Peta sumber dan bahaya gempa Indonesia tahun, 2017).

3.2 Konsep Bangunan Tahan Gempa

Bangunan tahan gempa adalah bangunan yang dirancang untuk dapat bertahan dan tidak mengalami kegagalan struktural total saat terjadi gempa. Meskipun demikian, hal ini tidak berarti bahwa bangunan tersebut tidak boleh mengalami kerusakan sama sekali. Bangunan tahan gempa masih dapat mengalami kerusakan, tetapi harus tetap memenuhi persyaratan keamanan yang telah ditetapkan.

Menurut Pawirodikromo (2012), filosofi bangunan tahan gempa dapat dijelaskan sebagai berikut:

1. Pada gempa kecil (*light atau minor earthquake*) yang sering terjadi, struktur utama pada bangunan diharapkan tetap berfungsi dengan baik dan tidak

mengalami kerusakan yang signifikan. Kerusakan kecil yang terjadi pada elemen non-struktural masih bisa ditoleransi dan dianggap wajar.

2. Pada gempa menengah (*moderate earthquake*) yang terjadi cukup jarang, struktur utama pada bangunan diharapkan masih dapat diperbaiki setelah gempa dan mungkin mengalami kerusakan atau retakan ringan. Elemen non-struktural masih bisa mengalami kerusakan tetapi masih bisa diganti dengan elemen non-struktural yang baru.
3. Pada gempa kuat (*strong earthquake*), struktur bangunan masih bisa mengalami kerusakan namun tidak boleh sampai menyebabkan bangunan runtuh total (*totally collapse*). Meskipun kondisi ini jarang terjadi, diharapkan bahwa saat terjadi gempa besar (*great earthquake*), bangunan masih mampu memberikan perlindungan maksimal bagi manusia atau penghuninya.

3.3 Ketentuan Umum Perencanaan Struktur Bangunan Gedung Berdasarkan SNI-1726-2019

Dalam kaitannya dengan perencanaan beban gempa respons spektrum untuk tugas akhir ini, terdapat ketentuan-ketentuan yang akan digunakan sebagai berikut.

3.3.1 Kategori Risiko Bangunan Gedung

SNI-1726-2019 mengategorikan risiko pada struktur bangunan berdasarkan jenis pemanfaatan bangunan. Ada 4 kategori risiko berdasarkan jenis pemanfaatan bangunan yang dikelompokkan berdasarkan prioritas risiko yang ditimbulkannya, seperti yang tercantum dalam Tabel 3.1 Berikut.

Tabel 3.1 Kategori Risiko Bangunan Gedung dan Non Gedung Untuk Beban Gempa

Jenis Pemanfaatan	Kategori risiko
Gedung dan non gedung yang dikategorikan sebagai fasilitas yang penting, termasuk, tetapi tidak dibatasi untuk: <ul style="list-style-type: none"> - Bangunan-bangunan monumental - Gedung sekolah dan fasilitas pendidikan - Rumah ibadah 	IV

**Lanjutan Tabel 3.1 Kategori Risiko Bangunan Gedung dan Non Gedung
Untuk Beban Gempa**

Jenis Pemanfaatan	Kategori risiko
<ul style="list-style-type: none"> - 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 pemadam kebakaran atau struktur rumah atau struktur pendukung air atau material atau peralatan pemadam kebakaran) yang disyaratkan untuk beroperasi pada saat keadaan darurat Gedung dan non gedung yang dibutuhkan untuk mempertahankan fungsi struktur bangunan lain yang masuk ke dalam kategori risiko IV. 	

(Sumber : SNI 1726:2019, Tabel 3)

3.3.2 Faktor Keutamaan Gempa

Faktor keutamaan bangunan digunakan untuk meningkatkan beban gempa rencana. Nilai faktor keutamaan gempa diambil berdasarkan kategori risiko bangunan. Nilai-nilai faktor keutamaan gempa dapat dilihat pada Tabel 3.2 berikut.

Tabel 3.2 Faktor Keutamaan Gempa

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

(Sumber : SNI 1726:2019)

3.3.3 Klasifikasi Situs

Pada SNI-1726-2019, klasifikasi situs dibagi menjadi enam jenis tanah yang berbeda. Klasifikasi ini digunakan untuk menentukan kriteria desain seismik, seperti faktor amplifikasi, yang diterapkan pada bangunan. Sebelum merumuskan kriteria desain seismik untuk suatu bangunan di permukaan tanah tertentu, penting untuk mengklasifikasikan situs tersebut sesuai dengan jenis tanahnya. Detail klasifikasi situs tanah dapat dilihat pada Tabel 3.3 berikut.

Tabel 3.3 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 sampai 1500	N/A	N/A
SC (Tanah Keras, Sangat Padat dan Batuan Lunak)	350 sampai 750	>50	≥ 100
SD (Tanah Sedang)	175 sampai 350	15 sampai 50	50 sampai 100
SE (Tanah Lunak)	<175	<15	<50
	Atau setiap profil tanah yang mengandung lebih dari 3 m tanah dengan karakteristik sebagai berikut: 1. Indeks plastisitas, $PI > 20$, 2. Kadar air, $w \geq 40\%$, 3. Kuat geser niralir, $\bar{S}_u < 25$ kPa		
SF (Tanah Khusus, yang membutuhkan investigasi geoteknik spesifik dan analisis respons spesifik-situs yang mengikuti 0)	Setiap profil lapisan tanah yang memiliki salah satu atau lebih dari karakteristik berikut: - Rawan dan berpotensi gagal atau runtuh akibat beban gempa seperti mudah likuefaksi, lempung sangat sensitif, tanah tersementasi lemah - Lempung sangat organik dan/atau gambut (ketebalan $H > 3$ m) - Lempung berplastisitas sangat tinggi (ketebalan $H > 7,5$ m dengan indeks plastisitas $PI > 75$) - Lapisan lempung lunak/setengah teguh dengan ketebalan $H > 35$ m dengan $\bar{S}_u > 50$ kPa		

(Sumber : SNI 1726:2019)

3.3.4 Spektrum Respons Desain

Spektrum respons desain adalah grafik yang menggambarkan hubungan antara percepatan respons spektrum dengan periode getaran. Grafik ini biasanya dikenal sebagai kurva respons spektrum. Untuk menghasilkan kurva tersebut, dapat

digunakan rumus-rumus yang tercantum dalam SNI 1726:2019, disertai dengan ketentuan yang harus dipenuhi.

1. Untuk periode yang lebih kecil dari T_u , spektrum respons percepatan desain, S_a harus diambil dari Persamaan 3.1 berikut.

$$S_a = S_{DS} \left(0,4 + 0,6 \frac{T}{T_0} \right) \quad (3.1)$$

2. Untuk periode lebih besar dari atau sama dengan T_0 dan lebih kecil dari atau sama dengan T_s , spektrum respons percepatan desain, S_a sama dengan S_{DS} .
3. Untuk periode lebih besar dari T_s , tetapi lebih kecil dari atau sama dengan T_L , respons spektral percepatan desain, S_a diambil berdasarkan Persamaan 3.2 berikut ini.

$$S_a = \frac{S_{D1}}{T} \quad (3.2)$$

4. Untuk periode lebih besar dari T_L , respons spektral percepatan desain, S_a , diambil berdasarkan Persamaan 3.3 berikut ini.

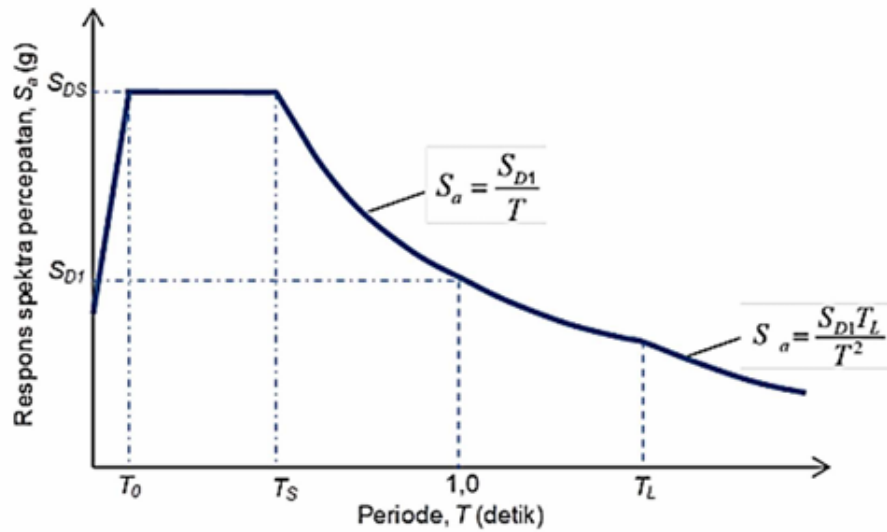
$$S_a = \frac{S_{D1} T_L}{T^2} \quad (3.3)$$

Untuk parameter lain dapat dicari menggunakan Persamaan 3.4 dan 3.5 berikut ini.

$$T = 0,2 \frac{S_{D1}}{S_{DS}} \quad (3.4)$$

$$T_s = \frac{S_{D1}}{S_{DS}} \quad (3.5)$$

Hasil dari perhitungan respons spektrum desain akan menghasilkan kurva respons spektrum seperti Gambar 3.2 berikut ini.



Gambar 3.2 Spektrum Respons Desain

(Sumber : SNI 1726:2019, Gambar 3)

3.3.5 Kategori Desain Seismik

Berdasarkan SNI-1726-2019, setiap struktur harus ditetapkan memiliki kategori desain seismik (KDS) sesuai dengan ketentuan berikut.

1. Struktur dengan kategori risiko I, II, atau III yang memiliki nilai $S_1 \geq 0,75$ harus ditetapkan sebagai kategori desain seismik E.
2. Struktur dengan kategori risiko IV yang memiliki nilai $S_1 \geq 0,75$ harus ditetapkan sebagai kategori desain seismik F.

Semua struktur lainnya harus ditetapkan kategori desain seismiknya berdasarkan kategori risiko dan parameter respons spektral percepatan desain (S_{DS} dan S_{D1}). Penentuan kategori desain seismik dilakukan sesuai dengan panduan yang tercantum dalam Tabel 3.4 dan Tabel 3.5 berikut.

Tabel 3.4 Kategori Desain Seismik Berdasarkan Parameter Respons Percepatan Pada Periode Pendek

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 3.5 Kategori Desain Seismik Berdasarkan Parameter Respons Percepatan Pada Periode 1 Detik

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

(Sumber : SNI 1726:2019)

3.3.6 Pemilihan Sistem Struktur Gedung

Setelah mengetahui sistem pemikul gaya seismik pada gedung yang akan dirancang, diperlukan tiga faktor utama untuk menghitung beban lateral, yaitu faktor modifikasi respons (R), faktor kuat lebih sistem (Ω_0), dan faktor pembesaran defleksi (C_d). Contoh penerapan Rangka Beton Bertulang Pemikul Momen yang sering digunakan dapat dilihat pada Tabel 3.6 berikut.

Tabel 3.6 Faktor R , C_d , dan Ω_0 untuk Sistem Penahan Gaya Gempa

Sistem Pemikul Gaya Seismik	Koefisien Modifikasi Respons, R^a	Faktor Kuat Lebih Sistem, Ω_0^b	Faktor Pembesaran Defleksi, C_d^c	Batasan sistem struktur dan batasan tinggi struktur, h_n (m) ^d				
				Kategori desain seismik				
				A	B	C	D	E
C. Sistem rangka pemikul momen								
1. Rangka beton bertulang pemikul momen khusus	8	3	5,5	TB	TB	TB	TB	TB
2. Rangka beton pemikul momen menengah	5	3	4,5	TB	TB	TI	TI	TI
3. Rangka beton pemikul momen biasa	3	3	2,5	TB	TI	TI	TI	TI

(Sumber : SNI 1726:2019)

dengan:

A = Koefisien modifikasi respons, R , untuk penggunaan pada keseluruhan standar. Nilai R mereduksi gaya ke level kekuatan bukan pada level tegangan izin.

B = Jika nilai pada Tabel faktor kuat lebih, Ω_0 , lebih besar atau sama dengan

2,5, Ω_0 maka diizinkan untuk direduksi setengah untuk struktur dengan diafragma fleksibel.

- C = Faktor pembesaran simpangan lateral, C_d , untuk penggunaan dalam 0, 0, dan 0
- D = TB = Tidak Dibatasi dan TI = Tidak Diizinkan

3.3.7 Periode Fundamental Pendekatan

Periode fundamental struktur (T) dapat diperoleh melalui analisis struktur yang ditinjau. Namun, sesuai dengan SNI-1726-2019, periode fundamental yang digunakan dalam perhitungan tidak boleh melebihi batas atas periode fundamental pendekatan, yang diperoleh dari hasil perkalian koefisien periode batas atas (C_u) dengan periode pendekatan (T_a). Untuk kemudahan dalam pelaksanaan, Periode fundamental alami (T) dapat langsung menggunakan periode pendekatan (T_a). Periode pendekatan ini ditentukan berdasarkan Persamaan 3.6 berikut.

$$T_a = C_t \cdot h_n^x \quad (3.6)$$

dengan:

h_n^x adalah ketinggian struktur bangunan gedung dalam satuan meter, diukur dari dasar hingga tingkat tertinggi struktur. Koefisien C dan x ditentukan berdasarkan Tabel 3.7 berikut.

Tabel 3.7 Koefisien Untuk Batas Atas Pada Periode Yang Dihitung

Parameter Percepatan respons Spektral Desain Pada 1 Detik, S_{DS}	Koefisien C_u
$\geq 0,4$	1,4
0,3	1,4
0,2	1,5
0,15	1,6
$\leq 0,1$	1,7

(Sumber : SNI 1726:2019)

Tabel 3.8 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 dari defleksi gaya seismik:		
- Rangka baja pemikul momen	0,0772	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)

3.3.8 Gaya Geser Dasar Seismik

Menurut SNI-1726-2019, gaya geser dasar seismik V dalam arah tertentu harus ditentukan sesuai dengan Persamaan 3.7 berikut.

$$V = C_s \cdot W \quad (3.7)$$

dengan:

V = Gaya geser dasar seismik

C_s = Koefisien respons seismik

W = Berat seismik efektif

Untuk menentukan nilai koefisien respons seismik (C_s), digunakan Persamaan 3.8, yang harus mematuhi batasan nilai dari Persamaan 3.9 dan Persamaan 3.10. Selain itu, C_s tidak boleh kurang dari nilai yang dihasilkan oleh Persamaan 3.11. Untuk struktur yang berlokasi di daerah dengan nilai S_1 yang sama atau lebih besar dari 0,6g, nilai C_s harus memenuhi Persamaan 3.11.

$$C_s = \frac{SDS}{I_e} \quad (3.8)$$

Untuk $T \leq T_L$

$$C_s = \frac{SDS}{T \left(\frac{R}{I_e}\right)} \quad (3.9)$$

Untuk $T > T_L$

$$C_s = \frac{SD1 \cdot TL}{T^2 \left(\frac{R}{I_e}\right)} \quad (3.10)$$

C_S tidak boleh kurang dari

$$C_S = 0,044 S_{DS} \cdot I_e \geq 0,001 \quad (3.11)$$

$$C_S = \frac{0,5 S_1}{\frac{R}{I_e}} \quad (3.12)$$

3.3.9 Distribusi Vertikal Gaya Seismik

Pendistribusian gaya seismik lateral (F_x) pada setiap tingkat lantai dapat dihitung menggunakan persamaan 3.13 yang mempergunakan koefisien faktor distribusi vertikal (C_{vx}) seperti pada persamaan 3.14 berikut:

$$F_x = C_{vx} \cdot V \quad (3.13)$$

$$C_{vx} = \frac{w_x h_x^k}{\sum_{i=1}^n w_i h_i^k} \quad (3.14)$$

dengan:

C_{vx} = Faktor distribusi vertikal

V = Gaya lateral desain total atau geser pada struktur (kN)

W_i dan W_x = Bagian berat seismik efektif total struktur (W) yang ditempatkan atau dikenakan pada tingkat i atau x (m)

h_i dan h_x = Tinggi dari dasar sampai tingkat i atau x (m)

k = Eksponen yang terkait dengan Periode struktur dengan nilai sebagai berikut:

- Untuk struktur dengan $T \leq 0,5$ detik, $k = 1$,
- Untuk struktur dengan $T \geq 2,5$ detik, $k = 2$,
- Untuk struktur dengan $0,5 < T < 2,5$ detik, $k = 2$ ditentukan dan dengan interpolasi linear antara 1 dan 2.

3.3.10 Distribusi Horizontal Gaya Seismik

Gaya geser desain gempa di semua tingkat (V_x) harus ditentukan dari Persamaan 3.15 berikut:

$$C_{vx} = \sum_{i=x}^n F_i \quad (3.15)$$

dengan:

F_i = bagian dari gaya geser dasar seismik (V) yang timbul di tingkat i

V_x = didistribusikan pada tiap tingkat yang ditinjau.

3.3.11 Analisis Beban Gempa

Analisis beban gempa perlu dilakukan dengan metode yang sesuai untuk menghindari kegagalan struktur yang berpotensi merugikan. Pemilihan metode ini didasarkan pada kategori desain seismik bangunan, karakteristik struktur, sistem struktur yang digunakan, tinggi bangunan, serta adanya ketidakberaturan pada struktur. Prosedur analisis beban gempa diatur dalam SNI 1726:2019 Tabel 16, dan penjelasan lebih rinci dapat dilihat pada Tabel 3.9 berikut.

Tabel 3.9 Prosedur Analisis yang Diizinkan

Kategori Desain Seismik	Karakteristik Struktur	Analisis Gaya Lateral Ekuivalen Pasa 7.8	Analisis Spektrum Respons Ragam Pasal 7.8	Prosedur Respons Riwayat Waktu Seismik Pasal 11
B, C	Semua Struktur	I	I	I
D, E, F	Bangunan dengan kategori risiko I atau II yang tidak melebihi 2 tingkat di atas dasar	I	I	I
	Struktur tanpa ketidakberaturan struktural dan ketinggiannya tidak melebihi 48,8 m	I	I	I
	Struktur tanpa ketidakberaturan struktural dengan ketinggian melebihi 48,8 m dan $T < 3,5 T_s$	I	I	I
	Struktur dengan ketinggian tidak melebihi 48,8 m dan hanya memiliki ketidakberaturan horizontal tipe 2,3,4 atau 5 atau ketidakberaturan vertikal tipe 4, 5a atau 5b	I	I	I
	Semua struktur lainnya	TI	I	I

Catatan : I = Diizinkan; TI = Tidak Diizinkan

3.3.12 Arah Ortogonal

Struktur dianalisis menggunakan metode analisis ragam respons spektra dan analisis riwayat respons waktu. Pembebanan diterapkan secara terpisah pada dua arah ortogonal.

3.3.13 *Participating Mass Ratio*

Berdasarkan SNI 1726-2019 pasal 7.9.1.1, sebelum melakukan analisis struktur gedung, perlu dilakukan penentuan terhadap ragam getar alaminya. Analisis ini harus mencakup kontribusi massa yang cukup besar, dengan tujuan agar total partisipasi massa mendekati 100% dari keseluruhan massa struktur, Namun, apabila pencapaian 100% sulit dilakukan, maka diperbolehkan menggunakan minimal 90% dari massa aktual struktur.

3.3.14 Redundansi

Faktor redundansi (ρ) berfungsi untuk meningkatkan keandalan sistem struktur, sehingga dapat mencegah kegagalan struktur sekaligus menambah faktor keamanan pada sebuah bangunan. Penghitungan nilai faktor redundansi ini harus dilakukan untuk kedua arah ortogonal sesuai dengan SNI 1726:2019. Ada beberapa kondisi di mana nilai ρ ditetapkan sebesar 1,0, yaitu:

1. Desain struktur untuk kategori desain seismik B atau C.
2. Perhitungan simpangan antar tingkat dan efek P-delta.
3. Desain komponen non-struktural.
4. Desain struktur non-gedung yang tidak menyerupai gedung.
5. Desain elemen kolektor, sambungan lanjutan, dan sambungan lainnya.
6. Desain elemen struktur atau sambungan yang memperhitungkan kombinasi pengaruh beban seismik termasuk faktor kuat lebih.
7. Desain struktur dengan sistem peredam.
8. Desain dinding struktural terhadap gaya keluar bidang.

Sementara itu, untuk bangunan dengan kategori desain seismik D, E, dan F, nilai ρ harus ditetapkan sebesar 1,3. Namun, terdapat dua pengecualian di mana nilai ρ diizinkan untuk diambil sebesar 1,0, yaitu:

1. Setiap tingkat mampu menahan lebih dari 35% gaya geser dasar pada arah yang dianalisis.

2. Struktur dengan denah beraturan di semua tingkat, di mana sistem pemikul gaya seismik terdiri dari minimal dua bentang perimeter pemikul gaya seismik pada masing-masing sisi struktur dalam setiap arah ortogonal, di setiap tingkat yang menahan lebih dari 35% gaya geser dasar. Untuk dinding geser, jumlah bentang dihitung dengan membagi panjang dinding geser dengan tinggi tingkat, atau dua kali panjang dinding geser dibagi dengan tinggi tingkat (h_{sx}) untuk konstruksi rangka ringan.

3.3.15 Berat Seismik Efektif

Berat seismik efektif (W) harus menyertakan seluruh beban mati dan beban lainnya yang terdaftar di bawah ini.

1. Dalam daerah yang digunakan untuk penyimpanan, minimum sebesar 25% terhadap beban hidup lantai.

Pengecualian :

- a. Bila beban penyimpangan tidak lebih dari 5% terhadap beban seismik efektif pada tingkat tersebut, beban tidak perlu dimasukkan dalam berat seismik efektif.
 - b. Beban hidup lantai di tempat parkir umum dan struktur parkir terbuka perlu dimasukkan.
2. Jika ketentuan desain beban lantai untuk partisi disyaratkan SNI 1727 Pasal 4.2.1, sebesar beban terbesar antara berat partisi aktual atau berat daerah lantai minimum sebesar $0,48 \text{ kN/m}^2$.
 3. Berat operasional total dari peralatan yang permanen.
 4. Berat lanskap dan beban lainnya pada taman atap dan area sejenis.

3.4 Pembebanan Struktur

Dalam penelitian ini, analisis akan difokuskan pada tiga jenis beban yang paling signifikan mempengaruhi struktur, yaitu beban mati, beban hidup, dan beban gempa.

3.4.1 Beban Gravitasi

1. Beban Mati

Menurut Pasal 3.1 SNI 1727-2020, beban mati adalah berat keseluruhan bahan konstruksi bangunan gedung yang terpasang, termasuk dinding, lantai, atap, plafon, tangga, dinding partisi tetap, serta komponen arsitektural dan struktural lainnya, serta peralatan layan terpasang lainnya, termasuk berat derek dan sistem pengangkut material. Besaran beban-beban ini dapat ditentukan berdasarkan SNI 03-1727-1989, yang mengatur tentang Pedoman Perencanaan Pembebanan untuk Rumah dan Gedung.

2. Beban Hidup

Menurut Pasal 4.3 SNI 1727-2020, beban hidup adalah beban yang dihasilkan oleh pengguna bangunan, benda, atau struktur yang tidak termasuk dalam beban konstruksi dan beban lingkungan. Beban hidup untuk struktur bangunan dapat ditentukan berdasarkan SNI 1727-2020, tentang beban minimum untuk Perancangan Bangunan Gedung dan Struktur Lain. Beban hidup pada rumah sakit harus paling sedikit sebesar 1.92 kN/m^2 , sedangkan untuk beban hidup pada atap harus paling sedikit sebesar 0.96 kN/m^2 .

3.4.2 Beban Gempa

Gempa bumi merupakan salah satu beban utama yang harus diperhitungkan dalam perancangan struktur bangunan, khususnya di wilayah dengan tingkat aktivitas seismik tinggi seperti Indonesia. SNI 1726:2019 memberikan panduan dalam penentuan beban gempa dengan mempertimbangkan berbagai metode analisis yang disesuaikan dengan karakteristik struktur serta tingkat ketelitian yang diperlukan. Beban gempa merujuk pada gaya lateral yang timbul akibat gerakan seismik tanah selama peristiwa gempa bumi, sehingga perhitungannya harus dilakukan secara sistematis sesuai dengan ketentuan yang berlaku untuk memastikan ketahanan dan keamanan struktur bangunan.

Dalam perancangan struktur bangunan tahan gempa, terdapat beberapa metode yang digunakan untuk mengevaluasi respons struktur terhadap beban seismik, antara lain.

3.4.2.1 Statik Ekuivalen

(Rifandi, I. dkk., 2020) menjelaskan bahwa analisis statik ekuivalen merupakan metode pendekatan dalam evaluasi beban gempa yang

menyederhanakan perhitungan respons seismik struktur. Pendekatan ini menggantikan karakteristik dinamis gempa yang kompleks dengan gaya lateral ekuivalen yang dihasilkan akibat inersia massa struktur selama peristiwa seismik. Secara prinsip, beban gempa timbul akibat pergerakan tanah di bagian dasar struktur, yang kemudian ditransmisikan melalui elemen-elemen konstruksi hingga mencapai keseluruhan sistem struktural. Dengan asumsi-asumsi tertentu, metode ini memungkinkan estimasi respons struktur secara praktis tanpa memodelkan seluruh aspek dinamis dari gerakan tanah, sehingga menjadi alat yang efisien dalam perancangan bangunan tahan gempa.

3.4.2.2 Respons Spektrum

Menurut Pawirodikromo (2012), respons spektrum merupakan representasi grafis yang menunjukkan keterkaitan antara periode getar struktur T dengan respons maksimum yang terjadi pada suatu sistem, dengan mempertimbangkan rasio redaman serta karakteristik beban gempa tertentu. Respons maksimum yang dianalisis dapat berupa simpangan maksimum (*Spectral Displacement, SD*), kecepatan maksimum (*Spectral Velocity, SV*), atau percepatan maksimum (*Spectral Acceleration, SA*) pada sistem struktur dengan satu derajat kebebasan (*Single Degree of Freedom, SDOF*). Spektrum ini berperan sebagai alat analisis untuk mengevaluasi respons dinamis struktur terhadap eksitasi seismik secara lebih mendalam, sehingga memberikan pemahaman yang komprehensif mengenai perilaku struktur dalam menghadapi beban gempa.

3.4.2.3 *Pushover* Analisis

Menurut Septian, N., dkk., (2022) analisis *pushover*, atau dikenal sebagai analisis beban dorong statik, merupakan teknik untuk menilai perilaku keruntuhan suatu bangunan saat menghadapi beban gempa dengan cara memberikan beban lateral statik yang ditingkatkan secara bertahap hingga mencapai perpindahan target pada titik referensi, umumnya di atap. Metode ini menghasilkan kurva *pushover* yang menampilkan hubungan antara gaya geser dasar (V) dan perpindahan titik referensi (D), mengungkap respons struktur dari fase elastis hingga in-elastis, termasuk titik leleh dan kapasitas maksimumnya. Analisis ini bermanfaat untuk mengidentifikasi kelemahan struktur, memperkirakan tingkat daktilitas, dan

memberikan landasan untuk perancangan *retrofitting*, sehingga meningkatkan ketahanan struktur terhadap gempa.

3.4.2.4 *Time History*

Hutahean, N, dkk., (2020) menerangkan bahwa analisis *Time History* merupakan metode analisis dinamis yang menstimulasikan respons struktur terhadap rekaman gempa melalui penerapan input gerakan tanah secara langsung pada model struktur. Perhitungan dilakukan dalam domain waktu dengan interval diskret, memungkinkan evaluasi evolusi respons struktural secara *real-time* terhadap eksitasi seismik. Pendekatan ini memberikan pemahaman komprehensif terkait perilaku dinamis struktur, mencakup parameter seperti simpangan, percepatan, serta distribusi gaya internal pada elemen-elemen struktural selama berlangsungnya gempa, sehingga dapat digunakan untuk menilai kinerja seismik bangunan secara lebih akurat.

3.5 Tata Cara Pemilihan Dan Modifikasi Gerak Tanah Permukaan Untuk Perencanaan Gedung Tahan Gempa (*Time History*)

Dalam kaitannya dengan perencanaan beban gempa *Time History* untuk tugas akhir ini, terdapat ketentuan-ketentuan yang akan digunakan sebagai berikut.

3.5.1 Target Respons Spektra

Berdasarkan SNI 1726:2019 Pasal 11.2.1, target respons spektrum gempa yang digunakan dalam analisis merupakan spektrum MCER pada permukaan tanah dengan tingkat redaman sebesar 5%. Sementara itu, SNI 8899:2020 menjelaskan bahwa, sesuai ketentuan dalam SNI 1726:2019 Pasal 6.8, untuk struktur yang berada pada kelas situs SA, SB, SC, SD, dan SE, target respons spektrum MCER dapat diperoleh dengan mengalikan respons spektrum desain (*Design-Based Earthquake/DBE*) dengan faktor 1,5. Spektrum desain tersebut dapat dihitung secara langsung sesuai prosedur dalam SNI 1726:2019 Pasal 6.4, menggunakan parameter percepatan dan koefisien situs spesifik yang telah ditetapkan dalam peraturan tersebut. Sebagai alternatif, untuk kelas situs yang sama (SA, SB, SC, SD, dan SE), diperbolehkan penggunaan analisis respons spektrum spesifik situs sebagaimana diatur dalam SNI 1726:2019 Pasal 6.10. Namun, untuk kelas situs SF,

sesuai ketentuan dalam SNI 1726:2019 Pasal 6.9, analisis respons spektrum spesifik situs wajib diterapkan guna menentukan target respons spektrum, mengikuti prosedur sebagaimana tercantum dalam SNI 1726:2019 Pasal 6.10.

3.5.2 Pemilihan Gerak Tanah

SNI 1726:2019 Pasal 7.9.2.3 menyatakan bahwa riwayat percepatan tanah yang digunakan dalam analisis harus terdiri dari setidaknya tiga pasang komponen ortogonal yang telah disesuaikan secara spektral (*spectrally matched*), yang diperoleh dari rekaman gerakan tanah alami atau gerakan tanah sintetik. Setiap set riwayat percepatan tanah yang telah disesuaikan secara spektral harus memiliki spektrum respons target yang dikonstruksi berdasarkan ketentuan dalam Pasal 6.4.

Selanjutnya, SNI 8890:2020 Pasal 7.2 mengatur bahwa pemilihan rekaman gerakan tanah harus mempertimbangkan mekanisme sumber gempa, besaran magnitudo, serta jarak terhadap sesar atau sumber gempa yang merepresentasikan kondisi seismik di lokasi kajian. Jika memungkinkan, rekaman gerakan tanah sebaiknya diambil dari data akselerometer yang dipasang di permukaan tanah. Namun, apabila jumlah data rekaman yang memenuhi persyaratan tidak tersedia, maka penggunaan gerakan tanah hasil simulasi diperbolehkan, dengan syarat simulasi tersebut harus konsisten dengan parameter seismik utama, termasuk magnitudo, karakteristik sumber gempa, jarak terhadap patahan, serta kondisi situs yang menentukan spektrum respons target.

3.5.3 Modifikasi Gerak Tanah

Menurut Atik dan Abrahamson (2010) dalam SNI 8899:2020, pencocokan spektral didefinisikan sebagai proses modifikasi gerakan tanah asli agar respons akselerasi spektralnya sesuai dengan spektrum respons target yang telah ditetapkan. Proses ini bertujuan untuk mengurangi fluktuasi signifikan pada puncak spektral gerakan tanah asli, sekaligus mempertahankan karakteristik *Non stasioner* dari riwayat waktu gerakan tanah tersebut.

Berdasarkan SNI 1726:2019 Pasal 7.9.2.3.1, setiap komponen gerakan tanah harus disesuaikan secara spektral dalam rentang periode $0,8 T_{Lower}$ hingga $1,2 T_{Upper}$. Dalam rentang periode tersebut, serta pada setiap arah, nilai rata-rata percepatan semu (*pseudo acceleration*) dengan redaman 5% yang diperoleh dari

rekaman gerakan tanah yang telah disesuaikan secara spektral harus berada dalam kisaran 10% dari spektrum respons target.

3.5.4 Hasil Modifikasi Gerak Tanah

Sesuai dengan SNI 8890-2020 Pasal 8.3. Sebelum digunakan dalam analisis dinamik struktur, rekaman *Time History* buatan yang telah melalui proses pencocokan (*matching*) terhadap respons spektrum target perlu divalidasi untuk memastikan kesesuaiannya. Validasi ini bertujuan untuk menilai apakah karakteristik dinamik dari data sintetis yang dihasilkan memenuhi kriteria representatif terhadap kondisi gempa rujukan. Tiga aspek utama yang diperhatikan dalam proses validasi ini yaitu:

1. Keselarasan Bentuk Spektrum

Spektrum respons yang dihasilkan setelah pencocokan harus memiliki bentuk yang serupa dengan spektrum target, sehingga distribusi energi seismik tetap representatif.

2. Konsistensi Karakteristik Non stasioner

Karakteristik *non stasioner* dari gerakan tanah asli (*seed motion*) harus tetap dipertahankan untuk menghindari perubahan fase yang signifikan antara riwayat waktu gerakan tanah asli dan riwayat waktu yang telah dimodifikasi.

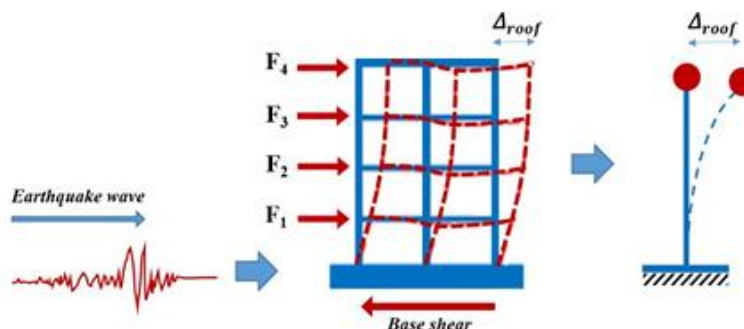
3. Kesamaan Intensitas Arias

Intensitas arias dari riwayat waktu gerakan tanah sebelum dan sesudah proses pencocokan spektral harus menunjukkan kesamaan guna memastikan bahwa distribusi energi selama durasi gempa tetap terjaga.

3.6 Respons Struktur Akibat Gempa

Gempa bumi merupakan beban dinamis yang berupa gelombang radiasi yang berasal dari sumber gempa, lalu menyebar ke segala arah melalui sifat tanah dan batuan, sampai akhirnya mencapai permukaan tanah dan menimbulkan getaran. Pondasi, yang berfungsi sebagai penopang utama bangunan, akan menerima getaran gempa dan mentransferkannya ke bagian atas struktur, yang menyebabkan bangunan bergoyang karena gaya inersia. Getaran gempa ini digambarkan sebagai beban lateral (F_i), yang dapat menyebabkan perpindahan pada atap bangunan

(Δ_{roof})(Muntafi dkk., 2023). Sebuah ilustrasi yang menggambarkan respons struktural akibat gempa dapat dilihat pada Gambar 3.3.



Gambar 3.3 Respons Struktural Akibat Gempa Bumi

(Sumber : Muntafi, dkk., 2023)

3.6.1 Base Shear

Pemeriksaan gaya geser dasar dilakukan sesuai dengan SNI 1726-2019, Jika kombinasi respons gaya geser dasar dari analisis ragam ($V_{dinamik}$) kurang dari 100% gaya geser (V_{statik}) yang dihitung menggunakan metode statik ekuivalen, maka gaya tersebut harus dikalikan dengan faktor $V_{statik}/V_{dinamik}$.

3.6.2 Ketidakberaturan

SNI 1726:2019 menjelaskan bahwa struktur bangunan dapat diklasifikasikan ke dalam dua kategori, yaitu bangunan beraturan dan tidak beraturan. Ketidakberaturan pada struktur dibedakan menjadi dua jenis, yaitu ketidakberaturan horizontal dan ketidakberaturan vertikal. Klasifikasi ini didasarkan pada konfigurasi horizontal dan vertikal dari struktur bangunan tersebut.

3.6.1.1 Ketidakberaturan Horizontal

Berdasarkan SNI 1726:2019 Ketidakberaturan horizontal terdiri dari beberapa jenis. Jika suatu struktur memiliki satu atau lebih dari jenis ketidakberaturan ini, maka struktur tersebut dianggap memiliki ketidakberaturan horizontal.

1. Ketidakberaturan Torsi 1a

Ketidakteraturan torsi terjadi jika perbedaan simpangan antar tingkat maksimum, yang dihitung dengan memasukkan torsi tak terduga dengan $A_x = 1,0$, pada salah satu ujung struktur melintang terhadap suatu sumbu, lebih dari

1,2 kali perbedaan simpangan antar tingkat rata-rata di kedua ujung struktur. Persyaratan mengenai ketidakberaturan torsi yang tercantum dalam pasal-pasal referensi hanya berlaku untuk struktur yang memiliki diafragma kaku atau setengah kaku. Ketidakberaturan akibat torsi berlebihan terjadi apabila simpangan antar tingkat maksimum yang dihitung, termasuk akibat torsi tak terduga dengan $A_x = 1,0$, di salah satu ujung struktur yang melintang terhadap suatu sumbu, melebihi 1,4 kali simpangan antar tingkat rata-rata di kedua ujung struktur tersebut. Pengklasifikasian ketidakberaturan torsi 1a dan 1b dapat ditentukan berdasarkan persamaan berikut.

$$\delta_{\max} < 1,2 \delta_{\text{avg}} \quad = \text{tanpa ketidakberaturan torsi} \quad (3.16)$$

$$1,2\delta_{\text{avg}} \leq \delta_{\max} < 1,4\delta_{\text{avg}} \quad = \text{ketidakberaturan torsi 1a} \quad (3.17)$$

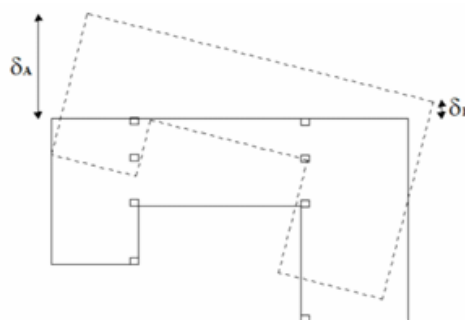
$$\delta_{\max} > 1,4 \delta_{\text{avg}} \quad = \text{ketidakberaturan torsi 1b} \quad (3.18)$$

dengan :

δ_{\max} = perpindahan maksimum di titik x dan

δ_{avg} = rata – rata perpindahan di titik – titik terjauh struktur di tingkat x.

Gambar 3.4 merupakan ilustrasi dari ketidakberaturan 1a dan 1b.



Gambar 3.4 Ketidakberaturan Horizontal 1a dan 1b

(Sumber : SNI 1726:2019, Gambar 5)

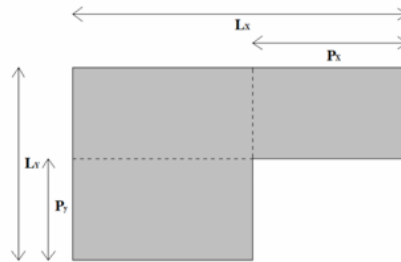
2. Ketidakberaturan Sudut Dalam

Berdasarkan SNI 1726:2019 Ketidakberaturan sudut dalam terjadi apabila kedua dimensi proyeksi denah struktur di lokasi sudut dalam melebihi 15% dari dimensi denah struktur dalam arah yang sedang dianalisis.

$$P_y < 0,15 L_y \quad (3.19)$$

$$P_x < 0,15 L_x \quad (3.20)$$

Gambar 3.5 merupakan gambar ketidakberaturan sudut dalam.



Gambar 3.5 Ketidakberaturan Sudut Dalam

(Sumber : SNI 1726:2019, Gambar 5)

3.6.1.2 Ketidakberaturan Vertikal

Ketidakberaturan vertikal mencakup beberapa jenis. Apabila sebuah struktur memiliki satu atau lebih ketidakberaturan berikut, maka struktur tersebut dikategorikan sebagai memiliki ketidakberaturan vertikal.

1. Ketidakberaturan 1a dan 1b

Ketidakberaturan kekakuan tingkat lunak terjadi apabila suatu tingkat memiliki kekakuan lateral yang kurang dari 70% kekakuan lateral tingkat di atasnya, atau kurang dari 80% rata-rata kekakuan lateral dari tiga tingkat di atasnya. Ketidakberaturan kekakuan tingkat lunak berlebihan terjadi apabila suatu tingkat memiliki kekakuan lateral kurang dari 60% kekakuan lateral tingkat di atasnya, atau kurang dari 70% rata-rata kekakuan lateral dari tiga tingkat di atasnya. Persamaan ketidakberaturan 1a dan 1b dapat dilihat di bawah ini.

$$\text{Pada 1a} = 70\% (K_{n+1}) < K_n \quad (3.22)$$

$$80\% \left(\frac{K_{n+1} + K_{n+2} + K_{n+3}}{3} \right) < K_n \quad (3.23)$$

$$\text{Pada 1b} = 60\% (K_{n+1}) < K_n \quad (3.24)$$

$$80\% \left(\frac{K_{n+1} + K_{n+2} + K_{n+3}}{3} \right) < K_n \quad (3.25)$$

$$K_n = \frac{V_x}{\Delta_x} \quad (3.26)$$

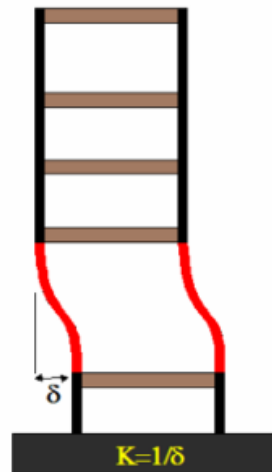
dengan :

K_n = kekakuan pada lantai ke-n,

V_x = gaya geser pada lantai ke-n, dan

Δ_x = simpangan antar tingkat pada lantai ke-n.

Berikut merupakan gambar ketidakberaturan vertikal 1a dan 1b.



Gambar 3.6 Ketidakberaturan Vertikal 1a dan 1b

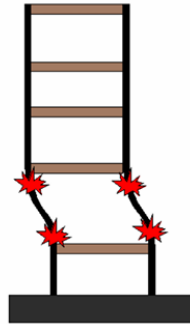
(Sumber : SNI 1726:2019, Gambar 6)

2. Ketidakberaturan Vertikal 5a dan 5b

Ketidakberaturan tingkat lemah akibat diskontinuitas pada kekuatan lateral tingkat terjadi apabila kekuatan lateral suatu tingkat kurang dari 80% kekuatan lateral tingkat di atasnya. Kekuatan lateral tingkat merujuk pada total kekuatan semua elemen pemikul seismik yang berbagi geser pada tingkat tersebut dalam arah yang sedang dianalisis. Ketidakberaturan tingkat lemah berlebihan akibat diskontinuitas pada kekuatan lateral tingkat terjadi apabila kekuatan lateral suatu tingkat kurang dari 65% kekuatan lateral tingkat di atasnya. Kekuatan lateral tingkat mengacu pada total kekuatan semua elemen pemikul seismik yang berbagi geser pada tingkat tersebut dalam arah yang dianalisis. Berikut merupakan gambar dari ketidakberaturan tersebut.

$$\text{Kuat geser A} < 80\% \text{ B} \quad (3.30)$$

$$\text{Kuat geser A} < 65\% \text{ B} \quad (3.31)$$

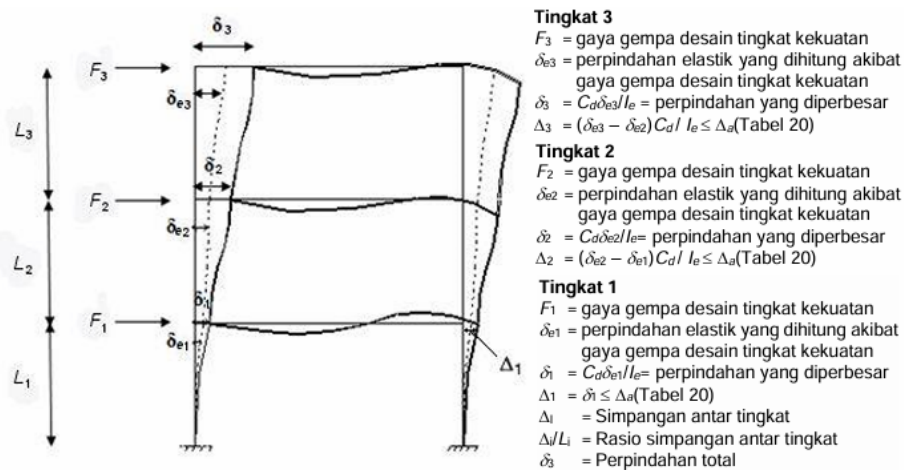


Gambar 3.7 Ketidakberaturan Vertikal 5a dan 5b

(Sumber : SNI 1726:2019, Gambar 6)

3.6.3 Simpangan Antar Tingkat

Simpangan antara tingkat-tingkat dalam bangunan dilihat dari perbedaan posisi pusat massa pada tingkat atas dibandingkan dengan tingkat bawah. Jika pusat massa tidak sejajar secara vertikal, diperbolehkan untuk menghitung simpangan dasar tingkat berdasarkan proyeksi vertikal dari pusat massa tingkat di atasnya. Jika menggunakan tegangan ijin dalam desain, perhitungan simpangan (Δ) harus dilakukan dengan gaya seismik desain yang telah ditentukan, tanpa mengurangi tegangan ijin. Ilustrasi simpangan pada struktur bisa dilihat pada Gambar 3.14.



Gambar 3.8 Penentuan Simpangan Antar Tingkat

(Sumber : SNI 1726:2019, Gambar 10)

Simpangan antar tingkat ditentukan oleh pergeseran yang terjadi di setiap tingkat bangunan, dengan persamaan defleksi sebagai berikut.

$$\delta_x = \frac{C_d \delta_e}{I_e} \quad (3.32)$$

Keterangan :

δ_x = defleksi yang terjadi pada tingkat x (mm),

C_d = faktor amplifikasi defleksi,

δ_x = defleksi disyaratkan pada lokasi ditentukan dari analisis elastis, dan

I_e = faktor keutamaan gempa.

Batasan simpangan antar tingkat yang diperbolehkan, sesuai dengan SNI 1726:2019, dapat dilihat pada Tabel 3.10.

Tabel 3.10 Simpangan Antar Tingkat Izin

Struktur	Kategori Risiko		
	I atau II	III	IV
Struktur, selain dari struktur dinding geser batu bata, 4 tingkat atau kurang dengan dinding interior, partisi, langit-langit dan sistem dinding eksterior yang telah didesain untuk mengakomodasi simpangan antar tingkat.	$0,25h_{sx}$	$0,02h_{sx}$	$0,015h_{sx}$
Struktur dinding geser kantilever batu bata.	$0,010h_{sx}$	$0,010h_{sx}$	$0,010h_{sx}$
Struktur dinding geser batu bata lainnya	$0,007h_{sx}$	$0,007h_{sx}$	$0,007h_{sx}$
Semua struktur lainnya	$0,020h_{sx}$	$0,015h_{sx}$	$0,010h_{sx}$

(Sumber : SNI 1726:2019, Tabel 20)

BAB IV

METODOLOGI PENELITIAN

4.1 Umum

Metodologi penelitian merupakan serangkaian langkah-langkah yang dilakukan secara sistematis untuk mencapai tujuan penelitian. Setiap tahapan dalam metodologi penelitian dirancang untuk membantu penulis dalam mengumpulkan data, menganalisis informasi, membahas temuan-temuan yang ada, dan akhirnya menarik kesimpulan. Proses ini memastikan bahwa penelitian dilakukan dengan cara yang terstruktur, dimulai dari pengumpulan data yang relevan, kemudian dilanjutkan dengan analisis data untuk memahami fenomena yang sedang diteliti. Setelah itu, dilakukan pembahasan untuk mendalami hasil analisis dan diakhiri dengan kesimpulan yang merangkum temuan penelitian.

Penelitian ini difokuskan pada analisis pengaruh respons struktur bangunan terhadap variasi bentuk denah gedung, dengan menggunakan dua metode analisis linier dinamik, yaitu respons spektrum dan *Time History*. Tujuan utamanya adalah untuk mengkaji sejauh mana perbedaan hasil antara kedua metode tersebut dalam menghasilkan parameter-parameter penting seperti gaya geser dasar, ketidakberaturan struktur, perpindahan (*displacement*), serta simpangan antar tingkat (*Story drift*). Melalui analisis ini, diharapkan diperoleh pemahaman yang lebih mendalam mengenai pengaruh konfigurasi geometrik dan variasi ketinggian bangunan terhadap kinerja seismik struktur yang dianalisis menggunakan metode linier dinamik respons spektrum dan *Time History*. Hasil tersebut diharapkan dapat menjadi dasar pertimbangan dalam pemilihan metode analisis yang tepat serta perencanaan desain struktur gedung yang lebih optimal di masa mendatang.

4.2 Data Penelitian

Data penelitian merupakan sekumpulan informasi yang dikumpulkan untuk mendukung proses pencarian jawaban atas rumusan masalah atau pencapaian

tujuan penelitian. Adapun data yang diperlukan dalam studi ini adalah sebagai berikut.

4.2.1 Lokasi Penelitian

Gedung yang menjadi objek penelitian ini terletak di Kabupaten Bantul, Daerah Istimewa Yogyakarta dengan koordinat 434689.01 m E dan 9130392.54 m S, yang dipilih sebagai lokasi studi berdasarkan tingkat kerentanannya terhadap aktivitas seismik yang signifikan. Wilayah ini berada dalam zona subduksi antara Lempeng Indo-Australia dan Lempeng Eurasia, yang berkontribusi terhadap tingginya potensi gempa bumi. Selain itu, keberadaan Sesar Opak yang masih aktif semakin meningkatkan risiko seismik di daerah ini. Oleh karena itu, kajian mengenai respons struktur terhadap gempa di wilayah ini menjadi relevan dalam upaya pengembangan desain bangunan tahan gempa. Lokasi penelitian dapat dilihat pada Gambar 4.1 berikut ini.



Gambar 4.1 Peta Lokasi Sesar Opak Daerah Istimewa Yogyakarta
(sumber: Google earth, diakses 29 Juli 2025)

4.2.2 Data Bangunan

Dalam penelitian ini, bangunan yang digunakan bersifat imajiner, artinya bangunan tersebut tidak benar-benar ada secara fisik, melainkan hanya dibuat dalam bentuk model 3D menggunakan *software* ETABS untuk keperluan analisis struktur. Bangunan ini dirancang dengan parameter tertentu yang disesuaikan

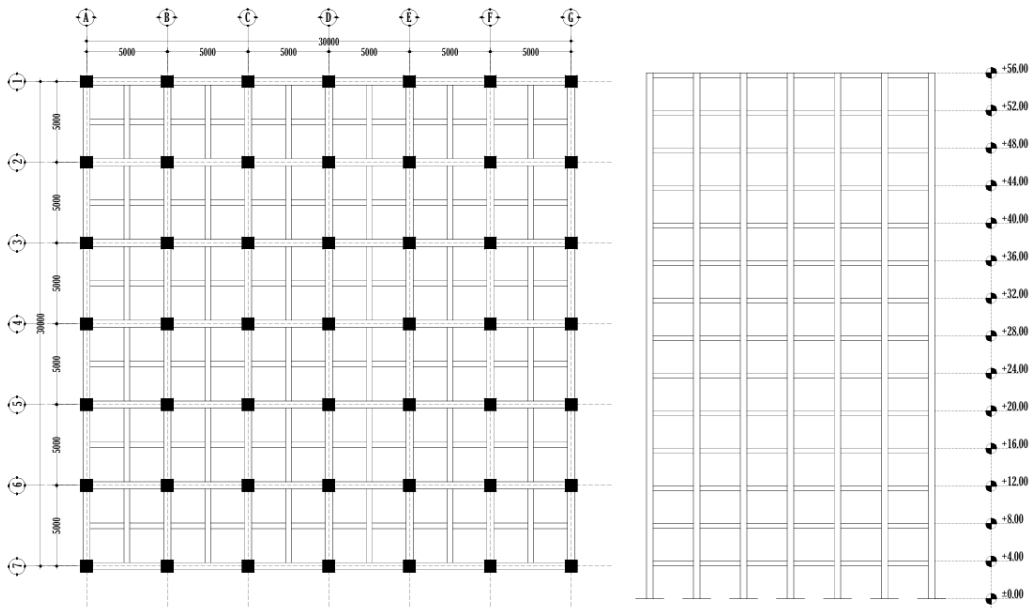
dengan tujuan penelitian, yaitu untuk melihat bagaimana struktur bangunan merespons gempa berdasarkan perbedaan bentuk denah bangunan.

Variasi bentuk bangunan yang digunakan terdiri dari bentuk persegi, T, dan L. Bentuk persegi dipilih karena menggambarkan bangunan yang simetris, sementara bentuk T dan L merepresentasikan bangunan yang tidak simetris atau tidak beraturan. Ketidaksimetrian ini muncul akibat adanya sudut dalam yang kedalamannya melebihi 15%, dengan dimensi denah $L_x = 30$ m dan $P_x = 10$ m, sehingga menghasilkan perbandingan P_x/L_x sebesar 33%.

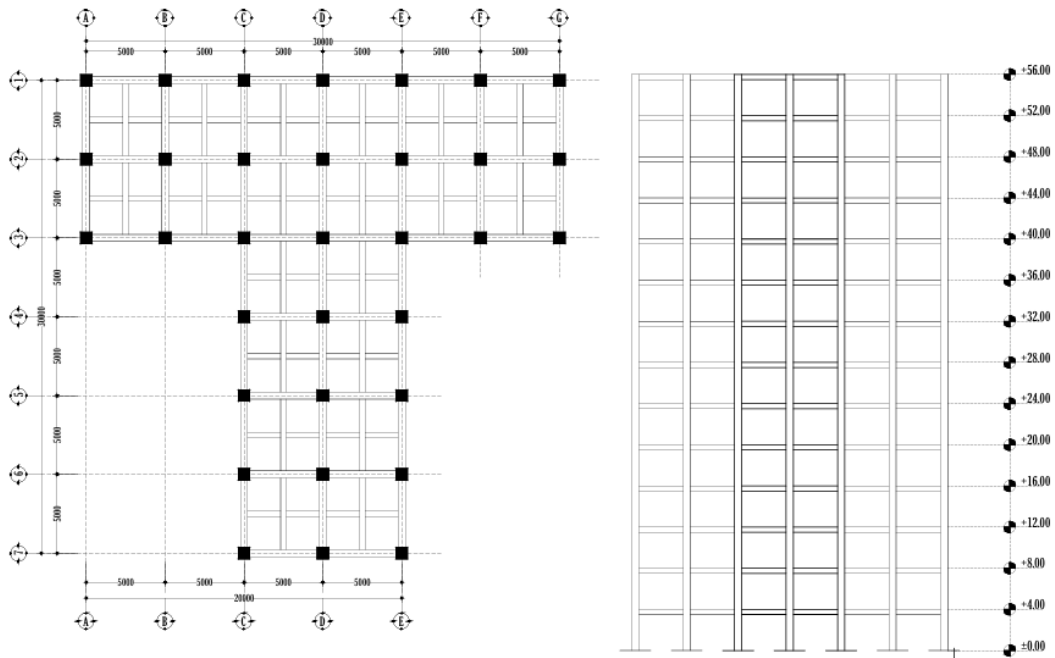
Agar proses analisis lebih fokus dan hasilnya bisa dibandingkan dengan adil, semua model bangunan dibuat dengan dimensi balok, kolom, dan tebal pelat yang sama. Tujuannya agar perbedaan respons struktur yang muncul hanya dipengaruhi oleh bentuk bangunan, bukan oleh ukuran elemen strukturnya. Informasi mengenai data bangunan yang digunakan sebagai objek penelitian disajikan dalam Tabel 4.1. Sementara itu, representasi visual struktur bangunan, termasuk denah, potongan melintang, serta dimensi struktural, dapat dilihat pada Gambar 4.2 sampai 4.4 berikut.

Tabel 4.1 Data Bangunan

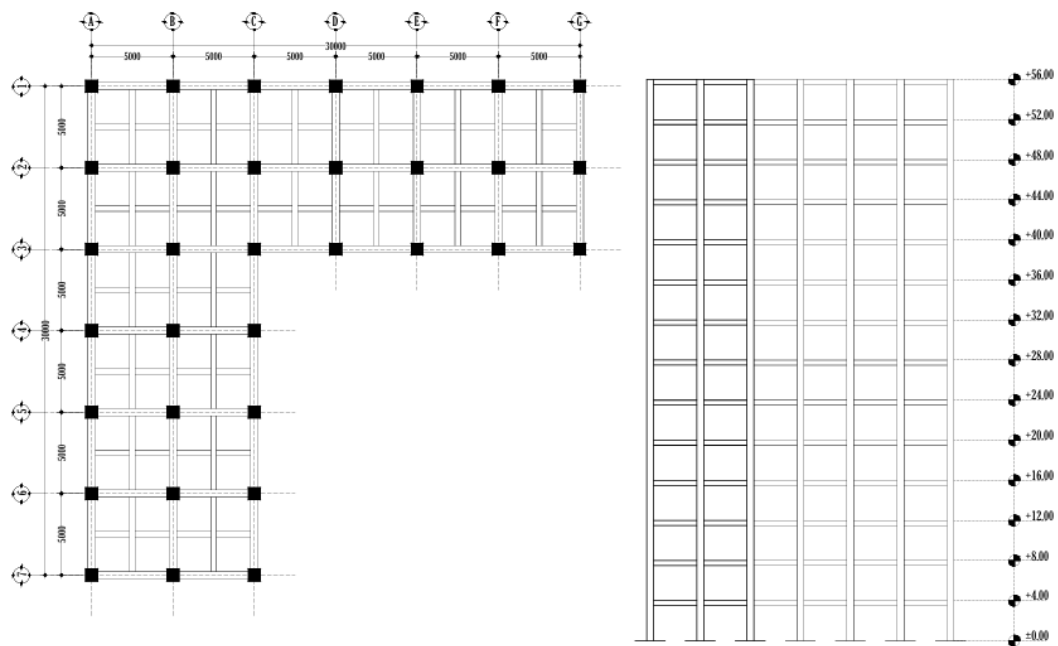
No.	Konfigurasi Struktur		Mutu Material		Dimensi Struktur			
	Bentuk	Jumlah Lantai	Beton (MPa)	Baja (MPa)	Balok Induk (mm)	Balok Anak (mm)	Kolom (mm)	H Pelat (mm)
1	Persegi	14 Lantai	30	420	300 x 500	250 x 400	650 x 650	125
2	T	14 Lantai	30	420	300 x 500	250 x 400	650 x 650	125
3	L	14 Lantai	30	420	300 x 500	250 x 400	650 x 650	125



Gambar 4.2 Denah dan Potongan Melintang Gedung Persegi



Gambar 4.3 Denah dan Potongan Melintang Gedung T



Gambar 4.4 Denah dan Potongan Melintang Gedung L

4.2.3 Data Gempa

Data gempa untuk analisis struktur diperoleh dari tiga sumber utama, yang pertama yaitu parameter spektral percepatan (S_s dan S_1) di wilayah Yogyakarta yang diakses melalui portal resmi Pusat Penelitian dan Pengembangan Perumahan dan Permukiman (Puskim); parameter magnitudo (M) dan jarak sumber gempa (R) yang diperoleh dari analisis Peta Sumber dan Bahaya Gempa Indonesia (PUSGEN) 2017 melalui proses *deagregasi hazard*; serta yang terakhir adalah rekaman gempa (*Time History*) yang diperoleh dari website database *Pacific Earthquake Engineering Research Center Next Generation Attenuation-West2* (PEER NGA-West2). Rekaman gempa diseleksi berdasarkan kriteria kesesuaian dengan spektrum respons target wilayah studi, dengan mempertimbangkan kesesuaian magnitudo (M), jarak *hiposenter* (R), karakteristik geoteknik lokal V_{s30} dan mekanisme gempa.

4.2.4 Program yang Digunakan

Dalam penelitian ini, program komputer digunakan untuk mendukung proses penelitian dan mempermudah penyelesaian masalah. Proses analisis struktur

dilakukan menggunakan kombinasi beberapa perangkat lunak dengan fungsi spesifik.

1. Permodelan denah gedung dikembangkan menggunakan AutoCAD 2019 untuk menghasilkan gambar struktur sebagai acuan dalam permodelan 3D.
2. Pembuatan dan pengolahan rekaman gempa *Time History* dilakukan melalui *software* seismomatch untuk penyesuaian spektrum.
3. Analisis struktur lengkap menggunakan ETABS v22 untuk permodelan 3D, analisis statik dan dinamik, serta evaluasi kinerja struktur.
4. Microsoft Excel untuk analisis data.
5. Microsoft Word untuk menulis laporan hasil penelitian.

Integrasi berbagai perangkat lunak dalam penelitian ini memungkinkan terciptanya alur kerja yang sistematis dan efisien, dimulai dari tahap perancangan denah menggunakan AutoCAD, pembuatan data gempa sintetik melalui perangkat lunak SeismoMatch, pelaksanaan analisis struktural secara baik dengan ETABS, pengolahan dan analisis data numerik menggunakan Microsoft Excel, hingga penyusunan laporan akhir penelitian menggunakan Microsoft Word.

4.3 Tahapan Penelitian

Metode penelitian ini menerapkan analisis *linear Time History* dengan bantuan perangkat lunak ETABS V22. Tahapan analisisnya adalah sebagai berikut.

1. Studi Literatur

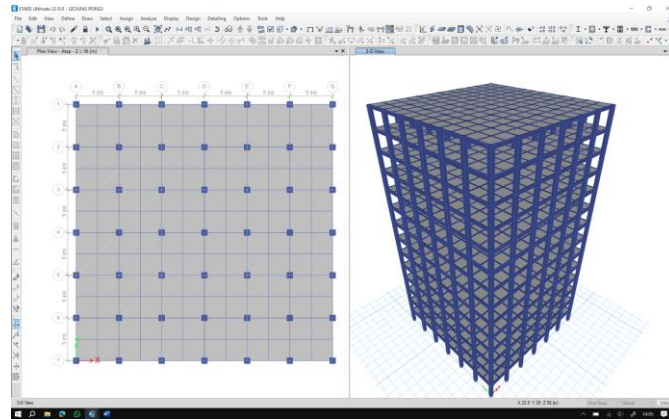
Studi literatur ini berdasarkan jurnal yang telah dibahas pada bagian tinjauan pustaka, Peraturan SNI 1726:2019 tentang Tata Cara Perencanaan Ketahanan Gempa untuk Struktur Bangunan Gedung dan Non Gedung, Peraturan SNI 1727:2020 tentang Beban Desain Minimum dan Kriteria Terkait untuk Bangunan Gedung dan Struktur Lain.

2. Perencanaan Pembebanan

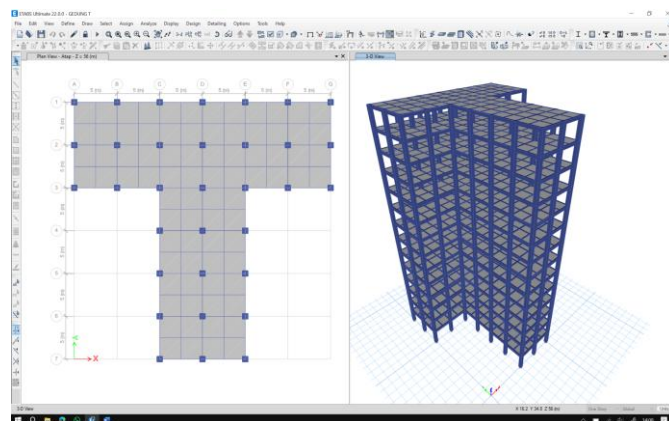
Sebelum dimodelkan, dihitung pembebanan elemen struktur meliputi beban mati (*dead load*), beban mati tambahan (*superimposed dead load*), beban hidup (*live load*) serta beban gempa (*earthquake load*).

3. Permodelan Struktur

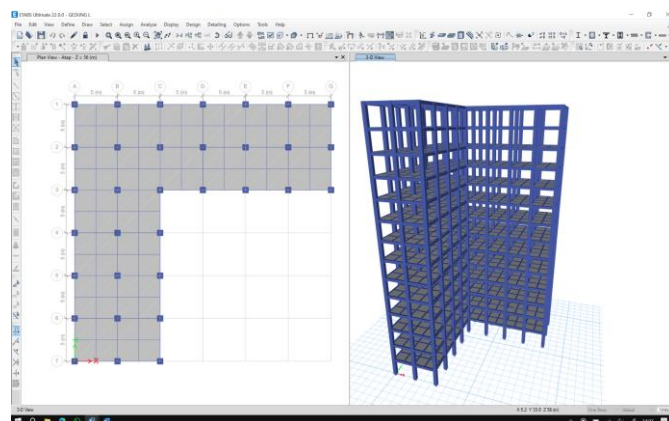
Gedung dimodelkan menggunakan ETABS V22 secara 3D. Untuk melihat bagaimana struktur digambarkan dalam 3D dapat dilihat pada Gambar 4.5, Gambar 4.6, dan Gambar 4.7 di bawah ini.



Gambar 4.5 Pemodelan 3D Gedung Persegi



Gambar 4.6 Pemodelan 3D Gedung T



Gambar 4.7 Pemodelan 3D Gedung L

4. Penerapan Metode Analisis

Penelitian ini menerapkan dua metode analisis, yaitu Respons *Spectrum Analysis* (RSA) dan *Time History Analysis* (THA). Penerapan kedua metode tersebut dibagi ke dalam beberapa tahapan, sebagaimana dijelaskan pada bagian berikut.

a. Respons Spektrum Analisis (RSA)

1) Menentukan *spectra* percepatan dan jenis tanah

Penentuan spektrum percepatan diawali dengan mengidentifikasi parameter seismik dasar (S_s dan S_1) berdasarkan koordinat lokasi studi pada Peta Sumber dan Bahaya Gempa Indonesia (PUSGEN). Klasifikasi jenis tanah (Kelas Situs A hingga E) ditetapkan melalui data kecepatan gelombang geser (V_{s30}) atau N-SPT lapangan.

2) Pemrosesan *response spectra*

Setelah didapatkan parameter seismik dasar, langkah selanjutnya menghitung faktor amplifikasi tanah (F_a dan F_v) sesuai Tabel 5-6 SNI 1726:2019. Hasilnya adalah spektrum respons elastik yang telah dimodifikasi untuk karakteristik lokal, mencakup periode transisi (T_0 dan T_s) serta percepatan spektral desain (SDS dan SD1).

3) Input beban *gempa response spectra*

Proses input beban gempa *response spectra* ke dalam *software* ETABS dilakukan sebagai tahap awal dalam analisis respons struktur bangunan terhadap beban gempa. Beban ini dimasukkan ke dalam model struktur untuk menyimulasikan bagaimana bangunan merespons gaya gempa berdasarkan spektrum respons yang telah ditentukan, sehingga dapat diketahui perilaku dinamis struktur secara lebih akurat.

b. *Time History Analisis* (THA)

1) Pemilihan rekaman gempa yang sesuai

Magnitudo (M) dan jarak sumber gempa (R) yang diperoleh dari analisis Peta Sumber dan Bahaya Gempa Indonesia (PUSGEN) 2017 melalui proses *deagregasi hazard* kemudian dilakukan pencarian rekaman gempa

melalui *website database Pacific Earthquake Engineering Research Center Next Generation Attenuation-West2* (PEER NGA-West2).

2) *Matching* data rekaman gempa

Rekaman gempa yang diperoleh dari *database* PEER NGA-West2 selanjutnya dilakukan proses *Matching* menggunakan perangkat lunak *SeismoMatch 2025* untuk menyesuaikan dengan spektrum respon target. Hal ini dilakukan agar data gempa yang digunakan dalam analisis *Time History* dapat merepresentasikan kondisi seismik yang sesuai dengan lokasi dan karakteristik struktur yang diteliti.

3) Input beban gempa *Time History*

Grafik percepatan tanah yang diperoleh dari rekaman waktu diintegrasikan ke dalam program ETABS V22 Analisis beban gempa kemudian dilakukan berdasarkan standar SNI 1726:2019.

5. Analisis Program

Hasil luaran dari program Etabs kemudian dilakukan analisis sesuai dengan SNI 1726:2019 guna melihat bagaimana respons struktur pada gedung terjadi pada gedung dengan bentuk dan ketinggian yang berbeda-beda. Analisis yang dilakukan untuk melihat respons struktur tersebut adalah sebagaimana dapat dilihat pada poin-poin di bawah ini.

a. Pemeriksaan gaya geser dasar

Pemeriksaan gaya geser dasar dilakukan sesuai dengan SNI 1726-2019, Jika kombinasi respons gaya geser dasar dari analisis ragam (V_{dinamik}) kurang dari 100% gaya geser (V_{statik}) yang dihitung menggunakan metode statik ekuivalen, maka gaya tersebut harus dikalikan dengan faktor $V_{\text{statik}}/V_{\text{dinamik}}$.

b. Pemeriksaan ketidakberaturan struktur

Pemeriksaan ketidakberaturan struktur dilakukan untuk menilai apakah suatu bangunan memiliki ketidakberaturan yang dapat memengaruhi respons seismiknya. Ketidakberaturan dapat terjadi dalam bentuk ketidakberaturan geometrik, massa, kekakuan, atau kekuatan, baik dalam arah horizontal maupun vertikal. Analisis ini mengacu pada kriteria yang ditetapkan dalam

SNI 1726:2019 guna memastikan bahwa struktur dirancang sesuai dengan standar keselamatan yang berlaku.

c. Pemeriksaan perpindahan (*displacement*)

Pemeriksaan perpindahan (*displacement*) dilakukan untuk melihat perpindahan lateral total akibat beban gempa *Time History* dan respons spektrum pada bangunan dengan bentuk dan ketinggian yang bervariasi, pemeriksaan perpindahan ini dilakukan sesuai dengan ketentuan dalam SNI 1726:2019.

d. Pemeriksaan simpangan antar tingkat

Pemeriksaan simpangan antar tingkat dilakukan untuk melihat deformasi lateral struktur akibat beban gempa *Time History* dan respons spektrum pada bangunan dengan bentuk dan ketinggian yang bervariasi, pemeriksaan simpangan ini dilakukan sesuai dengan ketentuan dalam SNI 1726:2019.

6. Pembahasan

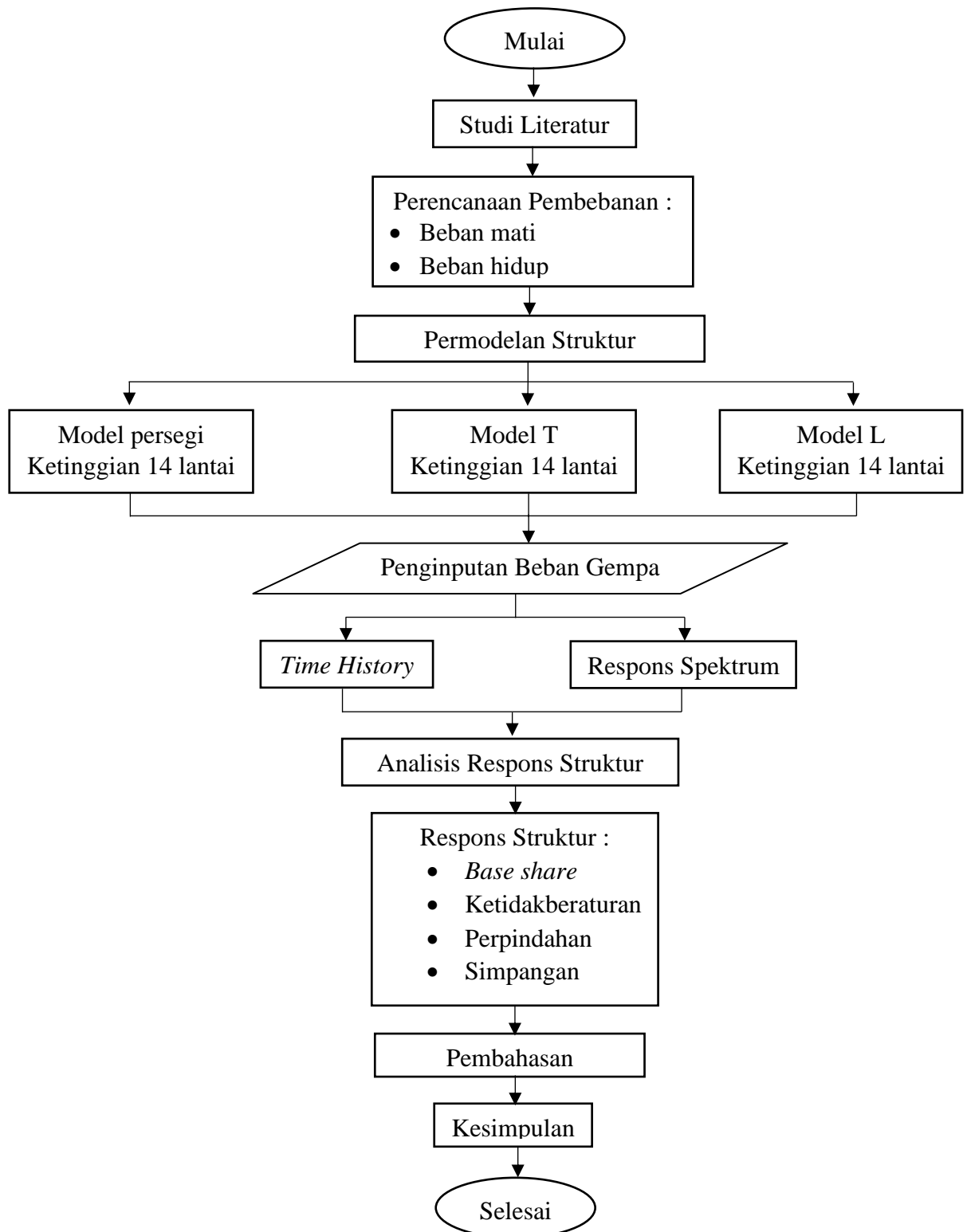
Menganalisis dan menyajikan hasil penelitian berdasarkan ketentuan dalam SNI 1726:2019. Penjabaran hasil setiap analisis yang telah dilakukan pada 9 model gedung.

7. Kesimpulan

Pada tahap ini, dilakukan penarikan kesimpulan berdasarkan hasil analisis yang telah dilakukan berupa perilaku struktur yang mencakup gaya geser dasar, ketidakberaturan, perpindahan (*displacement*), serta simpangan antar tingkat pada masing-masing gedung.

4.4 Bagan Alir Tahapan Penelitian

Proses penelitian secara keseluruhan digambarkan dalam bagan alir yang ditunjukkan pada Gambar 4.8 berikut.



Gambar 4.8 Tahapan Penelitian

BAB V

ANALISIS DAN PEMBAHASAN

5.1 Perhitungan Pembebanan

Proses pembebanan struktur merupakan tahap penting dalam analisis dan desain bangunan, yang mencakup perhitungan berbagai jenis beban yang bekerja pada struktur. Beban-beban tersebut meliputi beban mati, beban mati tambahan, beban hidup, dan beban gempa. Masing-masing jenis beban memiliki karakteristik dan peran spesifik dalam memastikan struktur dapat menahan gaya-gaya yang bekerja selama masa operasionalnya, baik secara langsung maupun tidak langsung. Perhitungan beban ini dilakukan berdasarkan ketentuan dan standar yang diatur dalam SNI 1727-2020 untuk beban hidup, PBI 1983 untuk beban mati, yang menjadi acuan nasional dalam menentukan jenis, besar, dan distribusi beban pada struktur bangunan. Dengan mengikuti pedoman ini, proses pembebanan dilakukan secara sistematis dan akurat untuk menghasilkan desain yang aman, efisien, dan sesuai dengan standar teknis.

5.1.1 Beban Mati

Dalam analisis struktur, beban mati mencakup berat dari elemen-elemen utama seperti kolom, balok, dan pelat yang menggunakan material beton bertulang. Berdasarkan PBI 1983, beton bertulang memiliki berat jenis sekitar 2.400 kg/m³. Beban dari elemen-elemen ini tidak perlu dimasukkan secara manual dalam perhitungan karena sudah terakomodasi melalui pemodelan menggunakan perangkat lunak ETABS. Program ini secara otomatis menghitung berat elemen-elemen struktur berdasarkan dimensi dan material yang telah didefinisikan. Contoh perhitungan berat balok, kolom dan pelat adalah sebagai berikut.

$$\begin{aligned}\text{Berat balok induk} &= b \times h \times l \times \rho_c \\ &= 0,3 \text{ m} \times 0,5 \text{ m} \times 5 \text{ m} \times 23,544 \text{ kN/m}^3 \\ &= 17,625 \text{ kN}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{Berat balok anak} &= b \times h \times l \times \rho_c \\ &= 0,23 \text{ m} \times 0,4 \text{ m} \times 2,5 \text{ m} \times 23,544 \text{ kN/m}^3\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &= 5,884 \text{ kN} \\
 \text{Berat kolom} &= b \times h \times l \times b_j \\
 &= 0,65 \text{ m} \times 0,65 \text{ m} \times 4 \text{ m} \times 23,544 \text{ kN/m}^3 \\
 &= 39,774 \text{ kN} \\
 \text{Berat pelat} &= l_x \times l_y \times h \times b_j \\
 &= 2,5 \text{ m} \times 2,5 \text{ m} \times 0,125 \text{ m} \times 23,544 \text{ kN/m}^3 \\
 &= 12,974 \text{ kN}
 \end{aligned}$$

5.1.2 Beban Mati Tambahan

Beban mati tambahan yang dijelaskan pada PBI 1983 merujuk pada beban dari elemen-elemen non-struktural atau elemen tambahan yang tidak termasuk dalam pemodelan awal tetapi tetap memengaruhi keseluruhan beban struktur. Perhitungan beban mati tambahan ini mencakup berat dari elemen-elemen seperti keramik, lantai, atap, dan komponen lain yang relevan. Setiap elemen dihitung secara detail untuk memastikan bahwa kontribusinya terhadap pembebanan struktur sesuai dengan kondisi sebenarnya di lapangan. Beban ini ditambahkan ke dalam analisis untuk memberikan gambaran yang lebih akurat tentang performa struktur terhadap beban total yang diterimanya. Adapun perhitungan beban mati tambahan dapat dilihat di bawah ini.

1. Beban mati tambahan pada pelat lantai

$$\begin{aligned}
 \text{Pasir} &= 1600 \text{ kg/m}^3 \times 0,05 \text{ m} / 1000 \times 9,81 \\
 &= 0,785 \text{ kN/m}^2 \\
 \text{Spesi} &= 2100 \text{ kg/m}^3 \times 0,03 \text{ m} / 1000 \times 9,81 \\
 &= 0,618 \text{ kN/m}^2 \\
 \text{Waterproofing} &= 2100 \text{ kg/m}^3 \times 0,02 \text{ m} / 1000 \times 9,81 \\
 &= 0,412 \text{ kN/m}^2 \\
 \text{Keramik} &= 0,167 \text{ kN/m}^2 \\
 \text{Ducting AC} &= 0,172 \text{ kN/m}^2 \\
 \text{MEP} &= 0,294 \text{ kN/m}^2 \\
 \text{Plafon} &= 0,088 \text{ kN/m}^2 \\
 \text{Penggantung Plafon} &= 0,049 \text{ kN/m}^2 \\
 \text{Total} &= 0,785 + 0,618 + 0,412 + 0,167 + 0,172 + 0,294 +
 \end{aligned}$$

$$0,088 + 0,049$$

$$= 2,585 \text{ kN/m}^2$$

2. Beban mati tambahan pada pelat atap

$$\text{Spesi} = 2100 \text{ kg/m}^3 \times 0,03 \text{ m} / 1000 \times 9,81$$

$$= 0,618 \text{ kN/m}^2$$

$$\text{Waterproofing} = 2100 \text{ kg/m}^3 \times 0,02 \text{ m} / 1000 \times 9,81$$

$$= 0,412 \text{ kN/m}^2$$

$$\text{Ducting AC} = 0,172 \text{ kN/m}^2$$

$$\text{MEP} = 0,294 \text{ kN/m}^2$$

$$\text{Plafon} = 0,088 \text{ kN/m}^2$$

$$\text{Penggantung Plafon} = 0,049 \text{ kN/m}^2$$

$$\text{Total} = 0,618 + 0,412 + 0,172 + 0,294 + 0,088 + 0,049$$

$$= 1,663 \text{ kN/m}^2$$

5.1.3 Beban Hidup

Menurut SNI 1727-2020 Pedoman Perencanaan Pembebanan Untuk Rumah dan Gedung, nilai beban hidup pada suatu bangunan ditentukan berdasarkan fungsi dari bangunan tersebut. Dalam penelitian ini, bangunan dirancang untuk berfungsi sebagai rumah sakit, sehingga nilai beban hidup yang digunakan dalam perhitungan pembebanan struktur disesuaikan dengan standar untuk jenis bangunan tersebut diambil nilai terbesar yaitu $3,83 \text{ kN/m}^2$ sebagai beban hidup lantai dengan fungsi ruang adalah koridor dan $0,96 \text{ kN/m}^2$ untuk beban hidup atap.

5.2 Validasi Model

Sebelum dilakukan analisis struktur secara menyeluruh, perlu dilakukan validasi model untuk memastikan bahwa model struktur yang dibangun di perangkat lunak sudah sesuai dengan kondisi teknis dan perilaku struktur yang diharapkan. Validasi ini penting agar hasil analisis berupa respons struktur dapat mencerminkan kondisi yang realistis dan dapat dipertanggungjawabkan.

Beberapa hal yang diperiksa dalam proses validasi antara lain adalah periode alami struktur dan persentase partisipasi massa pada masing-masing arah. Kedua parameter ini memberikan indikasi apakah kekakuan, massa, dan sistem pemikul

beban lateral telah dimodelkan dengan benar. Jika nilai-nilai tersebut tidak memenuhi kriteria atau menyimpang jauh dari estimasi teoritis, maka perlu dilakukan peninjauan ulang terhadap pemodelan.

5.2.1 Pemeriksaan Mode Vibrasi (partisipasi massa)

Pemeriksaan rasio partisipasi massa bertujuan untuk menilai sejauh mana massa struktur terlibat dalam setiap mode getar yang dianalisis. Nilai *Participating Mass Ratio* untuk setiap model struktur disajikan dalam Tabel 5.1 hingga 5.3 berikut ini.

Tabel 5. 1 Modal Participating Mass Ratio Gedung

Mode	Partisipasi Massa Struktur Gedung					
	Persegi		T		L	
	Sum UX	Sum UY	Sum UX	Sum UY	Sum UX	Sum UY
1	0,792	0,004	0,741	0,000	0,385	0,310
2	0,796	0,796	0,741	0,792	0,742	0,745
3	0,796	0,796	0,792	0,792	0,792	0,792
12	0,952	0,952	0,951	0,951	0,951	0,951

Berdasarkan hasil analisis modal terhadap nilai partisipasi massa pada seluruh model struktur yang disajikan dalam tabel di atas, diketahui bahwa partisipasi massa telah melebihi 90%. Mengacu pada SNI 1726-2019 pasal 7.9.1.1, apabila sulit untuk mencapai 100% partisipasi massa aktual, maka diperbolehkan menggunakan paling sedikit 90% dari massa struktur. Hal ini menunjukkan bahwa massa struktur telah cukup terwakili dalam analisis yang dilakukan. Oleh karena itu, model struktur yang digunakan dapat dianggap valid dalam menggambarkan respons struktur terhadap beban gravitasi maupun gempa, sehingga analisis dapat dilanjutkan ke tahap berikutnya.

5.2.2 Periode Fundamental

Periode fundamental merupakan salah satu parameter penting dalam analisis struktur, karena menunjukkan waktu yang dibutuhkan bangunan untuk menyelesaikan satu siklus getaran alami. Nilai periode ini dipengaruhi oleh beberapa faktor, antara lain ketinggian bangunan, kekakuan struktur, dan konfigurasi geometri. Pada pembahasan ini, nilai periode fundamental yang digunakan merupakan nilai yang dihitung berdasarkan kondisi penampang retak.

Informasi lengkap mengenai nilai periode fundamental struktur dapat dilihat pada Tabel 5.4 berikut.

Tabel 5. 2 Nilai Periode Struktur

No	Keterangan	T _a		T _c		C _u x T _a		T _{pakai}	
		X	Y	X	Y	X	X	X	Y
1	Gedung Persegi	1.745	1.745	2,985	2,985	2,443	2,443	2,443	2,443
2	Gedung T	1.745	1.745	2,962	2,941	2,443	2,443	2,443	2,443
3	Gedung L	1.745	1.745	2,977	2,947	2,443	2,443	2,443	2,443

Berdasarkan Tabel 5.4, nilai periode fundamental struktur berada dalam rentang yang wajar tanpa menunjukkan keanehan, seperti nilai yang ekstrem atau tidak realistis. Hal ini mengindikasikan bahwa model struktur telah memenuhi validitas dalam aspek periode fundamental, sehingga analisis dapat dilanjutkan ke tahap berikutnya.

5.3 Analisis Model dengan Metode Respon Spektrum

Dalam sub bab ini, akan diperlihatkan proses pembuatan dan dilakukan analisis menggunakan metode respons spektrum untuk melihat respons dinamis dari struktur gedung.

5.3.1 Pembuatan Respons spektrum

Lokasi dari bangunan ini terletak di Provinsi Daerah Istimewa Yogyakarta, Indonesia. Bangunan tersebut dirancang sebagai gedung bertingkat dengan fungsi bangunan sebagai rumah sakit yang memiliki 14 lantai, dengan setiap lantai diasumsikan memiliki fungsi dan penggunaan yang sama. Tinggi total bangunan yaitu 52, mencakup seluruh struktur vertikal dari dasar hingga atap gedung. Perencanaan beban gempa pada penelitian ini mengacu pada peraturan SNI 1726:2019. Berikut ini adalah prosedur perhitungan perencanaan beban gempa yang dilakukan pada penelitian ini.

1. Kategori risiko bangunan gedung

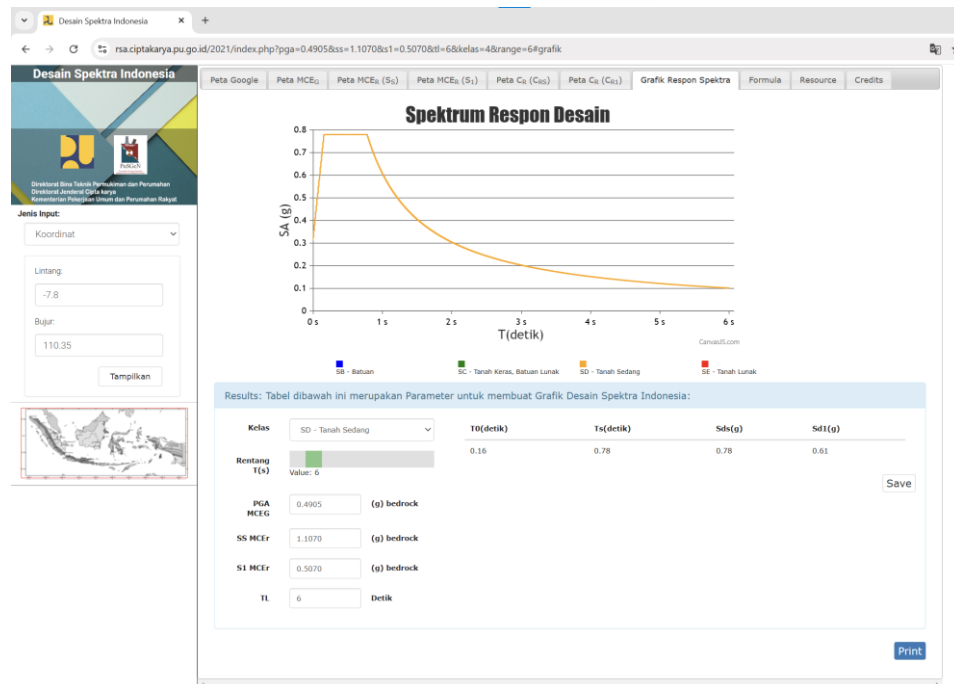
Berdasarkan SNI-1726-2019 Tabel 3, fungsi gedung diasumsikan sebagai rumah sakit maka bangunan pada penelitian ini masuk pada kategori risiko IV. Faktor keutamaan bangunan (*I_e*) untuk kategori risiko IV adalah sebesar 1,5 (satu), berdasarkan Tabel 4 SNI 1726:2019.

2. Klasifikasi situs

Menurut SNI 1726:2012 Pasal 5.1, klasifikasi situs dapat ditentukan berdasarkan nilai penetrasi rata-rata (\bar{N}). Jika nilai \bar{N} kurang dari 15, maka situs dikategorikan sebagai tanah lunak. Untuk nilai \bar{N} antara 15 hingga 50, tanah diklasifikasikan sebagai tanah sedang, sedangkan jika \bar{N} lebih dari 50, maka tanah termasuk dalam kategori tanah keras. Pada wilayah sekitar sesar Opak nilai rata-rata V_{s30} berkisar 175-350 m/s. Nilai tersebut menunjukkan bahwa pada wilayah ini klasifikasi tanahnya tergolong dalam jenis tanah sedang (Muzli, M, dkk. 2016). Pengklasifikasian tanah di Daerah Kapanewon Pleret, Kabupaten Bantul juga dilakukan oleh Zawawi, A.F. dkk pada 2023 dengan hasil klasifikasi tanah di wilayah penelitian berdasarkan data MASW di dominasi oleh jenis tanah sedang (SD) dan sebagian kecil tanah keras (SC). Merujuk pada kedua penelitian sebelumnya, penelitian ini menggunakan kelas situs tanah sedang (SD).

3. Penentuan S_s dan S_1

Penentuan nilai S_s dan S_1 bergantung pada lokasi bangunan. Pada penelitian ini untuk memperoleh nilai S_s dan S_1 dilakukan dengan mengakses situs resmi Kementerian Pekerjaan Umum Bagian Pusat Pengembangan dan Evaluasi Pemukiman (<https://rsa.ciptakarya.pu.go.id>). Dengan meng-input nama kota Yogyakarta, didapatkan hasil S_s dan S_1 sebesar 1.1070g dan 0.5070g seperti yang ditampilkan pada gambar 5.1 berikut.



Gambar 5. 1 Hasil Perhitungan Respon Spektral Desain pada Situs Puskim.go.id (Diakses 2 Februari 2020)

4. Penentuan nilai F_a dan F_v

Berdasarkan nilai S_s , S_1 dan kelas situs, dapat ditentukan nilai F_a dan F_v dengan melakukan interpolasi linier sesuai Tabel 6 dan Tabel 7 SNI 1726:2019. Sehingga didapat nilai $F_a = 1.0572$ dan $F_v = 1.793$.

5. Menentukan nilai S_{DS} dan S_{D1}

Nilai S_{DS} dan S_{D1} ditentukan berdasarkan Pasal 6.3, SNI 1726 : 2019. Berikut ini adalah penjabaran perhitungannya.

$$\begin{aligned}
 S_{DS} &= \frac{2}{3} \times S_{MS} \\
 &= \frac{2}{3} \times F_a \times S_s \\
 &= \frac{2}{3} \times 1.0572 \times 1.1070 \\
 &= 0.7802 \text{ g}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 S_{D1} &= \frac{2}{3} \times S_{M1} \\
 &= \frac{2}{3} \times F_v \times S_1 \\
 &= \frac{2}{3} \times 1.793 \times 0.5070 \\
 &= 0.6060 \text{ g}
 \end{aligned}$$

6. Kategori desain seismik

Penentuan kategori desain seismik dapat ditentukan berdasarkan Tabel 8 dan Tabel 9 SNI 1726:2019. Kategori desain seismik ditentukan berdasarkan nilai SDS dan SD1. Berdasarkan Tabel tersebut, kategori desain seismik untuk penelitian ini termasuk dalam kategori desain seismik D.

7. Respon spektrum desain

a. Penentuan nilai T_0 dan T_s dilakukan dengan persamaan berikut.

$$\begin{aligned} T_0 &= 0,2 \times \frac{SD1}{SDS} \\ &= 0,2 \times \frac{0.7802}{0.6060} \\ &= 0.1554 \text{ detik} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} T_s &= \frac{SD1}{SDS} \\ &= \frac{0.7802}{0.6060} \\ &= 0.7768 \text{ detik} \end{aligned}$$

b. Nilai $S_a < T_0$, maka harus ditentukan menggunakan persamaan berikut.

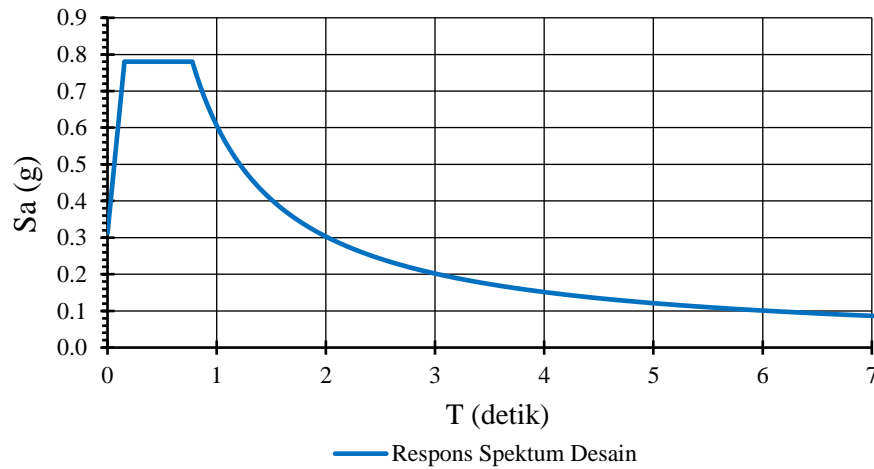
$$S_a = S_{DS} \left(0,4 + 0,6 \frac{T}{T_0} \right)$$

c. Untuk periode lebih besar dari atau sama dengan T_0 dan lebih kecil dari atau sama dengan T_s , spektrum respons percepatan desain, S_a , sama dengan SDS.

d. Nilai S_a yang berada pada periode lebih besar dari nilai T_s , diambil dengan persamaan berikut ini.

$$S_a = \frac{SD1}{T}$$

Nilai-nilai S_a yang telah ditentukan dapat dibuat grafik seperti pada Gambar 5.2 berikut ini.



Gambar 5. 2 Grafik Respons Spektral Wilayah Yogyakarta

8. Koefisien modifikasi respons (R), faktor kuat lebih sistem (Ω_0) dan faktor pembesaran defleksi (C_d)

Berdasarkan Tabel 12 SNI 1726: 2019, nilai koefisien modifikasi respon, faktor kuat lebih sistem dan faktor pembesaran defleksi dipilih sesuai dengan sistem struktur yang dipilih. Model struktur Gedung pada penelitian ini adalah menggunakan sistem rangka pemikul momen khusus. Alasan pemilihan sistem struktur tersebut adalah karena bangunan diasumsikan berfungsi sebagai rumah sakit dan berada di wilayah Yogyakarta yang mana wilayah tersebut rawan terjadi gempa bumi. Ketiga nilai tersebut adalah sebagaimana yang dapat dilihat berikut ini.

$$R = 8$$

$$\Omega_0 = 3$$

$$C_d = 5,5$$

5.3.2 Hasil Analisis Respons Spektrum

Analisis respons spektrum menggambarkan kinerja struktur terhadap beban gempa. Parameter utama yang diperoleh meliputi gaya geser dasar, ketidakberaturan, perpindahan, dan simpangan antar tingkat, yang mencerminkan respons dinamis bangunan. Pembahasan ini menguraikan tren hasil analisis serta implikasinya terhadap stabilitas dan ketahanan struktur.

5.3.2.1 Gaya Geser Dasar

Dalam penelitian ini, hasil simulasi gaya geser dasar dari metode respons spektrum ditampilkan sebelum dilakukan penskalaan terhadap gaya statik ekuivalen. Hal ini dilakukan agar pengaruh asli dari gaya geser dasar dapat terlihat tanpa ada pengaruh dari gaya statik ekuivalen. Contoh perhitungan gaya geser dasar pada gedung persegi akibat beban gempa respons spektrum wilayah Yogyakarta pada arah X disajikan sebagai berikut.

$$\begin{aligned} \text{Koefisien Gempa (Cs)} &= \frac{\text{SDS}}{\left(\frac{R}{T}\right)} \\ &= \frac{0,7802}{\left(\frac{8}{1,5}\right)} \\ &= 0,1463 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Cs max} &= \frac{\text{SD1}}{\left(T \times \frac{R}{T}\right)} \\ &= \frac{0,606}{\left(3,519 \times \frac{8}{1,5}\right)} \\ &= 0,0465 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Cs min} &= 0,044 \times \text{SDS} \times I_e > 0,01 \\ &= 0,044 \times 0,7802 \times 1,5 > 0,01 \\ &= 0,0515 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Berat Struktur (W)} &= \text{terdiri dari beban mati dan 25\% beban hidup} \\ &= 136482,441 \text{ kN} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Gaya geser dasar (Vx)} &= \text{Cs} \times \text{W} \\ &= 0,0515 \text{ kN} \times 136482,441 \text{ kN} \\ &= 7820,040 \text{ kN} \end{aligned}$$

Penskalaan gaya geser dasar

Berdasarkan SNI 1726:2019 pada pasal 7.9.1.4.1 tentang penskalaan gaya, jika periode fundamental struktur yang diperoleh dari hasil analisis melebihi nilai $C_u.T_a$ untuk arah tertentu, maka periode struktur T harus dibatasi sebesar $C_u.T_a$. Selain itu, apabila gaya geser dasar hasil kombinasi respons ragam (V_t) lebih kecil dari 100% gaya geser dasar metode statik ekuivalen (V), maka nilai V harus dikalikan dengan faktor koreksi V/V_t . Di mana, V adalah gaya geser dasar dari

metode statik ekuivalen sesuai ketentuan pasal ini dan 7.8. Dan V_t merupakan gaya geser dasar hasil dari kombinasi ragam getar.

Contoh penerapan penskalaan gaya disajikan pada uraian berikut.

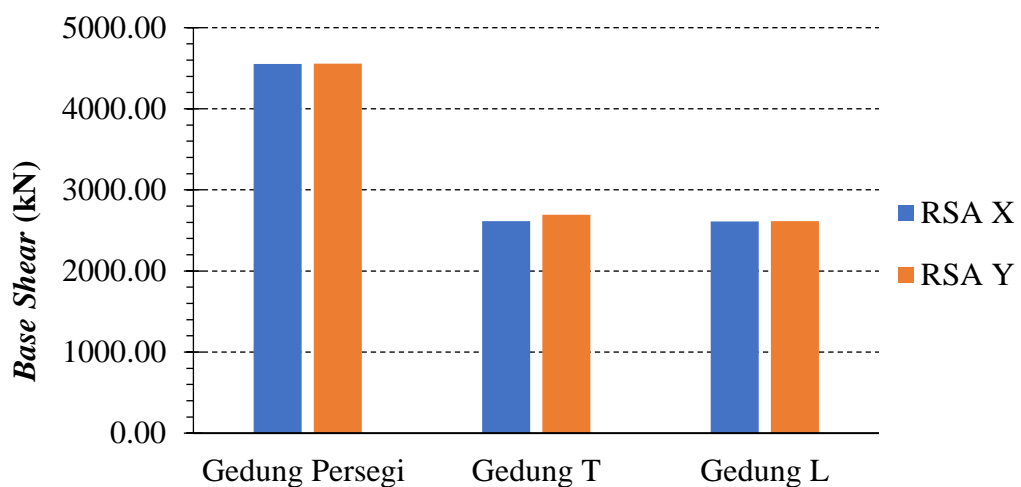
$$\begin{aligned} \text{Skala gaya arah x} &= \frac{\text{Statik X}}{\text{Dinamik X}} \\ &= \frac{V_t}{V} \\ &= \frac{7820,040}{4554,3} \\ &= 1,543 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Scale Factor X} &= \frac{I_e}{R} \times g \times \text{skala gaya} \\ &= \frac{1,5}{8} \times 9,81 \times 1,543 \\ &= 2837,539 \text{ mm/s}^2 \end{aligned}$$

Cek penskalaan gaya setelah di skala:

$$\begin{aligned} \text{Skala gaya arah x} &= V \text{ Dinamik X} \geq V \text{ Statik X} \\ &= 7028,041 \geq 7028,040 \text{ (Oke)} \end{aligned}$$

Rekapitulasi hasil evaluasi gaya geser dasar pada masing-masing model struktur yang dianalisis dengan beban gempa respons spektrum wilayah Yogyakarta disajikan pada Gambar 5.3. Sementara itu, data numerik gaya geser dasar secara rinci disajikan pada Lampiran 1.a.



Gambar 5.3 Diagram Batang Gaya Geser Dasar Beban Gempa Respons Spektrum

Berdasarkan hasil evaluasi gaya geser dasar menggunakan metode *Response Spectrum Analysis* (RSA), diperoleh bahwa gedung dengan konfigurasi denah persegi menunjukkan nilai gaya geser dasar paling besar dibandingkan dengan gedung berbentuk T dan L. Pada gedung denah persegi, gaya geser dasar tercatat sebesar 4554,223 kN pada arah X dan 4554,590 kN pada arah Y. Sementara itu, gedung berbentuk T memiliki gaya geser dasar sebesar 2615,332 kN pada arah X dan 2693,635 kN pada arah Y. Adapun pada gedung berbentuk L, nilai gaya geser dasar yang diperoleh adalah 2604,795 kN pada arah X dan 2615,356 kN pada arah Y.

Perbedaan besaran gaya geser dasar tersebut terutama dipengaruhi oleh perbedaan massa seismik masing-masing bangunan. Gedung dengan denah persegi memiliki massa bangunan yang lebih besar, yaitu sebesar 136482,441 kN, sedangkan gedung dengan denah T dan L memiliki massa yang relatif lebih kecil, masing-masing sebesar 80077,665 kN. Kondisi ini menyebabkan gaya inersia akibat beban gempa pada gedung persegi menjadi lebih besar, sehingga menghasilkan nilai gaya geser dasar yang lebih tinggi. Secara kuantitatif, perbedaan massa bangunan tersebut berkontribusi terhadap selisih nilai gaya geser dasar sebesar sekitar 42,573%.

5.3.2.2 Ketidakberaturan

Ketidakberaturan ini terbagi menjadi horizontal dan vertikal, yang dapat menyebabkan torsi berlebihan, konsentrasi tegangan, atau deformasi tidak merata. Oleh karena itu, analisis yang cermat diperlukan dalam perancangan bangunan tahan gempa untuk memastikan stabilitas dan keamanannya.

1. Ketidakberaturan Horizontal

Ketidakberaturan Torsi (Tipe 1a) dan Ketidakberaturan Torsi Berlebihan (Tipe 1b) berdasarkan hasil analisis menggunakan ETABS, nilai Δ_{\max} diperoleh dari simpangan maksimum pada dua titik ujung lokasi pengambilan data, sementara nilai Δ_{avg} dihitung sebagai rata-rata simpangan pada kedua titik tersebut. Selanjutnya, evaluasi ketidakberaturan pada setiap lantai dilakukan, dengan contoh perhitungan pada lantai atap dalam arah X gedung menggunakan beban gempa respons spektrum Yogyakarta.

Berdasarkan hasil analisis ketidakberaturan horizontal tipe H.1a dan H.1b menggunakan metode *response spectrum*, diketahui bahwa pada model bangunan berbentuk T teridentifikasi adanya ketidakberaturan horizontal tipe H.1a pada arah X, sedangkan pada arah Y tidak menunjukkan indikasi ketidakberaturan tersebut. Sementara itu, hasil evaluasi pada bangunan dengan denah persegi dan berbentuk L menunjukkan bahwa kedua model tersebut tidak mengalami ketidakberaturan horizontal tipe H.1a maupun H.1b, baik pada arah X maupun arah Y. Temuan ini mengindikasikan bahwa konfigurasi denah bangunan T memiliki potensi respons torsi yang lebih signifikan pada arah tertentu dibandingkan dengan konfigurasi denah persegi dan L, yang menunjukkan perilaku respons struktur yang relatif lebih simetris terhadap beban gempa.

2. Ketidakberaturan Vertikal

a. Ketidakberaturan Kekakuan Tingkat Lunak (Tipe 1a) dan Ketidakberaturan Kekakuan Tingkat Lunak Berlebih (Tipe 1b)

Ketidakberaturan tingkat lunak terjadi ketika kekakuan lateral suatu tingkat kurang dari 70% dari kekakuan lateral tingkat di atasnya atau kurang dari 80% dari kekakuan rata-rata tiga tingkat di atasnya. Sementara itu, ketidakberaturan tingkat lunak berlebih terjadi jika kekakuan lateral suatu tingkat kurang dari 60% dari kekakuan lateral tingkat di atasnya atau kurang dari 70% dari kekakuan rata-rata tiga tingkat di atasnya. Berdasarkan analisis ETABS, nilai kekakuan lateral dihitung dan dievaluasi untuk mengidentifikasi ketidakberaturan tingkat lunak pada setiap lantai untuk masing-masing model struktur. Contoh perhitungan disajikan untuk gedung persegi pada arah X.

Ketidakberaturan Kekakuan Tingkat Lunak

Kekakuan lateral tingkat di atasnya

Kekakuan lantai atap = 237564,374 kN/m

Kekakuan lantai 13 = 323071,280 kN/m

Cek = 70% x Kekakuan lantai atap

= 166295,0618 kN/m

$$= 323071,280 \text{ kN/m} \geq 166295,0618 \text{ kN/m (Regular)}$$

Kekakuan lateral rerata tiga tingkat di atasnya

$$\text{Kekakuan lantai atap} = 237564,374 \text{ kN/m}$$

$$\text{Kekakuan lantai 13} = 323071,280 \text{ kN/m}$$

$$\text{Kekakuan lantai 12} = 334409,644 \text{ kN/m}$$

$$\text{Cek} = 80\% \text{ Rata-rata 3 tingkat}$$

$$= 80\% \times \frac{\text{Kekakuan atap} + \text{Kekakuan lantai 20} + \text{Kekakuan lantai 19}}{3}$$

$$= 80\% \times \frac{237564,374 + 323071,280 + 334409,644}{3}$$

$$= 333674,568 \text{ kN/m} \geq 238678,746 \text{ kN/m (Regular)}$$

Ketidakteraturan Kekakuan Tingkat Lunak Berlebih

Kekakuan lateral tingkat di atasnya

$$\text{Kekakuan lantai atap} = 237564,374 \text{ kN/m}$$

$$\text{Kekakuan lantai 13} = 323071,280 \text{ kN/m}$$

$$\text{Cek} = 60\% \times \text{Kekakuan lantai atap}$$

$$= 142538,6244 \text{ kN/m}$$

$$= 323071,280 \text{ kN/m} \geq 142538,6244 \text{ kN/m (Regular)}$$

Kekakuan lateral rerata tiga tingkat di atasnya

$$\text{Kekakuan lantai atap} = 237564,374 \text{ kN/m}$$

$$\text{Kekakuan lantai 13} = 323071,280 \text{ kN/m}$$

$$\text{Kekakuan lantai 12} = 334409,644 \text{ kN/m}$$

$$\text{Cek} = 70\% \text{ Rata-rata 3 tingkat}$$

$$= 70\% \times \frac{\text{Kekakuan atap} + \text{Kekakuan lantai 20} + \text{Kekakuan lantai 19}}{3}$$

$$= 70\% \times \frac{237564,374 + 323071,280 + 334409,644}{3}$$

$$= 333674,568 \text{ kN/m} \geq 208843,902 \text{ kN/m (Regular)}$$

Rekapitulasi hasil pengecekan ketidakberaturan vertikal Tipe 1a dan 1b setiap model struktur dengan beban gempa respons spektrum disajikan dalam Tabel 5.6 berikut. Adapun nilai-nilai rinci ketidakberaturan Vertikal dapat dilihat lebih lanjut pada bagian Lampiran 1.e hingga 1.g.

Tabel 5.4 Rekapitulasi Ketidakberaturan Vertikal Tipe 1a dan 1b Beban Gempa Respons Spektrum

Lantai	Status Ketidakberaturan Vertikal 1a dan 1b					
	Persegi		T		L	
	Arah X	Arah Y	Arah X	Arah Y	Arah X	Arah Y
14	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>
13	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>
12	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>
11	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>
10	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>
9	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>
8	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>
7	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>
6	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>
5	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>
4	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>
3	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>
2	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>
1	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>

Hasil analisis menunjukkan bahwa ketidakberaturan vertikal tipe 1a dan 1b tidak ditemukan pada seluruh tipe bangunan.

b. Ketidakberaturan Tingkat Lemah (Tipe 5a) dan Ketidakberaturan Tingkat Lemah Berlebihan (Tipe 5b)

Ketidakberaturan tingkat lemah akibat diskontinuitas pada kekuatan lateral terjadi apabila kekuatan lateral suatu tingkat kurang dari 80% dari kekuatan lateral tingkat di atasnya. Sementara itu, ketidakberaturan tingkat lemah berlebihan terjadi jika kekuatan lateral suatu tingkat kurang dari 65% dari kekuatan lateral tingkat di atasnya. Kekuatan lateral tingkat merujuk pada total kapasitas semua elemen pemikul beban seismik yang berkontribusi terhadap geser tingkat dalam arah yang dianalisis. Berdasarkan hasil analisis ETABS yang diperoleh dari tabel *story forces*, dilakukan evaluasi kekuatan lateral pada setiap lantai untuk mengidentifikasi adanya diskontinuitas.

Rekapitulasi hasil perhitungan terkait pengecekan ketidakberaturan tingkat lemah akibat diskontinuitas pada kekuatan lateral tingkat (Tipe 5a) serta ketidakberaturan tingkat lemah berlebihan akibat diskontinuitas pada

kekuatan lateral tingkat (Tipe 5b) disajikan dalam Tabel 5.7 berikut. Adapun nilai-nilai rinci ketidakberaturan Vertikal tipe 5a dan 5b dapat dilihat lebih lanjut pada bagian Lampiran 1.h hingga 1.j.

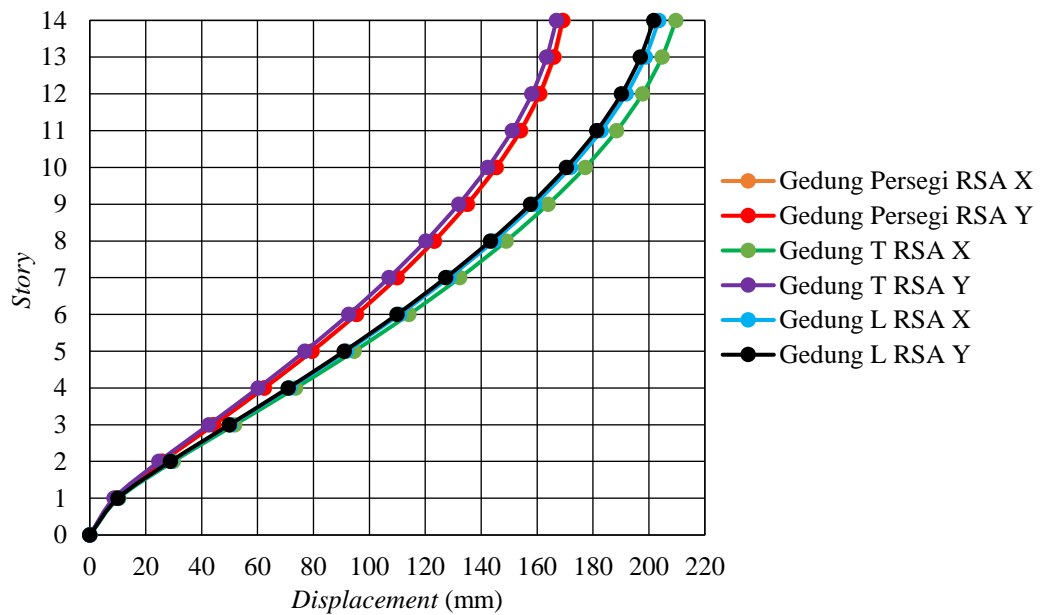
Tabel 5. 5 Rekapitulasi Ketidakberaturan Vertikal Tipe 5a dan 5b Beban Gempa Respons Spektrum

Lantai	Status Ketidakberaturan Vertikal 5a dan 5b					
	Persegi		T		L	
	Arah X	Arah Y	Arah X	Arah Y	Arah X	Arah Y
14	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>
13	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>
12	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>
11	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>
10	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>
9	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>
8	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>
7	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>
6	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>
5	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>
4	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>
3	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>
2	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>
1	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>

Hasil analisis menunjukkan bahwa ketidakberaturan vertikal tipe 5a dan 5b tidak ditemukan pada tiap tipe bangunan.

5.3.2.3 Perpindahan (*displacement*)

Berdasarkan hasil analisis yang dilakukan menggunakan perangkat lunak ETABS, nilai perpindahan (*Displacement*) yang dihasilkan dari beban gempa respons spektrum wilayah Yogyakarta disajikan dalam Gambar 5.6 di bawah ini. Adapun uraian dari nilai-nilai perpindahan akibat beban respons spektrum wilayah Yogyakarta dapat dilihat lebih lanjut pada bagian Lampiran 1.k.



Gambar 5.4 Grafik Perpindahan pada Beban Gempa Respons Spektrum

Hasil evaluasi perpindahan (*Displacement*) struktur berdasarkan analisis *response spectrum* menunjukkan variasi nilai simpangan maksimum pada masing-masing konfigurasi denah bangunan. Pada bangunan dengan denah persegi, perpindahan maksimum tercatat sebesar 169,329 mm pada arah X dan 169,076 mm pada arah Y. Sementara itu, bangunan berbentuk T mengalami perpindahan maksimum sebesar 209,639 mm pada arah X dan 166,949 mm pada arah Y. Adapun pada bangunan berbentuk L, nilai perpindahan maksimum yang diperoleh adalah 203,557 mm pada arah X dan 201,760 mm pada arah Y.

5.3.2.4 Simpangan Antar Tingkat (*Story drift*)

Simpangan antar tingkat sudah diatur pada SNI 1726:2019 dengan batasan simpangan antar tingkat pada Tabel 3.10 dimana untuk struktur dengan kategori risiko IV dengan kategori bangunan gedung termasuk semua struktur lainnya maka nilai batasan simpangannya adalah $0,01h_{sx} \times \Delta/\rho$. Nilai faktor redundansi (ρ) yang digunakan adalah 1,3. Contoh perhitungan simpangan antar tingkat dilakukan pada gempa RSA wilayah Yogyakarta tipe gedung persegi menggunakan Persamaan 3.36 adalah sebagai berikut.

$$\delta_{ex \text{ Atap}} = 231,132 \text{ mm}$$

$$\delta_{ex \text{ Lantai 13}} = 226,701 \text{ mm}$$

Perhitungan *elastic drift*

$$\begin{aligned}
 h_{sx} &= 4000 \text{ mm} \\
 \delta_{ex \text{ Atap}} &= \delta_{ex \text{ Atap}} - \delta_{ex \text{ Lantai 13}} \\
 &= 231,132 \text{ mm} - 226,701 \text{ mm} \\
 &= 4,431 \text{ mm}
 \end{aligned}$$

Perhitungan *inelastic drift*

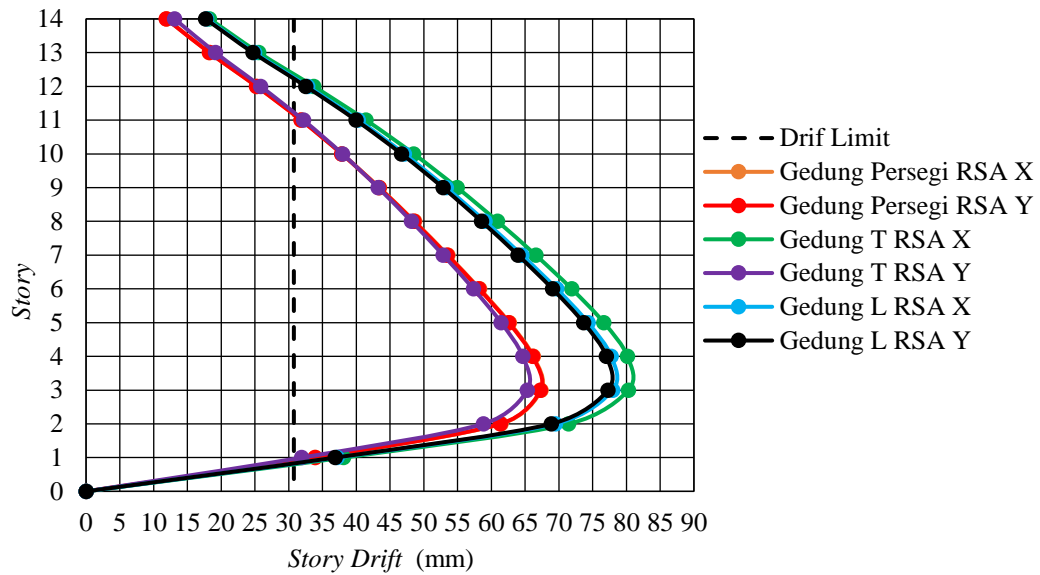
$$\begin{aligned}
 \Delta X &= \frac{\delta_{ex \text{ Atap}} \times C_d}{I_e} \\
 \Delta X &= \frac{4,431 \times 5,5}{1,5} \\
 \Delta X &= 16,247 \text{ mm}
 \end{aligned}$$

Perhitungan nilai simpangan *inelastic* Izin

$$\begin{aligned}
 \Delta_a &= 0,01 h \\
 \text{Simpangan } \textit{inelastic} \text{ Izin} &= \frac{\Delta_a}{\rho} \\
 &= \frac{0,01 \times 4000}{1,3} \\
 &= 30.769 \text{ mm}
 \end{aligned}$$

$$\text{Cek} = 16,614 \text{ mm} < 30.769 \text{ mm (Oke)}$$

Hasil analisis simpangan antar tingkat (*Story drift*) yang diakibatkan oleh beban gempa respons spektrum (RSA) wilayah Yogyakarta untuk masing-masing bentuk bangunan disajikan secara sistematis pada Gambar 5.9 berikut ini. Sementara itu, untuk uraian dari nilai-nilai simpangan antar tingkat akibat beban respons spektrum wilayah Yogyakarta dapat dilihat lebih lanjut pada bagian Lampiran 1.1 hingga 1.n.



Gambar 5. 5 Grafik *Story Drift* Beban Gempa Respons Spektrum

Berdasarkan hasil analisis simpangan antar tingkat (*story drift*), diperoleh bahwa bangunan dengan denah persegi menunjukkan nilai simpangan maksimum sebesar 67,386 mm pada arah X dan 67,291 mm pada arah Y. Pada bangunan berbentuk T, simpangan antar tingkat maksimum tercatat sebesar 80,307 mm pada arah X dan 65,344 mm pada arah Y. Sementara itu, bangunan dengan denah berbentuk L memiliki nilai simpangan antar tingkat maksimum sebesar 77,968 mm pada arah X dan 77,286 mm pada arah Y.

Hasil tersebut menunjukkan bahwa seluruh tipe bangunan yang dianalisis memiliki nilai simpangan antar tingkat yang melampaui batas izin sebesar 30,769 mm. Kondisi ini mengindikasikan bahwa kriteria kinerja batas layan belum terpenuhi. Hal tersebut berkaitan dengan tahapan *preliminary design* struktur yang masih belum optimal, khususnya dalam penentuan dimensi elemen struktural. Keterbatasan dalam penetapan dimensi awal ini berdampak pada tingkat kekakuan struktur yang belum memadai, sehingga respons deformasi lateral bangunan menjadi lebih besar dan menyebabkan terjadinya simpangan antar tingkat yang melebihi nilai maksimum yang diizinkan.

5.4 Analisis dengan Metode *Time History*

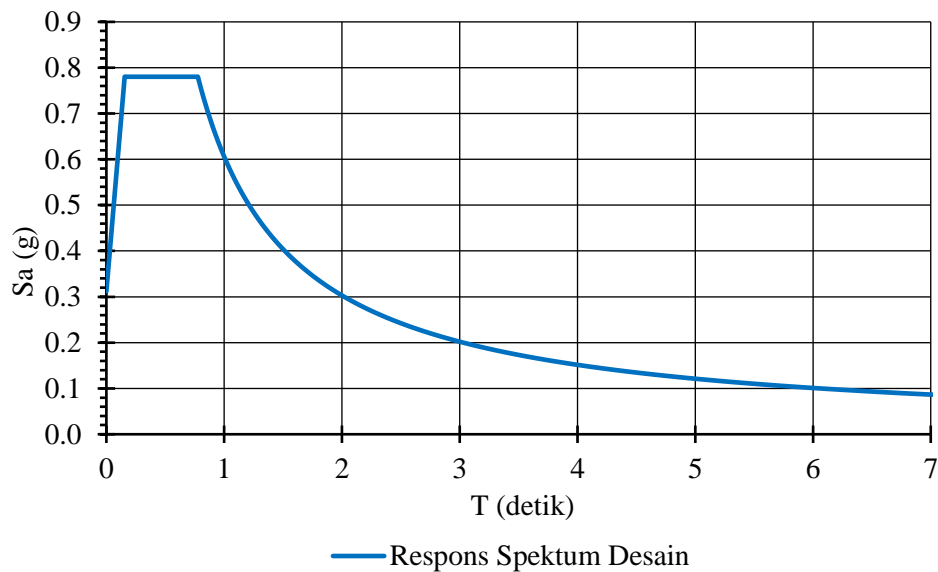
Untuk memperoleh gambaran perilaku dinamis struktur secara lebih rinci dan realistis terhadap beban gempa, dilakukan analisis menggunakan metode *Time History*. Metode ini memungkinkan evaluasi respons struktur terhadap rekaman gerakan tanah aktual dalam domain waktu, sehingga mampu menggambarkan interaksi kompleks antara massa, kekakuan, dan redaman secara lebih komprehensif dibandingkan metode statik ekuivalen maupun respons spektrum. Analisis ini menjadi krusial dalam menilai kinerja struktur terutama pada kondisi ketidakberaturan geometri dan distribusi massa, serta dalam mengidentifikasi potensi mekanisme keruntuhan lokal yang tidak dapat terdeteksi melalui pendekatan linier statik atau spektrum respons.

5.4.1 Pembuatan *Time History*

Pengambilan rekaman gerak tanah diambil dari *Website PEER Ground Motion Database*. Parameter untuk pengambilan rekaman gerak tanah mengacu pada ketentuan yang terdapat pada Peta Deagregasi Bahaya Gempa Indonesia untuk Perencanaan dan Evaluasi Infrastruktur Tahan Gempa Tahun 2022 yang disusun oleh Tim Pusat Studi Gempa Nasional. Parameter yang diambil dari peta tersebut adalah nilai Magnitudo (M), Jarak patahan (R), V_{s30} dan mekanisme gempa. Untuk mendapatkan nilai-nilai tersebut, pada penelitian ini sumber gempa yang digunakan adalah tipe *Shallow Crustal* yang sesuai dengan keadaan gempa Yogyakarta yaitu yang berasal dari sesar opak. Periode Ulang dan Periode Getar yang digunakan adalah Periode Ulang 2500 Tahun, pada percepatan spektrum respon 3 detik. Pemilihan percepatan spektrum respon 3 detik didasari oleh periode fundamental rerata dari sembilan model struktur. Pencarian parameter rekaman data gempa dapat dilihat di bawah ini.

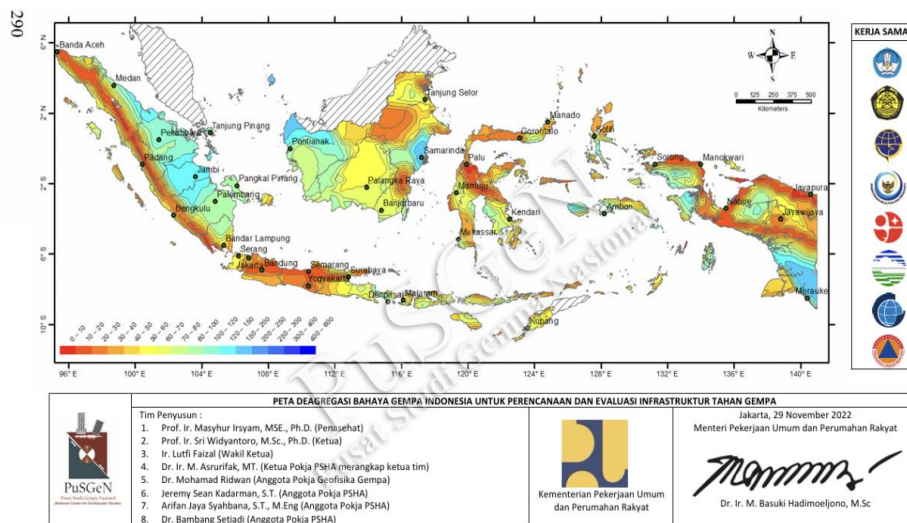
5.4.1.1 Menentukan Target Spektrum Respons

Respons spektrum yang digunakan sebagai acuan dalam analisis *Time History* pada penelitian ini berasal dari wilayah Yogyakarta. Pemilihan wilayah tersebut didasarkan pada potensi gempa *Shallow Crustal* yang berasal dari Sesar Opak. Grafik respons spektrum wilayah Yogyakarta dapat dilihat pada gambar 5.12 di bawah ini.



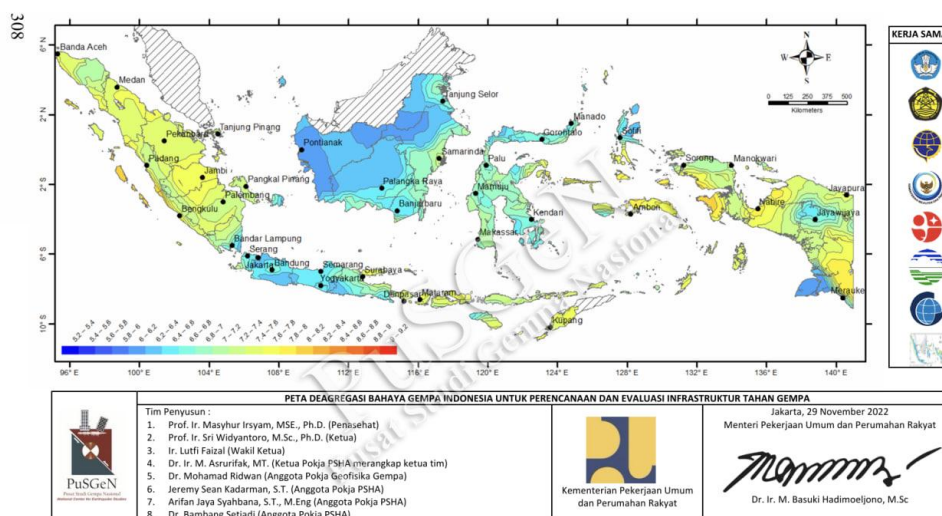
Gambar 5.6 Grafik Respons Spektrum Wilayah Yogyakarta

5.4.1.2 Menentukan Magnitudo dan Jarak



Gambar L.2.48 Peta deagregasi Jarak (R) sumber gempa Sesar Dangkal pada percepatan spektrum respon 3-detik dengan redaman 5% untuk periode ulang 2500 tahun

Gambar 5.7 Jarak Hiposenter (R) Untuk Sesar Dangkal (*Shallow Crustal*) pada Peta Deagregasi Bahaya Gempa Indonesia 2022



Gambar L2.66 Peta deagregasi Magnitudo (M) sumber gempa Sesar Dangkal pada percepatan spektrum respon 3-detik dengan redaman 5% untuk periode ulang 2500 tahun

Gambar 5.8 Magnitudo (M) Untuk Sesar Dangkal (*Shallow Crustall*) pada Peta Deagregasi Bahaya Gempa Indonesia 2022

Dari pencarian data magnitudo (M) dan jarak (R) untuk sesar dangkal (*Shallow Crustall*) Pada Peta Deagregasi Bahaya Gempa Indonesia 2022 didapat nilai-nilai yang dapat dilihat pada Tabel 5.8 berikut.

Tabel 5. 6 Nilai Magnitudo (M) dan Jarak (R) Wilayah Yogyakarta

No	Sumber	Magnitudo	Jarak (km)	Mekanisme
		3 detik	3 detik	3 detik
1	<i>Shallow Crustal</i>	6.4-6.6	10-20	<i>Strike Slip</i>

5.4.1.3 Memilih Rekaman Gempa Acuan

Setelah memperoleh data parameter gempa berupa magnitudo (M) dan jarak (R), langkah selanjutnya adalah mengakses *Website PEER Ground Motion Database* untuk memperoleh data rekaman gempa yang sesuai. Prosedur pencarian dan pemilihan rekaman gempa pada basis data tersebut dijelaskan lebih lanjut pada bagian berikut.

1. Isi magnitudo (M), jarak (R), Mekanisme Patahan, serta Vs30 sesuai dengan data yang telah diperoleh dari peta deagregasi bahaya gempa Indonesia 2022.

Edit Search

Load Sample Input Values | Clear Input Values

Search

These characteristics are defined in the NGA-West2 Flatfile. You need to re-run Search when any of these parameters are updated.

Record Characteristics:

RSN(s) : RSN1,..RSNn

Event Name :

Station Name :

Search Parameters:

Fault Type :

Magnitude :

min,max

R JB(km) :

min,max

R rup(km) :

min,max

Vs30(m/s) :

min,max

D5-95(sec) :

min,max

Pulse :

Additional Characteristics:

Max No. Records :

(<=100)

Suite

Spectral Ordinate :

Damping Ratio :

Suite Average :

Controls

[Search Records](#) [Rerun Suite](#)

[Search Results -- Response Spectra](#)

Gambar 5.9 Halaman Pencarian Data Rekaman Gempa PEER NGA

2. Pilih rekaman gempa sesuai dengan kebutuhan

Results -- Metadata

Click heading of the column to be sorted in ascending order

Rescale Using Checked Records

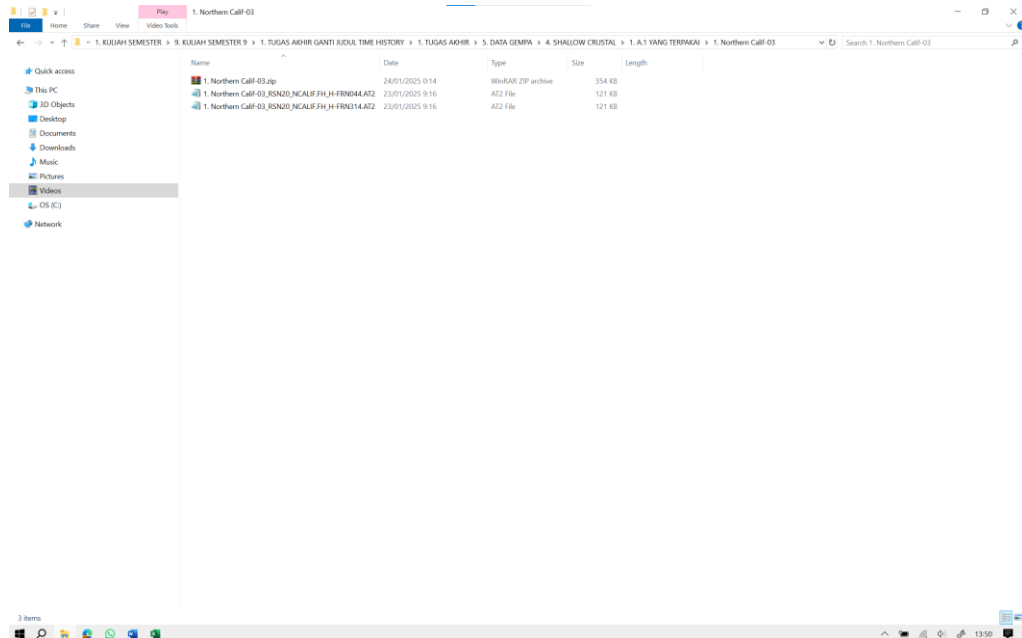
MSE	Scale Factor	Tp(s)	D5-75(s)	D5-95(s)	Arias Intensity (m/s)	Event	Year	Station	Mag	Mechanism	Rjb(km)	Rrup
	1.0	4.396	5.3	14.9	0.4	Imperial Valley-06	1979	Brawley Airport	6.53	strike slip	8.54	10.0
	1.0	-	7.2	14.8	0.9	Imperial Valley-06	1979	Calexico Fire Station	6.53	strike slip	10.45	10.0
	1.0	-	13.4	28.7	0.4	Imperial Valley-06	1979	Compuertas	6.53	strike slip	13.52	15.0
	1.0	-	4.6	9.0	2.0	Imperial Valley-06	1979	El Centro Array #11	6.53	strike slip	12.56	12.0
	1.0	-	9.7	19.6	0.4	Imperial Valley-06	1979	El Centro Array #12	6.53	strike slip	17.94	17.0
	1.0	-	7.1	18.6	0.2	Imperial Valley-06	1979	Parachute Test Site	6.53	strike slip	12.69	12.0
	1.0	-	14.0	25.6	0.1	Imperial Valley-06	1979	Westmorland Fire Sta	6.53	strike slip	14.75	15.0
	1.0	-	10.6	14.3	0.3	Superstition Hills-02	1987	Brawley Airport	6.54	strike slip	17.03	17.0
	1.0	-	9.4	35.7	1.1	Superstition Hills-02	1987	El Centro Imp. Co. Cent	6.54	strike slip	18.2	18.0
	1.0	2.128	10.6	13.9	0.3	Superstition Hills-02	1987	Kornbloom Road (temp)	6.54	strike slip	18.48	18.0

Download Options

[Download Search Results \(metadata+spectra\)](#) [Download Time Series Records \(metadata+spectra+traces\)](#)

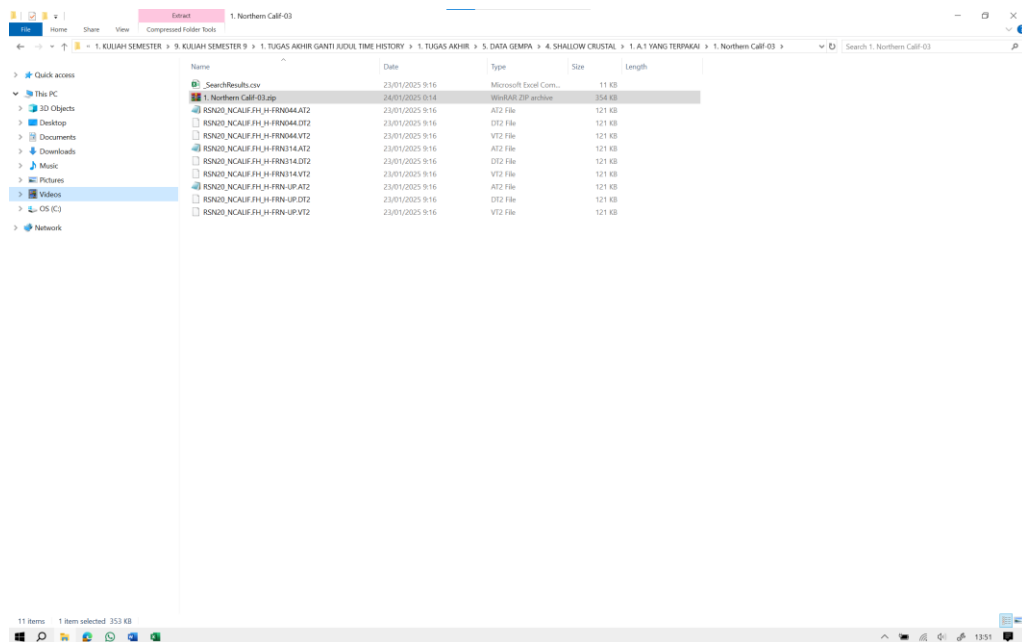
Gambar 5.10 Pemilihan Data Rekaman Gempa

3. Simpan data rekaman gempa yang telah didapat



Gambar 5.11 Penyimpanan Data Rekaman Gempa

4. *Extract* data rekaman gempa



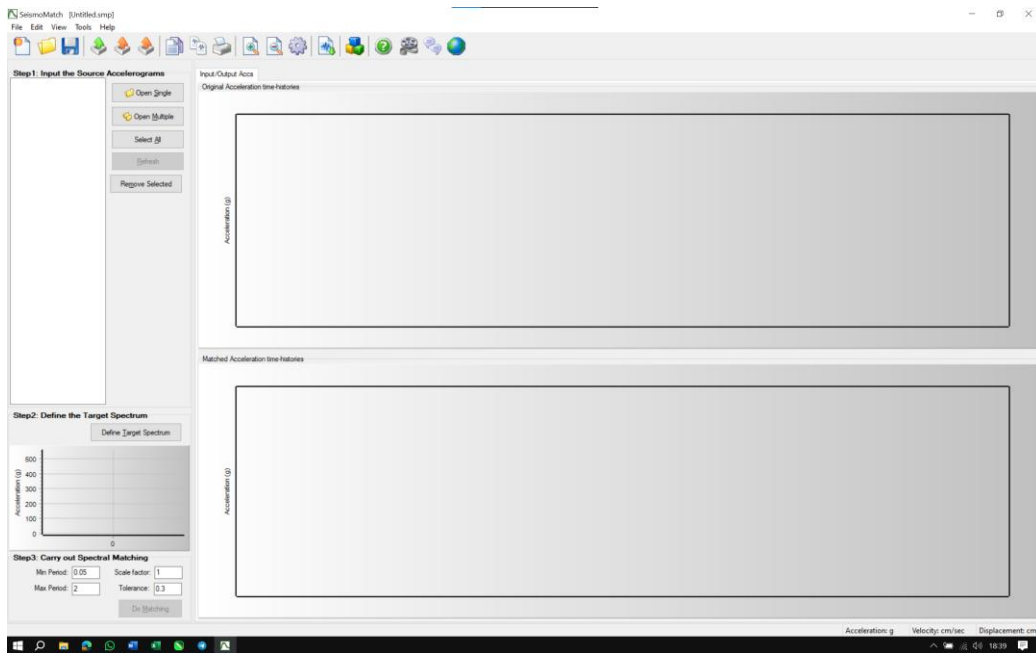
Gambar 5.12 Hasil *Extract File* Rekaman Gempa

Hasil *extract* dari basis data berupa sejumlah berkas berformat teks (.txt), yang merupakan data mentah dan memerlukan proses penyesuaian (*matching*) terhadap respons spektrum target. Dalam proses *matching* tersebut, data yang dibutuhkan secara spesifik adalah rekaman percepatan terhadap waktu (*Acceleration vs Time*) yang memiliki ekstensi (.AT). Oleh karena itu, berkas selain yang berformat (.AT) dapat dieliminasi karena tidak diperlukan dalam tahap analisis ini.

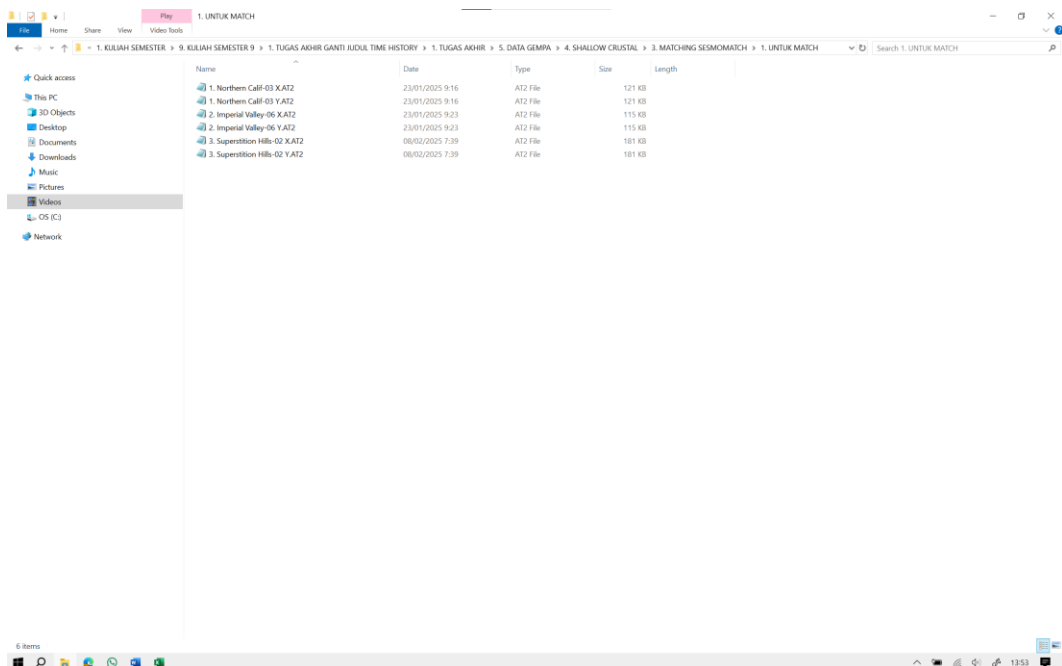
5.4.1.4 Proses *Matching*

Proses *Matching* dilakukan dengan menargetkan data rekaman gempa pada respons spektra MCER. Beberapa ketentuan seperti batasan periode dan kemiripan nilai rata-rata data rekaman gempa telah diatur pada SNI 1726:2019. Batas periode yang digunakan sesuai dengan SNI 1726:2019 adalah $0,8T_{lower}$ sampai $1,2T_{upper}$. Pada penelitian ini *Tupper* diambil dari rerata nilai periode mode pertama bangunan sedangkan untuk *Tlower* dipilih dari rerata mode yang pertama kali memiliki 90% partisipasi massa pada kedua sumbu ortogonal utama, didapatkan nilai *Tupper* = 4.187 detik dan *Tlower* = 0.862 detik. Pengerjaan pencocokan data rekaman gempa dilakukan dengan bantuan *Software Seismomatch 2025*. Berikut langkah-langkah dari proses *matching* data rekaman gempa.

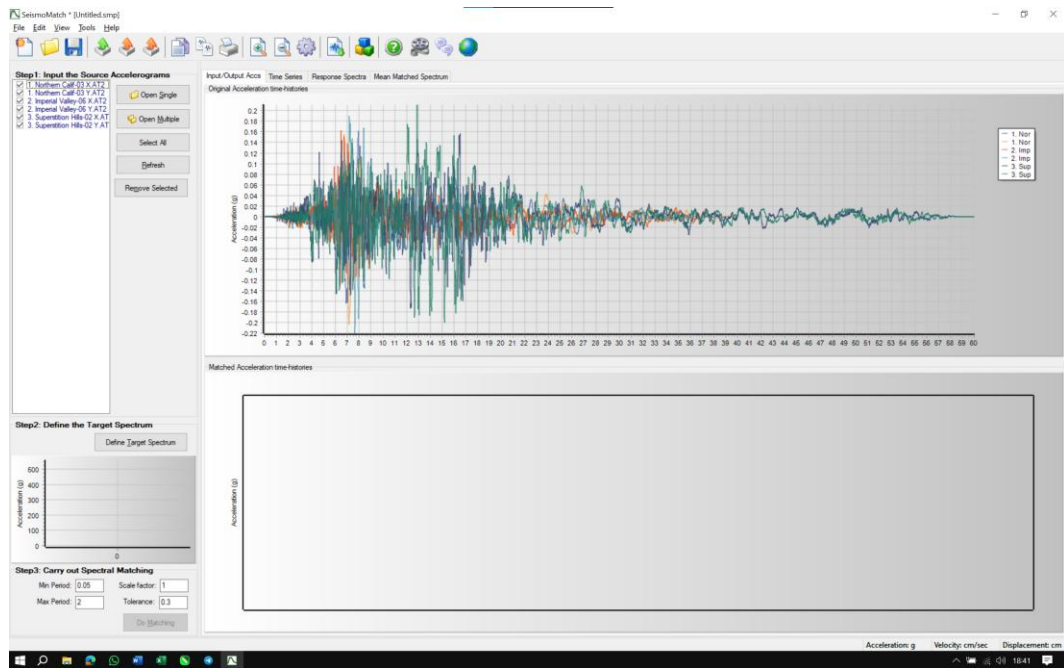
1. Buka *software seismomatch* → *open multiple* → pilih PEER NGA Format → klik Oke.



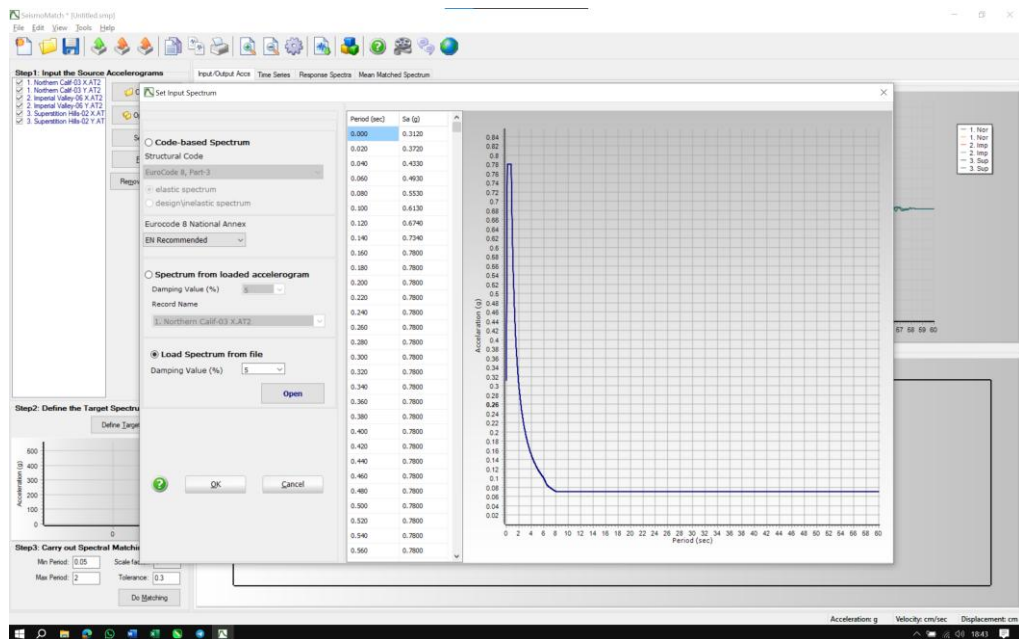
2. Jika sudah klik oke maka kita akan dibawa ke jendela tempat penyimpanan file, cari tempat dimana file data rekaman gempa disimpan



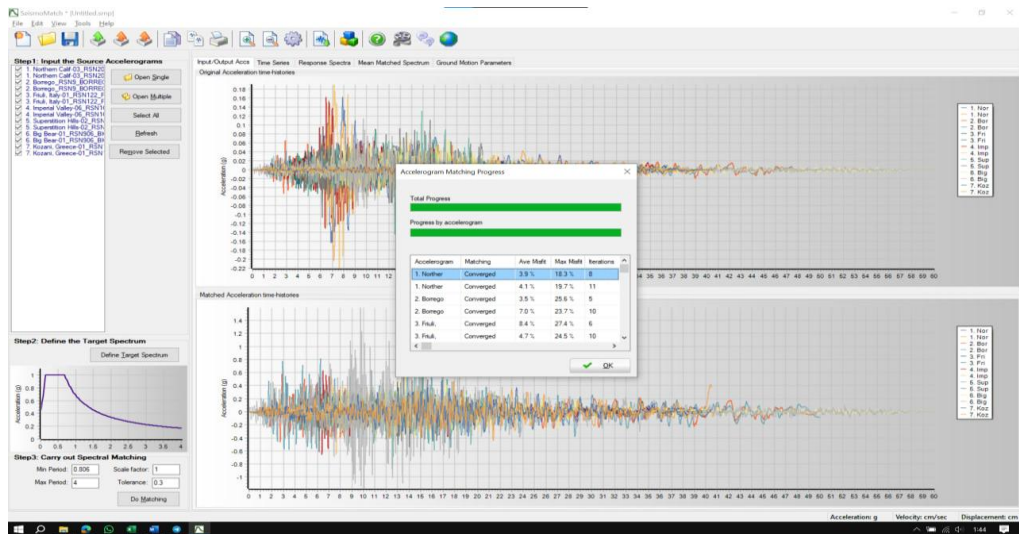
3. Pilih semua data gempa yang akan dicocokkan kemudian klik open



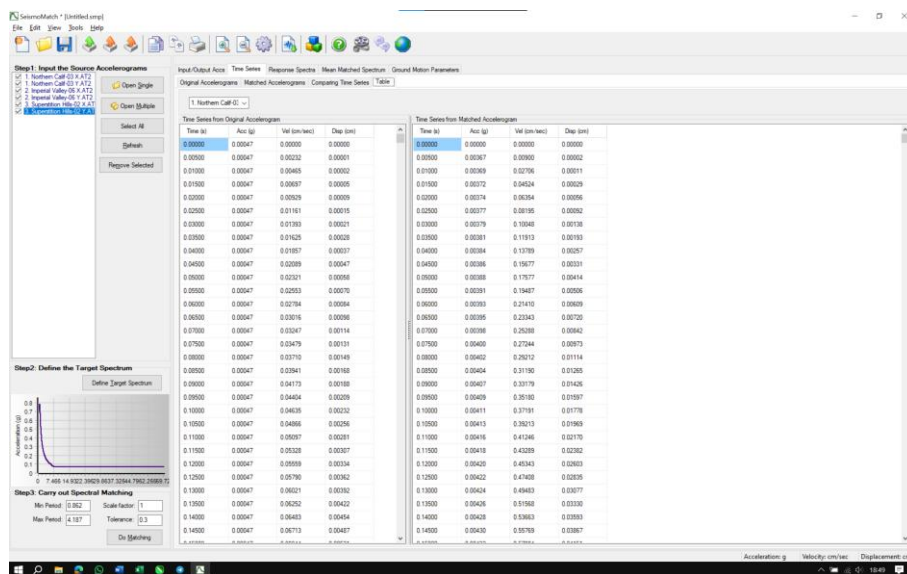
4. Definiskan target respon spektrum daerah yang ditinjau dengan cara *define target spectrum*



5. Sebelum memulai *Matching* tentukan parameter periode max dan periode min terlebih dahulu, nilai periode maksimum adalah $1,2T_{upper}$ dan Periode minimum $0,8T_{lower}$. Setelah itu klik *Do Matching*



6. Simpan hasil pencocokan dengan cara masuk ke menu *Time Series* → *Table* → Pilih data gempa yang akan di simpan → *Copy Chart Data* lalu salin ke Notepad.

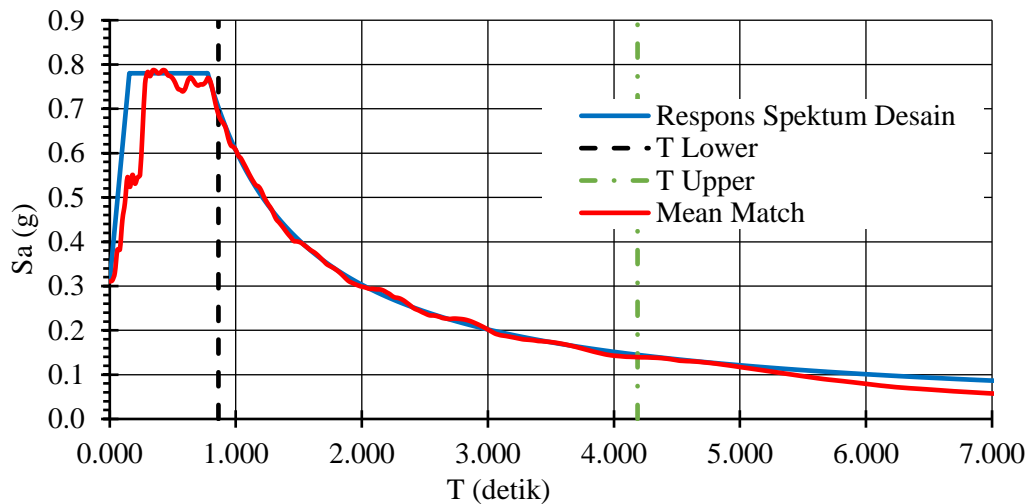


5.4.1.5 Validasi *Time History* Buatan

Setelah proses pencocokan (*matching*) antara rekaman gempa dan respons spektrum target dilakukan, tahap selanjutnya adalah melakukan validasi terhadap hasil pencocokan tersebut. Validasi ini bertujuan untuk memastikan bahwa rekaman gempa yang telah dimodifikasi memenuhi kriteria kesesuaian terhadap spektrum target yang telah ditentukan. Hasil validasi tersebut dapat dilihat pada uraian berikut.

1. Keselarasan Bentuk Spektrum

Bentuk keselarasan hasil pencocokan spektral (*Spektral Matching*) antara respons spektrum Yogyakarta dengan rerata rekaman gempa (*Time History*) dapat dilihat pada Gambar 5.19 di bawah ini.

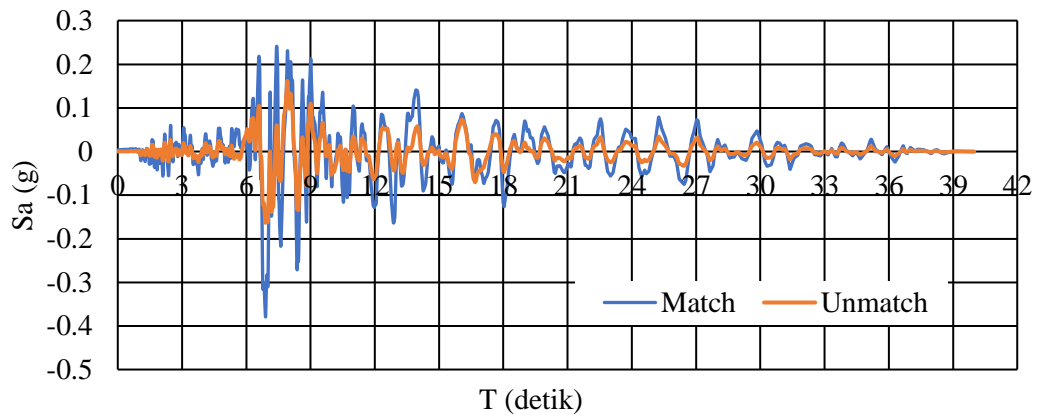


Gambar 5.13 Kontrol *Pseudo-Acceleration Time Histoy* Terhadap Respons Spektrum Target

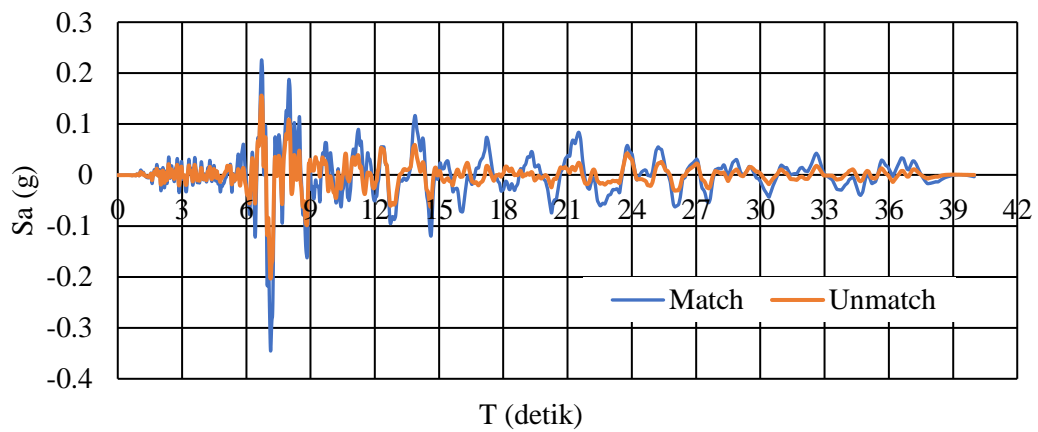
Berdasarkan hasil pencocokan (*matching*) rekaman gempa terhadap kurva spektrum respons diperoleh bahwa bentuk spektrum hasil pencocokan menunjukkan tingkat kesesuaian yang tinggi terhadap spektrum target dengan maksimum *error* sebesar 4,366%. Hal ini ditunjukkan dengan garis rata-rata hasil pencocokan (*mean match*) yang mengikuti pola dan amplitudo spektrum respons desain pada rentang periode yang relevan antara T_{lower} dan T_{upper} .

2. Konsistensi Karakteristik Non Stasioner

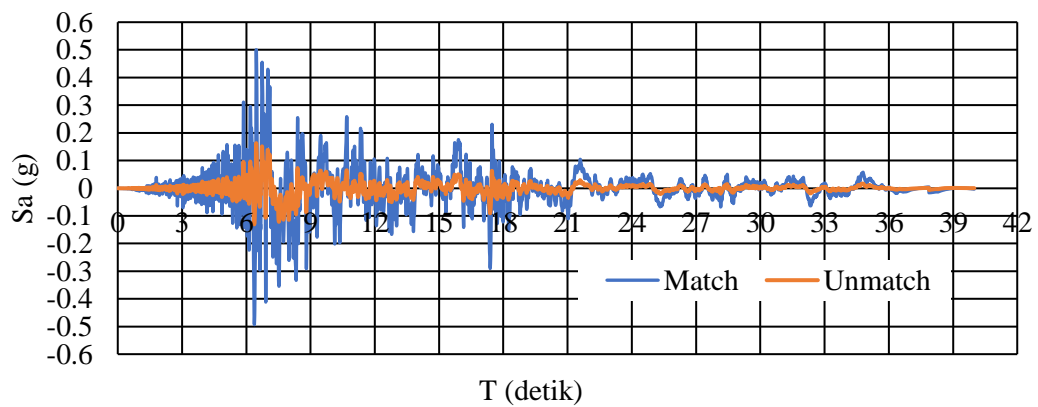
Kondisi gerakan tanah sebelum dilakukan pencocokan (*matching*) dan setelah *matching* yang diwakili oleh *spectral accelerations* dapat dilihat pada gambar 5.20 sampai dengan gambar 5.25 di bawah ini.



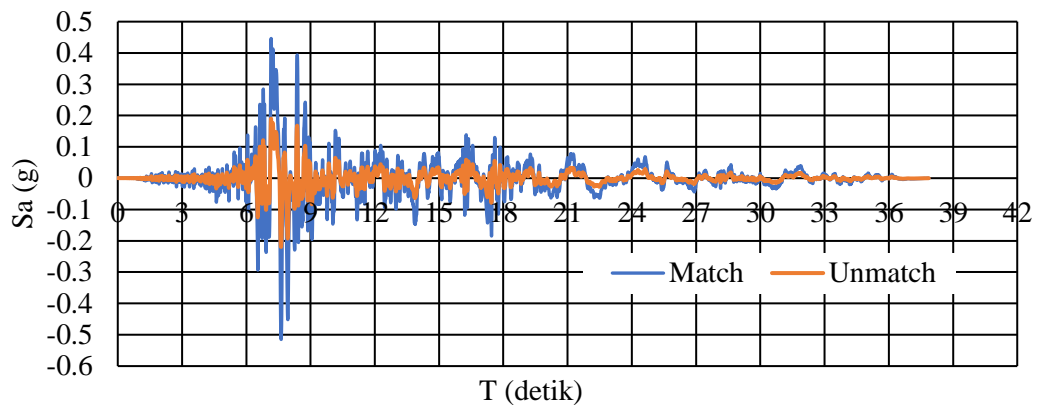
Gambar 5.14 Spectral Acceleration Northern Calif-03 X



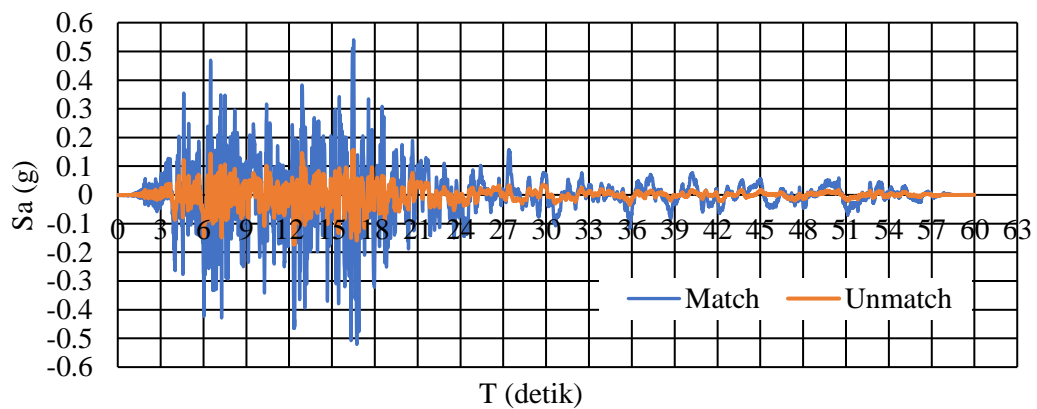
Gambar 5.15 Spectral Acceleration Northern Calif-03 Y



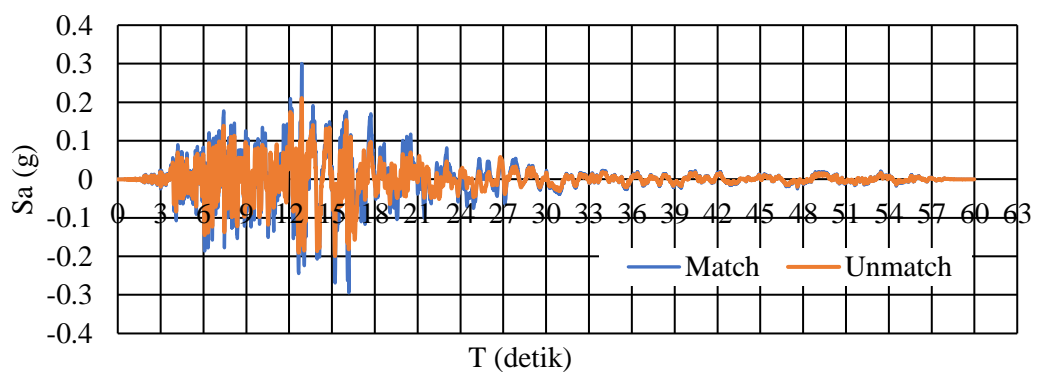
Gambar 5.16 Spectral Acceleration Imperial Valley-06 X



Gambar 5.17 Spectral Acceleration Imperial Valley-06 Y



Gambar 5.18 Spectral Acceleration Superstition Hills-02 X



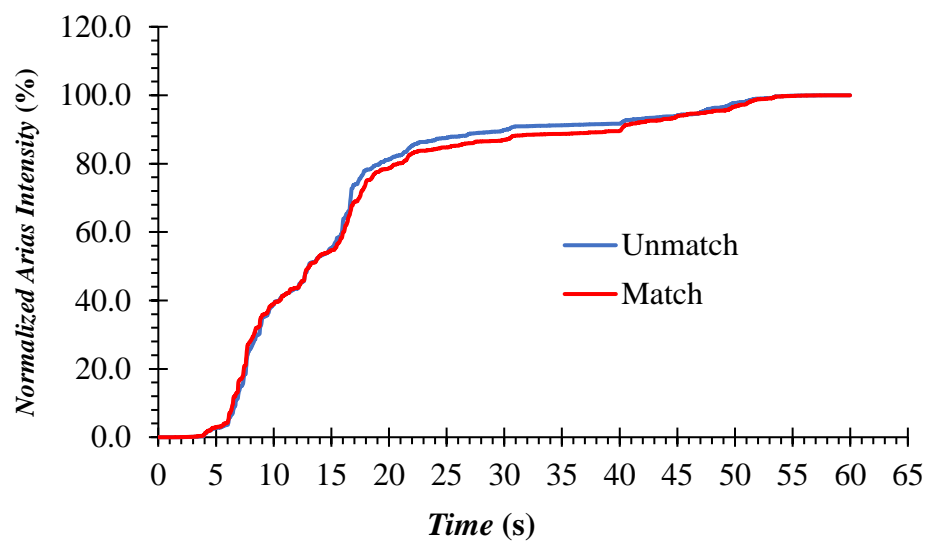
Gambar 5.19 Spectral Acceleration Superstition Hills-02 Y

Hasil pencocokan terhadap beberapa rekaman gempa, seperti Northern Calif-03, Imperial Valley-06, dan Superstition Hills-02, baik pada komponen X maupun Y, menunjukkan bahwa karakteristik spektral dari riwayat waktu percepatan

tetap konsisten sebelum dan sesudah proses pencocokan. Hal ini menandakan bahwa metode pencocokan yang diterapkan tidak mengganggu sifat dasar non-stasioner dari sinyal gempa, sehingga tetap representatif untuk analisis *Time History* yang realistis dan akurat.

3. Kesamaan Intensitas Arias

Intensitas arias yang didapatkan sebelum dan setelah proses *matching* diilustrasikan pada Gambar 5.26 di bawah ini.



Gambar 5.20 Grafik *Normalized Arias Intensity Time History* Sebelum dan Setelah *Matching*

Berdasarkan hasil grafik intensitas Arias setelah dilakukan proses *spectral matching*, diketahui bahwa karakteristik distribusi energi antara rekaman gempa sebelum dan sesudah pencocokan menunjukkan kesamaan yang signifikan. Hal ini mengindikasikan bahwa proses *matching* tidak mengubah secara substansial total energi impulsif yang ditransfer ke sistem struktur. Dengan demikian, rekaman gempa hasil pencocokan dinilai telah memenuhi kriteria kesesuaian energi, yakni intensitas Arias *pasca-matching* tetap sebanding dengan kondisi awalnya, sebagaimana disyaratkan dalam praktik analisis *Time History* yang representatif.

Berdasarkan hasil validasi, rekaman *Time History* buatan yang dihasilkan melalui proses *spectral matching* dinyatakan valid dan layak digunakan untuk analisis *Time History linear*. Hal ini didasarkan pada tiga aspek utama, yaitu: (1)

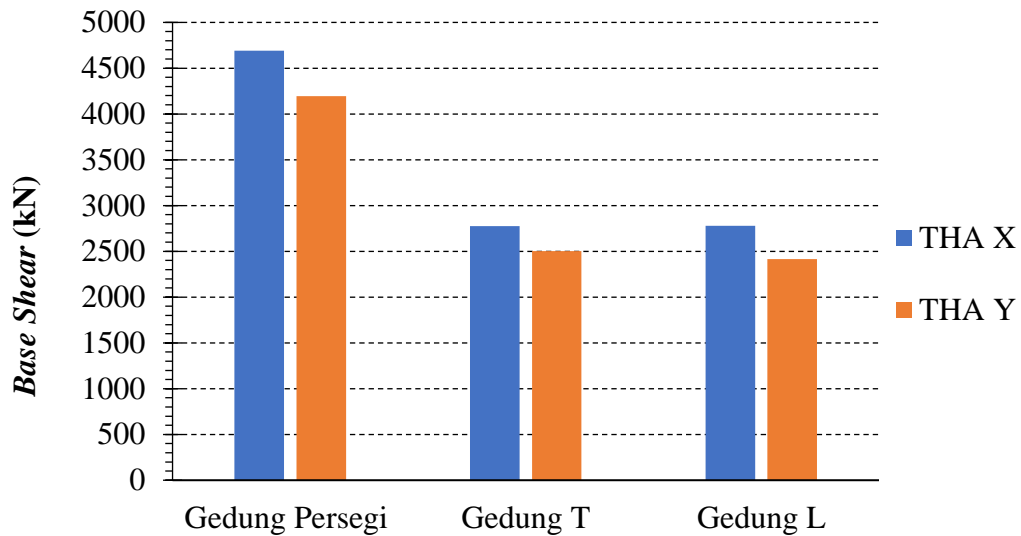
kesesuaian spektrum, di mana respons spektrum hasil pencocokan menunjukkan kecocokan tinggi dengan spektrum target wilayah Yogyakarta dengan maksimum *error* sebesar 4,366% , terutama pada rentang periode dominan struktur; (2) kestabilan karakteristik non-stasioner, karena bentuk spektral rekaman tetap mempertahankan ciri aslinya setelah pencocokan; serta (3) kesetaraan intensitas Arias, yang menunjukkan bahwa energi gempa tidak berubah secara signifikan setelah proses *matching*. Ketiga aspek ini menunjukkan bahwa proses penyesuaian tidak mengubah karakteristik penting dari sinyal gempa, sehingga hasil yang diperoleh dapat diandalkan dalam simulasi respons struktur.

5.4.2 Hasil Analisis *Time History*

Dalam analisis ini, data riwayat waktu (*Time History*) yang telah dicocokkan dan divalidasi karakteristiknya antara sebelum dan setelah pencocokan dengan respons spektral target kemudian diproses menggunakan perangkat lunak ETABS untuk mendapatkan respons struktur.

5.4.2.1 Gaya Geser Dasar

Pada penelitian ini, hasil simulasi gaya geser dasar menggunakan metode *Time History* ditampilkan tanpa terlebih dahulu dilakukan penskalaan terhadap gaya statik ekuivalen. Hal ini bertujuan untuk melihat secara langsung pengaruh asli dari gaya geser dasar tanpa adanya pengaruh dari gaya statik ekuivalen. Gaya geser dasar tersebut ditampilkan pada Gambar 5.21. Adapun uraian dari nilai-nilai gaya geser dasar akibat beban *Time History* dapat dilihat lebih lanjut pada bagian lampiran 2.a.



Gambar 5.21 Diagram Batang Gaya Geser Dasar Beban Gempa *Time History*

Berdasarkan hasil analisis gaya geser dasar menggunakan metode *Time History Analysis* (THA), diketahui bahwa model bangunan dengan denah persegi menunjukkan nilai gaya geser dasar terbesar dibandingkan dengan konfigurasi lainnya, yaitu sebesar 4690,826 kN pada arah X dan 4193,570 kN pada arah Y. Pada bangunan berbentuk T, gaya geser dasar yang dihasilkan sebesar 2776,016 kN pada arah X dan 2503,746 kN pada arah Y. Sementara itu, bangunan dengan denah berbentuk L memiliki nilai gaya geser dasar sebesar 2777,599 kN pada arah X dan 2416,097 kN pada arah Y.

Dari ketiga model bangunan tersebut, terlihat bahwa nilai gaya geser dasar secara konsisten lebih besar pada arah X dibandingkan dengan arah Y, dengan selisih rata-rata sekitar 11,040%. Perbedaan ini dipengaruhi oleh karakteristik input gempa yang digunakan dalam analisis, di mana komponen percepatan gempa pada arah X memiliki intensitas yang lebih besar. Hal ini tercermin, antara lain, pada rekaman gempa Imperial Valley-06 yang menunjukkan respons percepatan dominan pada arah X, sehingga menghasilkan gaya inersia dan gaya geser dasar yang lebih besar pada arah tersebut.

5.4.2.2 Ketidakberaturan

Analisis terhadap setiap bentuk struktur telah dilakukan dengan memanfaatkan respons gempa berdasarkan metode *Time History*. Hasil dari analisis

tersebut dipaparkan pada bagian berikut untuk mengidentifikasi ketidakberaturan yang muncul akibat pengaruh gempa terhadap struktur.

1. Ketidakberaturan Horizontal Torsi (Tipe 1a) dan Ketidakberaturan Torsi Berlebihan (Tipe 1b)

Hasil analisis numerik menggunakan perangkat lunak ETABS menunjukkan bahwa nilai Δ_{\max} diperoleh dari simpangan maksimum pada dua titik ujung lokasi pengambilan data. Sementara itu, nilai Δ_{avg} ditentukan sebagai rata-rata simpangan pada kedua titik tersebut. Evaluasi terhadap potensi ketidakberaturan dilakukan pada setiap lantai struktur, dengan contoh perhitungan ditunjukkan pada lantai atap arah X untuk model gedung persegi akibat beban gempa *Time History*.

$$\Delta_{\max} = 6,140 \text{ mm}$$

$$\Delta_{\text{avg}} = 6,136 \text{ mm}$$

$$\begin{aligned} \frac{\Delta_{\max}}{\Delta_{\text{avg}}} &= \frac{\Delta_{\max}}{\Delta_{\text{avg}}} \\ &= \frac{6,140}{6,136} \\ &= 1,001 \end{aligned}$$

$$\text{Cek} = 1,001 < 1,2 \text{ (Regular)}, < 1,4 \text{ (Regular)}$$

Berdasarkan hasil evaluasi pada lantai atap, diperoleh nilai rasio sebesar 1,001 yang berada dalam rentang $1,0 < 1,2 < 1,4$. Hal ini mengindikasikan bahwa pada lantai atap tidak teridentifikasi adanya ketidakberaturan torsi maupun ketidakberaturan torsi berlebih. Rekapitulasi hasil evaluasi torsi pada ketidakberaturan arah X dan Y untuk masing-masing model struktur akibat beban gempa *Time History* disajikan pada Tabel 5.7 berikut. Rincian lengkap mengenai nilai-nilai ketidakberaturan horizontal tipe 1a dan 1b beban gempa *Time History* dapat dilihat pada lampiran 2.b hingga lampiran 2.d.

**Tabel 5.7 Rekapitulasi Ketidakberaturan Horizontal Tipe 1a dan 1b
Beban Gempa *Time History***

Lantai	Status Ketidakberaturan Horizontal 1a dan 1b					
	Persegi		T		L	
	Arah X	Arah Y	Arah X	Arah Y	Arah X	Arah Y
14	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>
13	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>
12	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>
11	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>
10	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>
9	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>
8	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>
7	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>
6	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>
5	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>
4	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>
3	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>
2	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>
1	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>

Berdasarkan hasil evaluasi ketidakberaturan horizontal menggunakan pendekatan *Time History Analysis*, dapat disimpulkan bahwa seluruh model bangunan yang dianalisis tidak menunjukkan adanya ketidakberaturan horizontal. Dengan demikian, respons dinamik struktur pada masing-masing konfigurasi denah memenuhi kriteria keteraturan horizontal, baik pada arah X maupun arah Y, sehingga tidak teridentifikasi potensi perilaku torsi yang signifikan akibat eksentrisitas massa maupun kekakuan selama pembebanan gempa.

2. Ketidakberaturan Vertikal

a. Ketidakberaturan Kekakuan Tingkat Lunak (Tipe 1a) dan Ketidakberaturan Kekakuan Tingkat Lunak Berlebih (Tipe 1b)

Sebagai ilustrasi, perhitungan kekakuan lateral pada arah X gedung persegi dengan mempertimbangkan pengaruh beban gempa berdasarkan analisis respons riwayat waktu, sebagaimana dijelaskan pada uraian berikut.

Ketidakteraturan Kekakuan Tingkat Lunak

Kekakuan lateral tingkat di atasnya

$$\begin{aligned}
\text{Kekakuan lantai atap} &= 236847,726 \text{ kN/m} \\
\text{Kekakuan lantai 12} &= 318921,340 \text{ kN/m} \\
\text{Cek} &= 70\% \times \text{Kekakuan lantai atap} \\
&= 70\% \times 236847,726 \text{ kN/m} \\
&= 165793,408 \text{ kN/m} \\
&= 318921,340 \text{ kN/m} \geq 165793,408 \text{ kN/m (Regular)}
\end{aligned}$$

Kekakuan lateral rerata tiga tingkat di atasnya

$$\begin{aligned}
\text{Kekakuan lantai atap} &= 236847,726 \text{ kN/m} \\
\text{Kekakuan lantai 13} &= 318921,340 \text{ kN/m} \\
\text{Kekakuan lantai 12} &= 322274,640 \text{ kN/m} \\
\text{Cek} &= 80\% \text{ Rata-rata 3 tingkat} \\
&= 80\% \times \frac{\text{Kekakuan atap} + \text{Kekakuan lantai 13} + \text{Kekakuan lantai 12}}{3} \\
&= 80\% \times \frac{236847,726 + 318921,340 + 322274,640}{3} \\
&= 312452,559 \text{ kN/m} \geq 204876,865 \text{ kN/m (Regular)}
\end{aligned}$$

Ketidakteraturan Kekakuan Tingkat Lunak Berlebih

Kekakuan lateral tingkat di atasnya

$$\begin{aligned}
\text{Kekakuan lantai atap} &= 236847,726 \text{ kN/m} \\
\text{Kekakuan lantai 13} &= 318921,340 \text{ kN/m} \\
\text{Cek} &= 60\% \times \text{Kekakuan lantai atap} \\
&= 60\% \times 236847,726 \text{ kN/m} \\
&= 142108,6356 \text{ kN/m} \\
&= 318921,340 \text{ kN/m} \geq 142108,635 \text{ kN/m (Regular)}
\end{aligned}$$

Kekakuan lateral rerata tiga tingkat di atasnya

$$\begin{aligned}
\text{Kekakuan lantai atap} &= 236847,726 \text{ kN/m} \\
\text{Kekakuan lantai 13} &= 318921,340 \text{ kN/m} \\
\text{Kekakuan lantai 12} &= 322274,640 \text{ kN/m} \\
\text{Cek} &= 70\% \text{ Rata-rata 3 tingkat} \\
&= 70\% \times \frac{\text{Kekakuan atap} + \text{Kekakuan lantai 13} + \text{Kekakuan lantai 12}}{3} \\
&= 70\% \times \frac{236847,726 + 318921,340 + 322274,640}{3} \\
&= 312452,559 \text{ kN/m} \geq 204876,864 \text{ kN/m (Regular)}
\end{aligned}$$

Rekapitulasi hasil pengecekan ketidakberaturan vertikal Tipe 1a dan 1b setiap model struktur dengan beban gempa *Time History* disajikan dalam Tabel 5.8 berikut, sementara itu, rincian lengkap mengenai nilai-nilai ketidakberaturan horizontal tipe 1a dan 1b beban gempa *Time History* dapat dilihat pada lampiran 2.e hingga lampiran 2.g.

Tabel 5.8 Rekapitulasi Ketidakberaturan Vertikal Tipe 1a dan 1b Beban Gempa *Time History*

Lantai	Status Ketidakberaturan Vertikal 1a dan 1b					
	Persegi		T		L	
	Arah X	Arah Y	Arah X	Arah Y	Arah X	Arah Y
14	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>
13	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>
12	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>
11	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>
10	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>
9	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>
8	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>
7	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>
6	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>
5	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>
4	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>
3	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>
2	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>
1	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>

Hasil analisis ketidakberaturan vertikal tipe 1a dan 1b pada semua tipe konfigurasi bentuk denah gedung tidak terdeteksi ketidakberaturan.

b. Ketidakberaturan Tingkat Lemah (Tipe 5a) dan Ketidakberaturan Tingkat Lemah Berlebihan (Tipe 5b)

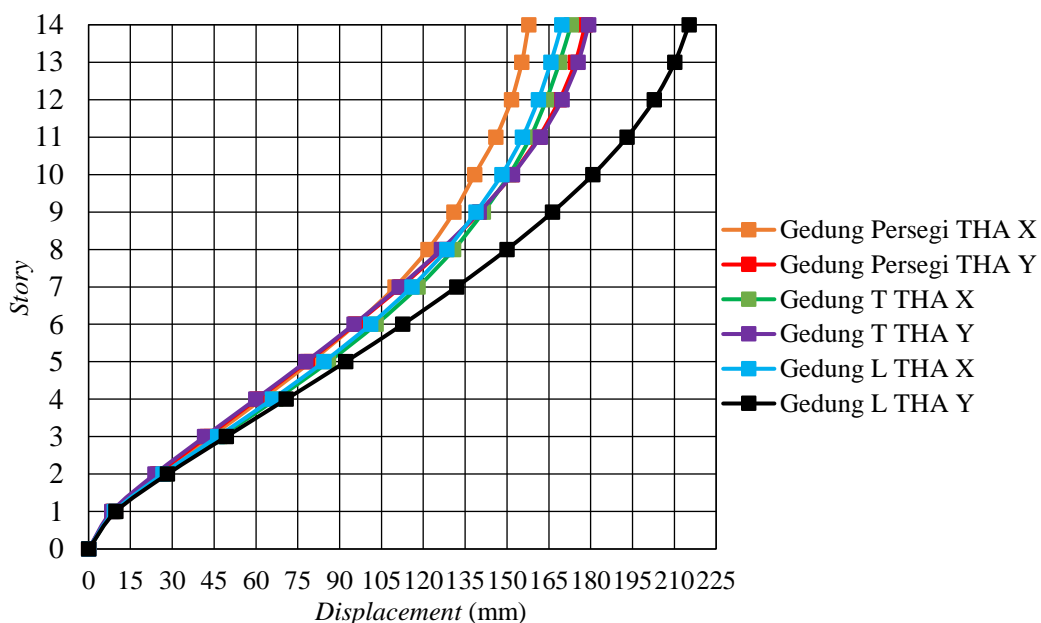
Rekapitulasi hasil perhitungan terkait pengecekan ketidakberaturan tingkat lemah akibat diskontinuitas pada kekuatan lateral tingkat (Tipe 5a) serta ketidakberaturan tingkat lemah berlebihan akibat diskontinuitas pada kekuatan lateral tingkat (Tipe 5b) menggunakan beban gempa *time history* disajikan dalam Tabel 5.9 berikut ini. Rincian lengkap mengenai nilai-nilai ketidakberaturan horizontal tipe 1a dan 1b beban gempa *Time History* dapat dilihat pada lampiran 2.h hingga lampiran 2.j.

**Tabel 5.9 Rekapitulasi Ketidakberaturan Vertikal Tipe 5a dan 5b
Beban Gempa *Time History***

Lantai	Status Ketidakberaturan Vertikal 5a dan 5b					
	Persegi		T		L	
	Arah X	Arah Y	Arah X	Arah Y	Arah X	Arah Y
14	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>
13	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>
12	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>
11	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>
10	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>
9	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>
8	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>
7	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>
6	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>
5	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>
4	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>
3	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>
2	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>
1	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>

5.4.2.3 Perpindahan (*displacement*)

Berdasarkan hasil pemodelan dan analisis numerik yang dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak ETABS, respons dinamis struktur terhadap beban gempa *Time History* telah diperoleh dalam bentuk nilai perpindahan (*displacement*) yang disajikan pada Gambar 5.22 di bawah ini. Adapun uraian dari nilai-nilai perpindahan akibat beban *Time History* dapat dilihat lebih lanjut pada bagian lampiran 2.k.



Gambar 5.22 Grafik Perpindahan Beban Gempa *Time History*

Berdasarkan hasil analisis perpindahan struktur menggunakan pendekatan *Time History Analysis*, diperoleh bahwa bangunan dengan denah persegi mengalami perpindahan maksimum sebesar 157,779 mm pada arah X dan 178,127 mm pada arah Y. Pada bangunan berbentuk T, nilai perpindahan maksimum tercatat sebesar 178,127 mm pada arah X dan 179,332 mm pada arah Y. Sementara itu, bangunan dengan denah berbentuk L menunjukkan perpindahan maksimum sebesar 169,662 mm pada arah X dan 215,295 mm pada arah Y.

Hasil ini menunjukkan adanya variasi respons perpindahan antar konfigurasi denah bangunan dan arah pembebanan gempa, yang mencerminkan pengaruh karakteristik dinamik struktur serta komponen rekaman gempa yang digunakan dalam analisis terhadap besarnya deformasi lateral yang terjadi.

5.4.2.4 Simpangan Antar Tingkat (*Story drift*)

Contoh perhitungan simpangan antar tingkat (*Story drift*) untuk gedung berbentuk persegi akibat beban gempa berdasarkan analisis riwayat waktu (*Time History*) dilakukan dengan mengacu pada Persamaan 3.36. Nilai perpindahan yang digunakan dalam perhitungan tersebut diperoleh dari hasil analisis numerik menggunakan perangkat lunak ETABS adalah sebagai berikut.

$$\delta_{ex \text{ Atap}} = 215,969 \text{ mm}$$

$$\delta_{ex \text{ Lantai 13}} = 212,504 \text{ mm}$$

Perhitungan *elastic drift*

$$h_{sx} = 4000 \text{ mm}$$

$$\begin{aligned} \delta_{ex \text{ Atap}} &= \delta_{ex \text{ Atap}} - \delta_{ex \text{ Lantai 20}} \\ &= 215,969 \text{ mm} - 212,504 \text{ mm} \\ &= 3,465 \text{ mm} \end{aligned}$$

Perhitungan *inelastic drift*

$$\Delta_X = \frac{\delta_{ex \text{ Atap}} \times C_d}{I_e}$$

$$\Delta_X = \frac{3,465 \times 5,5}{1,5}$$

$$\Delta_X = 12,706 \text{ mm}$$

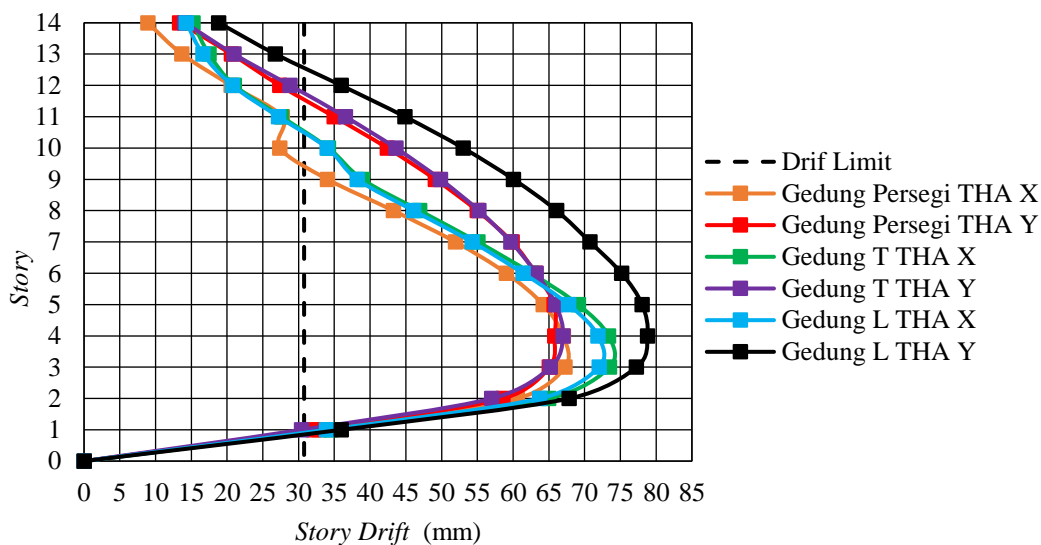
$$\Delta_a = 0,01 \text{ h}$$

$$\begin{aligned} \text{Simpangan } \textit{inelastic} \text{ Izin} &= \frac{\Delta_a}{\rho} \\ &= \frac{0,01 \times 4000}{1,3} \end{aligned}$$

$$= 30.769 \text{ mm}$$

$$\text{Cek} = 12,706 \text{ mm} < 30.769 \text{ mm (Oke)}$$

Rekapitulasi hasil evaluasi simpangan antar tingkat (*Story drift*) akibat gempa berdasarkan analisis riwayat waktu (*Time History*) telah dilakukan untuk masing-masing tipe struktur bangunan. Nilai-nilai *Story drift* yang diperoleh disajikan secara sistematis pada Gambar 5.23 berikut ini. Sementara itu, untuk uraian dari nilai-nilai *drift* akibat beban *Time History* dapat dilihat lebih lanjut pada bagian lampiran 2.1 hingga lampiran 2.n.



Gambar 5.23 Grafik *Story Drift* Beban Gempa *Time History*

Berdasarkan hasil analisis simpangan antar tingkat (*story drift*) dengan menggunakan pendekatan *Time History Analysis*, diperoleh bahwa bangunan dengan denah persegi memiliki simpangan antar tingkat maksimum sebesar 67,258 mm pada arah X dan 65,807 mm pada arah Y. Pada bangunan berbentuk T, nilai simpangan antar tingkat maksimum tercatat sebesar 73,496 mm pada arah X dan 66,972 mm pada arah Y. Sementara itu, bangunan dengan denah berbentuk L menunjukkan simpangan antar tingkat maksimum sebesar 77,968 mm pada arah X dan 77,286 mm pada arah Y.

Hasil tersebut mencerminkan perbedaan respons deformasi lateral antar konfigurasi denah bangunan, yang dipengaruhi oleh karakteristik kekakuan, distribusi massa, serta respons dinamik struktur terhadap riwayat percepatan gempa yang digunakan dalam analisis.

5.5 Perbandingan Hasil Analisis Respons Spektrum dan *Time History*

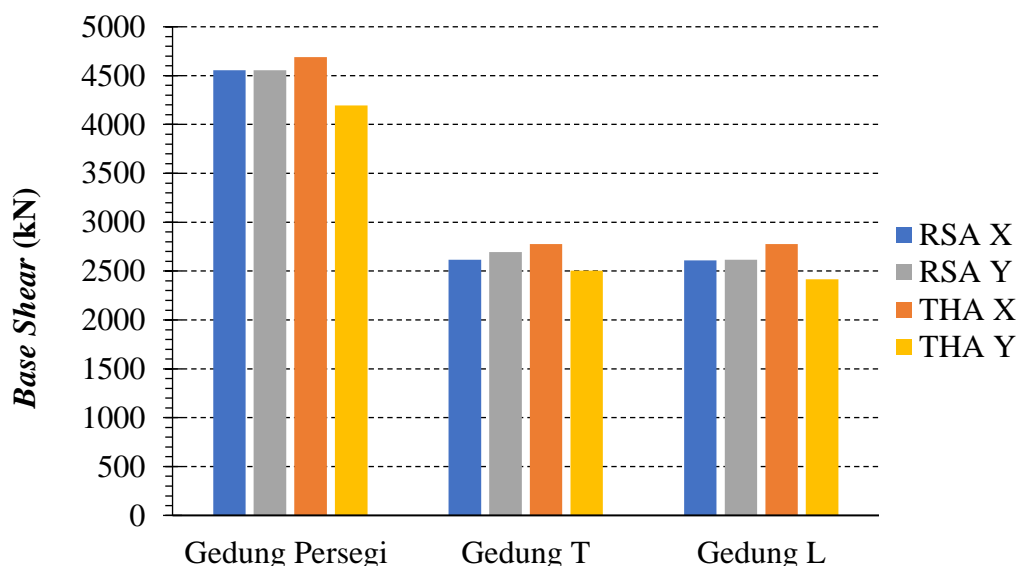
Pada subbab ini akan dibahas pengaruh variasi bentuk denah gedung yaitu bentuk Persegi T dan L apabila dianalisis menggunakan metode respons spektrum dan *Time History*.

5.5.1 Pengaruh Bentuk Denah Terhadap Respons Gedung

Subbab ini membahas pengaruh variasi bentuk denah gedung terhadap respons struktur, melalui pendekatan analisis perbandingan antara metode Respons Spektrum dan *Time History*. Perbandingan kedua metode ini bertujuan untuk mengidentifikasi perbedaan karakteristik respons dinamik yang ditimbulkan oleh masing-masing bentuk geometri, sehingga diperoleh pemahaman yang lebih mendalam terhadap respons seismik struktur.

1. Gaya Geser Dasar

Nilai perbandingan *Base Shear* pada gedung Persegi T dan L dengan metode RSA dan THA dapat dilihat pada Gambar 5.24 di bawah ini.



Gambar 5.24 Diagram Batang Perbandingan Nilai Gaya Geser Dasar Beban Gempa Respons Spektrum dan *Time History*

Berdasarkan grafik perbandingan gaya geser dasar yang diperoleh dari analisis *Response Spectrum Analysis* (RSA) dan *Time History Analysis* (THA), dapat diamati bahwa pada metode RSA tidak terdapat perbedaan yang signifikan antara respons pada arah X dan arah Y. Rata-rata selisih gaya geser dasar yang dihasilkan relatif kecil, yakni sekitar 0,872%, yang menunjukkan bahwa respons struktur terhadap spektrum rencana bersifat lebih seimbang pada kedua arah utama.

Sebaliknya, hasil analisis THA menunjukkan perbedaan gaya geser dasar yang cukup mencolok antara arah X dan arah Y, dengan nilai pada arah X secara konsisten lebih besar dan selisih rata-rata mencapai sekitar 11,040%. Perbedaan ini dipengaruhi oleh karakteristik input gempa yang digunakan dalam analisis *time history*, di mana komponen percepatan pada arah X memiliki intensitas yang lebih dominan dibandingkan arah Y, sebagaimana tercermin pada rekaman gempa Imperial Valley-06 komponen X. Selain itu, respons yang lebih besar pada analisis *time history* juga dapat dipicu oleh fenomena resonansi, khususnya ketika periode alami struktur mendekati periode dominan dari rekaman gempa. Kondisi tersebut berpotensi meningkatkan respons dinamik struktur secara signifikan, yang pada kasus tertentu dapat memperbesar tingkat kerusakan, sebagaimana dikemukakan oleh Lang dkk. (2011), bahwa terjadinya resonansi struktur dapat menyebabkan kerusakan yang lebih serius, baik secara parsial maupun menyeluruh.

2. Ketidakberaturan

Perbandingan ketidakberaturan horizontal dan vertikal pada semua model struktur akibat beban gempa berdasarkan metode respons spektrum dan *Time History* dapat dilihat pada uraian dibawah ini.

a. Ketidakberaturan Horizontal Torsi (Tipe 1a) dan Ketidakberaturan Torsi Berlebihan (Tipe 1b)

Perbandingan ketidakberaturan torsi 1a dan 1b RSA dan THA pada gedung dengan bentuk Persegi T dan L dapat dilihat pada Tabel 5.10 berikut ini.

Tabel 5.10 Perbandingan Ketidakberaturan Horizontal 1a dan 1b Respons Beban Gempa Respons Spektrum dan *Time History*

Bentuk	Perbandingan Ketidakberaturan Horizontal 1a dan 1b			
	RSA		THA	
	Arah X	Arah Y	Arah X	Arah Y
Persegi	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>
T	H.1a	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>
L	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>

Ketidakteraturan horizontal hanya teridentifikasi pada pembebanan gempa menggunakan metode *Response Spectrum Analysis* (RSA), khususnya pada model gedung dengan konfigurasi denah berbentuk T pada arah X. Sebaliknya, pada model gedung dengan denah persegi dan berbentuk L, hasil analisis menunjukkan bahwa baik pembebanan gempa RSA maupun *Time History Analysis* (THA) pada arah X dan Y tidak menimbulkan indikasi ketidakberaturan horizontal.

b. Ketidakteraturan Vertikal

- 1) Ketidakteraturan Kekakuan Tingkat Lunak (Tipe 1a) dan Ketidakteraturan Kekakuan Tingkat Lunak Berlebih (Tipe 1b)

Ketidakteraturan Kekakuan Tingkat Lunak 1a dan 1b RSA dan THA dapat dilihat pada Tabel 5.11 berikut ini.

Tabel 5.11 Perbandingan Ketidakteraturan Vertikal 1a dan 1b Beban Gempa Respons Spektrum dan *Time History*

Bentuk	Perbandingan Ketidakteraturan Vertikal 1a dan 1b			
	RSA		THA	
	Arah X	Arah Y	Arah X	Arah Y
Persegi	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>
T	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>
L	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>

Hasil evaluasi ketidakberaturan vertikal tipe 1a dan 1b pada gedung dengan denah persegi, T, dan L menunjukkan respons yang konsisten pada arah X maupun Y untuk pembebanan gempa menggunakan metode *Response Spectrum Analysis* (RSA) dan *Time History Analysis* (THA). Berdasarkan kriteria yang ditetapkan, seluruh model struktur diklasifikasikan sebagai “*regular*”, tanpa ditemukan perbedaan klasifikasi ketidakberaturan vertikal antara kedua metode analisis yang digunakan.

- 2) Ketidakteraturan Tingkat Lemah (Tipe 5a) dan Ketidakteraturan Tingkat Lemah Berlebihan (Tipe 5b)

Rekapitulasi perbandingan Ketidakberaturan Tingkat Lemah 5a dan 5b RSA dan THA dapat dilihat pada Tabel 5.12 berikut ini.

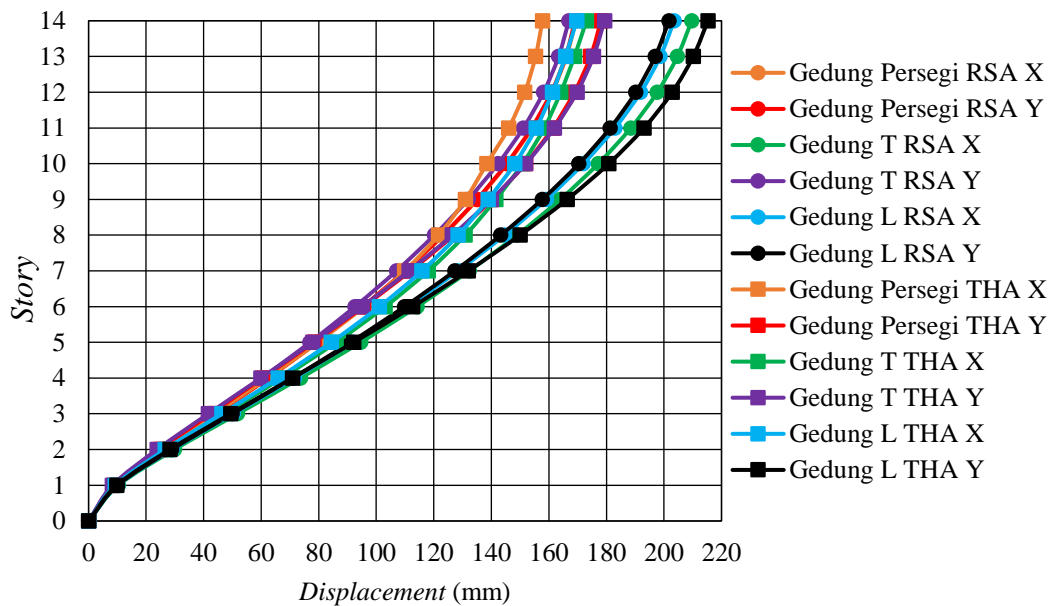
**Tabel 5.12 Perbandingan Ketidakberaturan Vertikal 5a dan 5b
Beban Gempa Respons Spektrum dan *Time History***

Bentuk	Perbandingan Ketidakberaturan vertikal 5a dan 5b			
	RSA		THA	
	Arah X	Arah Y	Arah X	Arah Y
Persegi	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>
T	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>
L	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>	<i>Regular</i>

Berdasarkan hasil perbandingan yang dilakukan, dapat disimpulkan bahwa pada gedung dengan denah persegi, T, dan L yang dianalisis menggunakan beban gempa RSA maupun THA tidak teridentifikasi adanya ketidakberaturan vertikal tipe 5a dan 5b, baik pada arah X maupun arah Y. Hal ini menunjukkan bahwa perilaku struktur pada seluruh model tetap memenuhi kriteria keteraturan vertikal sesuai ketentuan yang berlaku, terlepas dari metode analisis gempa yang digunakan.

3. Perpindahan

Perbandingan perpindahan (*displacement*) RSA dan THA dapat dilihat pada Gambar 5.25 berikut.

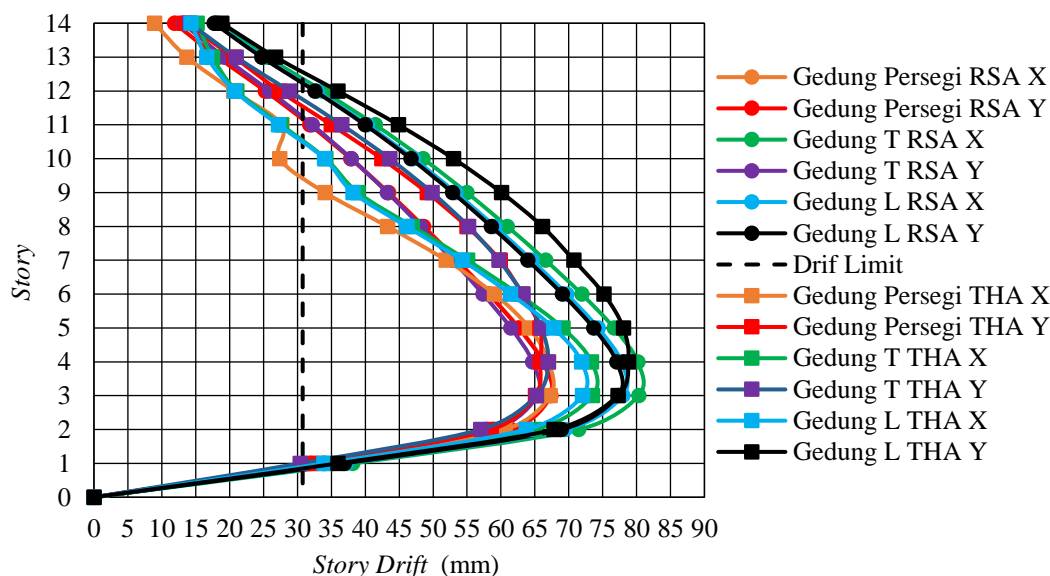


ambar 5. 25 Grafik Perbandingan Perpindahan Beban Gempa Respons Spektrum dan *Time History*

Berdasarkan hasil analisis komparatif, respons perpindahan yang dihasilkan oleh metode RSA dan THA menunjukkan perbedaan yang bergantung pada arah pembebanan. Pada arah X, perpindahan hasil RSA secara umum lebih besar dibandingkan dengan THA, sedangkan pada arah Y diperoleh kecenderungan sebaliknya, di mana nilai perpindahan hasil THA lebih dominan. Pola respons tersebut teramati secara konsisten pada seluruh model gedung dengan denah persegi, T, dan L, dengan rata-rata perbedaan sebesar 14,085% pada arah X, di mana RSA memberikan nilai yang lebih besar, serta 6,503% pada arah Y, di mana THA menghasilkan perpindahan yang lebih tinggi.

4. Simpangan antar Tingkat

Perbandingan simpangan antar tingkat RSA dan dapat dilihat pada Gambar 5.26 berikut.



Gambar 5.26 Grafik Perbandingan Simpangan antar Tingkat Beban Gempa Respons Spektrum dan *Time History*

Sejalan dengan hasil analisis perpindahan, perbandingan simpangan antar tingkat yang diperoleh dari metode RSA dan THA juga menunjukkan kecenderungan yang tidak selalu konsisten dalam hal dominasi respons. Pada arah X, metode RSA menghasilkan simpangan antar tingkat yang relatif lebih besar dengan nilai rata-rata sebesar 75,220 mm, sedangkan pada arah Y diperoleh nilai rata-rata sebesar 69,973 mm untuk ketiga model gedung yang dianalisis. Sementara itu, hasil analisis *time history* menunjukkan bahwa simpangan antar tingkat rata-rata pada arah X sebesar 70,925 mm dan pada arah Y sebesar 70,528 mm. Perbedaan ini mengindikasikan bahwa selisih respons antara arah X dan Y pada RSA mencapai 6,975%, sedangkan pada THA perbedaan tersebut lebih kecil, yakni sebesar 0,560%. Temuan ini menguatkan pernyataan Arias dan Jaramillo (2019) serta Bayyinah (2017) yang menyebutkan bahwa metode RSA cenderung memberikan hasil yang lebih konservatif karena didasarkan pada spektrum respons desain yang telah mengalami proses penyederhanaan.

BAB VI

KESIMPULAN DAN SARAN

6.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisis yang dilakukan dengan menerapkan metode *Response Spectrum Analysis* (RSA) dan *Time History Analysis* (THA) pada gedung dengan bentuk Persegi T dan L, dapat ditarik beberapa kesimpulan utama terkait perilaku respons struktur terhadap beban gempa yang dapat dilihat di bawah ini.

1. Analisis menggunakan *Response Spectrum Analysis* (RSA), cenderung menunjukkan perilaku yang lebih konservatif. Dimana, Rata-rata perbedaan gaya geser dasar yang diperoleh tergolong sangat kecil, yaitu sekitar 0,872%, yang mengindikasikan bahwa respons struktur terhadap spektrum rencana menunjukkan perilaku yang relatif seimbang pada kedua arah utama. Ketidakberaturan horizontal tipe 1a dan 1b hanya teridentifikasi pada gedung dengan denah berbentuk T pada arah X, sedangkan untuk ketidakberaturan vertikal seluruh model bangunan masih dapat dikategorikan sebagai struktur *regular*. Respons perpindahan struktur cenderung lebih dominan pada arah X dengan nilai rerata sebesar 194,175 mm, sementara pada arah Y diperoleh rerata *displacement* sebesar 179,262 mm, sehingga selisih keduanya mencapai 7,680%. Pola serupa juga ditunjukkan oleh respons *drift* antar lantai, di mana terdapat perbedaan sebesar 6,975% antara arah X dan arah Y, dengan nilai *drift* masing-masing sebesar 75,220 mm pada arah X dan 69,973 mm pada arah Y.
2. Hasil *Time History Analysis* (THA) mengindikasikan bahwa respons struktur lebih dipengaruhi oleh arah pembebanan serta karakteristik *input* gempa. Hal ini tercermin dari perbedaan gaya geser dasar antara arah X dan Y yang relatif signifikan, dengan rata-rata selisih sebesar 11,040%, di mana respons pada arah X cenderung lebih besar. Evaluasi terhadap ketidakberaturan struktur menunjukkan bahwa baik ketidakberaturan horizontal maupun vertikal tidak teridentifikasi pada seluruh tipe gedung yang dianalisis, sehingga struktur masih dapat dikategorikan sebagai bangunan berperilaku *regular*. Dari sisi simpangan,

respons *displacement* lebih dominan terjadi pada arah Y dengan nilai rata-rata masing-masing sebesar 190,918 mm dan 166,825 mm, yang menunjukkan selisih sekitar 14,442%. Namun demikian, perbedaan respons *story drift* antara arah X dan Y relatif kecil, dengan selisih hanya sebesar 0,560%, di mana nilai *story drift* maksimum pada arah X tercatat sebesar 70,925 mm dan pada arah Y sebesar 70,528 mm.

6.2 Saran

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, penulis menyarankan beberapa hal yang dapat menjadi pertimbangan untuk pengembangan penelitian sejenis di masa mendatang, antara lain:

3. Diperlukan pemahaman yang komprehensif mengenai konsep dasar serta parameter-parameter yang memengaruhi analisis *Time History*, mengingat kompleksitas metode tersebut dalam menggambarkan respons dinamis gedung terhadap gempa.
4. Penguasaan perangkat lunak analisis gedung seperti ETABS perlu ditingkatkan, khususnya dalam aspek pemodelan dinamis, agar proses simulasi dapat dilakukan secara tepat dan efisien.
5. Disarankan adanya kajian lanjutan yang lebih mendalam seperti pengaruh variasi dimensi elemen gedung, detail penulangan, serta mutu material terhadap kinerja gedung dalam kerangka *performance-based design*.
6. Ketersediaan data masukan yang lebih rinci dan akurat, baik dalam hal karakteristik gedung maupun parameter beban gempa, sangat diperlukan untuk meningkatkan validitas hasil analisis.

DAFTAR PUSTAKA

- Arias, H and Jaramillo, J.D. 2019. *Base Shear Determination Using Response-Spectrum Modal Analysis of Multi-Degree-of-Freedom Systems With Soil–Structure Interaction. Bulletin of Earthquake Engineering. Volume 17, pages 2801-3814.* Colombia.
- Bayyinah, D.A.L.N dan Faimun. 2017. Studi Perbandingan Analisis Respon Spektra dan *Time History* untuk Desain Gedung. *Jurnal Teknik ITS*. Vol. 6, No.1. Surabaya.
- Budi Wibowo, N., Juwita Nur Sembri BMKG Stasiun Geofisika Yogyakarta JIWates Km, dan, & Balecatur Gamping Sleman Yogyakarta, J. DI. 2017. Analisis Seismisitas dan Energi Gempabumi di Kawasan Jalur Sesar Opak-Oyo Yogyakarta. Dalam *Indonesian Journal of Applied Physics*. Vol. 7, No. 2. Yogyakarta.
- Dwi Pangestu, K., Cornelis, R., & Hangge, E. E. 2021. Analisis Kinerja Struktur Pada Model Bangunan Setback Menggunakan Metode *Time History Analysis* Analysis Structural Performance of the Setback Building Model Using *Time History Analysis Method*. *Jurnal Forum Teknik Sipil*, Vol. 1, No.2:1–12. Kupang.
- Faizah, Restu. 2015. Studi Perbandingan Pembebanan Gempa Statik Ekuivalen dan Dinamik *Time History* pada Gedung Bertingkat di Yogyakarta. *Jurnal Ilmiah Semesta Teknika*. Vol. 18, No. 2:190-199. Yogyakarta.
- Federal Emergency Management Agency (FEMA), 2015, FEMA 154: *Rapid Visual Screening of Buildings for Potential Seismic Hazards a Handbook*. Applied Technology Council. The United States.
- Haque, M., Ray, S., Chakraborty, A., Elias, M., & Alam, I. (2016). Seismic Performance Analysis of RCC Multi-Storied Buildings with Plan Irregularity. *American Journal of Civil Engineering*, 4(3), 68–73. <https://doi.org/10.11648/j.ajce.20160403.11>.
- Hutahean, N., Napitupulu, J., dan Ndaru, S. 2020. Analisis Dinamis Gaya Gempa Pada Bangunan Berdasarkan SNI 03-1726 2012. *Jurnal Ilmiah Teknik Sipil*. Vol. 9, No. 2 Hal 91-100. Medan.
- Hutchings, S. J., & Mooney, W. D. (2021). *The Seismicity of Indonesia and Tectonic Implications. Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 22(9). <https://doi.org/10.1029/2021GC009812>.

- J, R. T. M., & G, C. (2024). A Comparative Study on Seismic Behaviour of Plan Irregular Buildings. *International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology*, 12(10), 1061–1071. <https://doi.org/10.22214/ijraset.2024.64804>
- Karunia, R., Baehaki, dan Fathonah, W. 2020. Pengaruh Variasi Model Ketidakberaturan Vertikal pada Gedung Bertingkat Tinggi terhadap Respons Seismik dengan Analisis Spektrum. *Jurnal Fondasi*. Vol. 9, No. 1, Hal 63 – 76. Banten.
- Lang, D.H., Schwarz, J., and Gulkan, P. 2011. *Site-Structure Resonance as a Proxy for Structural Damage*. *Earthquake Spectra*. Volume 27, No. 4, pages 1105–1125.
- Marasabessy, M.I., Saputra, E., dan Basarah, Y.I. 2025. *Evaluation of seismic site amplification factor in Yogyakarta using One-Dimensional site response analysis*. *Teknisia*. Vol.30,0.1. Yogyakarta.
- Milind, V.M. 2015. *Effect Of Shape And Plan Configuration On Seismic Response Of Structure*. *International Journal Of Scientific & Technology Research* .Volume 4, Issue 09.
- Muntafi, Y., Nojima, N., & Ikramullah, I. 2023. *Study of Ground Motion Models Selection to the Concrete Frame Building Damage Probability using the 2006 Yogyakarta Earthquake Scenario*. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1173(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1173/1/012016>.
- Muzli, M., Mahesworo, R. P., Madijono, R., Siswoyo, S., Pramono, S., Dewi, K. R., dan Oktavia, N., "Pengukuran Vs30 Menggunakan Metode MASW Untuk Wilayah Yogyakarta," *Jurnal Meteorologi dan Geofisika*, 17 (1), 2016.
- Nugroho, S. C. 2020. *The Easerum Epicentre Pusat Studi Gempa Bumi Di Kabupaten Bantul, D.I.Yogyakarta*. Yogyakarta.
- Nurkhusnaedi, R.A. 2025. *Perbandingan Respon Struktur Dengan Penerapan Beban Gempa Statik Ekuivalen, Respon Spektrum, Dan Time History*. Tugas Akhir. Yogyakarta.
- PEER NGA-West2. (n.d.). Pacific Earthquake Engineering Research Center Next Generation Attenuation-West2 . Retrieved December 21, 2025, from <https://ngawest2.berkeley.edu/>
- Pratiwi, G.A dan Widodo. 2017. Analisis Dan Desain Struktur Beton Bertingkat Banyak Berdasarkan Perbandingan Analisis Respons Spektrum Dan Dinamik Riwayat Waktu. *Jurnal Teknisia*. Volume 22, No. 1. Yogyakarta.

- Pusat Studi Gempa Nasional, 2017. Peta Sumber dan Bahaya Gempa Indonesia Tahun 2017. Jakarta.
- Pusat Studi Gempa Nasional. 2022. Peta Deagregasi Bahaya Gempa Indonesia untuk Perencanaan dan Evaluasi Infrastruktur Tahan Gempa. Jakarta.
- Purnama Putra, M., Isneini, M., & Noorhidana, V. A. 2021. Evaluasi Kinerja Struktur Gedung Bertingkat dengan Metode Analisis *Time History* (Studi Kasus: Apartemen Kingland Avenue Serpong). *Jurnal Rekayasa Sipil dan Desain*. Vol. 9, No. 1. Lampung.
- Rahayu, P., & Pawirodikromo, W. 2023. *Time History* Sintetik di Wilayah Bogor Ditinjau dari Deagregasi Hazard. *Jurnal Konstruksia*. Vol. 14, No. 2:93-108. Jakarta.
- Rahmantlyo, A dan Andayani, R. 2019. Analisis *Story drift* dan Kondisi Sendi Plastis Berbasis Performa pada Gedung Bertingkat dengan Konfigurasi Struktur Persegi Panjang, U, L, H, dan T. *Media Komunikasi Teknik Sipil*. Vol. 25, No. 1:38-47. Jakarta.
- Rifandi, I dan Walujodjati, E. 2020. Analisis Beban Gempa dengan Metode Statik Ekuivalen Berdasarkan SNI 1726-2019 pada Gedung IPAL (Studi Kasus Proyek Pembangunan Gedung IPAL UT-HO-Jakarta Timur). *Jurnal Konstruksi*. Vol. 18, No. 02, Hal 72-82. Garut.
- Saputra, N.E. dan Priastiwi, Y.A. 2023. *Comparative Study Of Dynamic Earthquake Analysis With Spectral Design And Time History Methods*. *Jurnal Indonesia Sosial Teknologi*. Vol. 4, No. 4:1223-1234. Semarang.
- Septian, N., Turuallo, G., Sulendra, I.K., 2022. Kinerja Portal Struktur Gedung Tahan Gempa dengan Sistem Ganda Menggunakan Metode Pushover Analysis. *REKONSTRUKSI TADULAKO: Civil Engineering Journal on Research and Development*. Vol. 3 (1), Hal 35-42. Palu.
- Sign dan Kumar. 2020. *Comparison of Base Shear with Height of building of RCC Structure*. *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*. Vol 07.
- Silaban, G.T.N., Tampubolon, A.P., dan Faestin, A.S.M. 2023. *Performance Evaluation of High-rise Buildings with Respon Spectrum Analysis and Time History Analysis*. *Jurnal Ilmu Pengetahuan dan Teknologi*. Vol. 9, No. 1, hal 84-95. Jakarta Timur.
- Standar Nasional Indonesia. 2019. *Tata Cara Perencanaan Ketahanan Gempa Untuk Struktur Bangunan Gedung dan Nongedung*. SNI 1726:2019. Badan Standarisasi Nasional. Jakarta.

- Standar Nasional Indonesia. 2019. *Persyaratan Beton Struktural Untuk Bangunan Gedung dan Penjelasan*. SNI 2847:2019. Badan Standarisasi Nasional. Jakarta
- Standar Nasional Indonesia. 2020. *Beban Desain Minimum dan Kriteria Terkait Untuk Bangunan Gedung dan Struktur Lain*. SNI 1727:2020. Badan Standarisasi Nasional. Jakarta.
- Standar Nasional Indonesia. 2020. *Tata Cara dan Modifikasi Gerak Tanah Permukaan untuk Perencanaan Gedung Tahan Gempa*. SNI 8899:2020. Badan Standarisasi Nasional. Jakarta.
- Syafara, A.A., Rahmayanti, N., dan Saputra, E. 2023. Analisis Respons Ketidakberaturan Horizontal Dan Vertikal Pada Gedung Perkuliahan Di Yogyakarta Dengan Menggunakan Sni 1726-2019. *Proceeding Civil Engineering Research Forum*. Vol. 2, No. 2. Yogyakarta.
- The Consultative Group on Indonesia. (2006). *Preliminary Damage and Loss Assessment Yogyakarta and Central Java Natural Disaster*.
- Zawawi, A.F., Sumardi, B., dan Prayoedhie, S. 2023. Penentuan Klasifikasi Tanah Dengan Menggunakan Metode Multi-channel Analysis of Surface Waves Di Kapanewon Pleret, Kabupaten Bantul. *Jurnal Stasiun Geofisika Sleman*. Vol. 1, No. 2, Hal 01-05. Sleman.

LAMPIRAN

Lampiran 1 Hasil Analisis Respons Spektrum

Lampiran 1.a Nilai Gaya Geser Dasar Beban Gempa Respons Spektrum

No	Keterangan	Base Shear (kN)	
		Arah X	Arah Y
1	Gedung Persegi	4554,223	4554,590
2	Gedung T	2615,332	2693,635
3	Gedung L	2608,759	2615,365

Lampiran 1.b Nilai Ketidakteraturan Horizontal Tipe 1a dan 1b Gedung Persegi Beban Gempa Respons Spektrum

Lantai	Arah X				Arah Y			
	Δ_{Max}	Δ_{Avg}	$\Delta_{Max}/\Delta_{Avg}$	Status	Δ_{Max}	Δ_{Avg}	$\Delta_{Max}/\Delta_{Avg}$	Status
14	5,928	5,917	1,002	Regular	5,932	5,909	1,004	Regular
13	9,062	9,046	1,002	Regular	9,069	9,035	1,004	Regular
12	12,122	12,101	1,002	Regular	12,131	12,086	1,004	Regular
11	14,661	14,635	1,002	Regular	14,672	14,617	1,004	Regular
10	16,749	16,719	1,002	Regular	16,760	16,698	1,004	Regular
9	18,496	18,463	1,002	Regular	18,507	18,438	1,004	Regular
8	20,000	19,964	1,002	Regular	20,012	19,936	1,004	Regular
7	21,377	21,338	1,002	Regular	21,388	21,308	1,004	Regular
6	22,692	22,651	1,002	Regular	22,703	22,617	1,004	Regular
5	23,919	23,876	1,002	Regular	23,931	23,841	1,004	Regular
4	24,924	24,879	1,002	Regular	24,938	24,844	1,004	Regular
3	25,174	25,129	1,002	Regular	25,189	25,096	1,004	Regular
2	22,880	22,841	1,002	Regular	22,896	22,815	1,004	Regular
1	12,617	12,597	1,002	Regular	12,627	12,585	1,003	Regular

Lampiran 1.c Ketidakteraturan Horizontal Tipe 1a dan 1b Gedung T Beban Gempa Respons Spektrum

Lantai	Arah X				Arah Y			
	Δ_{Max}	Δ_{Avg}	$\Delta_{Max}/\Delta_{Avg}$	Status	Δ_{Max}	Δ_{Avg}	$\Delta_{Max}/\Delta_{Avg}$	Status
14	8,404	6,911	1,216	H.1a	6,263	6,236	1,004	Regular
13	11,920	10,045	1,187	Regular	9,220	9,182	1,004	Regular
12	15,477	13,167	1,175	Regular	12,149	12,100	1,004	Regular
11	18,480	15,783	1,171	Regular	14,593	14,534	1,004	Regular
10	20,938	17,922	1,168	Regular	16,590	16,522	1,004	Regular
9	22,960	19,688	1,166	Regular	18,240	18,165	1,004	Regular
8	24,671	21,189	1,164	Regular	19,644	19,564	1,004	Regular
7	26,210	22,548	1,162	Regular	20,921	20,835	1,004	Regular
6	27,651	23,835	1,160	Regular	22,136	22,045	1,004	Regular
5	28,952	25,016	1,157	Regular	23,261	23,165	1,004	Regular
4	29,892	25,916	1,153	Regular	24,138	24,040	1,004	Regular
3	29,749	25,931	1,147	Regular	24,211	24,115	1,004	Regular
2	26,413	23,211	1,138	Regular	21,749	21,666	1,004	Regular
1	14,096	12,523	1,126	Regular	11,787	11,745	1,004	Regular

Lampiran 1.d Ketidakberaturan Horizontal Tipe 1a dan 1b Gedung L Beban Gempa Respons Spektrum

Lantai	Arah X				Arah Y			
	Δ_{Max}	Δ_{Avg}	$\Delta_{Max}/\Delta_{Avg}$	Status	Δ_{Max}	Δ_{Avg}	$\Delta_{Max}/\Delta_{Avg}$	Status
14	8,211	6,878	1,194	Regular	8,136	6,844	1,189	Regular
13	11,646	9,988	1,166	Regular	11,542	9,941	1,161	Regular
12	15,104	13,079	1,155	Regular	14,971	13,019	1,150	Regular
11	18,011	15,660	1,150	Regular	17,852	15,590	1,145	Regular
10	20,381	17,767	1,147	Regular	20,201	17,687	1,142	Regular
9	22,324	19,502	1,145	Regular	22,126	19,414	1,140	Regular
8	23,965	20,975	1,143	Regular	23,751	20,880	1,137	Regular
7	25,440	22,308	1,140	Regular	25,211	22,207	1,135	Regular
6	26,825	23,573	1,138	Regular	26,583	23,465	1,133	Regular
5	28,081	24,736	1,135	Regular	27,828	24,623	1,130	Regular
4	29,000	25,627	1,132	Regular	28,741	25,512	1,127	Regular
3	28,885	25,650	1,126	Regular	28,631	25,538	1,121	Regular
2	25,685	22,974	1,118	Regular	25,468	22,878	1,113	Regular
1	13,738	12,405	1,107	Regular	13,629	12,358	1,103	Regular

Lampiran 1.e Ketidakberaturan Vertikal 1a dan 1b Gedung Persegi Beban Gempa Respons Spektrum

Lantai	Kekakuan		Kekakuan tingkat di atasnya		Kekakuan rerata tiga tingkat di atasnya		Status	
	Arah X	Arah Y	Arah X	Arah Y	Arah X	Arah Y	Arah X	Arah Y
14	237564,374	237912,913	-	-	-	-		
13	323071,280	323523,852	166295,062	166539,039	-	-	Regular	Regular
12	334409,644	334899,214	226149,896	226466,696	-	-	Regular	Regular
11	333674,568	334159,513	234086,751	234429,450	208843,903	239022,928	Regular	Regular
10	332788,899	333268,176	233572,197	233911,659	264308,131	264688,688	Regular	Regular
9	332438,401	332930,372	232952,229	233287,723	266899,496	267287,174	Regular	Regular
8	332021,489	332509,240	232706,881	233051,260	266373,831	266762,150	Regular	Regular
7	332289,840	332764,042	232415,042	232756,468	265933,010	266322,077	Regular	Regular
6	333561,061	334062,493	232602,888	232934,829	265799,928	266187,641	Regular	Regular
5	335638,968	336134,181	233492,743	233843,745	266099,304	266489,540	Regular	Regular
4	340690,273	341180,418	234947,278	235293,926	267063,965	267456,191	Regular	Regular
3	356230,519	356718,369	238483,191	238826,292	269304,081	269700,558	Regular	Regular
2	409243,330	409739,965	249361,363	249702,859	275349,269	275742,125	Regular	Regular
1	755920,783	756704,926	286470,331	286817,975	294977,099	295370,334	Regular	Regular

Lampiran 1.f Ketidakberaturan Vertikal Tipe 1a dan 1b Gedung T Beban Gempa Respons Spektrum

Lantai	Kekakuan		Kekakuan tingkat di atasnya		Kekakuan rerata tiga tingkat di atasnya		Status	
	Arah X	Arah Y	Arah X	Arah Y	Arah X	Arah Y	Arah X	Arah Y
14	120949,443	132877,726	-	-	-	-		
13	172786,083	187835,896	84664,610	93014,408	-	-	Regular	Regular
12	181971,823	197273,579	120950,258	131485,127	-	-	Regular	Regular
11	182691,548	198052,621	127380,276	138091,505	110998,381	138129,920	Regular	Regular
10	182829,863	198218,751	127884,084	138636,835	143319,854	155509,892	Regular	Regular
9	183099,340	198482,009	127980,904	138753,126	145998,196	158278,654	Regular	Regular
8	183279,400	198638,740	128169,538	138937,407	146298,867	158600,902	Regular	Regular
7	183954,231	199283,710	128295,580	139047,118	146455,627	158757,200	Regular	Regular
6	185356,992	200655,668	128767,962	139498,597	146755,459	159041,189	Regular	Regular
5	187392,817	202662,478	129749,894	140458,968	147357,499	159620,831	Regular	Regular
4	191512,178	206766,302	131174,972	141863,735	148454,411	160693,828	Regular	Regular
3	202380,996	217846,701	134058,524	144736,411	150469,863	162689,186	Regular	Regular
2	236261,445	253197,489	141666,697	152492,691	155009,597	167273,462	Regular	Regular
1	446139,040	475690,345	165383,012	177238,242	168041,232	180749,465	Regular	Regular

Lampiran 1.g Ketidakberaturan Vertikal Tipe 1a dan 1b Gedung L Beban Gempa Respons Spektrum

Lantai	Kekakuan		Kekakuan tingkat di atasnya		Kekakuan rerata tiga tingkat di atasnya		Status	
	Arah X	Arah Y	Arah X	Arah Y	Arah X	Arah Y	Arah X	Arah Y
Atap	121767,738	122290,079	-	-	-	-		
13	174059,742	174805,402	85237,416	85603,055	-	-	Regular	Regular
12	183430,790	184235,172	121841,819	122363,781	-	-	Regular	Regular
11	184285,128	185100,455	128401,553	128964,620	111826,929	128354,841	Regular	Regular
10	184510,137	185345,463	128999,589	129570,319	144473,509	145104,274	Regular	Regular
9	184864,922	185707,814	129157,096	129741,824	147260,281	147914,957	Regular	Regular
8	185111,805	185961,130	129405,445	129995,470	147642,716	148307,662	Regular	Regular
7	185856,025	186709,339	129578,263	130172,791	147863,163	148537,175	Regular	Regular
6	187321,253	188193,041	130099,217	130696,538	148222,067	148900,876	Regular	Regular
5	189417,323	190300,845	131124,877	131735,128	148877,089	149563,603	Regular	Regular
4	193591,095	194481,334	132592,126	133210,591	150025,227	150720,860	Regular	Regular
3	204547,715	205458,509	135513,767	136136,934	152087,912	152793,392	Regular	Regular
2	238679,956	239687,071	143183,401	143820,956	156681,636	157397,517	Regular	Regular
1	450381,983	452095,598	167075,969	167780,949	169818,338	170567,177	Regular	Regular

Lampiran 1.h Nilai Ketidakberaturan Vertikal 5a dan 5b Gedung Persegi Beban Gempa Respons Spektrum

Lantai	Kekuatan		80% Kekuatan Lateral		65% Kekuatan Lateral		Status	
	Arah X	Arah Y	Arah X	Arah Y	Arah X	Arah Y	Arah X	Arah Y
14	1405,668	1405,827	1124,535	913,788	913,788	913,788	-	-
13	2922,503	2923,038	2338,002	1899,975	1899,975	1899,975	Regular	Regular
12	4046,691	4047,592	3237,353	2630,935	2630,935	2630,935	Regular	Regular
11	4883,327	4884,410	3906,662	3174,866	3174,866	3174,866	Regular	Regular
10	4883,327	4884,410	3906,662	3174,866	3174,866	3174,866	Regular	Regular
9	5563,898	5564,912	4451,118	3617,193	3617,193	3617,193	Regular	Regular
8	6137,810	6138,570	4910,248	3990,071	3990,071	3990,071	Regular	Regular
7	6628,477	6628,904	5302,782	4308,788	4308,788	4308,788	Regular	Regular
6	7090,401	7090,536	5672,320	4608,849	4608,849	4608,849	Regular	Regular
5	7555,492	7555,491	6044,393	4911,069	4911,069	4911,069	Regular	Regular
4	8013,716	8013,775	6410,973	5208,954	5208,954	5208,954	Regular	Regular
3	8476,033	8476,286	6780,827	5509,586	5509,586	5509,586	Regular	Regular
2	8951,717	8952,204	7161,373	5818,933	5818,933	5818,933	Regular	Regular
1	9347,527	9348,217	7478,022	6076,341	6076,341	6076,341	Regular	Regular

Lampiran 1.i Ketidakberaturan Vertikal Tipe 5a dan 5b Gedung Persegi T Beban Gempa Respons Spektrum

Lantai	Kekuatan		80% Kekuatan Lateral		65% Kekuatan Lateral		Status	
	Arah X	Arah Y	Arah X	Arah Y	Arah X	Arah Y	Arah X	Arah Y
14	835,882	828,626	668,705	538,607	538,607	538,607	-	-
13	1735,636	1724,709	1388,509	1121,061	1121,061	1121,061	Regular	Regular
12	2396,023	2387,010	1916,818	1551,557	1551,557	1551,557	Regular	Regular
11	2883,421	2878,497	2306,737	1871,023	1871,023	1871,023	Regular	Regular
10	2883,421	2878,497	2306,737	1871,023	1871,023	1871,023	Regular	Regular
9	3276,677	3274,970	2621,341	2128,731	2128,731	2128,731	Regular	Regular
8	3604,860	3605,426	2883,888	2343,527	2343,527	2343,527	Regular	Regular
7	3883,507	3886,168	3106,806	2526,009	2526,009	2526,009	Regular	Regular
6	4147,800	4152,076	3318,240	2698,849	2698,849	2698,849	Regular	Regular
5	4417,984	4423,454	3534,387	2875,245	2875,245	2875,245	Regular	Regular
4	4687,819	4694,676	3750,255	3051,540	3051,540	3051,540	Regular	Regular
3	4963,230	4970,662	3970,584	3230,930	3230,930	3230,930	Regular	Regular
2	5247,942	5253,373	4198,353	3414,693	3414,693	3414,693	Regular	Regular
1	5483,864	5485,777	4387,092	3565,755	3565,755	3565,755	Regular	Regular

Lampiran 1.j Ketidakberaturan Vertikal Tipe 5a dan 5b Gedung L Beban Gempa Respons Spektrum

Lantai	Kekuatan		80% Kekuatan Lateral		65% Kekuatan Lateral		Status	
	Arah X	Arah Y	Arah X	Arah Y	Arah X	Arah Y	Arah X	Arah Y
14	837,519	836,953	670,015	544,020	544,020	544,020	-	-
13	1738,509	1737,741	1390,807	1129,531	1129,531	1129,531	Regular	Regular
12	2399,091	2398,558	1919,273	1559,063	1559,063	1559,063	Regular	Regular
11	2885,905	2885,716	2308,724	1875,715	1875,715	1875,715	Regular	Regular
10	2885,905	2885,716	2308,724	1875,715	1875,715	1875,715	Regular	Regular
9	3278,192	3278,205	2622,553	2130,833	2130,833	2130,833	Regular	Regular
8	3605,236	3605,332	2884,189	2343,465	2343,465	2343,465	Regular	Regular
7	3882,720	3882,868	3106,176	2523,864	2523,864	2523,864	Regular	Regular
6	4146,076	4146,254	3316,861	2695,065	2695,065	2695,065	Regular	Regular
5	4415,724	4415,950	3532,579	2870,367	2870,367	2870,367	Regular	Regular
4	4685,427	4685,778	3748,342	3045,756	3045,756	3045,756	Regular	Regular
3	4961,159	4961,608	3968,927	3225,045	3225,045	3225,045	Regular	Regular
2	5246,649	5246,999	4197,319	3410,550	3410,550	3410,550	Regular	Regular
1	5483,433	5483,561	4386,747	3564,315	3564,315	3564,315	Regular	Regular

Lampiran 1.k Nilai Displacement Persegi Beban Gempa Respons Spektrum

Story	Displacement (mm)					
	Persegi		T		L	
	Arah X	Arah Y	Arah X	Arah Y	Arah X	Arah Y
Atap	169,329	169,076	209,639	166,949	203,557	201,760
13	166,081	165,834	204,652	163,376	198,690	196,935
12	161,096	160,856	197,680	158,150	191,891	190,195
11	154,201	153,972	188,484	151,096	182,937	181,319
10	145,509	145,292	177,176	142,317	171,943	170,422
9	135,172	134,972	163,944	131,963	159,093	157,686
8	123,324	123,143	148,955	120,168	144,550	143,273
7	110,062	109,902	132,336	107,028	128,435	127,303
6	95,453	95,317	114,176	92,607	110,833	109,861
5	79,556	79,445	94,566	76,965	91,827	91,027
4	62,461	62,377	73,656	60,203	71,559	70,941
3	44,397	44,341	51,794	42,567	50,354	49,927
2	26,019	25,989	29,892	24,746	29,090	28,849
1	9,262	9,253	10,404	8,700	10,139	10,059

Lampiran 1.l Nilai Drift Story Gedung Persegi Beban Gempa Respons Spektrum

Story	Displacement		Elastic Drift		h (mm)	Inelastic Drift		Drift Limit (mm)
	δe_x	δe_y	δe_x	δe_y		Δ_x	Δ_y	
	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)		(mm)	(mm)	
14	169,329	169,076	3,248	3,242	4000,000	11,909	11,887	30,769
13	166,081	165,834	4,985	4,978	4000,000	18,278	18,253	30,769
12	161,096	160,856	6,895	6,884	4000,000	25,282	25,241	30,769
10	154,201	153,972	8,692	8,680	4000,000	31,871	31,827	30,769
9	145,509	145,292	10,337	10,320	4000,000	37,902	37,840	30,769
8	135,172	134,972	11,848	11,829	4000,000	43,443	43,373	30,769
7	123,324	123,143	13,262	13,241	4000,000	48,627	48,550	30,769
6	110,062	109,902	14,609	14,585	4000,000	53,566	53,478	30,769
5	95,453	95,317	15,897	15,872	4000,000	58,289	58,197	30,769
4	79,556	79,445	17,095	17,068	4000,000	62,682	62,583	30,769
3	62,461	62,377	18,064	18,036	4000,000	66,235	66,132	30,769
2	44,397	44,341	18,378	18,352	4000,000	67,386	67,291	30,769
1	26,019	25,989	16,757	16,736	4000,000	61,442	61,365	30,769

Lampiran 1.m Nilai *Drift Story* Pada Gedung T Beban Gempa Respons Spektrum

Story	Displacement		Elastic Drift		h (mm)	Inelastic Drift		Drift Limit (mm)
	δe_x	δe_y	δe_x	δe_y		Δ_x	Δ_y	
	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)		(mm)	(mm)	
14	209,639	166,949	4,987	3,573	4000,000	18,286	13,101	30,769
13	204,652	163,376	6,972	5,226	4000,000	25,564	19,162	30,769
12	197,680	158,150	9,196	7,054	4000,000	33,719	25,865	30,769
11	188,484	151,096	11,308	8,779	4000,000	41,463	32,190	30,769
10	177,176	142,317	13,232	10,354	4000,000	48,517	37,965	30,769
9	163,944	131,963	14,989	11,795	4000,000	54,960	43,248	30,769
8	148,955	120,168	16,619	13,140	4000,000	60,936	48,180	30,769
7	132,336	107,028	18,160	14,421	4000,000	66,587	52,877	30,769
6	114,176	92,607	19,610	15,642	4000,000	71,903	57,354	30,769
5	94,566	76,965	20,910	16,762	4000,000	76,670	61,461	30,769
4	73,656	60,203	21,862	17,636	4000,000	80,161	64,665	30,769
3	51,794	42,567	21,902	17,821	4000,000	80,307	65,344	30,769
2	29,892	24,746	19,488	16,046	4000,000	71,456	58,835	30,769
1	10,404	8,700	10,404	8,700	4000,000	38,148	31,900	30,769

Lampiran 1.n Nilai *Drift Story* Pada Gedung L Beban Gempa Respons Spektrum

Story	Displacement		Elastic Drift		h (mm)	Inelastic Drift		Drift Limit (mm)
	δe_x	δe_y	δe_x	δe_y		Δ_x	Δ_y	
	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)		(mm)	(mm)	
14	203,557	201,760	4,867	4,825	4000,000	17,846	17,692	30,769
13	198,690	196,935	6,799	6,740	4000,000	24,930	24,713	30,769
12	191,891	190,195	8,954	8,876	4000,000	32,831	32,545	30,769
11	182,937	181,319	10,994	10,897	4000,000	40,311	39,956	30,769
10	171,943	170,422	12,850	12,736	4000,000	47,117	46,699	30,769
9	159,093	157,686	14,543	14,413	4000,000	53,324	52,848	30,769
8	144,550	143,273	16,115	15,970	4000,000	59,088	58,557	30,769
7	128,435	127,303	17,602	17,442	4000,000	64,541	63,954	30,769
6	110,833	109,861	19,006	18,834	4000,000	69,689	69,058	30,769
5	91,827	91,027	20,268	20,086	4000,000	74,316	73,649	30,769
4	71,559	70,941	21,205	21,014	4000,000	77,752	77,051	30,769
3	50,354	49,927	21,264	21,078	4000,000	77,968	77,286	30,769
2	29,090	28,849	18,951	18,790	4000,000	69,487	68,897	30,769
1	10,139	10,059	10,139	10,059	4000,000	37,176	36,883	30,769

Lampiran 2 Hasil Analisis *Time History*

Lampiran 2.a Nilai Gaya Geser Dasar Beban Gempa *Time History*

No	Keterangan	Base Shear (kN)	
		Arah X	Arah Y
1	Gedung Persegi	4690,826	4193,570
2	Gedung T	2776,016	2503,746
3	Gedung L	2777,599	2416,097

Lampiran 2.b. Ketidakberaturan Horizontal Tipe 1a dan 1b Gedung Persegi Beban Gempa *Time History*

Lantai	Arah X				Arah Y			
	Δ_{Max}	Δ_{Avg}	$\Delta_{Max}/\Delta_{Avg}$	Status	Δ_{Max}	Δ_{Avg}	$\Delta_{Max}/\Delta_{Avg}$	Status
14	6,140	6,136	1,001	Regular	6,516	6,499	1,003	Regular
13	9,517	9,511	1,001	Regular	9,748	9,726	1,002	Regular
12	12,799	12,792	1,001	Regular	12,805	12,780	1,002	Regular
11	15,360	15,350	1,001	Regular	15,257	15,232	1,002	Regular
10	16,997	16,982	1,001	Regular	17,111	17,060	1,003	Regular
9	18,515	18,500	1,001	Regular	19,367	19,287	1,004	Regular
8	19,357	19,341	1,001	Regular	21,442	21,353	1,004	Regular
7	19,991	19,977	1,001	Regular	23,323	23,236	1,004	Regular
6	22,216	22,197	1,001	Regular	24,815	24,721	1,004	Regular
5	24,334	24,315	1,001	Regular	25,797	25,697	1,004	Regular
4	25,501	25,483	1,000	Regular	26,158	26,057	1,004	Regular
3	25,220	25,205	1,000	Regular	25,608	25,510	1,004	Regular
2	22,558	22,543	1,001	Regular	22,907	22,813	1,004	Regular
1	12,311	12,302	1,001	Regular	12,528	12,480	1,004	Regular

Lampiran 2.c Ketidakberaturan Horizontal Tipe 1a dan 1b Gedung T Beban Gempa *Time History*

Lantai	Arah X				Arah Y			
	Δ_{Max}	Δ_{Avg}	$\Delta_{Max}/\Delta_{Avg}$	Status	Δ_{Max}	Δ_{Avg}	$\Delta_{Max}/\Delta_{Avg}$	Status
14	7,957	7,002	1,133	Regular	7,111	7,082	1,004	Regular
13	11,183	10,148	1,101	Regular	10,298	10,262	1,004	Regular
12	14,145	13,171	1,074	Regular	12,905	12,866	1,003	Regular
11	16,448	15,484	1,063	Regular	15,181	15,152	1,002	Regular
10	18,612	17,422	1,068	Regular	17,170	17,111	1,003	Regular
9	19,917	18,736	1,061	Regular	19,619	19,543	1,004	Regular
8	20,676	19,452	1,059	Regular	21,831	21,751	1,004	Regular
7	21,596	20,204	1,063	Regular	23,647	23,560	1,004	Regular
6	23,477	21,858	1,070	Regular	25,007	24,918	1,004	Regular
5	25,694	24,014	1,067	Regular	25,921	25,831	1,003	Regular
4	27,147	25,382	1,068	Regular	26,275	26,181	1,004	Regular
3	27,159	25,353	1,070	Regular	25,602	25,505	1,004	Regular
2	24,014	22,430	1,071	Regular	22,385	22,306	1,004	Regular
1	12,749	11,997	1,063	Regular	11,942	11,898	1,004	Regular

Lampiran 2.d Ketidakberaturan Horizontal Tipe 1a dan 1b Gedung L Beban Gempa Time History

Lantai	Arah X				Arah Y			
	Δ_{Max}	Δ_{Avg}	$\Delta_{Max}/\Delta_{Avg}$	Status	Δ_{Max}	Δ_{Avg}	$\Delta_{Max}/\Delta_{Avg}$	Status
14	7,802	6,958	1,119	Regular	8,699	7,603	1,147	Regular
13	10,972	10,079	1,088	Regular	12,110	10,879	1,116	Regular
12	14,018	13,157	1,065	Regular	15,045	13,699	1,102	Regular
11	16,251	15,433	1,053	Regular	17,950	16,359	1,099	Regular
10	18,365	17,342	1,060	Regular	21,091	18,729	1,126	Regular
9	19,633	18,640	1,052	Regular	23,796	20,816	1,144	Regular
8	20,413	19,358	1,051	Regular	26,074	23,010	1,133	Regular
7	21,186	20,068	1,051	Regular	28,066	24,900	1,127	Regular
6	23,064	21,730	1,058	Regular	29,706	26,406	1,124	Regular
5	25,202	23,850	1,054	Regular	30,786	27,377	1,124	Regular
4	26,618	25,199	1,055	Regular	31,207	27,762	1,124	Regular
3	26,613	25,154	1,057	Regular	30,409	27,072	1,123	Regular
2	23,549	22,252	1,059	Regular	26,656	23,766	1,121	Regular
1	12,522	11,909	1,052	Regular	14,136	12,698	1,113	Regular

Lampiran 2.e Ketidakberaturan Vertikal Tipe 1a dan 1b Gedung Persegi Beban Gempa Time History

Lantai	Kekakuan		Kekakuan tingkat di atasnya		Kekakuan rerata tiga tingkat di atasnya		Status	
	Arah X	Arah Y	Arah X	Arah Y	Arah X	Arah Y	Arah X	Arah Y
14	236847,726	280009,740	-	-	-	-		
13	318921,340	389773,589	165793,408	196006,818	-	-	Regular	Regular
12	322274,640	404924,769	223244,938	272841,512	-	-	Regular	Regular
11	312452,559	399328,516	225592,248	283447,338	204876,865	286588,826	Regular	Regular
10	322202,302	384258,796	218716,791	279529,961	254306,277	318407,166	Regular	Regular
9	335203,041	367394,775	225541,612	268981,157	255181,201	316936,555	Regular	Regular
8	344305,027	367775,130	234642,129	257176,343	258628,774	306928,557	Regular	Regular
7	347692,591	366254,235	241013,519	257442,591	267122,766	298514,320	Regular	Regular
6	332900,302	363981,297	243384,814	256377,964	273920,176	293713,104	Regular	Regular
5	326199,119	365799,328	233030,211	254786,908	273306,112	292802,843	Regular	Regular
4	338010,823	370377,035	228339,383	256059,530	268477,870	292275,963	Regular	Regular
3	361064,942	383676,603	236607,576	259263,924	265896,065	293375,376	Regular	Regular
2	418047,686	438455,802	252745,459	268573,622	273406,635	298627,458	Regular	Regular
1	775117,721	810053,606	292633,380	306919,062	297899,587	318002,517	Regular	Regular

Lampiran 2.f Ketidakberaturan Vertikal Tipe 1a dan 1b Gedung T Beban Gempa Time History

Lantai	Kekakuan		Kekakuan tingkat di atasnya		Kekakuan rerata tiga tingkat di atasnya		Status	
	Arah X	Arah Y	Arah X	Arah Y	Arah X	Arah Y	Arah X	Arah Y
14	127527,910	152205,987	-	-	-	-		
13	183459,013	219406,649	89269,537	106544,191	-	-	Regular	Regular
12	191398,542	239125,255	128421,309	153584,654	-	-	Regular	Regular
11	185220,890	232971,027	133978,980	167387,679	117223,275	162863,438	Regular	Regular
10	182329,210	224716,028	129654,623	163079,719	149354,252	184400,782	Regular	Regular
9	193263,100	214457,859	127630,447	157301,220	149052,971	185816,616	Regular	Regular
8	200077,409	213161,245	135284,170	150120,501	149550,187	179238,644	Regular	Regular
7	199169,262	211198,867	140054,186	149212,871	153511,925	173956,035	Regular	Regular
6	193898,190	213420,938	139418,484	147839,207	158002,606	170351,459	Regular	Regular
5	188833,182	216168,692	135728,733	149394,657	158171,963	170074,947	Regular	Regular
4	194787,643	221011,054	132183,227	151318,084	155173,502	170876,932	Regular	Regular
3	208385,777	231446,827	136351,350	154707,738	154005,071	173493,516	Regular	Regular
2	244460,185	267046,690	145870,044	162012,779	157868,427	178300,419	Regular	Regular
1	465852,164	501948,228	171122,130	186932,683	172702,295	191867,885	Regular	Regular