

TUGAS AKHIR
PENGARUH GETARAN GEMPA PADA GEDUNG BERTINGKAT
BANYAK BERSISTEM GANDA DI KOTA MEDAN DENGAN
METODE LINEAR

*Diajukan Untuk Memenuhi Syarat-Syarat Memperoleh
Gelar Sarjana Teknik Sipil Pada fakultas Teknik
Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara*

DISUSUN OLEH:

SALSABIELLA
NPM: 2207210049



PROGRAM STUDI TEKNIK SIPIL
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS MUHAMMADIYAH SUMATERA UTARA
MEDAN
2026

LEMBAR PERSETUJUAN PEMBIMBING

Tugas akhir ini diajukan oleh:

Nama : Salsabiella
Npm : 2207210049
Program Studi : Teknik Sipil
Judul Skripsi : Pengaruh Getaran Gempa Pada Gedung Bertingkat Banyak
Bersistem Ganda Di Kota Medan Dengan Metode Linear
Bidang Ilmu : Struktur

Telah berhasil dipertahankan dihadapan Tim Penguji dan diterima sebagai salah satu syarat yang diperlukan untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik pada Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara.

Disetujui Untuk Disampaikan

Kepada Panitia Ujian:

Medan, 1 September 2026

Dosen Pembimbing



Assoc. Prof. Ir. Ade Faisal, S.T., M.Sc., Ph.D

LEMBAR PENGESAHAN

Tugas akhir ini diajukan oleh:

Nama : Salsabiella
NPM : 2207210049
Program Studi : Teknik Sipil
Judul Skripsi : Pengaruh Getaran Gempa Pada Gedung Bertingkat Banyak
Bersistem Ganda Di Kota Medan Dengan Metode Linear
Bidang Ilmu : Struktur

Telah berhasil dipertahankan dihadapan Tim Penguji dan diterima sebagai salah satu syarat yang diperlukan untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik pada Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara.

Medan, 1 September 2026

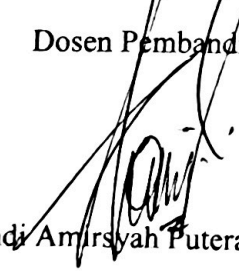
Mengetahui dan Menyetujui

Dosen Pembimbing


Assoc. Prof. Ir. Ade Faisal, S.T., M.Sc., Ph.D.

Dosen Pembimbing I

Dosen Pembimbing II


Ir. Tondi Amirsyah Putera, S.T., M.T.


Rizki Efrida, S.T., M.T.

Ketua Program Studi Teknik Sipil


Ir. Josef Hadipramana, S.T., M.Sc., Ph.D.

SURAT PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR

Saya yang bertandatangan dibawah ini:

Nama : Salsabiella
Tempat, Tanggal Lahir : Medan, 07 April 2004
Npm : 2207210049
Fakultas : Teknik
Program Studi : Teknik Sipil

Menyatakan dengan sesungguhnya dan sejujurnya, bahwa Laporan Tugas Akhir saya yang berjudul:

“Pengaruh Getaran Gempa Pada Gedung Bertingkat Banyak Di Kota Medan Bersistem Ganda Dengan Metode Linear”

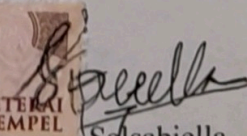
Bukan merupakan plagiarism, pencurian hasil karya milik orang lain, hasil kerja orang lain untuk kepentingan saya karena hubungan material dan nonmaterial serta segala kemungkinan lain, yang pada hakekatnya merupakan karya tulis Tugas Akhir saya secara orisinil dan otentik.

Bila kemudian hari diduga kuat ada ketidaksesuaian antara fakta dengan kenyataan ini, saya bersedia diproses oleh Tim fakultas yang di bentuk untuk melakukan verifikasi, dengan sanksi terberat berupa pembatalan kelulusan atau keserjanaan saya.

Demikian Surat Pernyataan ini saya buat dengan kesadaran sendiri dan tidak atas tekanan ataupun paksaan dari pihak manapun demi menegakkan integritas akademik di Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara.

Medan, 1 September 2026

Saya yang menyatakan

 
Salsabiella

ABSTRAK

PENGARUH GETARAN GEMPA PADA GEDUNG BERTINGKAT BANYAK BERSISTEM GANDA DI KOTA MEDAN DENGAN METODE LINEAR

Salsabiella

21207210049

Assoc. Prof. Ir. Ade Faisal, S.T., M.Sc., Ph.D.

Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi pengaruh getaran gempa terhadap respons simpangan antar lantai pada gedung bertingkat banyak dengan sistem struktur ganda di Kota Medan menggunakan metode analisis respons spektrum linier. Objek studi berupa gedung apartemen 23 lantai yang mengombinasikan Sistem Rangka Pemikul Momen Khusus (SRPMK) dan dinding geser (*shear wall*) sebagai sistem penahan beban lateral. Sebanyak 35 rekaman gempa bumi, yang terbagi dalam 15 rekaman gempa dekat (*near-field*) dan 20 rekaman gempa jauh (*far-field*), diseleksi dari basis data PEER dan diskalakan terhadap spektrum respons desain berdasarkan SNI 1726:2019 untuk kondisi tanah lunak di Kota Medan. Pemodelan struktur tiga dimensi serta analisis dinamik linier dilakukan menggunakan perangkat lunak ETABS v18. Parameter utama yang dievaluasi adalah simpangan antar lantai (*inter-story drift ratio*) pada seluruh tingkat bangunan, yang selanjutnya dibandingkan dengan batas ijin sebesar 0,020 sesuai ketentuan SNI 1726:2019. Hasil analisis menunjukkan bahwa Lantai 3 merupakan lokasi paling kritis dengan tingkat kegagalan mencapai 100% terhadap seluruh variasi rekaman gempa pada arah X Mode 1. Rekaman gempa GM2, GM4, GM7, dan GM14 teridentifikasi sebagai rekaman dengan pengaruh paling dominan, menyebabkan simpangan berlebih pada hampir seluruh lantai bangunan. Analisis statistik dan kurva fragilitas menunjukkan bahwa probabilitas kerusakan parah (*Limit State*) dan hampir rubuh (*Near Collapse*) pada seluruh konfigurasi tingkat masih berada pada nilai yang sangat rendah pada rentang intensitas yang dianalisis, dengan nilai median kapasitas struktur yang belum tercapai hingga tingkat percepatan spektral 0,50 g. Hal ini mengindikasikan bahwa struktur sistem ganda yang dirancang memiliki margin keamanan yang memadai terhadap beban gempa rencana. Penelitian ini menyimpulkan bahwa metode analisis linier masih dapat digunakan sebagai pendekatan awal dalam mengevaluasi kinerja struktur.

Kata kunci : sistem ganda, analisis respons spektrum linier, simpangan antar lantai, gempa dekat dan jauh, kurva fragilitas, SNI 1726:2019, Kota Medan.

ABSTRACT

THE EFFECT OF EARTHQUAKE VIBRATIONS ON MULTI-STORY BUILDINGS WITH DUAL-SYSTEM STRUCTURES IN THE CITY OF MEDAN USING THE LINEAR METHOD

Salsabiella

2207210049

Assoc. Prof. Ir. Ade Faisal, S.T., M.Sc., Ph.D.

This study aims to evaluate the effect of seismic vibrations on the inter-story displacement response of a high-rise building with a dual structural system in the city of Medan using the linear response spectrum analysis method. The subject of the study is a 23-story apartment building that combines a Special Moment-Resisting Frame System (SRPMK) and shear walls as a lateral load-resisting system. A total of 35 earthquake records comprising 15 near-field records and 20 far-field records were selected from the PEER database and scaled against the design response spectrum based on SNI 1726:2019 for soft soil conditions in the city of Medan. Three-dimensional structural modeling and linear dynamic analysis were performed using ETABS v18 software. The primary parameter evaluated was the inter-story drift ratio at all levels of the building, which was then compared to the allowable limit of 0.020 as specified in SNI 1726:2019. The analysis results showed that the 3rd floor was the most critical location, with a failure rate of 100% for all variations of the seismic record in the X-direction Mode 1. The GM2, GM4, GM7, and GM14 earthquake records were identified as having the most dominant effects, causing excessive deflections on nearly all floors of the building. Statistical analysis and fragility curves indicate that the probability of severe damage (Limit State) "Near Collapse" for all story configurations remained at very low values across the analyzed intensity range, with the median structural capacity not yet reached even at a spectral acceleration of 0.50 g. This indicates that the designed dual-system structure has an adequate safety margin against the design seismic load. This study concludes that linear analysis methods can still be used as an initial approach in evaluating structural performance.

Keywords : Dual-system, linear response spectrum analysis, inter-story drift, near-field and far-field earthquakes, fragility curve, SNI 1726:2019, City of Medan.

KATA PENGANTAR

Alhamdulillah Rabbil Alamin, puji syukur kehadiran Allah SWT atas rahmat dan keridhoannya penulis dapat menyelesaikan skripsi ini. Salah satu dari nikmat tersebut adalah keberhasilan penulis dalam menyelesaikan laporan Tugas Akhir ini yang berjudul “Pengaruh Getaran Gempa Pada Gedung Bertingkat Banyak Bersistem Ganda Di Kota Medan Dengan Metode Linear ” sebagai syarat untuk meraih gelar akademik Sarjana Teknik pada Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara (UMSU), Medan.

Banyak pihak telah membantu dalam menyelesaikan laporan Tugas Akhir ini, untuk itu penulis menghaturkan rasa terimakasih yang tulus dan dalam kepada:

1. Bapak Assoc. Prof. Ir. Ade Faisal, S.T., M.Sc., Ph.D. selaku Dosen Pembimbing sekaligus sebagai Dekan Fakultas Teknik yang telah banyak membimbing dan mengarahkan penulis dalam menyelesaikan Tugas Akhir ini.
2. Bapak Ir. Tondi Amirsyah Putera, S.T., M.T. selaku Dosen Pembimbing I dan Penguji yang telah banyak memberikan koreksi dan masukan kepada penulis dalam menyelesaikan Tugas Akhir ini.
3. Ibu Rizki Efrida, S.T., M.T. selaku Dosen Pembimbing II dan Penguji yang telah banyak memberikan koreksi dan masukan kepada penulis dalam menyelesaikan Tugas Akhir ini.
4. Bapak Dr. Josef Hadipramana. selaku Ketua Program Studi Teknik Sipil, Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara.
5. Seluruh Bapak/Ibu Dosen di Program Studi Teknik Sipil, Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara yang telah banyak memberikan ilmu ketekniksipil kepada penulis.
6. Orang tua penulis : Ayahanda saya dan Ibunda saya, dan kakak saya yang telah bersusah payah membesarkan, mendidik dan membiayai studi penulis serta memotivasi untuk selalu semangat.
7. Bapak/Ibu Staf Administrasi di Biro Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara.
8. Kepada Teman Sesama Tim *Earthquake Engineering Research Group*.

9. Sahabat Saya untuk Ninda Aulya Azhari dan Fadila Shoviatunisa yang telah banyak membantu saya dan selalu ada buat saya.
10. Teruntuk Hisyam Sarif yang selalu memberi support untuk penulis dalam menyelesaikan skripsi ini.

Akhir kata penulis berharap skripsi ini dapat memberikan sumbangan pemikiran yang bermanfaat bagi semua. Penulis menyadari akan keterbatasan dalam menyelesaikan skripsi ini sehingga banyak kekurangannya. Dengan demikian kritikan dan saran yang membangun dari semua pihak dalam penulisan skripsi ini.

Medan, 07 November 2025

Salsabiella

DAFTAR ISI

LEMBAR PERSETUJUAN PEMBIMBING	ii
LEMBAR PENGESAHAN	iii
SURAT PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR	iv
ABSTRAK	v
ABSTRACT	vi
KATA PENGANTAR	vii
DAFTAR ISI	ix
DAFTAR TABEL	xiv
DAFTAR GAMBAR	xvi
DAFTAR LAMPIRAN	xxi
DAFTAR NOTASI	xxii
DAFTAR SINGKATAN	xxiii
BAB 1	1
PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	4
1.3 Tujuan Penelitian	4
1.4 Ruang Lingkup	4
1.5 Manfaat Penelitian	8
1.6 Sistematika Penulisan	8
BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA	9
2.1 Penelitian Terdahulu	9
2.1.1 Pelitian Tentang SRPMK	9
2.1.2 Penelitian Tentang Sistem Ganda	9

2.1.3	Penelitian Tentang Dinding Geser	11
2.2	Teori Dasar	12
2.2.1	Pengertian Gempa Bumi	12
2.2.2	Mekanisme Pembangkitan Gelombang Seismik	12
2.2.3	Parameter Kegempaan (PGA, PGV, Magnitude, Intensitas)	13
2.2.4	Gelombang Seismik (Gelombang P,S, Love, Rayleigh)	13
2.2.5	Wilayah Seismik Indonesia dan Karakteristik Patahan Sumatera	14
2.2.6	Klasifikasi Kegempaan Sesuai SNI 1726:2019	14
2.2.7	Bahaya Gempa di Kota Medan	15
2.3	Analisis Respon Struktur terhadap Gempa	15
2.3.1	Teori Dinamika Struktur: SDOF dan MDOF	15
2.3.2	Respon Struktur Akibat Beban Dinamis	16
2.3.3	Analisis Respons Spektrum	16
2.3.4	Parameter Respon Struktur yang Dianalisis	17
2.4	Sistem Struktur Bangunan Gedung	17
2.4.1	Sistem Rangka Pemikul Momen (Moment Resisting Frame – MRF)	17
2.4.2	Sistem Dinding Geser (Shear Wall)	17
2.4.3	Sistem Ganda (Dual Sistem: Shear Wall + MRF)	18
2.5	Standar dan Peraturan Terkait	18
2.5.1	SNI 1726:2019 tentang Tata Cara Perencanaan Ketahanan Gempa	18
2.5.2	SNI 2847:2019 tentang Struktur Beton Bertulang	18
2.5.3	Pedoman Analisis Struktur	19
2.6	Model Struktur Pada Bangunan Bertingkat	19
2.6.1	Pemodelan Struktur 3D	19
2.6.2	Asumsi Pemodelan	19
2.6.3	Pengidealan Massa dan Kekakuan	20
2.6.4	Mode Shape dan Partisipasi Massa	20
2.7	Kerangka Pemikiran	20

2.7.1	Hubungkan Antara Getaran Gempa Dengan Respons Struktur	20
2.7.2	Pengaruh Sistem Ganda Terhadap Performa Struktur	21
BAB 3 METODE PENELITIAN		22
3.1	Umum	22
3.2	Metode Pengerjaan Tugas Akhir	23
3.2.1	Literatur Studi Dan Pengumpulan Data	23
3.2.2	Seleksi dan Pengumpulan Rekaman Gempa	27
3.2.3	Pemodelan dan Pembebanan Struktur Dengan Sistem Ganda	30
3.2.4	Mengubah Rekaman ke Respon Spektrum Percepatan dan Penskalaan Terhadap Spektrum Desain	32
3.2.5	Analisis Beban Gempa pada Struktur Sistem Ganda Menggunakan Respons Spektrum di ETABS	35
3.2.6	Analisa Kinerja Simpangan Antar Lantai terhadap Batas Ijin	38
3.2.7	Analisis Statistik: Median, Standar Deviasi, Distribusi Kumulatif	38
BAB 4		40
4.1	Tinjauan Umum	40
4.2	Penentuan Spektrum Respons Desain SNI 1726:2019 untuk Kota Medan	40
4.3	Perhitungan Desain Struktur Sistem Ganda	41
4.3.1	Parameter Gempa	41
4.3.2	Periode Struktur	41
4.3.3	Simpangan Antar Lantai terhadap Batas Ijin	42
4.4	Analisis Simpangan Antar Lantai (Story Drift) Akibat Gempa Arah X Mode 1	43
4.4.1	Rekapitulasi Ground Motion yang Melewati Batas Drift Izin	43
4.5	Analisis Simpangan Antar Lantai (Story Drift) Akibat Gempa Arah X Mode 2	46
4.5.1	Rekapitulasi Ground Motion yang Melewati Batas Drift Izin	46

4.5.2	Daftar Ground Motion Berlebih per Tingkat Lantai	46
4.5.3	Persentase Jumlah Lantai yang Melewati Batas per Ground Motion	48
4.6	Analisis Simpangan Antar Lantai (Story Drift) Akibat Gempa Arah Y Mode 1	49
4.6.1	Rekapitulasi Ground Motion yang Melewati Batas Drift Izin	49
4.7	Analisis Simpangan Antar Lantai (Story Drift) Akibat Gempa Arah Y Mode 2	52
4.7.1	Rekapitulasi Ground Motion yang Melewati Batas Drift Izin	52
4.7.2	Daftar Ground Motion Berlebih per Tingkat Lantai	53
4.7.3	Persentase Jumlah Lantai yang Melewati Batas per Ground Motion	54
4.8	Analisis Simpangan Antar Lantai (Story Drift) Akibat Gempa Jauh Arah X Mode 1	55
4.8.1	Rekapitulasi Ground Motion yang Melewati Batas Drift Izin	55
4.8.2	Daftar Ground Motion Berlebih per Tingkat Lantai	56
4.8.3	Persentase Jumlah Lantai yang Melewati Batas per Ground Motion	57
4.9	Analisis Simpangan Antar Lantai (Story Drift) Akibat Gempa Jauh Arah Y Mode 1	58
4.9.1	Rekapitulasi Ground Motion yang Melewati Batas Drift Izin	58
4.9.2	Daftar Ground Motion Berlebih per Tingkat Lantai	59
4.9.3	Persentase Jumlah Lantai yang Melewati Batas per Ground Motion	60
4.10	Analisis Simpangan Antar Lantai (Story Drift) Akibat Gempa Jauh Arah X Mode 2	61
4.10.1	Rekapitulasi Ground Motion yang Melewati Batas Drift Izin	62
4.10.2	Daftar Ground Motion Berlebih per Tingkat Lantai	62
4.10.3	Persentase Jumlah Lantai yang Melewati Batas per Ground Motion	64

4.11 Analisis Simpangan Antar Lantai (Story Drift) Akibat Gempa Jauh	
Arah Y Mode 2	65
4.11.1 Rekapitulasi Ground Motion yang Melewati Batas Drift Izin	65
4.11.2 Daftar Ground Motion Berlebih per Tingkat Lantai	66
4.11.3 Persentase Jumlah Lantai yang Melewati Batas per Ground	
Motion	67
4.11.4 Analisis Probabilitas Kerusakan Berdasarkan Simpangan Antar	
Tingkat	68
BAB 5	139
KESIMPULAN DAN SARAN	139
5.1 Kesimpulan	140
5.2 Saran	141
DAFTAR PUSTAKA	141
LAMPIRAN	145
DAFTAR RIWAYAT HIDUP	173

DAFTAR TABEL

Tabel 3. 1	Kuat Tekan Beton Yang Direncanakan Pada Balok	24
Tabel 3. 2	Kuat Tekan Beton Yang Direncanakan Pada Kolom	24
Tabel 3. 3	Dimensi Rencana Kolom	25
Tabel 3. 4	Dimensi Rencana Balok Lantai Mezzanine Sampai Lantai 22	25
Tabel 3. 5	Dimensi Rencana Pelat Lantai	26
Tabel 3. 6	Data Rekaman Gempa Dekat	27
Tabel 3. 7	Data Rekaman Gempa Jauh	28
Tabel 3. 8	Pembebanan yang diinputkan pada struktur Apartemen berdasarkan fungsi ruangan	31
Tabel 3. 9	Klasifikasi Situs	32
Tabel 3. 10	Kombinasi Pembebanan	36
Tabel 3. 11	Pengecekan minimal 25% keterlibatan SRPMK	37
Tabel 4. 1	Data perioda dan partisipasi massa	42
Tabel 4. 2	Rekapitulasi Ground Motion yang Melebihi Drift Izin per Tingkat Lantai	44
Tabel 4. 3	Persentase Kegagalan (exceedance) setiap rekaman gempa terhadap total 24 lantai yang dianalisis	45
Tabel 4. 4	Rekapitulasi Ground Motion yang Melebihi Drift Izin per Tingkat Lantai (Mode 2)	47
Tabel 4.5	Persentase Tingkat Kegagalan Struktur per Ground Motion (Mode2)	48
Tabel 4. 6	Rekapitulasi Ground Motion yang Melebihi Drift Izin per Tingkat Lantai (Arah Y Mode 1)	50
Tabel 4. 7	Persentase Tingkat Kegagalan Struktur per Ground Motion (Arah Y Mode 1)	51
Tabel 4. 8	Rekapitulasi Ground Motion yang Melebihi Drift Izin per Tingkat Lantai (Arah Y Mode 2)	53
Tabel 4. 9	Persentase Tingkat Kegagalan Struktur per Ground Motion (Arah Y Mode 2)	54

Tabel 4. 10	Rekapitulasi Ground Motion yang Melebihi Drift Izin per Tingkat Lantai (Gempa Jauh Arah X Mode 1)	56
Tabel 4. 11	Persentase Tingkat Kegagalan Struktur per Ground Motion (Gempa Jauh Arah X Mode 1)	57
Tabel 4. 12	Rekapitulasi Ground Motion yang Melebihi Drift Izin per Tingkat Lantai (Gempa Jauh Arah Y Mode 1)	59
Tabel 4. 13	Persentase Tingkat Kegagalan Struktur per Ground Motion (Gempa Jauh Arah Y Mode 1)	60
Tabel 4. 14	Rekapitulasi Ground Motion yang Melebihi Drift Izin per Tingkat Lantai (Gempa Jauh Arah X Mode 2)	62
Tabel 4. 15	Persentase Tingkat Kegagalan Struktur per Ground Motion (Gempa Jauh Arah X Mode 2)	64
Tabel 4. 16	Rekapitulasi Ground Motion yang Melebihi Drift Izin per Tingkat Lantai (Gempa Jauh Arah Y Mode 2)	66

DAFTAR GAMBAR

Gambar 3. 1	Diagram Alir Metode Penelitian	22
Gambar 3. 2:	Pemodelan 3D Sistem Ganda	30
Gambar 3. 3	Respon spektrum Medan, Tanah Lunak (SE)	32
Gambar 3. 4	Grafik Hasil Penskalaan Respon Spektra Desain	34
Gambar 4. 1	Respon spektrum Medan, Tanah Lunak (SE).	41
Gambar 4. 2	Grafik Probabilitas Rusak Parah (LS) Pada Semua Lantai Akibat Spektra Respon Percepatan Gempa Dekat Arah X Mode 1	70
Gambar 4. 3	Grafik Probabilitas Rusak Parah (LS) kondisi batas IDR = 0.020	72
Gambar 4. 4	Grafik Probabilitas Hampir Rubuh (NC) Pada Semua Lantai Akibat Spektra Respon Percepatan Gempa Dekat Arah X Mode 1	73
Gambar 4. 5	Grafik Probabilitas Hampir Rubuh (NC) kondisi batas IDR = 0.040	74
Gambar 4. 6	Perbandingan Grafik Probabilitas Rusak Parah IDR = 0.020 (LS) dengan Probabilitas Hampir Rubuh IDR = 0.040 (NC)	76
Gambar 4. 7	Grafik Probabilitas Rusak parah (LS) Pada Semua Lantai Akibat Spektra Respon Percepatan Gempa Jauh Arah X Mode 1	77
Gambar 4. 8	Grafik Probabilitas Rusak parah (LS) kondisi batas IDR = 0.020	79
Gambar 4. 9	Grafik Probabilitas Hampir Rubuh (NC) Pada Semua Lantai Akibat Spektra Respon Percepatan Gempa Jauh Arah X Mode 1	80

Gambar 4. 10	Grafik Probabilitas Hampir Rubuh (NC) Simpangan kondisi batas IDR = 0.040	82
Gambar 4. 11	Perbandingan Grafik Probabilitas Rusak Parah IDR = 0.020 (LS) dengan Probabilitas Hampir Rubuh IDR = 0.040 (NC)	83
Gambar 4. 12	Gabungan Grafik Probabilitas Hampir Rubuh (NC) kondisi batas IDR = 0.040 Pada Gempa Dekat & Gempa Jauh Arah X Mode 1	85
Gambar 4. 13	Grafik Probabilitas Rusak Parah (LS) Pada Semua Lantai Akibat Spektra Respon Percepatan Gempa Dekat Arah Y Mode 1	86
Gambar 4. 14	Grafik Probabilitas Rusak Parah (LS) kondisi batas IDR = 0.020	88
Gambar 4. 15	Grafik Probabilitas Hampir Rubuh (NC) Pada Semua Lantai Akibat Spektra Respon Percepatan Gempa Dekat Arah Y Mode1	89
Gambar 4. 16	Grafik Probabilitas Hampir Rubuh (NC) kondisi batas IDR = 0.040	91
Gambar 4. 17	Perbandingan Grafik Probabilitas Rusak Parah IDR = 0.020 (LS) dengan Probabilitas Hampir Rubuh IDR = 0.040 (NC)	92
Gambar 4. 18	Grafik Probabilitas Rusak parah (LS) Pada Semua Lantai Akibat Spektra Respon Percepatan Gempa Jauh Arah Y Mode1	94
Gambar 4. 19	Grafik Probabilitas Rusak parah (LS) Simpangan Simpangan Kondisi Batas IDR = 0.020	96
Gambar 4. 20	Grafik Probabilitas Hampir Rubuh (NC) Pada Semua Lantai Akibat Spektra Respon Percepatan Gempa Jauh Arah Y Mode1	97

Gambar 4. 21	Grafik Probabilitas Hampir Rubuh (NC) kondisi batas IDR = 0.040	99
Gambar 4. 22	Perbandingan Grafik Probabilitas Rusak Parah IDR = 0.020 (LS) dengan Probabilitas Hampir Rubuh IDR = 0.040 (NC)	100
Gambar 4. 23	Gabungan Grafik Probabilitas Rusak Parah (LS), IDR = 0.020 & Hampir Rubuh (NC), IDR = 0.040 Pada Gempa Dekat & Gempa Jauh Arah Y Mode 1	102
Gambar 4. 24	Grafik Probabilitas Rusak Parah (LS) Pada Semua Lantai Akibat Spektra Respon Percepatan Gempa Dekat Arah X Mode2	104
Gambar 4. 25	Grafik Probabilitas Rusak Parah (LS) Kondisi Batas IDR = 0.020	106
Gambar 4. 26	Grafik Probabilitas Hampir Rubuh (NC) Pada Semua Lantai Akibat Spektra Respon Percepatan Gempa Dekat Arah X Mode 2	107
Gambar 4. 27	Grafik Probabilitas Hampir Rubuh (NC) Kondisi Batas IDR = 0.040	109
Gambar 4. 28	Perbandingan Grafik Probabilitas Rusak Parah IDR = 0.020 (LS) dengan Probabilitas Hampir Rubuh IDR = 0.040 (NC)	110
Gambar 4. 29	Grafik Probabilitas Rusak parah (LS) Pada Semua Lantai Akibat Spektra Respon Percepatan Gempa Jauh Arah X Mode2	112
Gambar 4. 30	Grafik Probabilitas Rusak parah (LS) kondisi batas IDR = 0.020	113
Gambar 4. 31	Grafik Probabilitas Hampir Rubuh (NC) Pada Semua Lantai Akibat Spektra Respon Percepatan Gempa Dekat Arah X Mode2	115

Gambar 4. 32	Grafik Probabilitas Rusak parah (LS) Simpangan Kondisi Batas IDR = 0.040	116
Gambar 4. 33	Perbandingan Grafik Probabilitas Rusak Parah IDR = 0.020 (LS) dengan Probabilitas Hampir Rubuh IDR = 0.040 (NC)	118
Gambar 4. 34	Gabungan Grafik Probabilitas Rusak parah (LS), Kondisi Batas IDR = 0.020 & Hampir Rubuh (NC) Kondisi Batas IDR = 0.040 Pada Gempa Dekat & Gempa Jauh Arah X Mode 2	119
Gambar 4. 35	Grafik Probabilitas Rusak parah (LS) Pada Semua Lantai Akibat Spektra Respon Percepatan Gempa Dekat Arah Y Mode2	121
Gambar 4. 36	Grafik Probabilitas Rusak parah (LS) Kondisi Batas IDR = 0.020	123
Gambar 4. 37	Grafik Probabilitas Hampir Rubuh (NC) Pada Semua lantai Akibat Spektra Respon Percepatan Gempa Dekat Arah Y Mode2	124
Gambar 4. 38	Grafik Probabilitas Hampir Rubuh (NC) Kondisi Batas IDR = 0.040	126
Gambar 4. 39	Perbandingan Grafik Probabilitas Rusak Parah IDR = 0.020 (LS) dengan Probabilitas Hampir Rubuh IDR = 0.040 (NC)	127
Gambar 4. 40	Grafik Probabilitas Rusak parah (LS) Pada Semua Lantai Akibat Spektra Respon Percepatan Gempa Jauh Arah Y Mode2	129
Gambar 4. 41	Grafik Probabilitas Rusak parah (LS) Kondisi Batas IDR = 0.020	131

Gambar 4. 42	Grafik Probabilitas Hampir Rubuh (NC) Pada Semua Lantai Akibat Spektra Respon Percepatan Gempa Jauh Arah Y Mode2	132
Gambar 4. 43	Grafik Probabilitas Hampir Rubuh (NC) Kondisi Batas IDR = 0.040	134
Gambar 4. 44	Perbandingan Grafik Probabilitas Rusak Parah IDR = 0.020 (LS) dengan Probabilitas Hampir Rubuh IDR = 0.040 (NC)	136
Gambar 4. 45	Gabungan Grafik Probabilitas Rusak parah (LS) Kondisi Batas IDR = 0.020 & Hampir Rubuh (NC) Kondisi Batas IDR = 0.040, Pada Gempa Dekat & Gempa Jauh Arah Y Mode 2	137

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1	Denah struktur (Sistem Ganda)	145
Lampiran 2	Data perioda dan partisipasi massa (Sistem Ganda)	162
Lampiran 3	Story Drif	163

DAFTAR NOTASI

R	=	Faktor Koefisien Modifikasi Respon
Cd	=	Faktor Kuat Lebih Sistem
Ω_0	=	Faktor Pembesaran Defleksi
SDS	=	Respon Spektrum Percepatan Desain untuk Periode Pendek
SD1	=	Respon Spektrum Percepatan Desain untuk Periode 1,0 detik
Ss	=	Nilai parameter respon spektrum percepatan gempa periode pendek 0,2 detik di tanah sedang (SD) mengacu pada Peta Gempa SNI 1726 : 2019
S1	=	Nilai parameter respon spektrum percepatan gempa periode 0,1 detik di tanah sedang (SD) mengacu pada Peta Gempa SNI 1726 : 2019
Fa	=	Koefisien Periode Pendek
Fv	=	Koefisien Periode 1,0 detik
Sa	=	<i>Spectrum Accelereation</i>
T	=	Periode Fundamental
Cs	=	Koefisien Respon Seismik
Fy	=	Gaya Leleh
Fu	=	Gaya Ultimit
Ct	=	Parameter Periode Pendekatan
W	=	Berat Seismik Efektif Struktur
V	=	Gaya Geser Dasar Prosedur Gaya Lateral Statik Ekuivalen
Vt	=	Gaya Geser Dasar Nominal (Analisis Ragam Spektrum Respon)
fx	=	Faktor Skala Gaya Gempa Arah X
fy	=	Faktor Skala Gaya Gempa Arah Y
SFx	=	Faktor Skala Baru untuk Gaya Gempa Arah X
SFy	=	Faktor Skala Baru untuk Gaya Gempa Arah Y

DAFTAR SINGKATAN

SRPMK	=	Sistem Rangka Pemikul Momen Khusus
KDS	=	Kategori Desain Seismik
DL	=	<i>Dead Load</i>
LL	=	<i>Live Load</i>
SIDL	=	<i>Superimposed Dead Load</i>
SCWB	=	<i>Strong Column Weak Beam</i>

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Perkembangan berbagai Kota metropolitan di Indonesia terutama di luar Jawa menunjukkan peningkatan urbanisasi dan aktivitas ekonomi. Situasi ini memicu kebutuhan akan ruang hunian dan komersial yang lebih efisien, sehingga pembangunan bangunan vertical menjadi pilihan yang populer. Berbagai bangunan tinggi, seperti apartemen, hotel, dan perkantoran, telah muncul sebagai solusi atas keterbatasan lahan. Medan, Kota terbesar ketiga di Indonesia dan pusat ekonomi Sumatera, telah mengalami transformasi signifikan akibat maraknya pembangunan gedung-gedung tinggi. (Utami, C., dkk, 2025). Fenomena ini sejalan dengan perkembangan kota-kota metropolitan di Indonesia, terutama di luar Jawa, di mana urbanisasi dan pertumbuhan ekonomi mendorong permintaan ruang hunian dan komersial berorientasi vertical. Dalam konteks ini, gedung-gedung tinggi seperti apartemen, hotel, dan gedung perkantoran telah muncul sebagai solusi praktis untuk pemanfaatan lahan yang semakin terbatas.

Namun, perkembangan infrastruktur vertical ini tidak terlepas dari kondisi geografis Indonesia yang terletak di persimpangan tiga lempeng tektonik utama (Eurasia, Indo-Australia, dan Pasifik), menjadikannya salah satu wilayah dengan aktivitas seismik paling aktif di dunia. Aktivitas tektonik di zona subduksi Sumatera, termasuk Sesar Sumatera dan patahan local lainnya, menimbulkan risiko gempa bumi yang signifikan bagi wilayah tersebut. Oleh karena itu, menyelaraskan kebutuhan pembangunan vertical dengan persyaratan keamanan seismik merupakan isu krusial dalam perencanaan dan perancangan struktur bangunan di Medan. (Metrikasari, R., & Choiruddin, A., 2021).

Data kegempaan yang tersedia menunjukkan kerentanan Sumatera terhadap gempa bumi. Secara historis, peristiwa seperti gempa bumi Nias 2005 dengan magnitudo 8,6 dan gempa bumi Singkil 2022 dengan magnitudo 6,2 telah memberikan bukti konkret akan potensi bahaya tersebut. Badan Meteorologi, klimatologi, dan Geofisika (BMKG) mencatat bahwa antara tahun 2020 dan 2023,

Sumatera Utara dan sekitarnya mengalami lebih dari 500 gempa bumi dengan magnitudo di atas 3,0, puluhan di antaranya cukup kuat untuk dirasakan oleh masyarakat (BMKG, 2024). Peta Sumber dan Bahaya Gempa Bumi Indonesia yang dirilis oleh Pusat Studi Gempa Bumi Nasional pada tahun 2017 mengungkapkan bahwa Kota Medan mengalami percepatan tanah maksimum yang relatif tinggi, dengan nilai spectrum respon puncak mencapai 0,5 hingga 0,6 g untuk periode ulang 2.475 tahun (Pusat Studi Gempa Bumi Nasional, 2017). Situasi ini diperparah oleh jenis tanah yang dominan lunak di beberapa wilayah Medan, yang dapat memperkuat getaran gempa bumi dan memperpanjang durasinya, sehingga menimbulkan risiko resonansi dengan gedung-gedung tinggi (Metrikasari, R., & Choiruddin, A., 2021).

Di Medan, sebuah gedung apartemen 23 lantai dapat dianggap sebagai contoh struktur bangunan tinggi yang kompleks. Untuk meningkatkan ketahanan terhadap gempa dan membuat desain lebih efisien, sistem struktur ganda menggabungkan dinding geser dengan rangka pemikul momen, telah menjadi pilihan yang populer. Sistem ini dirancang untuk menahan beban gempa lateral melalui interaksi kekakuan dinding geser dan kemampuan deformasi rangka. Namun, implementasi dan simulasi sistem ini dalam perangkat lunak seperti ETABS memerlukan pemahaman yang mendalam tentang perilaku dinamis keseluruhan struktur. Metode analisis spectrum respon linier, yang tetap menjadi dasar wajib menurut Standar Nasional Indonesia (SNI 1726:2019) untuk tahap desain awal, seringkali bergantung pada penyederhanaan perilaku struktur yang mungkin tidak akurat. Oleh karena itu, penting untuk menyelidiki lebih lanjut efektivitas system ganda ini pada berbagai ketinggian bangunan dan kondisi seismic khas Medan, serta akurasi prediksi responsnya melalui analisis linier menggunakan beragam data rekaman gempa, untuk memastikan desain yang tidak hanya optimal tetapi juga aman. (Ramadhani, S. F., 2022).

Ada beberapa celah dalam praktik desain saat ini yang memerlukan perhatian. Meskipun standar Nasional Indonesia (SNI 1726:2019) merekomendasikan penggunaan analisis riwayat waktu untuk bangunan penting atau tidak beraturan, metode spektrum respons linier tetap lebih sering digunakan dalam desain sehari-hari karena kemudahan implementasinya. Hal ini menciptakan

perbedaan antara kebutuhan untuk memahami respons inelastis nonlinier yang sebenarnya dan asumsi elastis linier yang diterapkan. Lebih lanjut, ketika menerapkan sistem struktur ganda di gedung bertingkat tinggi di Medan, perancangan sering mengikuti konfigurasi standar tanpa melakukan studi perbandingan yang mendalam tentang bagaimana respons sistem bervariasi dengan serangkaian rekaman gempa bumi yang mewakili risiko seismik lokal. Sementara analisis linier dianggap sebagai pendekatan konservatif, studi seperti yang dilakukan oleh (Zhai dkk, 2020) mengungkapkan bahwa untuk struktur dengan periode guncangan yang lama, perbedaan hasil antara analisis linier dan nonlinier dapat menjadi signifikan, terutama dalam memperkirakan perpindahan atau pergeseran. Oleh karena itu, penting untuk menilai sejauh mana analisis linier menggunakan 40 rekaman gempa bumi dapat memberikan estimasi yang cukup akurat dan aman untuk desain sistem struktur ganda di Medan sebelum beralih ke analisis nonlinier yang lebih mahal dan kompleks.

Penelitian ini menunjukkan urgensi yang signifikan, baik secara teoritis maupun praktis. Dari perspektif teoritis, studi ini akan memperkaya wawasan tentang dinamika berbagai sistem struktur pada bangunan tinggi di wilayah seismik dengan kondisi tanah yang unik seperti Medan, menggunakan metode analisis linear yang diperkuat oleh beragam masukan gerakan tanah. Temuan ini dapat menjadi referensi untuk meningkatkan atau mengembangkan pedoman desain yang lebih sesuai dengan kondisi setempat. Sementara itu, dari perspektif praktis, penelitian ini memiliki implikasi langsung terhadap keselamatan manusia dan kelayakan ekonomi. Jika prediksi respons struktural tidak akurat, dua masalah serius dapat muncul: pertama, desain yang kurang, yang berpotensi menyebabkan kerusakan bangunan, korban jiwa, dan kerugian finansial yang signifikan ketika gempa bumi kuat melanda, seperti yang telah terjadi pada berbagai bencana sebelumnya, dan kedua, desain yang berlebihan, yang secara tidak efisien meningkatkan biaya konstruksi dan dapat menghambat pembangunan perkotaan secara keseluruhan.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan uraian yang telah disebutkan di atas, maka pokok masalah yang terjadi adalah sebagai berikut:

Bagaimana perilaku simpangan antar tingkat struktur gedung bertingkat banyak memakai sistem ganda di Kota Medan akibat getaran gempa jauh dan gempa dekat bila diperkirakan dengan struktur linear.

1.3 Tujuan Penelitian

Dari Tugas Akhir ini mendapat tujuan dari penelitian yaitu:
Untuk memperkirakan Simpangan antar tingkat Struktur gedung bertingkat dampak memakai sistem ganda di Kota Medan akibat getaran gempa jauh dan gempa dekat, menggunakan metode analisa struktur linear.

1.4 Ruang Lingkup

Agar penelitian ini dapat dilaksanakan secara sistematis dan terarah, maka ruang lingkup penelitian ditentukan dengan membatasi pembahasan pada aspek-aspek berikut:

1. Studi ini memusatkan kajian pada satu model struktur atas bangunan berupa gedung apartemen The Bliss di Kota Medan 23 lantai yang difungsikan sebagai hunian. Sistem strukturnya menerapkan konfigurasi sistem ganda (dual sistem), di mana Sistem Rangka Pemikul Momen (Special Moment Resisting Frame/SMRF) dipadukan dengan Sistem dinding geser (Shear Wall/SW) sebagai elemen penahan lateral. Spesifikasi dimensi balok, kolom, dan dinding geser, mutu material beton serta tulangan, beserta penetapan beban mati dan beban hidup, seluruhnya mengikuti ketentuan standar rujukan, yakni SNI 1727:2020 untuk pembebanan dan SNI 2847:2019 untuk struktur beton bertulang.
2. Studi ini berfokus pada model struktur tunggal sebuah gedung apartemen 23 lantai yang digunakan untuk hunian. Sistem struktur ini menggunakan konfigurasi sistem ganda, di mana sistem Rangka Pemikul Momen Khusus (SPRMK) dikombinasikan dengan sistem Dinding Geser (SW) sebagai elemen

penopang lateral. Dimensi balok, kolom, dan dinding geser, mutu beton dan material tulangan, serta penentuan beban mati dan beban hidup, semuanya mengikuti ketentuan standar acuan, yaitu SNI 1727:2020 untuk pembebanan dan SNI 2847:2019 untuk struktur beton bertulang.

3. Jenis analisis yang digunakan dalam studi ini adalah analisis spektrum respons linier (LSA), sebagaimana disyaratkan oleh SNI 1726:2019 pasal 7.9. Analisis riwayat waktu nonlinear tidak termasuk dalam cakupan studi. Prosedur analisis diterapkan dalam kerangka kerja linear-elastis, dengan asumsi bahwa perilaku struktur tetap berada dalam domain elastis selama gempa.
4. Seleksi Reakaman Gempa Bumi Sebanyak 35 rekaman gempa bumi dipilih dan dikelompokkan menjadi dua kelompok utama :
 - a. Kelompok medan jauh (20 rekaman): Rekaman yang berasal dari kejadian gempa bumi dengan hiposenter lebih dari 60 km dari instrumen perekaman dan tidak menunjukkan karakteristik pulsa dekat patahan yang signifikan.
 - b. Kelompok medan dekat (15 rekaman): Rekaman yang diperoleh dari gempa bumi dengan hiposenter <60 km, yang berpotensi mengandung pulsa kecepatan dan efek direktivitas.

Proses seleksi mempertimbangkan kesesuaian mekanisme sumber terutama konfigurasi patahan dorong yang terkait dengan sistem subduksi dan rentang magnitudo spesifik (M_w 6,0-8,0 untuk medan jauh dan M_w 6,0-7,5 untuk medan dekat). Selain itu, kesesuaian dengan kondisi tanah berdasarkan kelas lokasi dan kelengkapan komponen horizontal setiap rekaman juga dipertimbangkan.

Semua data yang terekam kemudian dikenakan prosedur penskalaan amplitudo sehingga spektrum respon rata-rata sesuai dengan spektrum desain SNI 1726:2019 pada interval periode $0,2T$ hingga $1,5T$, dengan T mewakili periode fundamental struktur.

5. Fokus analisis respons mencakup evaluasi berbagai parameter kunci, termasuk periode getaran alami fundamental struktur dan mode dominannya selanjutnya, gaya geser dasar total digunakan sebagai indikator penting dalam menilai respons gaya internal. Rasio simpangan antar lantai maksimum dan

distribusinya di sepanjang elevasi bangunan dianalisis untuk menilai perilaku deformasi. Perpindahan lateral di puncak struktur juga diperiksa sebagai ukuran respon global. Lebih lanjut, percepatan lantai pada beberapa tingkat representatif diamati untuk menggambarkan intensitas percepatan internal selama eksitasi gempa. Studi ini mencakup analisis komparatif yang secara eksplisit membandingkan parameter respons struktural dari dua kelompok rekaman gempa bumi.

a. Parameter evaluasi tambahan meliputi:

1. Rasio Geser Dasar: Rasio gaya geser dasar yang diperoleh dari perhitungan dinamis terhadap gaya geser dasar yang diperoleh dari prosedur statis ekuivalen.
2. Pola distribusi geser tingkat.
3. Perbandingan nilai maksimum: Pemeriksaan nilai puncak setiap parameter pada kedua kategori rekaman.
4. Koefisien variasi: Indikator untuk menilai variasi atau distribusi respons dalam setiap kelompok rekaman.

b. Analisis Statistik deskriptif: Meliputi perhitungan, median, dan standar deviasi sebagai dasar untuk membandingkan respons rekaman medan dekat dan medan jauh.

6. Proses pemodelan dan analisis struktur dilakukan dalam tiga dimensi (3D) menggunakan perangkat lunak ETABS. Setiap elemen struktur dimodelkan sebagai elemen linear, dengan balok dan kolom direpresentasikan sebagai elemen rangka, sementara dinding geser dimodelkan menggunakan elemen cangkang. Aspek interaksi tanah struktur tidak dipertimbangkan dalam pemodelan. Struktur diasumsikan berperilaku sebagai pondasi yang terpasang sempurna pada tingkat pondasi.

7. Batasan-batasan pada penelitian ini sebagai berikut:

- a. Studi ini tidak menguji kapasitas dan keuletan struktur melalui pendekatan nonlinier, dan tidak menyertakan analisis tingkat kerusakan yang mungkin terjadi pada elemen struktural.
- b. Pengaruh bangunan di sekitar objek penelitian dan kompleksitas fenomena interaksi tanah struktur (SSI) tidak termasuk dalam cakupan analisis.

- c. Beban angin dan kombinasi beban lain di luar kombinasi dengan beban gempa bumi bukanlah fokus utama pembahasan, meskipun keduanya mungkin muncul sebagai bagian dari penjelasan desain.
 - d. Hasil yang disajikan bersifat komparatif dan bertujuan untuk menilai variasi respons karena beberapa masukan gempa bumi, bukan untuk menghasilkan desain akhir yang dapat langsung diimplementasikan tanpa analisis tambahan seperti evaluasi dinamis nonlinier.
 - e. Klasifikasi Medan Dekat/Jauh: Menentukan kategori rekaman berdasarkan jarak hiposenter (≤ 60 km sebagai medan dekat dan >60 km sebagai medan jauh) merupakan penyederhanaan. Aspek lain seperti keberadaan direktivitas maju dan langkah lemparan tidak dianggap sebagai parameter utama, meskipun keduanya diketahui memengaruhi respons struktural.
 - f. Analisis Linier: Kajian ini terbatas pada analisis respons spektral linier, sehingga respons inelastic termasuk kemungkinan pembentukan cerita lunak akibat karakteristik pulsa medan dekat tidak dapat terwakili secara memadai.
 - g. Interaksi Tanah Struktur: Variasi dalam amplifikasi tanah lokal dan pengaruh interaksi tanah struktur terhadap perbedaan konten frekuensi gempa bumi dekat dan jauh tidak dimodelkan dalam studi ini.
 - h. Konfigurasi Sistem Ganda: Studi ini menggunakan konfigurasi sistem ganda tunggal yang tetap dengan rasio kekakuan tertentu antara dinding geser dan rangka penahan momen, sehingga kesimpulan yang diperoleh tidak dapat digeneralisasi ke konfigurasi sistem ganda lainnya.
8. Analisis dimulai dengan pengembangan model pada struktur dan penerapan analisis modal untuk menentukan periode fundamental struktur. Kemudian, 35 rekaman gempa dipilih dan disejajarkan berdasarkan spektrum target yang ditentukan. Setiap rekaman kemudian dianalisis secara terpisah menggunakan metode spektrum respons. Hasil analisis kemudian diklasifikasikan ke dalam kelompok medan dekat dan medan jauh, dilanjutkan dengan analisis statistik dan perbandingan parameter respons kedua kelompok.
9. Evaluasi kinerja struktur mengacu pada persyaratan SNI 1726:2019 untuk analisis linier, khususnya ketentuan mengenai batas simpangan antar lantai

sebagai parameter penilaian utama.

1.5 Manfaat Penelitian

Penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi nyata baik secara akademis maupun praktis dengan mengembangkan metode analisis gempa yang lebih representative untuk kondisi spesifik Kota Medan, dimana hasilnya dapat langsung diaplikasikan oleh para praktisi dalam mendesain gedung bertingkat banyak yang lebih efisien dana man terhadap bahaya gempa.

1.6 Sistematika Penulisan

Adapun sistematika penulisan yang digunakan pada Tugas Akhir ini sebagai berikut:

BAB 1 PENDAHULUAN

Bab ini akan menguraikan penjelasan tentang latar belakang masalah, rumusan masalah, tujuan penelitian, ruang lingkup permasalahan, manfaat penelitian, sistematika penulisan.

BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA

Bab ini akan menguraikan penelitian-penelitian terdahulu yang berkaitan dengan perencanaan struktur bangunan atas gedung bertingkat banyak.

BAB 3 METODE PENELITIAN

Bab ini akan menampilkan bagaimana metode penelitian yang digunakan dari awal sampai akhir penelitian dan Metodologi akan membahas bagaimana memodelkan struktur dengan menggunakan program analisis struktur.

BAB 4 ANALISIS DAN PEMBAHASAN

Bab ini akan menyajikan penjelasan mengenai perhitungan, analisis pemodelan bentuk gambar, grafik atau tabel serta pembahasannya.

BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN

Bab ini akan menyajikan penjelasan mengenai kesimpulan yang dapat diambil dari keseluruhan penulisan Tugas Akhir ini dan saran-saran yang dapat diterima.

BAB 2

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitian Terdahulu

2.1.1 Pelitian Tentang SRPMK

Sebuah studi yang dilakukan oleh Silaban dkk. (2023) meneliti kinerja struktural sebuah gedung apartemen bertingkat tinggi, Rusun Pulo Jahe (24 lantai), yang dilengkapi dengan sistem dinding geser dan Sistem Peredam Momen Kaku (SPRMK). Melalui metode analisis spektrum respons dan riwayat waktu menurut standar SNI 1726:2019 menggunakan perangkat lunak ETABS v.17, ditemukan bahwa perpindahan lantai rata-rata pada lantai 4 hingga 12 pada arah X melebihi ambang batas pergeseran yang diizinkan. Selain itu, koefisien stabilitas P-Delta tidak memenuhi kriteria yang ditetapkan, yang disebabkan oleh kekakuan terbatas akibat penempatan dinding geser di sudut-sudut bangunan. Kondisi ini terjadi meskipun partisipasi massa mode telah mencapai 95,39% untuk arah X dan 93,15% untuk arah Y, yang keduanya telah melebihi nilai minimum 90%. Temuan ini menggarisbawahi masalah yang berkaitan dengan stabilitas lateral di daerah rawan aktivitas seismik di Jawa. Oleh karena itu, perancangan ulang kolom atau penambahan dinding geser direkomendasikan. Integrasi SPRMK berpotensi digunakan untuk mengurangi tingkat perpindahan, pergeseran, dan memastikan distribusi gaya geser yang lebih seragam.

2.1.2 Penelitian Tentang Sistem Ganda

Sebuah studi oleh Guci dkk. (2021) merancang struktur bangunan apartemen 11 lantai yang terletak di daerah Indonesia dengan aktivitas seismik tinggi. Desain ini menerapkan sistem ganda yang terdiri dari kombinasi rangka momen khusus dengan dinding geser beton bertulang. Pemodelan tiga dimensi dilakukan menggunakan perangkat lunak ETABS v16.2 untuk melakukan analisis statis dan dinamis sesuai dengan SNI 1726:2019 (ketahanan gempa) dan SNI

2847:2019 (persyaratan beton struktural). Bangunan ini memiliki denah lantai asimetris dengan bentang kolom berkisar antara 3 hingga 7 meter, menggunakan beton dengan kualitas $f'c$ 30-35 MPa, dan tulangan baja dengan kualitas f_y 400-420 MPa.

Analisis ini mencakup validasi mode getaran (resonansi frekuensi alami lebih rendah dari periode Rayleigh), kontribusi massa modal minimum 90%, perbandingan respons seismik statis dan dinamis (parameter percepatan $SS/S1$, faktor R/I_e , kategori desain D), defleksi antar lantai tidak melebihi 0,4% dari tinggi lantai (4 per mil), dan analisis efek P-Delta. Beban aksial pada kolom P_u sebesar 1853,5 kN, yang lebih kecil dari batas aman 2240 kN ($A_g f'c/10$), telah memenuhi persyaratan SRPMK. Selain itu, rasio kekuatan momen lentur balok-pelat ($\alpha_m=4,46$) menentukan ketebalan pelat 200 mm dengan menggunakan tulangan D13 yang dipasang pada jarak 150 mm untuk kedua arah.

Balok utama dengan dimensi 500x300 mm dirancang untuk menahan gaya geser V_u , dilengkapi dengan konfigurasi tulangan lentur untuk pelat bawah 3D16 dan pelat atas 2D16, serta sengkang D13@100 mm (memenuhi kriteria $V_s > \phi V_n$). Sementara itu, kolom persegi dengan dimensi 800x800 mm diterapkan dengan 22 batang tulangan utama D18 dan sengkang D13@100 mm, yang dirancang untuk menahan kombinasi beban aksial dan lentur yang dominan. Penerapan kombinasi beban $1,2D+1,0E+0,5L$ bertujuan untuk memastikan stabilitas lateral pada titik pertemuan lempeng Indo-Australia dan Eurasia-Pasifik.

Sistem struktur ganda ini mengoptimalkan fungsionalitas bangunan tinggi karena mekanisme distribusi redundan untuk gaya geser dasar (V), serta kemampuannya untuk mengurangi efek pergeseran torsi yang timbul dari asimetri denah lantai. Lebih lanjut, sistem ini memenuhi standar detail yang ditetapkan dalam SNI, termasuk ketentuan mengenai jarak sengkang minimum dan kontinuitas sambungan tulangan. Namun, tantangan signifikan yang dihadapi adalah sinkronisasi penempatan dinding geser pada perimeter bangunan untuk mencegah fenomena pemisahan lantai (lantai lunak).

2.1.3 Penelitian Tentang Dinding Geser

Sebuah studi yang dilakukan oleh Hendra, Zulkarnaen, dan rekan-rekan (2021) menyajikan analisis mendalam tentang struktur Hotel Lidra, sebuah bangunan 17 lantai (dengan tinggi 67 meter) yang terletak di pantai Samudera Indah, Sungai Raya Kepulauan, Bengkayang, Kalimantan Barat. Daerah ini, meskipun diklasifikasikan sebagai zona seismik rendah menurut Peta Gempa Indonesia 2017, memiliki kerentanan yang signifikan karena kedekatannya dengan pertemuan lempeng tektonik Indo-Australia, Eurasia, dan Pasifik. Bangunan ini memiliki kelas tanah SD, yang menunjukkan kondisi tanah sedang berdasarkan hasil Uji Penetrasi Standar hingga kedalaman 24 meter, dan termasuk dalam Kategori Desain Seismik (KDS) D. Penerapan metode sistem ganda diadopsi, yang menggabungkan Sistem Rangka Tahan Momen Khusus (SRPMK) dengan prinsip "kolom kuat-balok lemah" untuk meredam energi gempa melalui deformasi plastis pada sambungan balok-kolom. Pendekatan ini dilengkapi dengan dinding geser beton bertulang yang memiliki ketebalan seragam 300 mm dan konfigurasi berbentuk I, dengan tulangan vertikal dan horizontal 2D13@100 mm. Dinding geser ini dirancang untuk menahan minimal 75% gaya geser lateral dasar, sesuai dengan ketentuan Pasal 3.51.3 dalam SNI 1726:2019. Dalam hal ini, rangka momen dibebani minimal 25% untuk tujuan redundansi struktural. Analisis dilakukan menggunakan pemodelan geometris tiga dimensi dengan perangkat lunak ETABS. Kualitas beton yang digunakan adalah f'_c 40 MPa, sedangkan tulangan baja memiliki kualitas f_y 420 MPa (BJ37 untuk rangka utama dan BJ41 untuk pelat penghubung). Analisis respons spektrum, dengan parameter berikut: $SS=1,4970$ g, $S1=0,5971$ g, $SDS=1,00$ g, $SD1=0,68$ g, serta faktor skala gempa $(g \times I)/R_a=1401,43$ mm/s² dan koefisien modifikasi respons $R_a=7$ berdasarkan Tabel 12 SNI 1726:2019, juga diterapkan. Kombinasi beban yang dihitung adalah 1,2D+1,0E+0,5L sesuai dengan SNI 1727:2020 dan PPPURG 1987.

Desain komponen struktural melibatkan sistem atap baja yang terdiri dari rangka dan pilar IWF dengan dimensi 148×100×6×9 mm. Balok penopang menggunakan profil CNP 150×50×20×3,2 mm dengan jarak 1 meter, tulangan tahan angin dengan diameter Ø8 mm, dan dihubungkan menggunakan baut M20×4 sesuai standar SNI 1729:2020. Pelat lantai, ketebalan tangga, dan bordes memiliki

ketebalan 130 mm dengan tulangan utama D13@80-240 mm (yang bervariasi antar lantai untuk momen positif/negatif) dan tulangan penyusutan Ø8@200 mm sesuai SNI 2847:2019. Balok utama SRPMK berukuran 350×700 mm dengan tulangan utama 10D25 pada tumpuan dan 9D25 di lapangan, serta sengkang 4D10@40-70 mm, dan tulangan torsi 2D13. Balok sub berukuran 300×600 mm dilengkapi dengan tulangan utama 10D22 dan sengkang 4D10@90-100 mm. Pilar berbentuk persegi panjang bervariasi: K1 berukuran 1200×600 mm dengan tulangan memanjang 44D29, tulangan melintang 8D10@100-150 mm, dan panjang lentur (l_o) 1200 mm; K2 berukuran 800×800 mm dengan tulangan 40D25 dan $l_o=800$ mm; K3 berukuran 1000×500 mm dengan tulangan 44D29 dan $l_o=1000$ mm; K4 berukuran 700×700 mm dengan tulangan 40D25 dan $l_o=700$ mm. Sambungan balok-pilar pada semua tipe pilar menggunakan tulangan 4D13@70 mm. Sistem fondasi terdiri dari tiang pancang putar variabel P1 (dengan 9 tiang pancang Ø600 mm) yang terhubung ke kepala tiang pancang berukuran 3600×3600×700 mm, dengan tulangan fondasi Ø25@100 mm.

2.2 Teori Dasar

2.2.1 Pengertian Gempa Bumi

Gempa bumi didefinisikan sebagai fenomena getaran tanah akibat pelepasan energi secara tiba-tiba dari litosfer, biasanya terkait dengan aktivitas pergeseran lempeng tektonik di zona patahan atau subduksi. Energi yang dilepaskan menyebabkan deformasi di episentrum dan menghasilkan gelombang seismik yang merambat ke permukaan, menyebabkan getaran tanah. Dari perspektif rekayasa struktur, peristiwa ini diperlakukan sebagai beban dinamis yang menginduksi gaya inersia pada massa bangunan, sehingga studi karakteristik gempa bumi menjadi komponen penting dalam proses desain bangunan tahan gempa.

2.2.2 Mekanisme Pembangkitan Gelombang Seismik

Gelombang seismik dihasilkan ketika tekanan pada massa batuan melebihi kapasitas elastisnya, memicu patahan atau pergeseran tiba-tiba yang melepaskan

energi dalam bentuk gelombang elastis. Energi ini kemudian merambat melalui tanah dan batuan sebagai gelombang badan dan gelombang permukaan. Gelombang badan terdiri dari gelombang P (primer/kompresional) dan gelombang S (geser), sementara gelombang permukaan Love dan Rayleigh terbentuk melalui refleksi dan interferensi pada lapisan permukaan dan seringkali menghasilkan amplitudo getaran yang lebih besar di permukaan tanah. Sifat perambatan gelombang, seperti amplitudo, kecepatan, dan frekuensi, ditentukan oleh karakteristik medium (misalnya, densitas dan modulus elastisitas) serta kedalaman dan mekanisme sumber gempa.

2.2.3 Parameter Kegempaan (PGA, PGV, Magnitude, Intensitas)

Dalam studi rekayasa gempa, parameter seperti Percepatan Tanah Puncak (PGA), Kecepatan Tanah Puncak (PGV), magnitudo gempa misalnya, dinyatakan melalui magnitudo momen dan intensitas, yang mencerminkan tingkat dampak kerusakan pada permukaan, merupakan indikator penting untuk menggambarkan karakteristik gempa dan potensi destruktifnya terhadap struktur. PGA umumnya digunakan sebagai dasar penentuan gaya gempa karena berkaitan langsung dengan percepatan tanah dan magnitudo gaya inersia yang bekerja pada massa struktur. Lebih lanjut, nilai PGV dan perpindahan tanah berperan dalam mengkaji respons dinamis jangka panjang, terutama untuk elemen struktur yang sensitif terhadap deformasi. Magitudo dan intensitas juga menjadi acuan utama dalam analisis bahaya seismik jangka panjang dan pengembangan langkah-langkah mitigasi yang tepat.

2.2.4 Gelombang Seismik (Gelombang P,S, Love, Rayleigh)

Secara umum, gelombang seismik diklasifikasikan menjadi dua kelompok utama: gelombang badan dan gelombang permukaan. Gelombang badan meliputi gelombang P, gelombang longitudinal dengan kecepatan rambat tertinggi dan sinyal pertama yang terekam oleh seismograf dan gelombang S, yang merupakan gelombang geser dan merambat lebih lambat tetapi memiliki potensi kerusakan

yang signifikan karena gerakan lateral yang ditimbulkannya. Sementara itu, gelombang permukaan, seperti gelombang Love dan Rayleigh, merambat di sepanjang permukaan bumi dan umumnya menunjukkan amplitudo yang besar serta durasi getaran yang lebih lama, sehingga seringkali mendominasi kontribusi terhadap kerusakan struktural, terutama pada bangunan bertingkat rendah hingga menengah. Memahami klasifikasi dan perilaku gelombang ini sangat penting karena memengaruhi bentuk beban gempa yang bekerja pada struktur, termasuk arah, durasi, rentang frekuensi, dan potensi amplifikasi getaran oleh kondisi tanah.

2.2.5 Wilayah Seismik Indonesia dan Karakteristik Patahan Sumatera

Secara geologis, Indonesia terletak di zona interaksi tiga lempeng tektonik utama Indo-Australia, Eurasia, dan Pasifik yang menjadikannya wilayah dengan aktivitas seismik yang intens dan kerentanan tinggi terhadap gempa bumi tektonik. Di Pulau Sumatera, pengaruh subduksi di sisi barat dan keberadaan sistem patahan aktif seperti Sesar Besar Sumatera telah mengakibatkan serangkaian gempa bumi besar yang berulang. Konfigurasi tektonik ini menyebabkan wilayah Sumatera, termasuk bagian utara seperti Medan, memiliki tingkat bahaya seismik yang relatif tinggi. Oleh karena itu, perencanaan bangunan di wilayah ini harus mengacu pada peta bahaya gempa bumi, parameter percepatan tanah, dan karakteristik spektrum respons yang ditetapkan dalam standar nasional untuk memastikan ketahanan seismik struktur yang memadai.

2.2.6 Klasifikasi Kegempaan Sesuai SNI 1726:2019

SNI 1726:2019 menetapkan ketentuan utama mengenai perencanaan ketahanan gempa di Indonesia, termasuk pembagian zona seismik, penentuan kategori desain, penerapan faktor prioritas struktur, dan perumusan spektrum respons desain berdasarkan parameter percepatan puncak (S_s), percepatan pada periode 1 detik (S_1), dan klasifikasi jenis tanah. Spektrum respons ini menjadi dasar perhitungan untuk analisis gaya lateral ekuivalen dan analisis spektrum respons. Lebih lanjut, SNI mewajibkan struktur dengan kategori risiko tinggi atau fungsi

esensial untuk mengakomodasi faktor prioritas (I_e) dan potensi amplifikasi tanah lokal dalam menentukan gaya seismik desain guna memastikan tingkat keamanan yang memadai.

2.2.7 Bahaya Gempa di Kota Medan

Karakteristik geologis dan posisi tektonik wilayah Medan menempatkan kota ini di zona dengan potensi seismik yang signifikan. Keberadaan sistem patahan di Sumatera dan ketidakpastian sumber gempa subduksi mengharuskan perancangan bangunan tinggi di Medan untuk mempertimbangkan percepatan gempa rencana dan kondisi tanah setempat, terutama di mana lapisan tanah lunak atau endapan aluvial dapat memperkuat gerakan tanah. Oleh karena itu, analisis respons struktural yang dikalibrasi berdasarkan spektrum regional dan diimplementasikan sesuai dengan Standar Nasional Indonesia (SNI) sangat penting untuk memastikan keamanan dan keberlanjutan bangunan di wilayah ini.

2.3 Analisis Respon Struktur terhadap Gempa

2.3.1 Teori Dinamika Struktur: SDOF dan MDOF

Gempa yang dianggap sebagai percepatan dasar ($\ddot{u}_g(t)$) yang menjadikan gaya inersia pada massa struktur. Pada model sederhana mode satu derajat kebebasan (SDOF), persamaan gerak dinamis linier yaitu:

$$m\ddot{x}(t) + C\dot{x}(t) + Kx(t) = -m\ddot{u}_g(t) \quad (2.1)$$

dimana m adalah massa, c koefisien redaman viskos, k kekakuan struktur, dan $x(t)$ perpindahan relative terhadap tanah. Pendekatan ini berdasarkan banyaknya teori mengenai respons seismik linier dan analisis spectrum. Pada struktur bertingkat tinggi, model yang lebih realistis menggunakan system multi yang derajat kebebasan (MDOF), yang dinyatakan dalam persamaan matriks:

$$M\ddot{x} + C\dot{x} + Kx = -M \cdot 1 \ddot{u}_g(t) \quad (2.2)$$

Modal Analisis terhadap system SDOF menghasilkan periode alami, mode shapes, dan Kontribusi massa riap mode yang penting untuk analisis dinamis struktur terhadap gempa.

2.3.2 Respon Struktur Akibat Beban Dinamis

Periode alami T dari sistem SDOF dihitung dengan rumus:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}} \quad (2.3)$$

Sementara frekuensi $f = 1/T$. Pada struktur yang memiliki kekakuan rendah, periode getarnya cenderung lebih panjang, sehingga peluang terjadinya resonansi dengan komponen frekuensi getaran gempa menjadi lebih besar. Besarnya redaman (damping ratio) akan membatasi atau memperbesar amplitudo respons dinamis yang muncul. Sementara itu, bentuk modus getar (mode shapes) menggambarkan pola deformasi antarlantai, yang berperan penting dalam menilai distribusi gaya serta besaran simpangan relatif pada bangunan bertingkat.

2.3.3 Analisis Respons Spektrum

Metode Spektrum respons menggunakan spectrum percepatan sebagai input utama untuk menentukan gaya seismic ekuivalen pada suatu struktur. Spektrum ini dibangun dengan mempertimbangkan nilai percepatan seismik desain (S_s dan S_1), klasifikasi tanah, dan factor prioritas. Setelah analisis modal dilakukan, kontribusi setiap moda digabungkan menggunakan metode kombinasi modal biasanya SRSS atau CQC untuk mendapatkan respons internal yang mewakili kondisi desain. Metode ini dianggap cukup adaptif dan efektif untuk digunakan pada tahap desain awal, baik pada sistem yang berperilaku elastis maupun linear maupun pada struktur dengan tingkat inelastisitas rendah. Dalam konteks nasional, pendekatan ini merupakan prosedur standar yang direkomendasikan oleh SNI 1726:2019 untuk desain struktur.

2.3.4 Parameter Respon Struktur yang Dianalisis

Parameter utama yang dihasilkan dari analisis respons struktural meliputi geser dasar, yaitu gaya geser total pada fondasi sebagai respons terhadap beban gempa dan berfungsi sebagai dasar perancangan elemen vertikal. Perpindahan lateral maksimum memberikan gambaran umum deformasi global struktur, sementara simpangan antar lantai menunjukkan perbedaan perpindahan antar lantai, yang krusial untuk menilai potensi kerusakan struktural dan non-struktural. Lebih lanjut, percepatan lantai juga dipertimbangkan karena memengaruhi kenyamanan penghuni dan integritas elemen non-struktural. Keempat parameter ini berfungsi sebagai dasar untuk menilai apakah suatu desain struktural memenuhi persyaratan keselamatan, kapasitas daktilitas, dan kriteria kinerja gempa.

2.4 Sistem Struktur Bangunan Gedung

2.4.1 Sistem Rangka Pemikul Momen (Moment Resisting Frame – MRF)

Rangka Pemikul Momen (RPM) adalah sistem struktur yang terdiri dari rangka balok-kolom yang dirancang untuk menahan momen lentur akibat beban lateral. Sistem ini memberikan daktilitas tinggi ditandai dengan kemampuan struktur untuk menahan deformasi plastis sebelum runtuh dan fleksibilitas dalam tata letak arsitektur. Namun, kekakuan lateral RMP relatif terbatas, sehingga mengakibatkan peningkatan simpangan dan perpindahan antar lantai. Oleh karena itu, detail sambungan dan tulangan pada elemen balok dan kolom harus dirancang untuk menahan momen dan deformasi yang terjadi selama gempa.

2.4.2 Sistem Dinding Geser (Shear Wall)

Dinding geser didefinisikan sebagai elemen vertikal yang terbuat dari beton atau beton bertulang yang memiliki kekakuan sangat tinggi terhadap beban lateral. Fungsi utamanya adalah menahan gaya geser dan momen lateral, yang pada gilirannya secara signifikan mengurangi perpindahan horizontal dan pergeseran antar lantai bangunan. Tingkat kekakuan yang tinggi ini menjadikan dinding geser pilihan ideal untuk struktur bertingkat, terutama ketika kontrol deformasi lateral

dan stabilitas torsional diperlukan. Namun, penggunaan dinding geser dapat membatasi fleksibilitas desain arsitektur dan tata ruang di dalam bangunan.

2.4.3 Sistem Ganda (Dual Sistem: Shear Wall + MRF)

Untuk memanfaatkan kedua sistem tersebut, banyak gedung tinggi saat ini menggunakan sistem struktur ganda yang menggabungkan dinding geser dan rangka penahan momen (MRF). Dalam konfigurasi ini, dinding geser memberikan kekakuan lateral yang signifikan untuk menahan gaya seismik, sementara MRF memberikan daktilitas dan redundansi yang diperlukan. Standar desain seismik (SNI) menetapkan bahwa peran MRF dalam ketahanan lateral harus dipertimbangkan termasuk ketentuan mengenai proporsi minimum gaya lateral yang harus ditopang oleh MRF agar bangunan tetap mampu menahan deformasi inelastis terkendali dan menyediakan jalur beban alternatif jika terjadi kerusakan dinding geser lokal. Penggunaan sistem ganda juga memungkinkan distribusi gaya lateral yang lebih seimbang, mengurangi potensi konsentrasi tegangan, dan memberikan kombinasi kekakuan-daktilitas yang optimal untuk bangunan tinggi.

2.5 Standar dan Peraturan Terkait

2.5.1 SNI 1726:2019 tentang Tata Cara Perencanaan Ketahanan Gempa

Perancangan struktur tahan gempa di Indonesia dilakukan dengan mengacu pada SNI 1726, yang memuat peta percepatan gempa, spektrum respons desain, klasifikasi tanah, dan prosedur analisis gempa, termasuk metode gaya lateral ekuivalen, spektrum respons, dan analisis riwayat respons. Standar ini menyelaraskan praktik internasional, seperti yang diterapkan oleh ASCE atau IBC, dengan kondisi geologi dan seismik di Indonesia. Penerapan SNI bertujuan untuk memastikan perancangan struktur sesuai dengan kondisi gempa aktual dan karakteristik tanah di lokasi konstruksi.

2.5.2 SNI 2847:2019 tentang Struktur Beton Bertulang

Untuk struktur beton bertulang, SNI 2847:2019 berfungsi sebagai pedoman untuk perincian tulangan, panjang angkur, tulangan sendi plastis, dan kriteria

daktilitas, untuk memastikan struktur dapat menahan beban gempa tanpa mengalami kegagalan getas. Di lapangan, perangkat lunak analisis struktur seperti ETABS dan SAP2000 banyak digunakan untuk pemodelan 3D, analisis modal, dan perhitungan spektrum respons sesuai dengan standar. Pendekatan ini memungkinkan evaluasi periode alami, mode getaran, gaya dalam, simpangan, dan parameter struktur lainnya secara efisien serta mendukung penerapan berbagai konfigurasi sistem.

2.5.3 Pedoman Analisis Struktur

Pendekatan pemodelan tiga dimensi digunakan untuk merepresentasikan bangunan bertingkat secara keseluruhan, termasuk balok, kolom, pelat lantai, dinding geser, dan interaksi antar elemen. Pemodelan 3D ini memungkinkan evaluasi akurat distribusi kekakuan, massa, dan gaya internal, sekaligus menunjukkan efek torsi, redaman, dan partisipasi berbagai mode getaran yang tidak dapat dianalisis dengan model dua dimensi sederhana.

2.6 Model Struktur Pada Bangunan Bertingkat

2.6.1 Pemodelan Struktur 3D

Dalam pemodelan struktural, perlu ditetapkan asumsi-asumsi mengenai sifat material, seperti kuat tekan beton (f_c'), modulus elastisitas, dan redaman, beserta kondisi batas struktural, misalnya, dengan asumsi pondasi tetap atau tanah elastis ideal. Beban seismik dan gravitasi juga harus dimasukkan dalam model. Asumsi-asumsi ini harus konsisten dengan standar desain yang berlaku dan mempertimbangkan karakteristik lokal, termasuk jenis tanah, beban hidup, dan tinggi bangunan.

2.6.2 Asumsi Pemodelan

Dalam pemodelan struktural, perlu ditetapkan asumsi-asumsi mengenai sifat material, seperti kuat tekan beton (f_c'), modulus elastisitas, dan redaman, beserta kondisi batas struktural, misalnya, dengan asumsi pondasi tetap atau tanah elastis ideal. Beban seismik dan gravitasi juga harus dimasukkan dalam model.

Asumsi-asumsi ini harus konsisten dengan standar desain yang berlaku dan mempertimbangkan karakteristik lokal, termasuk jenis tanah, beban hidup, dan tinggi bangunan.

2.6.3 Pengidealan Massa dan Kekakuan

Dalam proses idealisasi model, massa bangunan biasanya didistribusikan di setiap lantai sebagai massa terkonsentrasi, sementara kekakuan elemen dihitung berdasarkan sifat penampang kolom, dinding, dan balok. Perhitungan kekakuan ini menentukan periode alami struktur dan memengaruhi kontribusi mode dalam analisis dinamis.

2.6.4 Mode Shape dan Partisipasi Massa

Proses analisis modal bertujuan untuk menentukan bentuk moda dan jumlah partisipasi massa pada setiap moda. Dalam penerapan analisis spektrum respons, partisipasi massa kumulatif pada arah horizontal (X atau Y) harus memenuhi ambang batas minimum, biasanya $\geq 90\%$, agar respons gempa dapat terefleksikan secara akurat. Setelah itu, perhitungan gaya dalam, simpangan antar lantai, dan perpindahan dilakukan melalui superposisi modal menggunakan prosedur kombinasi modal.

2.7 Kerangka Pemikiran

2.7.1 Hubungan Antara Getaran Gempa Dengan Respons Struktur

Percepatan tanah yang dihasilkan oleh getaran gempa bumi menginduksi gaya inersia pada massa bangunan, yang selanjutnya menyebabkan deformasi lateral, pergeseran antar lantai, serta gaya momen dan geser pada elemen struktur. Besarnya respons struktur dipengaruhi oleh sifat gempa bumi (percepatan, durasi, dan spektrum frekuensi), tata letak dan kekakuan struktur, distribusi massa, redaman, dan karakteristik tanah di lokasi bangunan.

2.7.2 Pengaruh Sistem Ganda Terhadap Performa Struktur

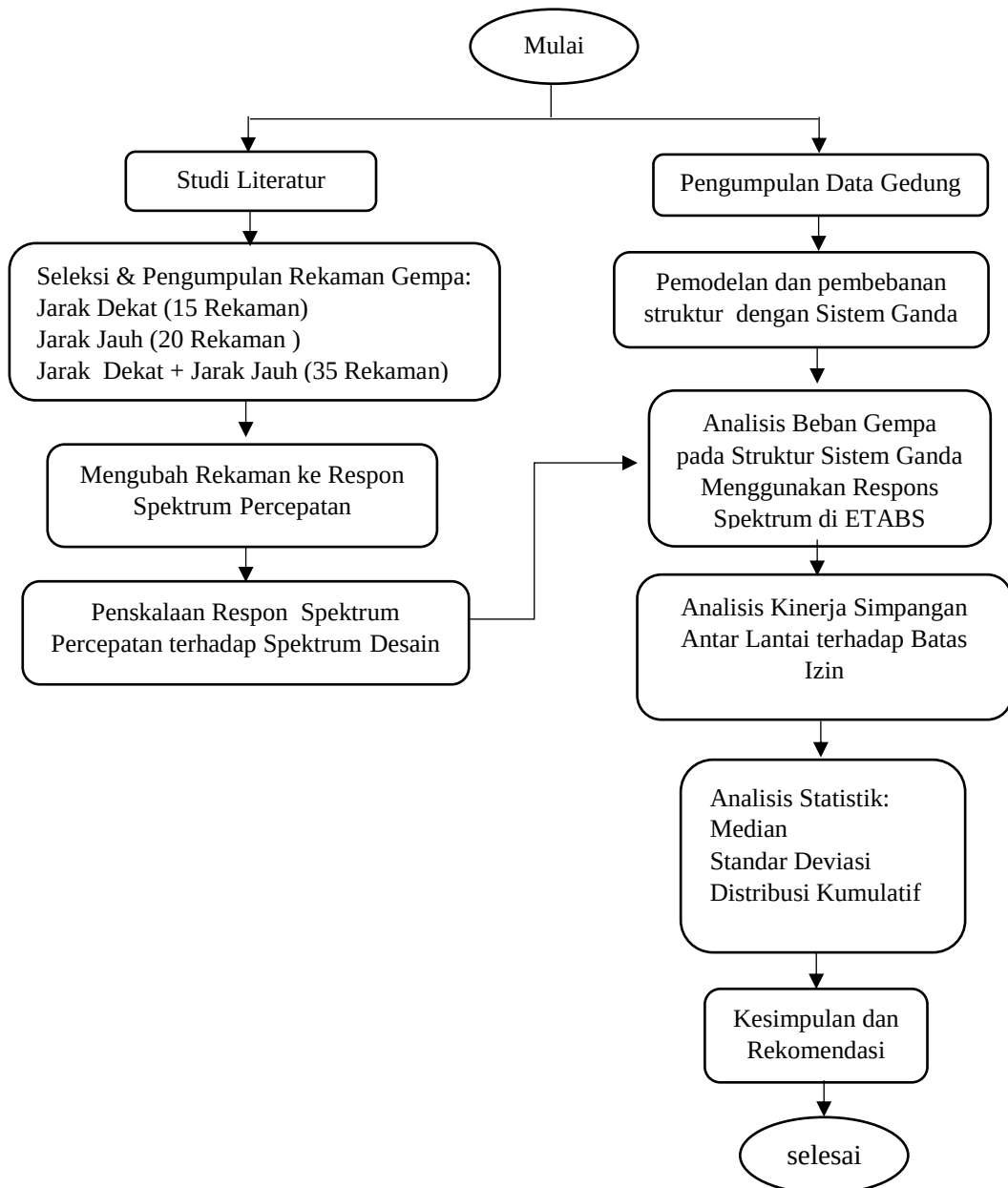
Dengan memanfaatkan sistem ganda yang terdiri dari dinding geser dan MRF, struktur bangunan tinggi dapat mengintegrasikan kekakuan lateral dinding geser yang tinggi dengan daktilitas dan redundansi MRF. Pendekatan ini memungkinkan drift dan perpindahan lateral yang terkendali, sekaligus menyediakan kapasitas deformasi inelastis yang terkendali dalam kondisi gempa ekstrem. Oleh karena itu, sistem ganda ini dianggap sebagai pilihan efektif untuk bangunan tinggi di daerah rawan gempa seperti Medan, karena mampu menyeimbangkan kekakuan, kekuatan, dan fleksibilitas struktur.

BAB 3

METODE PENELITIAN

3.1 Umum

Uraian metode pekerjaan Tugas akhir dilakukan dengan tahapan-tahapan berikut:



Gambar 3. 1 Diagram Alir Metode Penelitian

3.2 Metode Pengerjaan Tugas Akhir

Dari Diagram alir yang telah ada di atas dapat dijelaskan metode pekerjaan yang akan di gunakan dalam menyusun tugas akhir ini.

3.2.1 Literatur Studi Dan Pengumpulan Data

Tinjauan pustaka bertujuan memperoleh landasan teoretis mengenai getaran gempa, karakteristik sistem struktur ganda, metode analisis linier, serta aplikasi ETABS untuk beban gempa. Kajian meliputi studi terdahulu tentang kinerja sistem ganda, komparasi rangka momen dan dinding geser, serta pengaruh konfigurasi dinding geser terhadap respons seismik, dengan mengacu pada SNI 1726:2019, SNI 1727:2020, dan SNI 2847:2019. Fokus diarahkan pada respons apartemen di Medan (zona seismik aktif), mencakup perbedaan karakteristik gempa jarak dekat dan jauh. Dari tinjauan ini diidentifikasi kesenjangan penelitian, yaitu terbatasnya analisis statistik respons sistem ganda di Medan, yang menjadi dasar teoretis bagi pemodelan dan analisis lanjutan.

Data struktur atas dikumpulkan dari gedung apartemen 23 lantai di Medan, meliputi parameter geometrik (tinggi total, luas lantai, konfigurasi kolom, balok, pelat, dan dinding geser) serta spesifikasi material (beton $f_c'=40$ MPa dan baja $f_y=400$ MPa) dari dokumen teknis. Informasi sistem ganda kombinasi rangka pemikul momen dan dinding geser sebagai penahan lateral diperoleh dari gambar dan spesifikasi struktur. Data tersebut menjadi dasar pemodelan 3D di ETABS v18, merepresentasikan kondisi aktual dengan pembebanan mati dan hidup sesuai fungsi hunian, serta asumsi perilaku linier.

3.2.1.1 Data Umum Bangunan

Data bangunan yang akan digunakan sebagai acuan perencanaan ini adalah sebagai berikut:

Fungsi	: Apartemen
Lokasi	: Kota Medan
Jumlah Lantai	: 23
Struktur utama	: Struktur Beton Bertulang

3.2.1.2 Menentukan Material Struktur

Material yang digunakan dalam perencanaan struktur atas bangunan Apartemen The Bliss adalah sebagai berikut:

a. Beton

Tabel 3. 1: Kuat Tekan Beton Yang Direncanakan Pada Balok.

Lantai	Fc' Beton
Base	40 Mpa
1-10	40 Mpa
11-23	40 Mpa

Tabel 3. 2: Kuat Tekan Beton Yang Direncanakan Pada Kolom.

Lantai	Fc' Beton
Base	40 Mpa
1-10	40 Mpa
11-23	40 Mpa

b. Baja Tulangan

Tulangan utama (BJTS -420B):

Tegangan leleh minimum (F_y) : 420 Mpa.

Tegangan putus minimum (F_n) : 545 Mpa.

Tulangan sengkang (BJTS – 280):

Tegangan leleh minimum (F_y) : 280 Mpa.

Tegangan putus minimum (F_n) : 350 Mpa.

3.2.1.3 Menentukan Penampang Rencana Balok, Kolom dan Pelat lantai

Dimensi penampang yang direncanakan untuk struktur atas gedung apartemen The Bliss adalah sebagai berikut:

a. Kolom

Tabel 3. 3 Dimensi Rencana Kolom

Penamaan Kolom	Lantai	Dimensi Kolom (m)
K1	Mezzanine	1.3x1.6
	1	1.3x1.6
K2-1	2	1.2x1.3
K2	3	1x1.3
	4	1x1.3
	5	1x1.3
	6	1x1.3
	7	1x1.3
	8	1x1.3
	9	1x1.3
	10	1x1.3
K3	11	1x1.2
	12	1x1.2
	13	1x1.2
	14	1x1.2
	15	1x1.2
	16	1x1.2
	17	1x1.2
	18	1x1.2
	19	1x1.2
	20	1x1.2
	21	1x1.2
	22	1x1.2
	23	1x1.2

b. Balok

Tabel 3. 4: Dimensi Rencana Balok Lantai Mezzanine Sampai Lantai 22.

Lantai	Balok Utama B1 (m)	Balok Utama B2 (m)	Balok Utama B3 (m)	Balok Anak (BA) (m)
lt mezz	0.5x0.8	0.9x0.6	0.9x0.7	0.3x0.6
1	0.5x0.8	0.9x0.6	0.9x0.7	0.3x0.6
2	0.5x0.8	0.9x0.6	0.9x0.7	0.3x0.6
3	0.5x0.8	0.9x0.6	0.9x0.7	0.3x0.6
4	0.5x0.8	0.9x0.6	0.9x0.7	0.3x0.6
5	0.5x0.8	0.9x0.6	0.9x0.7	0.3x0.6
6	0.5x0.8	0.9x0.6	0.9x0.7	0.3x0.6

Tabel 3.4: *Lanjutan.*

Lantai	Balok Utama B1 (m)	Balok Utama B2 (m)	Balok Utama B3 (m)	Balok Anak (BA) (m)
7	0.5x0.8	0.9x0.6	0.9x0.7	0.3x0.6
8	0.5x0.8	0.9x0.6	0.9x0.7	0.3x0.6
9	0.5x0.8	0.9x0.6	0.9x0.7	0.3x0.6
10	0.5x0.8	0.9x0.6	0.9x0.7	0.3x0.6
11	0.5x 0.8	0.9x0.6	0.9x0.7	0.3x0.6
12	0.5x0.8	0.9x0.6	0.9x0.7	0.3x0.6
13	0.5x0.8	0.9x0.6	0.9x0.7	0.3x0.6
14	0.5x0.8	0.9x0.6	0.9x0.7	0.3x0.6
15	0.5x0.8	0.9x0.6	0.9x0.7	0.3x0.6
16	0.5x0.8	0.9x0.6	0.9x0.7	0.3x0.6
17	0.5x0.8	0.9x0.6	0.9x0.7	0.3x0.6
18	0.5x0.8	0.9x0.6	0.9x0.7	0.3x0.6
19	0.5x0.8	0.9x0.6	0.9x0.7	0.3x0.6
20	0.5x0.8	0.9x0.6	0.9x0.7	0.3x0.6
21	0.5x0.8	0.9x0.6	0.9x0.7	0.3x0.6
22	0.5x0.8	0.9x0.6	0.9x0.7	0.3x0.6
23	0.5x0.8	0.9x0.6	0.7x1	0.5x0.8

c. Pelat Lantai

Tabel 3. 5: Dimensi Rencana Pelat Lantai.

Lantai	Tebal Pelat (cm)
lt mezz	15
1	15
2	15
3	15
4	15
5	15
6	15
7	15
8	15
9	15
10	15
11	15
11	15
12	15
13	15
14	15

Tabel 3.5: *Lanjutan.*

Lantai	Tebal Pelat (cm)
15	15
16	15
17	15
18	15
19	15
20	15
21	15
22	15
23	15

d. Dinding Geser

Tebal rencana Dinding Geser:

TEBAL DINDING (Lantai mezz – Lantai 10) = 40 cm ($F_c' 30$)

TEBAL DINDING (Lantai 11 – Lantai 23) = 30 cm ($F_c' 30$)

3.2.2 Seleksi dan Pengumpulan Rekaman Gempa

Rekaman gempa bumi yang digunakan dalam penelitian ini dipilih dari basis data internasional yang kredibel, yaitu Pacific Earthquake Engineering Research Center (PEER). Rekaman dipilih berdasarkan kriteria teknis tertentu agar sesuai dengan kondisi seismik wilayah Kota Medan dan tujuan analisis. Rekaman gempa bumi yang dipilih memiliki rentang magnitudo antara 5,0 dan 8,0 untuk mewakili variasi tingkat energi gempa bumi yang berpotensi memengaruhi respons struktural bangunan tinggi.

Tabel 3. 6: Data Rekaman Gempa Dekat.

GROUND MOTION	Nama Gempa	Tahun	Nama Stasiun	Magnitude
1	Imperial Valley-06	1979	El Centro Array #3	6.53
2	Imperial Valley-07	1979	El Centro Array #3	5.01
3	Chi-Chi_ Taiwan	1999	CHY047	7.62

Tabel 3.6: *Lanjutan.*

GROUND MOTION	Nama Gempa	Tahun	Nama Stasiun	Magnitude
4	Whittier Narrows-02	1987	Carson - Water St	5.27
5	Tottori_ Japan	2000	SMN002	6.61
6	Tottori_ Japan	2000	TTR008	6.61
7	Parkfield-02_ CA	2004	Parkfield - Cholame 2WA	6.0
8	Niigata_ Japan	2004	NIG014	6.63
9	Chuetsu-oki_ Japan	2007	NIG013	6.8
10	Chuetsu-oki_ Japan	2007	NIG014	6.8
11	Chuetsu-oki_ Japan	2007	NIG025	6.8
12	Darfield_ New Zealand	2010	Christchurch Resthaven	7.0
13	Christchurch_ New Zealand	2011	Christchurch Resthaven	6.2
14	Whittier Narrows-01	1987	Carson - Water St	5.99
15	Iwate_ Japan	2008	MYG006	6.9

Tabel 3. 7: Data Rekaman Gempa Jauh.

GROUND MOTION	Nama Gempa	Tahun	Nama Stasiun	Magnitude
1	Coalinga-01	1983	Parkfield - Cholame 2WA	6.36
2	Morgan Hill	1984	Foster City - APEEL 1	6.19
3	Loma Prieta	1989	APEEL 2 - Redwood City	6.93

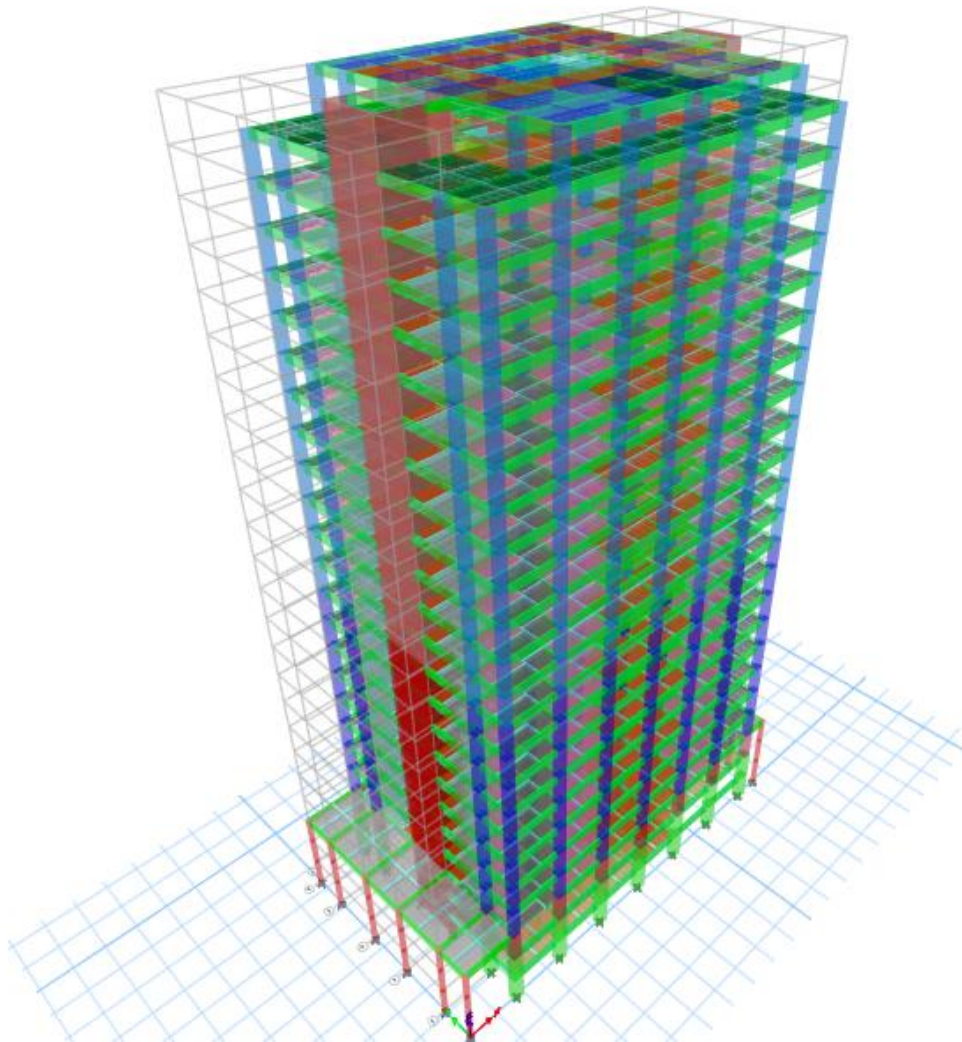
Tabel 3.7: *Lanjutan.*

GROUND MOTION	Nama Gempa	Tahun	Nama Stasiun	Magnitude
4	Loma Prieta	1989	Foster City - APEEL 1	6.93
5	Loma Prieta	1989	Foster City - Menhaden Court	6.93
6	Northridge-01	1994	Carson - Water St	6.69
7	Kocaeli_ Turkey	1999	Ambarli	7.51
8	Chi-Chi_ Taiwan	1999	CHY054	7.62
9	Chi-Chi_ Taiwan	1999	ILA004	7.62
10	Chi-Chi_ Taiwan	1999	KAU011	7.62
11	Chi-Chi_ Taiwan-04	1999	CHY054	6.2
12	Chi-Chi_ Taiwan-04	1999	CHY076	6.2
13	Chi-Chi_ Taiwan-04	1999	CHY078	6.2
14	Chi-Chi_ Taiwan-04	1999	KAU045	6.2
15	Tottori_ Japan	2000	TTR005	6.61
16	Niigata_ Japan	2004	FKS020	6.63
17	El Mayor-Cucapah_ Mexico	2010	El Centro Array #3	7.2
18	Tottori_ Japan	2000	HRS013	6.61
19	Tottori_ Japan	2000	HRS018	6.61
20	Tottori_ Japan	2000	KYT002	6.61

Kumpulan rekaman gempa ini diharapkan mampu memberikan gambaran yang lebih komprehensif mengenai perbedaan karakteristik getaran gempa jarak dekat dan gempa jarak jauh, serta pengaruhnya terhadap respons struktural gedung bertingkat dengan sistem ganda di Kota Medan.

3.2.3 Pemodelan dan Pembebanan Struktur Dengan Sistem Ganda

Pemodelan 3D struktur merupakan proses kompleks yang melibatkan serangkaian tahapan sistematis dalam menganalisis dan merancang struktur bangunan menggunakan aplikasi analisis struktur. Proses ini tidak hanya melibatkan pembuatan representasi digital struktur, tetapi juga mengintegrasikan analisis mendalam untuk menjamin kinerja, keamanan, dan ketahanan bangunan sesuai standar nasional, dengan tujuan akhir menghasilkan desain struktur yang optimal, efisien, dan memenuhi persyaratan teknis yang ketat. Untuk detail denah struktur dapat dilihat pada lampiran 1-3 halaman 146.



Gambar 3. 2: Pemodelan 3D Sistem Ganda.

3.2.3.1 Pembebanan Berdasarkan Fungsi Ruang

Pada perencanaan gedung ini beban gravitasi mengacu pada SNI 1727:2020 dan Pedoman Perencanaan Pembebanan untuk Rumah dan Gedung (PPURG) 1987.

Tabel 3. 8: Pembebanan yang diinputkan pada struktur Apartemen berdasarkan fungsi ruangan.

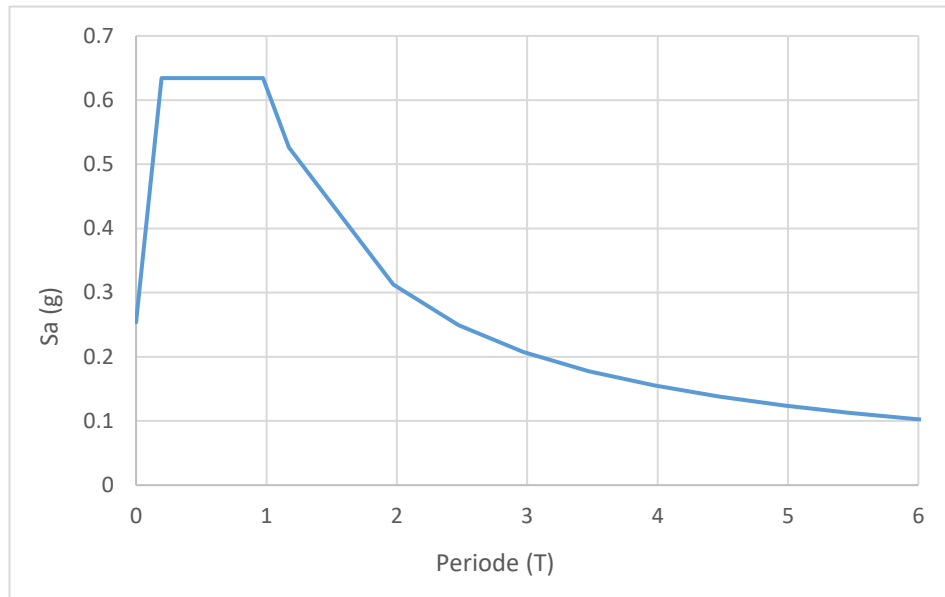
Fungsi	Beban	
	SDL	Live
Parkir	120 kg/m ²	192 kg/m ²
Koridor	120 kg/m ²	479 kg/m ²
Mushola	120 kg/m ²	479 kg/m ²
lobby lift	120 kg/m ²	479 kg/m ²
buffer tank	120 kg/m ²	479 kg/m ²
R. genset	120 kg/m ²	479 kg/m ²
Tenant	120 kg/m ²	479 kg/m ²
Gudang	120 kg/m ²	1197 kg/m ²
Kantor	120 kg/m ²	240 kg/m ²
R. PPPSRS	120 kg/m ²	479 kg/m ²
R. tidur	120 kg/m ²	192 kg/m ²
Dapur	120 kg/m ²	479 kg/m ²
R.keluarga	120 kg/m ²	479 kg/m ²
R.Serbaguna	120 kg/m ²	479 kg/m ²
Gym	120 kg/m ²	479 kg/m ²
Taman	120 kg/m ²	479 kg/m ²
Balkon	120 kg/m ²	479 kg/m ²
Ramp	120 kg/m ²	192 kg/m ²
Kolam renang (Kedalaman 1,5 m)	120 kg/m ²	479 kg/m ²

Note: Beban SDL sebagian besar diambil nilai maksimum dalam rentang yang ada.

3.2.3.2 Pembebanan Gempa

Berdasarkan data gempa yang mencakup parameter percepatan gempa pada periode pendek ($S_s = 0.65$) dan periode 1 detik ($S_1 = 0.36$), serta nilai desain yang telah disesuaikan ($SDS = 0.63$ dan $SD1 = 0.62$), pembebanan gempa menjadi tahapan esensial dalam perancangan struktur untuk menjamin bangunan mampu menahan gaya lateral akibat gempa bumi. Data-data ini, yang berasal dari analisis

respons spektrum, berfungsi sebagai dasar untuk menghitung gaya gempa desain yang sesungguhnya bekerja pada struktur. Perhitungan lebih rinci tentang bagaimana nilai-nilai ini diterapkan untuk menentukan gaya geser dasar dan gaya di setiap lantai dapat ditemukan secara lengkap pada Bab 4.



Gambar 3. 3 Respon spektrum Medan, Tanah Lunak (SE)

Tabel 3. 9: Klasifikasi Situs.

Kelas situs	$\bar{V}_s$ (m/detik)	$\bar{N}$ atau $\bar{N}_{ch}$	$\bar{s}_u$ (kPa)
SA (batuan keras)	>1500	N/A	N/A
SB (batuan)	750 sampai 1500	N/A	N/A
SC (tanah keras, sangat padat dan batuan lunak)	350 sampai 750	>50	≥ 100
SD (tanah sedang)	175 sampai 350	15 sampai 50	50 sampai 100
SE (tanah lunak)	< 175	<15	< 50

3.2.4 Mengubah Rekaman ke Respon Spektrum Percepatan dan Penskalaan Terhadap Spektrum Desain

Rekaman percepatan dari peer merupakan data mentah akselerogram yang belum merepresentasikan respons dinamik struktur. Untuk dapat digunakan dalam analisis dinamik linier dengan metode respons spektrum, rekaman tersebut terlebih dahulu dikonversi menjadi spektrum respons percepatan. Konversi ini bertujuan untuk memperoleh nilai respons puncak absolut dari sistem SDOF (Single Degree

of Freedom) terhadap berbagai periode getar struktur. Proses konversi dilakukan dengan bantuan perangkat lunak *SeismoSignal* versi 2022 dengan mengatur parameter redaman (*damping ratio*) sebesar 5%, sesuai dengan ketentuan yang disyaratkan untuk struktur beton bertulang dalam SNI 1726:2019.

Spektrum respons percepatan hasil konversi dari *SeismoSignal* tersebut kemudian menjadi input utama dalam proses penskalaan (*scaling*). Penskalaan sangat krusial karena spektrum hasil rekaman historis umumnya memiliki amplitudo yang tidak sama dengan tingkat bahaya gempa rencana di lokasi studi. Target spektrum desain yang digunakan mengacu pada peta bahaya gempa Indonesia SNI 1726:2019 untuk wilayah Kota Medan dengan mempertimbangkan kondisi tanah lunak (kelas situs SE). Parameter bahaya yang dijadikan acuan meliputi nilai percepatan spektral periode pendek (S_s) dan periode 1 detik (S_1) yang telah dikalikan dengan koefisien situs dan faktor amplifikasi, sehingga menghasilkan kurva spektrum desain elastis yang menjadi *target* penskalaan.

Pelaksanaan penskalaan dilakukan secara sistematis melalui perangkat lunak *Microsoft Excel* dengan memanfaatkan hasil *output* analisis modal dari ETABS. Periode getar alami fundamental struktur hasil pemodelan ETABS (berupa nilai *eigenvalue* untuk mode 1 dan mode 2) digunakan sebagai titik acuan penskalaan. Faktor skala (*Scale Factor* - SF) untuk setiap arah pembebanan (sumbu X dan sumbu Y) dihitung berdasarkan rasio antara ordinat spektrum target desain terhadap ordinat spektrum rekaman pada periode fundamental struktur tersebut, yang secara matematis dinyatakan sebagai:

$$S_f = \frac{S_{a_{target}}(T)}{S_{a_{record}}(T)} \quad (3.1)$$

Di mana:

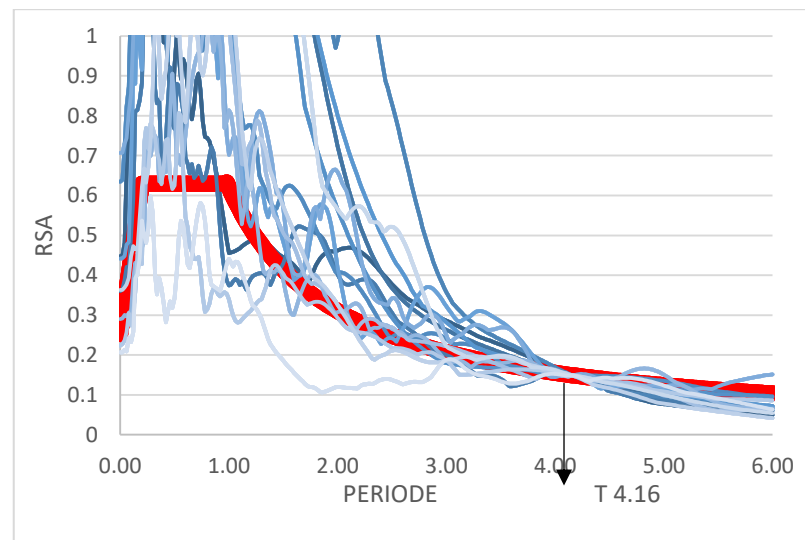
- $S_{a_{target}}(T)$ = Percepatan spektral desain menurut SNI 1726:2019 pada periode T (g).
- $S_{a_{record}}(T)$ = Percepatan spektral hasil rekaman (*SeismoSignal*) pada periode T (g).

Sebagai verifikasi awal, perhitungan faktor skala untuk arah X (Mode 1) dilakukan dengan mengambil nilai periode struktur sebesar $T = 0,10726$ detik. Pada

periode tersebut, spektrum target menunjukkan nilai percepatan $S_{a_{target}} = 0,148506$ g, sedangkan spectrum rekaman mentah menghasilkan $S_{a_{record}} = 0,10726$ g. Dengan demikian, faktor penskalaan yang diperoleh adalah:

$$SF_X = \frac{0,148506}{0,10726} = 1,384545 \quad (3.2)$$

Nilai $SF_X = 1,284545$ ini selanjutnya digunakan untuk mengalikan seluruh ordinat kurva spektrum respons percepatan arah X. Prosedur yang sama diterapkan untuk arah Y dengan mengacu pada periode fundamental arah Y serta rasio nilai yang tertera pada tabel rekapitulasi, sehingga diperoleh faktor skala untuk arah Y (SFY) yang selaras dengan target spektrum tanah lunak Medan.



Gambar 3. 4 Grafik Hasil Penskalaan Respon Spektra Desain

Seluruh hasil spektrum yang telah diskalakan (RSA X dan RSA Y) kemudian diinput kembali ke dalam perangkat lunak ETABS V18 sebagai beban gempa dinamik dengan metode respons spektrum. Penting untuk dicatat bahwa proses penskalaan ini tidak hanya memastikan pemenuhan nilai puncak pada periode fundamental saja, melainkan juga dievaluasi secara visual untuk memastikan bahwa pada rentang periode signifikan antara $0,2T$ hingga $1,5T$ (sesuai ketentuan SNI 1726:2019 Pasal 7.9.4.2.1), kurva spektrum hasil skala berada di atas atau setara dengan kurva spektrum desain target. Hal ini bertujuan untuk menjamin konservatisme analisis dalam menangkap kontribusi mode getar yang lebih tinggi.

3.2.5 Analisis Beban Gempa pada Struktur Sistem Ganda Menggunakan Respons Spektrum di ETABS

Setelah proses penskalaan spektrum respons percepatan selesai dilakukan, tahapan berikutnya adalah implementasi spektrum tersebut ke dalam model struktur tiga dimensi sistem ganda yang telah dibangun pada perangkat lunak ETABS versi 18. Sistem ganda yang dimodelkan terdiri dari kombinasi rangka pemikul momen beton bertulang dan dinding geser beton bertulang sebagai elemen penahan gaya lateral utama.

Implementasi beban gempa diawali dengan pendefinisian fungsi spektrum respons pada menu *Define > Response Spectrum Functions*. Data pasangan periode (T) dan percepatan spektral hasil penskalaan untuk arah X (RSA X) dan arah Y (RSA Y) diinput secara terpisah sebagai fungsi spektrum. Faktor skala (*scale factor*) yang telah diperoleh dari perhitungan di Microsoft Excel sebesar 1,384545 untuk arah X dan nilai analog untuk arah Y dimasukkan langsung pada definisi fungsi spektrum tersebut, sehingga kurva beban yang terbaca oleh ETABS telah merepresentasikan spektrum desain target sesuai SNI 1726:2019 untuk kondisi tanah lunak di Kota Medan.

Selanjutnya, beban gempa respons spektrum diaplikasikan pada struktur melalui pendefinisian kasus beban (*load case*) dinamis dengan metode *Modal Superposition*. Pada setiap kasus beban, arah pembebanan diatur sesuai sumbu global struktur (X dan Y). Mengacu pada SNI 1726:2019 Pasal 7.9.4.2.2, beban spektrum tersebut dikombinasikan dengan eksentrisitas accidental sebesar 5% dari dimensi struktur tegak lurus arah pembebanan untuk mengakomodasi ketidakpastian pusat massa. Analisis ragam getar dilakukan dengan memastikan bahwa jumlah mode yang ditinjau mampu mencapai partisipasi massa kumulatif minimal 90% pada masing-masing arah translasi, sesuai dengan persyaratan SNI 1726:2019 Pasal 7.9.1.

Untuk memperoleh respons struktur ultimit dan nilai simpangan antar lantai yang representatif, dilakukan kombinasi pembebanan berdasarkan SNI 1727:2020 tentang beban minimum dan SNI 1726:2019 tentang tahanan gempa. Kombinasi beban yang digunakan dalam analisis meliputi:

Tabel 3. 10: Kombinasi Pembebanan.

Nomor		DL	SIDL	LL	L _r	R	W _x	W _y	E _x	E _y
1	1.1	1.4	1.4							
2	2.1	1.2	1.2	1.6	0.5					
	2.2	1.2	1.2	1.6		0.5				
3	3.1	1.2	1.2	1	1.6					
	3.2	1.2	1.2		1.6		0.5			
	3.3	1.2	1.2		1.6			0.5		
	3.4	1.2	1.2		1.6		0.375	0.375		
	3.5	1.2	1.2	1		1.6				
	3.6	1.2	1.2			1.6	0.5			
	3.8	1.2	1.2			1.6	0.375	0.375		
4	4.1	1.2	1.2	1	0.5		1			
	4.2	1.2	1.2	1	0.5			1		
	4.5	1.2	1.2	1	0.5		0.75	0.75		
	4.3	1.2	1.2	1		0.5	1			
	4.4	1.2	1.2	1		0.5		1		
	4.6	1.2	1.2	1		0.5	0.75	0.75		
5	5.1	0.9	0.9				1			
	5.2	0.9	0.9					1		
	5.3	0.9	0.9				0.75	0.75		
6	6.1	1.3269	1.3269	1					1.3	0.39
	6.2	1.3269	1.3269	1					1.3	-0.39
	6.3	1.3269	1.3269	1					-1.3	0.39
	6.4	1.3269	1.3269	1					-1.3	-0.39
	6.5	1.3269	1.3269	1					0.39	1.3
	6.6	1.3269	1.3269	1					-0.39	1.3
	6.7	1.3269	1.3269	1					0.39	-1.3
	6.8	1.3269	1.3269	1					-0.39	-1.3
7	7.1	0.7731	0.7731						1.3	0.39
	7.2	0.7731	0.7731						1.3	-0.39
	7.3	0.7731	0.7731						-1.3	0.39
	7.4	0.7731	0.7731						-1.3	-0.39
	7.5	0.7731	0.7731						0.39	1.3
	7.6	0.7731	0.7731						-0.39	1.3

Dari hasil analisis dinamik linier tersebut, parameter utama yang diekstraksi adalah nilai simpangan antar lantai (*inter-story drift*) pada pusat massa di setiap tingkat, baik untuk arah X maupun arah Y. Nilai simpangan ini diperoleh dari selisih perpindahan lateral (*displacement*) antar tingkat yang berurutan, dengan memperhatikan pengaruh torsi akibat eksentrisitas accidental. Besaran simpangan

antar lantai tersebut selanjutnya dibandingkan terhadap simpangan batas ijin (*allowable drift*) berdasarkan SNI 1726:2019, yang meliputi batas simpangan antar lantai tingkat desain (ΔM) dan persyaratan kinerja batas layan (ΔS) maupun batas ultimit (ΔM). Selain itu, gaya geser dasar dinamis (*base shear*) hasil analisis juga diperiksa untuk memastikan nilainya tidak kurang dari 85% gaya geser dasar statik ekuivalen, sebagai verifikasi konsistensi pembebanan sesuai amanat SNI 1726:2019 Pasal 7.9.4.2.1. Seluruh hasil respons struktur ini selanjutnya menjadi dasar evaluasi keamanan elemen-elemen struktur, serta acuan dalam perancangan tulangan kolom, balok, dan dinding geser yang tetap mengacu pada ketentuan SNI 2847:2019 tentang persyaratan beton struktural.

Pengecekan syarat sistem ganda merupakan validasi penting dalam perencanaan struktur Gedung Apartemen The Bliss, yang merujuk pada ketentuan SNI 1726:2019. Berdasarkan analisis yang dilakukan, pada Tabel 4.4, kontribusi gaya lateral yang ditahan oleh Sistem Rangka Pemikul Momen Khusus (SRPMK) pada struktur Gedung Apartemen The Bliss adalah sebesar 35% untuk arah X dan 29% untuk arah Y. Kedua nilai ini telah memenuhi syarat minimum sebesar 25% yang ditetapkan oleh SNI, mengindikasikan bahwa sistem ganda yang direncanakan memiliki distribusi kekakuan dan kekuatan yang memadai antara rangka dan dinding geser. Al Fitra (2025:36).

Tabel 3. 11: Pengecekan minimal 25% keterlibatan SRPMK.

SRPMK+SW		SRPMK		KONTRIBUSI SRPMK		SYARAT MINIMUM
X	Y	X	Y	X	Y	%
kN	kN	kN	kN	%	%	
40442.18	47452.42	14320.36	13577.73	35%	29%	25%

3.2.6 Analisa Kinerja Simpangan Antar Lantai terhadap Batas Ijin

Analisis kinerja simpangan antar lantai dilakukan dengan membandingkan nilai simpangan hasil pemodelan ETABS terhadap batas ijin yang ditetapkan dalam SNI 1726:2019. Berdasarkan Pasal 7.12.1 dan Tabel 20 SNI 1726:2019, untuk bangunan apartemen dengan sistem ganda dan Kategori Risiko II yang termasuk dalam klasifikasi "Semua struktur lainnya" batas simpangan antar tingkat ijin (Δa) ditentukan sebesar:

$$\Delta a = 0,020 \times h_{sx} \quad (3.2)$$

Dengan h_{sx} adalah tinggi tingkat di bawah tingkat yang ditinjau. Analisis ini bertujuan untuk memastikan bahwa deformasi lateral struktur akibat beban gempa masih berada dalam ambang batas aman yang disyaratkan, baik untuk menjaga integritas elemen struktural maupun untuk melindungi komponen nonstruktural dari kerusakan berlebihan.

Simpangan antar lantai dianalisis secara terpisah untuk setiap rekaman gempa jarak dekat dan jarak jauh, sehingga pengaruh perbedaan karakteristik gempa terhadap respons deformasi struktur dapat diidentifikasi secara kuantitatif. Selain itu, gaya geser dasar dianalisis untuk mengetahui besaran gaya lateral total yang bekerja pada struktur. Kedua parameter hasil analisis tersebut yaitu simpangan antar lantai dan gaya geser dasar selanjutnya digunakan sebagai dasar perbandingan kinerja struktur antar skenario pembebanan gempa serta sebagai data masukan bagi analisis statistik pada tahap penelitian berikutnya.

3.2.7 Analisis Statistik: Median, Standar Deviasi, Distribusi Kumulatif

Hasil analisis respons struktur yang diperoleh dari penerapan 35 respon spektrum gempa, terdiri atas 15 gempa jarak dekat dan 20 gempa jarak jauh, selanjutnya dianalisis secara statistik untuk memperoleh gambaran kecenderungan dan variasi respons struktur. Parameter respons yang dianalisis secara statistik meliputi simpangan antar lantai maksimum dan gaya geser dasar yang dihasilkan dari masing-masing pembebanan gempa.

Analisis statistik dilakukan dengan menghitung nilai, median, dan standar

deviasi dari setiap parameter respons guna mengevaluasi tingkat sebaran dan konsistensi respons struktur terhadap variasi karakteristik gempa. Selain itu, distribusi kumulatif (Cumulative Distribution Function/CDF) digunakan untuk menggambarkan probabilitas terlampauinya nilai respons tertentu, sehingga perbandingan kinerja struktur akibat gempa jarak dekat dan gempa jarak jauh dapat dilakukan secara kuantitatif.

Hasil analisis statistik ini digunakan sebagai dasar untuk mengidentifikasi perbedaan karakteristik respons struktur serta untuk menarik kesimpulan mengenai pengaruh jarak sumber gempa terhadap simpangan antar lantai dan gaya geser dasar pada gedung bertingkat dengan sistem ganda di Kota Medan.

BAB 4

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Tinjauan Umum

Bab ini akan menjabarkan hasil analisis untuk struktur yang didesain dengan sistem ganda.

4.2 Penentuan Spektrum Respons Desain SNI 1726:2019 untuk Kota Medan

Data Percepatan Gempa

$$\text{Spektral Percepatan Periode Pendek} \quad S_s = 0.6558 \quad \text{g}$$

$$\text{Spektral Percepatan Periode 1 Detik} \quad S_1 = 0.3634 \quad \text{g}$$

$$\text{Koefisien Situs} \quad F_a = 1.4507$$

(SNI 1726:2019 tabel 6)

$$\text{Koefisien Situs} \quad F_v = 2.5464$$

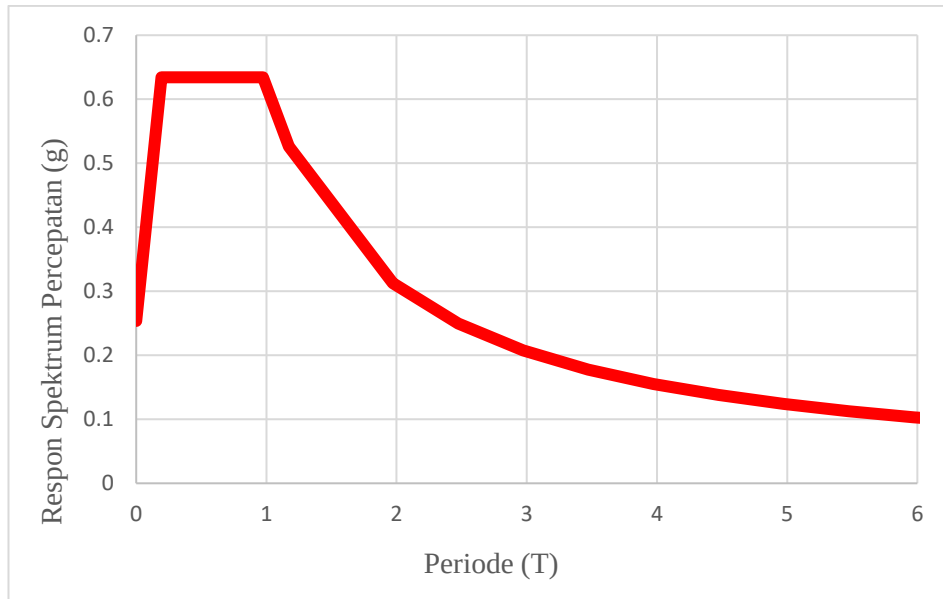
(SNI 1726:2019 tabel 7)

$$\begin{aligned} \text{Percepatan Desain Periode Pendek} \quad S_{DS} &= 2/3 * F_a * S_s & (4.1) \\ &= 0.6343 \quad \text{g} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Percepatan Desain Periode 1 Detik} \quad S_{D1} &= 2/3 * F_v * S_1 & (4.2) \\ &= 0.6169 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{(SNI 1726:2019 pasal 6.2 dan 6.3)} \quad T_0 &= 0.2 * S_{D1} / S_{DS} & (4.3) \\ &= 0.1945 \quad \text{detik} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} T_s &= S_{D1} / S_{DS} & (4.4) \\ &= 0.9726 \quad \text{detik} \end{aligned}$$



Gambar 4. 1 Respon spektrum Medan, Tanah Lunak (SE).

4.3 Perhitungan Desain Struktur Sistem Ganda

4.3.1 Parameter Gempa

Faktor Keutamaan Gempa (SNI 1726:2019 tabel 3 dan 4)	I_e	=	1.00
Koefisien Modifikasi Respons (SNI 1726:2019 tabel 12)	R	=	7
Faktor Kuat Lebih Sistem (SNI 1726:2019 tabel 12)	Ω_0	=	2.5
Faktor Pembesaran Defleksi (SNI 1726:2019 tabel 12)	C_d	=	5.5

4.3.2 Periode Struktur

Percepatan Desain Periode 1 Detik	S_{D1}	=	0.6169 g
Koefisien untuk Batas Periode (SNI 1726:2019 tabel 17)	C_u	=	1.4
Parameter Periode Pendekatan (SNI 1726:2019 tabel 18)	C_t	=	0.0488

$$\begin{aligned}
\text{Parameter Periode Pendekatan} \quad X &= 0.75 \\
\text{(SNI 1726:2019 tabel 18)} \\
\text{Tinggi Bangunan (Seismik)} \quad h &= 108 \quad \text{m} \\
\text{Periode Fundamental Pendekatan} \quad T_a &= C_t * h^x \quad (4.5) \\
&= 1.6349 \quad \text{detik} \\
\\
\text{Periode Maksimum (SNI 1726:2019 pasal 7.8.2)} \quad T_{\max} &= C_u * T_a \quad (4.6) \\
&= 2.289 \quad \text{detik} \\
\\
\text{Periode Hasil Analisis Arah X} \quad T_{c,X} &= 4.769 \quad \text{detik} \\
\text{Periode Hasil Analisis Arah Y} \quad T_{c,Y} &= 3.625 \quad \text{detik}
\end{aligned}$$

Dari Tabel 4.2 dapat dilihat bahwa mode 1 dan 2 merupakan translasi arah x dan y, sedangkan mode 3 merupakan rotasi. Kemudian partisipasi massa sudah mencapai 97% untuk arah x dan 95% untuk arah y pada *mode* ke 8. Ini sudah sesuai dengan syaratan SNI 1726:2019 yaitu minimal 90%. Untuk Data perioda dan partisipasi massa yang lengkap dapat dilihat pada lampiran 22 halaman 154.

Tabel 4. 1: Data perioda dan partisipasi massa.

<i>Mode</i>	<i>Period</i>	<i>UX</i>	<i>UY</i>	<i>RZ</i>	<i>SumUX</i>	<i>SumUY</i>
1	4.168	73%	0%	0%	73%	0%
2	3.454	0%	71%	0%	73%	71%
3	2.854	0%	0%	69%	73%	71%
4	1.231	13%	0%	0%	86%	71%
5	0.945	0%	14%	0%	86%	85%
6	0.784	0%	0%	14%	91%	85%
7	0.617	0%	0%	0%	91%	87%
24	0.142	0%	0%	0%	97%	95%

4.3.3 Simpangan Antar Lantai terhadap Batas Ijin

Pengecekan simpangan antar tingkat adalah prosedur vital dalam perencanaan Gedung Apartemen The Bliss untuk memastikan stabilitas dan kinerja bangunan di bawah beban lateral seperti gempa, sesuai SNI 1726:2019.

Simpangan Antar Tingkat Izin (Tabel 20 SNI 1726:2019)	Δ_a	=	0.02	h
Faktor Redundansi	ρ	=	1.3	
Story Drift Inelastik Izin	Δ_{max}	=	0.0200	h
Faktor Pembesaran Defleksi	C_d	=	5.5	
Faktor Keutamaan Gempa	I_e	=	1.00	
Story Drift Inelastik	Δ	=	$\delta * C_d / I_e$	(4.7)
Tinggi antar lantai	h	=	4500	mm

4.4 Analisis Simpangan Antar Lantai (Story Drift) Akibat Gempa Arah X Mode 1

Pada sub-bab ini dilakukan evaluasi terhadap nilai simpangan antar lantai (*story drift ratio*) struktur arah X berdasarkan 15 variasi *Ground Motion* (GM) yang telah dianalisis. Batas simpangan izin (*drift izin*) yang digunakan mengacu pada ketentuan perencanaan tahan gempa, yaitu sebesar 0,020. Evaluasi dilakukan pada seluruh tingkat bangunan, mulai dari Lantai 23 hingga Lantai 0 (total 24 tingkat). Data selengkapnya disajikan pada Lampiran (merujuk pada data mentah), sedangkan rekapitulasi hasil evaluasi disajikan pada sub-bab berikut.

4.4.1 Rekapitulasi Ground Motion yang Melewati Batas Drift Izin

Berdasarkan hasil rekapitulasi data, seluruh *Ground Motion* (GM) yang ditinjau memiliki setidaknya satu tingkat yang mengalami simpangan antar lantai melebihi batas izin 0,020. Dengan demikian, terdapat 15 (lima belas) *Ground Motion* yang dinyatakan melewati batas drift izin. *Ground Motion* tersebut adalah:

GM1, GM2, GM3, GM4, GM5, GM6, GM7, GM8, GM9, GM10, GM11, GM12, GM13, GM14, dan GM15.

Hal ini mengindikasikan bahwa secara umum, variasi rekaman gempa yang digunakan memberikan pengaruh signifikan terhadap respons simpangan struktur, terutama pada tingkat-tingkat tertentu yang menjadi lokasi kritis.

4.4.2 Daftar Ground Motion Berlebih per Tingkat Lantai

Untuk mengetahui distribusi tingkat kegagalan, dilakukan perhitungan pada setiap lantai. Tabel 4.2 menyajikan daftar *Ground Motion* mana saja yang menyebabkan nilai *story drift* melebihi batas 0,020 pada masing-masing tingkat.

Tabel 4. 2: Rekapitulasi Ground Motion yang Melebihi Drift Izin per Tingkat Lantai

Lantai	Ground Motion (GM) dengan Drift izin (0,020)
23	GM2, GM4, GM6, GM7, GM11, GM14
22	GM2, GM4, GM6, GM7, GM11, GM14
21	GM2, GM4, GM6, GM7, GM11, GM14
20	GM2, GM4, GM6, GM7, GM11, GM14
19	GM2, GM4, GM6, GM7, GM11, GM14
18	GM2, GM4, GM6, GM7, GM11, GM14
17	GM2, GM4, GM5, GM6, GM7, GM9, GM11, GM14
16	GM2, GM4, GM6, GM7, GM9, GM11, GM14
15	GM2, GM4, GM6, GM7, GM14
14	GM2, GM4, GM6, GM7, GM14
13	GM2, GM4, GM6, GM7, GM11, GM14
12	GM2, GM4, GM6, GM7, GM11, GM14
11	GM2, GM4, GM6, GM7, GM11, GM14
10	GM2, GM4, GM6, GM7, GM11, GM14
9	GM2, GM4, GM6, GM7, GM11, GM14
8	GM2, GM4, GM6, GM7, GM11, GM14
7	GM2, GM4, GM6, GM7, GM11, GM14
6	GM2, GM4, GM6, GM7, GM14
5	GM2, GM4, GM6, GM7, GM14
4	GM2, GM4, GM6, GM7, GM11, GM14
3	GM1, GM2, GM3, GM4, GM5, GM6, GM7, GM8, GM9, GM10, GM11, GM12, GM13, GM14, GM15
2	GM2, GM4, GM6, GM7, GM14
1	GM2, GM4, GM6, GM7, GM11, GM14
0	GM2, GM4, GM7, GM14

Berdasarkan Tabel 4.1, terlihat bahwa Lantai 3 merupakan tingkat paling kritis, karena seluruh variasi *Ground Motion* (100%) menghasilkan simpangan yang melampaui batas izin. Fenomena ini umum terjadi akibat adanya perubahan kekakuan atau konsentrasi massa yang signifikan pada tingkat tersebut. Selain

itu, *Ground Motion* dengan kode GM2, GM4, GM7, dan GM14 tercatat sebagai gempa dengan pengaruh paling dominan, karena memicu terjadinya drift berlebih di hampir seluruh lantai bangunan.

4.4.3 Persentase Jumlah Lantai yang Melewati Batas per *Ground Motion*

Untuk meninjau tingkat bahaya relatif dari masing-masing *Ground Motion*, dilakukan perhitungan persentase jumlah lantai yang mengalami kegagalan ($\text{drift} > 0,020$) terhadap total 24 lantai. Hasilnya disajikan pada Tabel 4.3

Tabel 4. 3: Persentase Kegagalan (exceedance) setiap rekaman gempa terhadap total 24 lantai yang dianalisis

Ground Motion	Jumlah lantai Melewati 0,020	Persentase (%)
GM1	1	4,17 %
GM2	24	100 %
GM3	1	4,17 %
GM4	24	100 %
GM5	2	8,33 %
GM6	23	95,83 %
GM7	24	100 %
GM8	1	4,17 %
GM9	3	12,50 %
GM10	1	4,17 %
GM11	18	75 %
GM12	1	4,17 %
GM13	1	4,17 %
GM14	24	100 %
GM15	1	4,17 %

Dari tabel di atas, dapat diketahui bahwa terdapat 4 (empat) buah *Ground Motion* yang menyebabkan seluruh lantai (100%) mengalami simpangan melewati batas, yaitu GM2, GM4, GM7, dan GM14. Hal ini mengindikasikan bahwa respons struktur terhadap keempat rekaman gempa tersebut sangat kritis dan perlu menjadi perhatian utama dalam evaluasi lebih lanjut, misalnya melalui analisis *pushover* atau redesain elemen struktur. Sebaliknya, GM1, GM3, GM8, GM10, GM12, GM13, dan GM15 hanya memicu kegagalan pada 1 lantai (Lantai 3), sehingga tergolong memiliki tingkat bahaya yang lebih rendah dibandingkan GM lainnya.

4.5 Analisis Simpangan Antar Lantai (Story Drift) Akibat Gempa Arah X Mode 2

Pada sub-bab ini dilakukan evaluasi terhadap nilai simpangan antar lantai (*story drift ratio*) struktur arah X berdasarkan 15 variasi *Ground Motion* (GM) pada kondisi Mode 2. Batas simpangan izin (*drift izin*) yang digunakan adalah sebesar 0,020. Evaluasi dilakukan pada seluruh tingkat bangunan, mulai dari Lantai 23 hingga Lantai 0 (total 24 tingkat). Berikut adalah rekapitulasi hasil evaluasi yang telah dilakukan.

4.5.1 Rekapitulasi Ground Motion yang Melewati Batas Drift Izin

Berdasarkan hasil rekapitulasi data, dari 15 (lima belas) variasi *Ground Motion* yang ditinjau, terdapat 13 (tiga belas) *Ground Motion* yang memiliki setidaknya satu tingkat yang mengalami simpangan antar lantai melebihi batas izin 0,020. Adapun 2 (dua) *Ground Motion* lainnya, yaitu GM1 dan GM8, tidak menyebabkan terjadinya *story drift* berlebih pada seluruh tingkat bangunan.

Daftar *Ground Motion* yang dinyatakan melewati batas drift izin adalah sebagai berikut:

GM2, GM3, GM4, GM5, GM6, GM7, GM9, GM10, GM11, GM12, GM13, GM14, dan GM15.

Hasil ini mengindikasikan bahwa mayoritas variasi gempa masih memberikan pengaruh signifikan terhadap respons struktur, namun terdapat dua rekaman gempa (GM1 dan GM8) yang tergolong aman terhadap batas simpangan yang ditinjau.

4.5.2 Daftar Ground Motion Berlebih per Tingkat Lantai

Untuk mengetahui distribusi tingkat kegagalan, dilakukan perhitungan pada setiap lantai. Tabel 4.4 menyajikan daftar *Ground Motion* mana saja yang menyebabkan nilai *story drift* melebihi batas 0,020 pada masing-masing tingkat untuk analisis Mode 2.

Tabel 4. 4: Rekapitulasi Ground Motion yang Melebihi Drift Izin per Tingkat Lantai (Mode 2)

lantai	GM yang melewati Drift Izin (0,020)
23	GM2, GM4, GM6, GM7, GM11, GM14
22	GM2, GM4, GM6, GM7, GM11, GM14
21	GM2, GM4, GM6, GM7, GM11, GM14
20	GM2, GM4, GM6, GM7, GM11, GM14
19	GM2, GM4, GM6, GM7, GM11, GM14
18	GM2, GM4, GM6, GM7, GM11, GM14
17	GM2, GM4, GM6, GM7, GM11, GM14
16	GM2, GM3, GM4, GM6, GM7, GM11, GM14
15	GM2, GM3, GM4, GM6, GM7, GM14, GM15
14	GM2, GM3, GM4, GM6, GM7, GM14, GM15
13	GM2, GM3, GM4, GM6, GM7, GM11, GM14, GM15
12	GM2, GM3, GM4, GM6, GM7, GM11, GM14, GM15
11	GM2, GM3, GM4, GM6, GM7, GM11, GM12, GM14, GM15
10	GM2, GM3, GM4, GM6, GM7, GM11, GM12, GM14, GM15
9	GM2, GM3, GM4, GM6, GM7, GM11, GM12, GM14, GM15
8	GM2, GM3, GM4, GM6, GM7, GM11, GM14, GM15
7	GM2, GM3, GM4, GM6, GM7, GM11, GM14, GM15
6	GM2, GM3, GM4, GM6, GM7, GM14, GM15
5	GM2, GM3, GM4, GM6, GM7, GM14, GM15
4	GM2, GM3, GM4, GM6, GM7, GM11, GM14, GM15
3	GM2, GM3, GM4, GM5, GM6, GM7, GM9, GM10, GM11, GM12, GM13, GM14, GM15
2	GM2, GM4, GM6, GM7, GM14
1	GM2, GM4, GM6, GM7, GM11, GM14
0	GM2, GM4, GM7, GM14

Berdasarkan Tabel 4.4. terlihat bahwa Lantai 3 masih menjadi tingkat paling kritis, di mana hampir seluruh variasi *Ground Motion* (kecuali GM1 dan GM8) menghasilkan simpangan yang melampaui batas izin. Hal ini mengonfirmasi adanya konsentrasi tegangan atau perubahan kekakuan yang signifikan pada tingkat tersebut. Sama seperti pada Mode 1, *Ground Motion* GM2, GM4, GM7, dan GM14 kembali tercatat sebagai gempa dengan pengaruh paling dominan karena memicu kegagalan di hampir seluruh lantai bangunan. Namun, perlu dicatat bahwa pada Mode 2, GM3 dan GM15 juga mulai menunjukkan pengaruh yang cukup luas, terutama pada lantai menengah ke bawah.

4.5.3 Persentase Jumlah Lantai yang Melewati Batas per Ground Motion

Untuk meninjau tingkat bahaya relatif dari masing-masing *Ground Motion*, dilakukan perhitungan persentase jumlah lantai yang mengalami kegagalan ($\text{drift} > 0,020$) terhadap total 24 lantai. Hasilnya disajikan pada Tabel 4.5

Tabel 4.5: Persentase Tingkat Kegagalan Struktur per Ground Motion (Mode2)

Ground Motion	Jumlah Lantai Melewati 0,020	Persentase (%)
GM1	0	0 %
GM2	24	100%
GM3	14	58,33 %
GM4	24	100,00%
GM5	1	4,17%
GM6	23	95,83%
GM7	24	100,00%
GM8	0	0%
GM9	1	4,17%
GM10	1	4,17%
GM11	18	75,00%
GM12	4	16,67%
GM13	1	4,17%
GM14	24	100,00%
GM15	13	54,17%

Dari tabel di atas, dapat diketahui bahwa terdapat 4 (empat) buah *Ground Motion* yang menyebabkan seluruh lantai (100%) mengalami simpangan melewati batas, yaitu GM2, GM4, GM7, dan GM14. Kondisi ini identik dengan temuan pada Mode 1, yang mengindikasikan bahwa keempat rekaman gempa tersebut memiliki karakteristik frekuensi yang sangat dominan terhadap respons struktur gedung ini.

Di sisi lain, GM1 dan GM8 terbukti aman karena tidak memicu kegagalan pada satu pun tingkat bangunan (0%). Hal ini menunjukkan bahwa variasi rekaman gempa sangat memengaruhi tingkat kinerja struktur, sehingga dalam perencanaan tahan gempa, pemilihan *Ground Motion* yang representatif menjadi hal yang krusial. Selain itu, GM3 dan GM15 menunjukkan persentase kegagalan yang cukup signifikan (di atas 50%), terutama pada lantai 3 hingga lantai 16, sehingga perlu diwaspadai dalam evaluasi struktur secara menyeluruh.

4.6 Analisis Simpangan Antar Lantai (Story Drift) Akibat Gempa Arah Y Mode 1

Pada sub-bab ini dilakukan evaluasi terhadap nilai simpangan antar lantai (*story drift ratio*) struktur arah Y berdasarkan 15 variasi *Ground Motion* (GM) pada kondisi Mode 1. Batas simpangan izin (*drift izin*) yang digunakan mengacu pada ketentuan perencanaan tahan gempa, yaitu sebesar 0,020. Evaluasi dilakukan pada seluruh tingkat bangunan, mulai dari Lantai 23 hingga Lantai 0 (total 24 tingkat). Berikut adalah rekapitulasi hasil evaluasi yang telah dilakukan.

4.6.1 Rekapitulasi Ground Motion yang Melewati Batas Drift Izin

Berdasarkan hasil rekapitulasi data, dari 15 (lima belas) variasi *Ground Motion* yang ditinjau, terdapat 11 (sebelas) *Ground Motion* yang memiliki setidaknya satu tingkat yang mengalami simpangan antar lantai melebihi batas izin 0,020. Adapun 4 (empat) *Ground Motion* lainnya, yaitu GM1, GM8, GM10, dan GM15, tidak menyebabkan terjadinya *story drift* berlebih pada seluruh tingkat bangunan.

Daftar *Ground Motion* yang dinyatakan melewati batas drift izin adalah sebagai berikut:

GM2, GM3, GM4, GM5, GM6, GM7, GM9, GM11, GM12, GM13, dan GM14.

Hasil ini mengindikasikan bahwa pada arah Y, masih terdapat mayoritas variasi gempa yang memberikan pengaruh signifikan terhadap respons struktur. Namun, terdapat empat rekaman gempa (GM1, GM8, GM10, GM15) yang tergolong aman terhadap batas simpangan yang ditinjau pada seluruh tingkat bangunan.

4.6.2 Daftar Ground Motion Berlebih per Tingkat Lantai

Untuk mengetahui distribusi tingkat kegagalan, dilakukan perhitungan pada setiap lantai. Tabel 4.6 menyajikan daftar *Ground Motion* mana saja yang menyebabkan nilai *story drift* melebihi batas 0,020 pada masing-masing tingkat untuk analisis arah Y Mode 1.

Tabel 4. 6: Rekapitulasi Ground Motion yang Melebihi Drift Izin per Tingkat Lantai (Arah Y Mode 1)

Lantai	GM yang Melewati Drift izin (0,020)
23	GM2, GM4, GM5, GM7, GM11, GM12, GM13, GM14
22	GM2, GM4, GM5, GM7, GM11, GM12, GM13, GM14
21	GM2, GM4, GM5, GM7, GM11, GM12, GM13, GM14
20	GM2, GM4, GM5, GM7, GM11, GM12, GM13, GM14
19	GM2, GM4, GM5, GM7, GM11, GM12, GM13, GM14
18	GM2, GM4, GM5, GM6, GM7, GM11, GM12, GM13, GM14
17	GM2, GM4, GM5, GM7, GM11, GM12, GM13, GM14
16	GM2, GM4, GM5, GM7, GM11, GM12, GM13, GM14
15	GM2, GM4, GM5, GM7, GM11, GM12, GM13, GM14
14	GM2, GM3, GM4, GM5, GM7, GM11, GM12, GM13, GM14
13	GM2, GM3, GM4, GM5, GM7, GM11, GM12, GM13, GM14
12	GM2, GM3, GM4, GM7, GM11, GM12, GM13, GM14
11	GM2, GM3, GM4, GM7, GM11, GM12, GM13, GM14
10	GM2, GM3, GM4, GM7, GM11, GM12, GM13, GM14
9	GM2, GM3, GM4, GM7, GM11, GM12, GM13, GM14
8	GM2, GM4, GM7, GM11, GM12, GM13, GM14
7	GM2, GM4, GM5, GM7, GM11, GM12, GM13, GM14
6	GM2, GM4, GM5, GM7, GM11, GM12, GM13, GM14
5	GM2, GM4, GM5, GM7, GM11, GM12, GM13, GM14
4	GM2, GM4, GM5, GM7, GM11, GM12, GM13, GM14
3	GM2, GM3, GM4, GM5, GM6, GM7, GM9, GM11, GM12, GM13, GM14
2	GM2, GM4, GM5, GM7, GM11, GM14
1	GM2, GM4, GM5, GM7, GM11, GM14
0	GM2

Berdasarkan Tabel 4.6, terlihat bahwa Lantai 3 kembali menjadi tingkat paling kritis untuk arah Y, di mana hampir seluruh variasi *Ground Motion* yang kritis (kecuali GM1, GM8, GM10, GM15) menghasilkan simpangan yang melampaui batas izin. Fenomena ini mengonfirmasi adanya konsentrasi tegangan atau perubahan kekakuan yang signifikan pada tingkat tersebut. Selain itu, perlu dicatat bahwa Lantai 0 (dasar) hanya mengalami kegagalan pada GM2, yang mengindikasikan bahwa sebagian besar gempa tidak memberikan respons berlebih pada lantai dasar untuk arah Y. *Ground Motion* GM2, GM4, GM7, GM11, dan

GM14 tercatat sebagai gempa dengan pengaruh paling dominan karena memicu kegagalan di hampir seluruh lantai bangunan.

4.6.3 Persentase Jumlah Lantai yang Melewati Batas per Ground Motion

Untuk meninjau tingkat bahaya relatif dari masing-masing *Ground Motion*, dilakukan perhitungan persentase jumlah lantai yang mengalami kegagalan ($\text{drift} > 0,020$) terhadap total 24 lantai. Hasilnya disajikan pada Tabel 4.7

Tabel 4. 7: Persentase Tingkat Kegagalan Struktur per Ground Motion (Arah Y Mode 1)

Ground Motion	Jumlah lantai Melewati 0,02	Persentase (%)
GM1	0	0 %
GM2	24	100,00 %
GM3	7	29,17 %
GM4	23	95,83 %
GM5	18	75,00 %
GM6	2	8,33 %
GM7	23	95,83 %
GM8	0	0 %
GM9	1	4,17 %
GM10	0	0 %
GM11	23	95,83 %
GM12	21	87,50 %
GM13	21	87,50 %
GM14	23	95,83 %
GM15	0	0 %

Berdasarkan Table 4.7 , dapat diketahui bahwa GM2 merupakan satu-satunya *Ground Motion* yang menyebabkan seluruh lantai (100%) mengalami simpangan melewati batas pada arah Y. Hal ini menunjukkan bahwa GM2 memiliki karakteristik frekuensi yang sangat dominan terhadap respons struktur gedung ini pada kedua arah (X dan Y). Selain itu, GM4, GM7, GM11, dan GM14 juga menunjukkan pengaruh yang sangat besar dengan persentase kegagalan mencapai 95,83%.

Di sisi lain, GM1, GM8, GM10, dan GM15 terbukti aman karena tidak memicu kegagalan pada satu pun tingkat bangunan (0%). Hal ini mempertegas

bahwa pemilihan *Ground Motion* yang representatif dalam analisis waktu riwayat (*time history*) sangat krusial, karena variasi rekaman gempa yang berbeda dapat menghasilkan tingkat kinerja struktur yang sangat bervariasi. Secara khusus pada arah Y, GM3 dan GM5 menunjukkan pengaruh yang cukup signifikan (29,17% dan 75,00%), terutama pada lantai menengah ke bawah, sehingga perlu menjadi perhatian dalam evaluasi struktur secara menyeluruh.

4.7 Analisis Simpangan Antar Lantai (Story Drift) Akibat Gempa Arah Y Mode 2

Pada sub-bab ini dilakukan evaluasi terhadap nilai simpangan antar lantai (*story drift ratio*) struktur arah Y berdasarkan 15 variasi *Ground Motion* (GM) pada kondisi Mode 2. Batas simpangan izin (*drift izin*) yang digunakan mengacu pada ketentuan perencanaan tahan gempa, yaitu sebesar 0,020. Evaluasi dilakukan pada seluruh tingkat bangunan, mulai dari Lantai 23 hingga Lantai 0 (total 24 tingkat). Berikut adalah rekapitulasi hasil evaluasi yang telah dilakukan.

4.7.1 Rekapitulasi Ground Motion yang Melewati Batas Drift Izin

Berdasarkan hasil rekapitulasi data, dari 15 (lima belas) variasi *Ground Motion* yang ditinjau, terdapat 8 (delapan) *Ground Motion* yang memiliki setidaknya satu tingkat yang mengalami simpangan antar lantai melebihi batas izin 0,020. Adapun 7 (tujuh) *Ground Motion* lainnya, yaitu GM1, GM3, GM8, GM9, GM12, GM13, dan GM15, tidak menyebabkan terjadinya *story drift* berlebih pada seluruh tingkat bangunan.

Daftar *Ground Motion* yang dinyatakan melewati batas drift izin adalah sebagai berikut:

GM2, GM4, GM5, GM6, GM7, GM10, GM11, dan GM14.

Hasil ini mengindikasikan bahwa pada arah Y Mode 2, masih terdapat beberapa variasi gempa yang memberikan pengaruh signifikan terhadap respons struktur, namun jumlahnya lebih sedikit dibandingkan dengan arah X maupun Mode 1 sebelumnya. Terdapat tujuh rekaman gempa yang tergolong aman terhadap batas simpangan yang ditinjau pada seluruh tingkat bangunan.

4.7.2 Daftar Ground Motion Berlebih per Tingkat Lantai

Untuk mengetahui distribusi tingkat kegagalan, dilakukan perhitungan pada setiap lantai. Tabel 4.8 menyajikan daftar *Ground Motion* mana saja yang menyebabkan nilai *story drift* melebihi batas 0,020 pada masing-masing tingkat untuk analisis arah Y Mode 2.

Tabel 4. 8: Rekapitulasi Ground Motion yang Melebihi Drift Izin per Tingkat Lantai (Arah Y Mode 2)

lantai	GM yang Melewati Drift Izin (0,020)
23	GM2, GM4, GM5, GM7, GM11, GM14
22	GM2, GM4, GM5, GM7, GM11, GM14
21	GM2, GM4, GM5, GM7, GM11, GM14
20	GM2, GM4, GM5, GM7, GM11, GM14
19	GM2, GM4, GM5, GM6, GM7, GM11, GM14
18	GM2, GM4, GM5, GM6, GM7, GM11, GM14
17	GM2, GM4, GM5, GM7, GM11, GM14
16	GM2, GM4, GM5, GM7, GM11, GM14
15	GM2, GM4, GM5, GM7, GM11, GM14
14	GM2, GM4, GM5, GM7, GM14
13	GM2, GM4, GM5, GM7, GM14
12	GM2, GM4, GM5, GM7, GM14
11	GM2, GM7
10	GM2, GM7
9	GM2, GM7
8	GM2, GM5, GM7
7	GM2, GM4, GM5, GM7, GM14
6	GM2, GM4, GM5, GM7, GM14
5	GM2, GM4, GM5, GM7, GM14
4	GM2, GM4, GM5, GM7, GM14
3	GM2, GM4, GM5, GM6, GM7, GM10, GM11, GM14
2	GM2, GM4, GM5, GM7, GM14
1	GM2, GM4, GM5, GM7, GM14
0	Tidak ada yang melewati

Berdasarkan Tabel 4.8, terlihat bahwa Lantai 3 kembali menjadi tingkat paling kritis untuk arah Y Mode 2, di mana terdapat 8 (delapan) variasi *Ground Motion* yang menghasilkan simpangan melampaui batas izin. Fenomena ini konsisten dengan temuan pada mode-mode sebelumnya, yang mengonfirmasi

adanya konsentrasi tegangan atau perubahan kekakuan yang signifikan pada tingkat tersebut. Selain itu, *Ground Motion* GM2 dan GM7 tercatat sebagai gempa dengan pengaruh paling dominan, karena memicu kegagalan di hampir seluruh lantai bangunan (23 dari 24 lantai), dengan satu-satunya lantai yang lolos adalah Lantai 0 (dasar). Menariknya, Lantai 0 sama sekali tidak mengalami kegagalan pada seluruh variasi gempa, yang mengindikasikan bahwa respons pada lantai dasar untuk arah Y masih berada dalam batas aman.

4.7.3 Persentase Jumlah Lantai yang Melewati Batas per Ground Motion

Untuk meninjau tingkat bahaya relatif dari masing-masing *Ground Motion*, dilakukan perhitungan persentase jumlah lantai yang mengalami kegagalan ($\text{drift} > 0,020$) terhadap total 24 lantai. Hasilnya disajikan pada Tabel 4.9

Tabel 4. 9: Persentase Tingkat Kegagalan Struktur per Ground Motion (Arah Y Mode 2).

Ground Motion	Jumlah Lantai Melewati (0,020)	Persentase (%)
GM1	0	0 %
GM2	23	95,83 %
GM3	0	0 %
GM4	19	79,17 %
GM5	20	83,33 %
GM6	3	12,50 %
GM7	23	95,83 %
GM8	0	0 %
GM9	0	0 %
GM10	1	4,17 %
GM11	10	41,67 %
GM12	0	0 %
GM13	0	0 %
GM14	19	79,17 %
GM15	0	0 %

Dari tabel di atas, dapat diketahui bahwa GM2 dan GM7 merupakan *Ground Motion* dengan pengaruh paling ekstrem, yang menyebabkan hampir seluruh lantai (95,83%) mengalami simpangan melewati batas. Kondisi ini mengindikasikan bahwa kedua rekaman gempa tersebut memiliki karakteristik frekuensi yang sangat dominan terhadap respons struktur gedung ini

pada arah Y Mode 2. Selain itu, GM4, GM5, dan GM14 juga menunjukkan pengaruh yang sangat besar dengan persentase kegagalan masing-masing sebesar 79,17%, 83,33%, dan 79,17%.

Di sisi lain, GM1, GM3, GM8, GM9, GM12, GM13, dan GM15 terbukti aman karena tidak memicu kegagalan pada satu pun tingkat bangunan (0%). Hal ini mempertegas bahwa pemilihan *Ground Motion* yang representatif dalam analisis waktu riwayat (*time history*) sangat krusial, karena variasi rekaman gempa yang berbeda dapat menghasilkan tingkat kinerja struktur yang sangat bervariasi. Secara khusus, GM10 dan GM6 hanya memicu kegagalan pada Lantai 3 saja, sehingga tergolong memiliki tingkat bahaya yang rendah.

4.8 Analisis Simpangan Antar Lantai (Story Drift) Akibat Gempa Jauh Arah X Mode 1

Pada sub-bab ini dilakukan evaluasi terhadap nilai simpangan antar lantai (*story drift ratio*) struktur arah X berdasarkan 20 variasi *Ground Motion* (GM) pada kondisi Gempa Jauh Mode 1. Batas simpangan izin (*drift izin*) yang digunakan mengacu pada ketentuan perencanaan tahan gempa, yaitu sebesar 0,020. Evaluasi dilakukan pada seluruh tingkat bangunan, mulai dari Lantai 23 hingga Lantai 0 (total 24 tingkat). Berikut adalah rekapitulasi hasil evaluasi yang telah dilakukan.

4.8.1 Rekapitulasi Ground Motion yang Melewati Batas Drift Izin

Berdasarkan hasil rekapitulasi data, dari 20 (dua puluh) variasi *Ground Motion* yang ditinjau, seluruhnya (20 GM) memiliki setidaknya satu tingkat yang mengalami simpangan antar lantai melebihi batas izin 0,020. Dengan demikian, tidak terdapat satupun *Ground Motion* yang aman secara keseluruhan terhadap batas simpangan yang ditinjau.

Daftar *Ground Motion* yang dinyatakan melewati batas drift izin adalah sebagai berikut:

GM1, GM2, GM3, GM4, GM5, GM6, GM7, GM8, GM9, GM10, GM11, GM12, GM13, GM14, GM15, GM16, GM17, GM18, GM19, dan GM20.

Hasil ini mengindikasikan bahwa pada kondisi gempa jauh arah X, seluruh variasi rekaman gempa memberikan pengaruh signifikan terhadap respons struktur, dengan tingkat kegagalan yang bervariasi antar lantai.

4.8.2 Daftar Ground Motion Berlebih per Tingkat Lantai

Untuk mengetahui distribusi tingkat kegagalan, dilakukan perhitungan pada setiap lantai. Tabel 4.10 menyajikan daftar *Ground Motion* mana saja yang menyebabkan nilai *story drift* melebihi batas 0,020 pada masing-masing tingkat untuk analisis gempa jauh arah X Mode 1.

Tabel 4. 10: Rekapitulasi Ground Motion yang Melebihi Drift Izin per Tingkat Lantai (Gempa Jauh Arah X Mode 1).

Lantai	Ground Motion yang Melewati Batas 0,020
23	GM1, GM2, GM3, GM4, GM6
22	GM1, GM2, GM3, GM4, GM6
21	GM1, GM2, GM3, GM4, GM6
20	GM1, GM2, GM3, GM4, GM6
19	GM1, GM2, GM3, GM4, GM6
18	GM1, GM2, GM3, GM4, GM6
17	GM1, GM2, GM3, GM4, GM5, GM6
16	GM1, GM2, GM3, GM4, GM6
15	GM1, GM2, GM3, GM4, GM6
14	GM1, GM2, GM3, GM4, GM6
13	GM1, GM2, GM3, GM4, GM6
12	GM1, GM2, GM3, GM4, GM6
11	GM1, GM2, GM3, GM4, GM6
10	GM1, GM2, GM3, GM4, GM6
9	GM1, GM2, GM3, GM4, GM6
8	GM1, GM2, GM3, GM4, GM6
7	GM1, GM2, GM3, GM4, GM6
6	GM1, GM2, GM3, GM4, GM6
5	GM1, GM2, GM3, GM4, GM6
4	GM1, GM2, GM3, GM4, GM6
3	GM1, GM2, GM3, GM4, GM5, GM6, GM7, GM8, GM9, GM10, GM11, GM12, GM13, GM14, GM15, GM16, GM17, GM18, GM19, GM20
2	GM1, GM2, GM3, GM4, GM6
1	GM1, GM2, GM3, GM4, GM6
0	GM1, GM2, GM3, GM4

Berdasarkan Tabel 4.10, terlihat bahwa Lantai 3 merupakan tingkat paling kritis, di mana seluruh variasi *Ground Motion* (20 GM atau 100%) menghasilkan simpangan yang melampaui batas izin. Fenomena ini mengonfirmasi adanya konsentrasi tegangan atau perubahan kekakuan yang signifikan pada tingkat tersebut, yang konsisten dengan temuan pada kasus gempa dekat sebelumnya. Selain itu, *Ground Motion* GM1, GM2, GM3, GM4, dan GM6 tercatat sebagai gempa dengan pengaruh paling dominan karena memicu kegagalan di hampir seluruh lantai bangunan (23 dari 24 lantai). Menariknya, GM5 hanya memicu kegagalan pada Lantai 3 dan Lantai 17, sedangkan GM7 hingga GM20 (kecuali GM6) hanya memicu kegagalan pada Lantai 3 saja.

4.8.3 Persentase Jumlah Lantai yang Melewati Batas per *Ground Motion*

Untuk meninjau tingkat bahaya relatif dari masing-masing *Ground Motion*, dilakukan perhitungan persentase jumlah lantai yang mengalami kegagalan ($\text{drift} > 0,020$) terhadap total 24 lantai. Hasilnya disajikan pada Tabel 4.11.2.

Tabel 4. 11: Persentase Tingkat Kegagalan Struktur per *Ground Motion* (Gempa Jauh Arah X Mode 1).

Ground motion	Jumlah Lantai Melewati 0,020	Persentase (%)
GM1	24	100 %
GM2	24	100%
GM3	24	100%
GM4	24	100%
GM5	2	8,33%
GM6	23	95,83%
GM7	1	4,17%
GM8	1	4,17%
GM9	1	4,17%
GM10	1	4,17%
GM11	1	4,17%
GM12	1	4,17%
GM13	1	4,17%
GM14	1	4,17%
GM15	1	4,17%
GM16	1	4,17%
GM17	1	4,17%
GM18	1	4,17%

Tabel 4.11: *Lanjutan.*

GM19	1	4,17%
GM20	1	4,17%

Dari tabel di atas, dapat diketahui bahwa terdapat 4 (empat) buah *Ground Motion* yang menyebabkan seluruh lantai (100%) mengalami simpangan melewati batas, yaitu GM1, GM2, GM3, dan GM4. Hal ini menunjukkan bahwa keempat rekaman gempa tersebut memiliki karakteristik frekuensi yang sangat dominan terhadap respons struktur gedung ini pada arah X untuk kasus gempa jauh. Selain itu, GM6 juga menunjukkan pengaruh yang sangat besar dengan persentase kegagalan mencapai 95,83% (hanya Lantai 0 yang lolos). Di sisi lain, GM7 hingga GM20 (13 GM) hanya memicu kegagalan pada 1 lantai (Lantai 3) dengan persentase 4,17%, sedangkan GM5 memicu kegagalan pada 2 lantai (Lantai 3 dan 17) dengan persentase 8,33%. Hal ini mengindikasikan bahwa meskipun seluruh GM melewati batas, tingkat bahaya yang ditimbulkan sangat bervariasi, di mana mayoritas GM justru hanya bermasalah pada satu tingkat kritis (Lantai 3).

4.9 Analisis Simpangan Antar Lantai (Story Drift) Akibat Gempa Jauh Arah Y Mode 1

Pada sub-bab ini dilakukan evaluasi terhadap nilai simpangan antar lantai (*story drift ratio*) struktur arah Y berdasarkan 20 variasi *Ground Motion* (GM) pada kondisi Gempa Jauh Mode 1. Batas simpangan izin (*drift izin*) yang digunakan mengacu pada ketentuan perencanaan tahan gempa, yaitu sebesar 0,020. Evaluasi dilakukan pada seluruh tingkat bangunan, mulai dari Lantai 23 hingga Lantai 0 (total 24 tingkat). Berikut adalah rekapitulasi hasil evaluasi yang telah dilakukan.

4.9.1 Rekapitulasi Ground Motion yang Melewati Batas Drift Izin

Berdasarkan hasil rekapitulasi data, dari 20 (dua puluh) variasi *Ground Motion* yang ditinjau, terdapat 10 (sepuluh) *Ground Motion* yang memiliki setidaknya satu tingkat yang mengalami simpangan antar lantai melebihi batas izin 0,020. Adapun 10 (sepuluh) *Ground Motion* lainnya, yaitu GM6, GM7, GM8, GM9, GM10, GM12, GM13, GM14, GM17, dan GM20, tidak menyebabkan terjadinya *story drift* berlebih pada seluruh tingkat bangunan.

Daftar Ground Motion yang dinyatakan melewati batas drift izin adalah sebagai berikut:

GM1, GM2, GM3, GM4, GM5, GM11, GM15, GM16, GM18, dan GM19.

Hasil ini mengindikasikan bahwa pada kondisi gempa jauh arah Y, hanya separuh dari variasi rekaman gempa yang memberikan pengaruh signifikan terhadap respons struktur. Hal ini menunjukkan bahwa karakteristik frekuensi gempa jauh pada arah Y memiliki variasi yang cukup besar, di mana beberapa rekaman tergolong aman secara keseluruhan.

4.9.2 Daftar Ground Motion Berlebih per Tingkat Lantai

Untuk mengetahui distribusi tingkat kegagalan, dilakukan perhitungan pada setiap lantai. Tabel 4.12.1 menyajikan daftar *Ground Motion* mana saja yang menyebabkan nilai *story drift* melebihi batas 0,020 pada masing-masing tingkat untuk analisis gempa jauh arah Y Mode 1.

Tabel 4. 12: Rekapitulasi Ground Motion yang Melebihi Drift Izin per Tingkat Lantai (Gempa Jauh Arah Y Mode 1).

20	GM1, GM2, GM3, GM4, GM5, GM16, GM18, GM19
23	GM1, GM2, GM3, GM5, GM16, GM18, GM19
22	GM1, GM2, GM3, GM5, GM16, GM18, GM19
21	GM1, GM2, GM3, GM5, GM16, GM18, GM19
20	GM1, GM2, GM3, GM4, GM5, GM16, GM18, GM19
19	GM1, GM2, GM3, GM4, GM5, GM16, GM18, GM19
18	GM1, GM2, GM3, GM4, GM5, GM11, GM16, GM18, GM19
17	GM1, GM2, GM3, GM4, GM5, GM11, GM16, GM18, GM19
16	GM1, GM2, GM3, GM4, GM5, GM11, GM16, GM18, GM19
15	GM1, GM2, GM3, GM4, GM5, GM11, GM16, GM18, GM19
14	GM1, GM2, GM3, GM4, GM5, GM11, GM16, GM19
13	GM1, GM3, GM4, GM11, GM16, GM19
12	GM1, GM3, GM4, GM11, GM16, GM19
11	GM1, GM3, GM4, GM11, GM16, GM19
10	GM1, GM4, GM11, GM16, GM19
9	GM1, GM4, GM11, GM16, GM19
8	GM1, GM3, GM4, GM11, GM16, GM19

7	GM1, GM3, GM4, GM11, GM16, GM19
---	---------------------------------

Tabel 4.12: *Lanjutan.*

6	GM1, GM3, GM4, GM11, GM16, GM19
5	GM1, GM3, GM16, GM19
4	GM1, GM2, GM3, GM16, GM19
3	GM1, GM2, GM3, GM4, GM5, GM11, GM15, GM16, GM18, GM19
2	GM1, GM3, GM16, GM19
1	GM1, GM3, GM19
0	Tidak ada

Berdasarkan Tabel 4.12, terlihat bahwa Lantai 3 merupakan tingkat paling kritis, di mana terdapat 10 (sepuluh) variasi *Ground Motion* yang menghasilkan simpangan melampaui batas izin. Fenomena ini konsisten dengan temuan pada kasus-kasus sebelumnya, yang mengonfirmasi adanya konsentrasi tegangan atau perubahan kekakuan yang signifikan pada tingkat tersebut. Selain itu, *Ground Motion* GM1, GM3, GM16, dan GM19 tercatat sebagai gempa dengan pengaruh paling dominan karena memicu kegagalan di hampir seluruh lantai bangunan (lebih dari 20 lantai). Menariknya, Lantai 0 (dasar) sama sekali tidak mengalami kegagalan pada seluruh variasi gempa, yang mengindikasikan bahwa respons pada lantai dasar untuk kasus gempa jauh arah Y masih berada dalam batas aman.

4.9.3 Persentase Jumlah Lantai yang Melewati Batas per *Ground Motion*

Untuk meninjau tingkat bahaya relatif dari masing-masing *Ground Motion*, dilakukan perhitungan persentase jumlah lantai yang mengalami kegagalan ($\text{drift} > 0,020$) terhadap total 24 lantai. Hasilnya disajikan pada Tabel 4.13

Tabel 4. 13: Persentase Tingkat Kegagalan Struktur per *Ground Motion* (Gempa Jauh Arah Y Mode 1).

Ground Motion	Jumlah lantai Melewati 0,020	Persentase (%)
GM1	23	95,83%
GM2	12	50%
GM3	21	87,50%
GM4	16	66,67%
GM5	11	45,83%
GM6	0	0%
GM7	0	0%
GM8	0	0%

GM9	0	0%
-----	---	----

Tabel 4.13: *lanjutan.*

GM10	0	0%
GM11	14	58,33%
GM12	0	0%
GM13	0	0%
GM14	0	0%
GM15	1	4,17%
GM16	22	91,67%
GM17	0	0%
GM18	10	41,67%
GM19	23	95,83%
GM20	0	0%

Dari tabel di atas, dapat diketahui bahwa GM1 dan GM19 merupakan *Ground Motion* dengan pengaruh paling ekstrem, yang menyebabkan hampir seluruh lantai (95,83%) mengalami simpangan melewati batas. Kedua rekaman gempa ini hanya menyisakan Lantai 0 yang lolos dari batas drift izin. Selain itu, GM3 juga menunjukkan pengaruh yang sangat besar dengan persentase kegagalan mencapai 87,50%, sedangkan GM16 memiliki persentase 91,67%.

Di sisi lain, terdapat 10 (sepuluh) *Ground Motion* yang terbukti aman karena tidak memicu kegagalan pada satu pun tingkat bangunan (0%), yaitu GM6, GM7, GM8, GM9, GM10, GM12, GM13, GM14, GM17, dan GM20. Hal ini mempertegas bahwa pemilihan *Ground Motion* yang representatif dalam analisis waktu riwayat (*time history*) sangat krusial, karena variasi rekaman gempa yang berbeda dapat menghasilkan tingkat kinerja struktur yang sangat bervariasi. Secara khusus, GM15 hanya memicu kegagalan pada Lantai 3 saja (4,17%), sehingga tergolong memiliki tingkat bahaya yang sangat rendah.

4.10 Analisis Simpangan Antar Lantai (Story Drift) Akibat Gempa Jauh Arah X Mode 2

Pada sub-bab ini dilakukan evaluasi terhadap nilai simpangan antar lantai (*story drift ratio*) struktur arah X berdasarkan 20 variasi *Ground Motion* (GM) pada kondisi Gempa Jauh Mode 2. Batas simpangan izin (*drift izin*) yang digunakan mengacu pada ketentuan perencanaan tahan gempa, yaitu sebesar 0,020. Evaluasi

dilakukan pada seluruh tingkat bangunan, mulai dari Lantai 23 hingga Lantai 0 (total 24 tingkat). Berikut adalah rekapitulasi hasil evaluasi yang telah dilakukan.

4.10.1 Rekapitulasi Ground Motion yang Melewati Batas Drift Izin

Berdasarkan hasil rekapitulasi data, dari 20 (dua puluh) variasi *Ground Motion* yang ditinjau, terdapat 18 (delapan belas) *Ground Motion* yang memiliki setidaknya satu tingkat yang mengalami simpangan antar lantai melebihi batas izin 0,020. Adapun 2 (dua) *Ground Motion* lainnya, yaitu GM8 dan GM16, tidak menyebabkan terjadinya *story drift* berlebih pada seluruh tingkat bangunan.

Daftar *Ground Motion* yang dinyatakan melewati batas drift izin adalah sebagai berikut:

GM1, GM2, GM3, GM4, GM5, GM6, GM7, GM9, GM10, GM11, GM12, GM13, GM14, GM15, GM17, GM18, GM19, dan GM20.

Hasil ini mengindikasikan bahwa pada kondisi gempa jauh arah X Mode 2, hampir seluruh variasi rekaman gempa (90%) memberikan pengaruh signifikan terhadap respons struktur, dengan tingkat kegagalan yang bervariasi antar lantai. Hanya GM8 dan GM16 yang tergolong aman secara keseluruhan.

4.10.2 Daftar Ground Motion Berlebih per Tingkat Lantai

Untuk mengetahui distribusi tingkat kegagalan, dilakukan perhitungan pada setiap lantai. Tabel 4.14 menyajikan daftar *Ground Motion* mana saja yang menyebabkan nilai *story drift* melebihi batas 0,020 pada masing-masing tingkat untuk analisis gempa jauh arah X Mode 2.

Tabel 4. 14: Rekapitulasi *Ground Motion* yang Melebihi Drift Izin per Tingkat Lantai (Gempa Jauh Arah X Mode 2).

Lantai	Ground Motion yang Melewati Batas 0,020
23	GM1, GM2, GM3, GM4
22	GM1, GM2, GM3, GM4, GM18
21	GM1, GM2, GM3, GM4, GM6, GM18, GM19
20	GM1, GM2, GM3, GM4, GM6, GM18, GM19
19	GM1, GM2, GM3, GM4, GM6, GM18, GM19

Tabel 4.14: *lanjutan.*

18	GM1, GM2, GM3, GM4, GM6, GM13, GM18, GM19
17	GM1, GM2, GM3, GM4, GM6, GM7, GM13, GM17, GM18, GM19
16	GM1, GM2, GM3, GM4, GM6, GM7, GM12, GM13, GM17, GM18, GM19
15	GM1, GM2, GM3, GM4, GM7, GM12, GM13, GM17, GM18, GM19
14	GM1, GM2, GM3, GM4, GM7, GM12, GM13, GM17, GM18, GM19
13	GM1, GM2, GM3, GM4, GM7, GM9, GM11, GM12, GM13, GM17, GM18, GM19
12	GM1, GM3, GM4, GM7, GM9, GM11, GM12, GM13, GM17, GM18, GM19
11	GM1, GM4, GM7, GM9, GM11, GM12, GM13, GM17, GM18, GM19
10	GM1, GM4, GM7, GM9, GM11, GM12, GM13, GM17, GM18, GM19
9	GM1, GM4, GM7, GM9, GM11, GM12, GM13, GM17, GM18, GM19
8	GM1, GM4, GM7, GM9, GM11, GM12, GM13, GM17, GM18, GM19
7	GM1, GM4, GM7, GM9, GM11, GM12, GM13, GM17, GM18, GM19
6	GM1, GM2, GM3, GM4, GM12, GM13, GM17, GM18, GM19
5	GM1, GM3, GM4, GM12, GM13, GM17, GM18, GM19
4	GM1, GM3, GM4, GM18, GM19
3	GM1, GM2, GM3, GM4, GM5, GM6, GM7, GM9, GM10, GM11, GM12, GM13, GM14, GM15, GM17, GM18, GM19, GM20
2	GM1, GM2, GM3, GM4, GM18
1	GM1, GM2, GM3, GM4, GM13, GM18, GM19
0	Tidak ada

Berdasarkan Tabel 4.14, terlihat bahwa Lantai 3 kembali menjadi tingkat paling kritis, di mana terdapat 18 (delapan belas) variasi *Ground Motion* yang menghasilkan simpangan melampaui batas izin. Hanya GM8 dan GM16 yang lolos pada lantai ini. Fenomena ini konsisten dengan temuan pada kasus-kasus sebelumnya, yang mengonfirmasi adanya konsentrasi tegangan atau perubahan kekakuan yang signifikan pada tingkat tersebut. Selain itu, *Ground Motion* GM1, GM3, GM4, GM18, dan GM19 tercatat sebagai gempa dengan pengaruh paling dominan karena memicu kegagalan di hampir seluruh lantai bangunan.

Menariknya, Lantai 0 (dasar) sama sekali tidak mengalami kegagalan pada seluruh variasi gempa, yang mengindikasikan bahwa respons pada lantai dasar untuk kasus gempa jauh arah X Mode 2 masih berada dalam batas aman.

4.10.3 Persentase Jumlah Lantai yang Melewati Batas per Ground Motion

Untuk meninjau tingkat bahaya relatif dari masing-masing *Ground Motion*, dilakukan perhitungan persentase jumlah lantai yang mengalami kegagalan ($\text{drift} > 0,020$) terhadap total 24 lantai. Hasilnya disajikan pada Tabel 4.15.

Tabel 4. 15: Persentase Tingkat Kegagalan Struktur per Ground Motion (Gempa Jauh Arah X Mode 2).

Ground Motion	Jumlah Lantai Melewati 0,020	Persentase (%)
GM1	23	95,83 %
GM2	15	62,50 %
GM3	18	75 %
GM4	23	95,83 %
GM5	1	4,17 %
GM6	7	29,17 %
GM7	12	50 %
GM8	0	0 %
GM9	8	33,33 %
GM10	1	4,17 %
GM11	8	33,33 %
GM12	14	58,33 %
GM13	17	70,83 %
GM14	1	4,17 %
GM15	1	4,17 %
GM16	0	0 %
GM17	15	62,50 %
GM18	22	91,67%
GM19	20	83,33%
GM20	0	4,17%

Dari tabel di atas, dapat diketahui bahwa GM1 dan GM4 merupakan *Ground Motion* dengan pengaruh paling ekstrem, yang menyebabkan hampir seluruh lantai (95,83%) mengalami simpangan melewati batas. Kedua rekaman gempa ini hanya menyisakan Lantai 0 yang lolos dari batas

drift izin. Selain itu, GM18 juga menunjukkan pengaruh yang sangat besar dengan persentase kegagalan mencapai 91,67%, sedangkan GM19 memiliki persentase 83,33%. GM3 dan GM13 masing-masing mencapai 75,00% dan 70,83%.

Di sisi lain, GM8 dan GM16 terbukti aman karena tidak memicu kegagalan pada satu pun tingkat bangunan (0%). Hal ini mempertegas bahwa pemilihan *Ground Motion* yang representatif dalam analisis waktu riwayat (*time history*) sangat krusial, karena variasi rekaman gempa yang berbeda dapat menghasilkan tingkat kinerja struktur yang sangat bervariasi. Secara khusus, GM5, GM10, GM14, GM15, dan GM20 hanya memicu kegagalan pada Lantai 3 saja (4,17%), sehingga tergolong memiliki tingkat bahaya yang sangat rendah.

4.11 Analisis Simpangan Antar Lantai (Story Drift) Akibat Gempa Jauh Arah Y Mode 2

Pada sub-bab ini dilakukan evaluasi terhadap nilai simpangan antar lantai (*story drift ratio*) struktur arah Y berdasarkan 20 variasi *Ground Motion* (GM) pada kondisi Gempa Jauh Mode 2. Batas simpangan izin (*drift izin*) yang digunakan mengacu pada ketentuan perencanaan tahan gempa, yaitu sebesar 0,020. Evaluasi dilakukan pada seluruh tingkat bangunan, mulai dari Lantai 23 hingga Lantai 0 (total 24 tingkat). Berikut adalah rekapitulasi hasil evaluasi yang telah dilakukan.

4.11.1 Rekapitulasi Ground Motion yang Melewati Batas Drift Izin

Berdasarkan hasil rekapitulasi data, dari 20 (dua puluh) variasi *Ground Motion* yang ditinjau, terdapat 12 (dua belas) *Ground Motion* yang memiliki setidaknya satu tingkat yang mengalami simpangan antar lantai melebihi batas izin 0,020. Adapun 8 (delapan) *Ground Motion* lainnya, yaitu GM4, GM7, GM8, GM9, GM10, GM12, GM13, dan GM17, tidak menyebabkan terjadinya *story drift* berlebih pada seluruh tingkat bangunan.

Daftar *Ground Motion* yang dinyatakan melewati batas drift izin adalah sebagai berikut:

GM1, GM2, GM3, GM5, GM6, GM11, GM14, GM15, GM16, GM18, GM19, dan GM20.

Hasil ini mengindikasikan bahwa pada kondisi gempa jauh arah Y Mode 2, terdapat 60% dari variasi rekaman gempa yang memberikan pengaruh signifikan terhadap respons struktur, sedangkan 40% lainnya tergolong aman secara keseluruhan.

4.11.2 Daftar Ground Motion Berlebih per Tingkat Lantai

Untuk mengetahui distribusi tingkat kegagalan, dilakukan perhitungan pada setiap lantai. Tabel 4.16 menyajikan daftar *Ground Motion* mana saja yang menyebabkan nilai *story drift* melebihi batas 0,020 pada masing-masing tingkat untuk analisis gempa jauh arah Y Mode 2.

Tabel 4. 16: Rekapitulasi Ground Motion yang Melebihi Drift Izin per Tingkat Lantai (Gempa Jauh Arah Y Mode 2)

lantai	Ground Motion yang Melewati Batas 0,020
23	GM1, GM2, GM3, GM18, GM19
22	GM1, GM2, GM3, GM18, GM19
21	GM1, GM2, GM3, GM5, GM6, GM18, GM19
20	GM1, GM2, GM3, GM5, GM6, GM18, GM19
19	GM1, GM2, GM3, GM5, GM6, GM18, GM19
18	GM1, GM2, GM3, GM5, GM6, GM18, GM19
17	GM1, GM2, GM3, GM5, GM6, GM18, GM19
16	GM1, GM2, GM3, GM5, GM6, GM11, GM18, GM19
15	GM1, GM2, GM3, GM11, GM18, GM19
14	GM1, GM2, GM3, GM11, GM18, GM19
13	GM1, GM2, GM3, GM11, GM18, GM19
12	GM1, GM2, GM3, GM11, GM14, GM18, GM19
11	GM1, GM2, GM3, GM11, GM14, GM18, GM19
10	GM2, GM11, GM14, GM18, GM19
9	GM2, GM11, GM14, GM18, GM19
8	GM1, GM2, GM3, GM11, GM18, GM19
7	GM1, GM2, GM3, GM11, GM18, GM19
6	GM1, GM2, GM3, GM11, GM18, GM19
5	GM1, GM2, GM3, GM11, GM18, GM19
4	GM1, GM2, GM3, GM11, GM18, GM19

3	GM1, GM2, GM3, GM5, GM6, GM11, GM14, GM15, GM16, GM18, GM19, GM20
2	GM1, GM2, GM18, GM19
1	GM1, GM2, GM3, GM18, GM19
0	Tidak ada

Berdasarkan Tabel 4.16, terlihat bahwa Lantai 3 kembali menjadi tingkat paling kritis, di mana terdapat 12 (dua belas) variasi *Ground Motion* yang menghasilkan simpangan melampaui batas izin. Fenomena ini konsisten dengan temuan pada kasus-kasus sebelumnya, yang mengonfirmasi adanya konsentrasi tegangan atau perubahan kekakuan yang signifikan pada tingkat tersebut. Selain itu, *Ground Motion* GM1, GM2, GM3, GM18, dan GM19 tercatat sebagai gempa dengan pengaruh paling dominan karena memicu kegagalan di hampir seluruh lantai bangunan (lebih dari 20 lantai). Menariknya, Lantai 0 (dasar) sama sekali tidak mengalami kegagalan pada seluruh variasi gempa, yang mengindikasikan bahwa respons pada lantai dasar untuk kasus gempa jauh arah Y Mode 2 masih berada dalam batas aman.

4.11.3 Persentase Jumlah Lantai yang Melewati Batas per *Ground Motion*

Untuk meninjau tingkat bahaya relatif dari masing-masing *Ground Motion*, dilakukan perhitungan persentase jumlah lantai yang mengalami kegagalan ($\text{drift} > 0,020$) terhadap total 24 lantai. Hasilnya disajikan pada Tabel 4.18.

Tabel 4. 17: Persentase Tingkat Kegagalan Struktur per *Ground Motion* (Gempa Jauh Arah Y Mode 2).

Ground Motion	Jumlah Lantai Melewati 0,020	Persentase (%)
GM1	22	91,67%
GM2	23	95,83%
GM3	22	91,67%
GM4	0	0%
GM5	9	37,50%
GM6	9	37,50%
GM7	0	0%
GM8	0	0%
GM9	0	0%
GM10	0	0%
GM11	15	62,50%
GM12	0	0%

GM13	0	0%
GM14	4	16,67%
GM15	2	8,33%
GM16	2	8,33%
GM17	0	0%

Tabel 4.17: *Lanjutan.*

GM18	23	95,83%
GM19	23	95,83%
GM20	2	8,33%

Dari tabel di atas, dapat diketahui bahwa GM2, GM18, dan GM19 merupakan *Ground Motion* dengan pengaruh paling ekstrem, yang menyebabkan hampir seluruh lantai (95,83%) mengalami simpangan melewati batas. Kedua rekaman gempa ini hanya menyisakan Lantai 0 yang lolos dari batas drift izin. Selain itu, GM1 dan GM3 juga menunjukkan pengaruh yang sangat besar dengan persentase kegagalan mencapai 91,67%. GM11 memiliki persentase 62,50%, sedangkan GM5 dan GM6 masing-masing mencapai 37,50%.

Di sisi lain, terdapat 8 (delapan) *Ground Motion* yang terbukti aman karena tidak memicu kegagalan pada satu pun tingkat bangunan (0%), yaitu GM4, GM7, GM8, GM9, GM10, GM12, GM13, dan GM17. Hal ini mempertegas bahwa pemilihan *Ground Motion* yang representatif dalam analisis waktu riwayat (*time history*) sangat krusial, karena variasi rekaman gempa yang berbeda dapat menghasilkan tingkat kinerja struktur yang sangat bervariasi. Secara khusus, GM15, GM16, dan GM20 hanya memicu kegagalan pada Lantai 3 dan beberapa lantai lainnya dengan persentase 8,33%, sehingga tergolong memiliki tingkat bahaya yang rendah.

4.11.4 Analisis Probabilitas Kerusakan Berdasarkan Simpangan Antar Tingkat

Prosedur pengolahan data statistik untuk menghasilkan kurva probabilitas kumulatif ini dilakukan secara bertahap menggunakan perangkat lunak Microsoft Excel. Tahap awal adalah mengekstraksi nilai simpangan antar tingkat maksimum (*maximum inter-story drift ratio*) dari setiap rekaman gempa yang telah dianalisis melalui metode Respons Spektrum (RSA) linier pada struktur sistem ganda. Nilai-

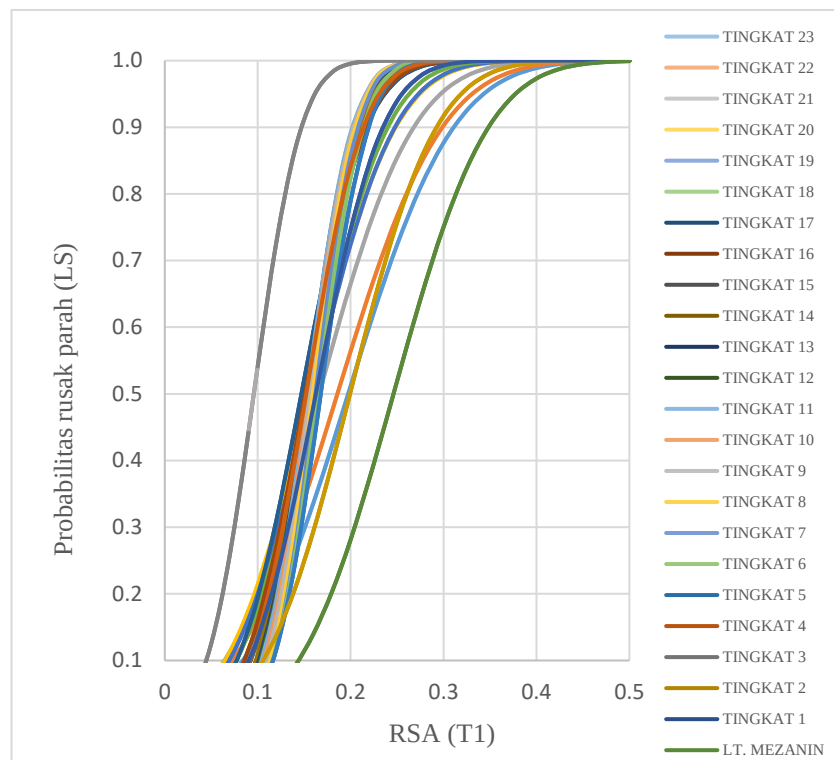
nilai simpangan dari seluruh skenario gempa tersebut kemudian diurutkan (*sort ascending*) dari nilai terkecil hingga terbesar untuk membentuk distribusi empiris

Sub-bab ini memuat tahapan krusial dalam penelitian, yaitu transformasi respons dinamik struktur dari ranah deterministik ke ranah probabilistik untuk menilai kerentanan seismik (*seismic fragility*) gedung tinggi. Secara spesifik, prosedur ini bertujuan untuk mengkonversi besaran simpangan antar tingkat maksimum (*maximum inter-story drift ratio*) yang diperoleh dari analisis respons spektrum (RSA) linier menjadi kurva probabilitas kumulatif kerusakan. Kurva-kurva ini menjadi dasar kuantitatif untuk memprediksi peluang suatu lantai mencapai atau melampaui ambang batas kinerja struktur, yaitu kondisi Kerusakan Parah (*Life Safety – LS*) dengan batas simpangan 0,020 dan kondisi Hampir Rubuh (*Near Collapse – NC*) dengan batas simpangan 0,040.

Metodologi yang diterapkan mengikuti alur analisis statistik yang sistematis. Seluruh data simpangan puncak dari setiap rekaman gempa baik dari sumber gempa dekat (*near-fault*) maupun jauh (*far-fault*) diekstraksi dan diurutkan secara ascending untuk membentuk distribusi empiris. Selanjutnya, pendekatan distribusi lognormal digunakan untuk memodelkan ketidakpastian aleatorik (*aleatory uncertainties*) yang melekat pada parameter gempa dan respons struktur. Parameter statistik utama, yaitu nilai median (kecenderungan pusat) dan standar deviasi lognormal (tingkat dispersi data), diestimasi untuk masing-masing kondisi batas dan tipe gempa. Estimasi ini tidak hanya menggambarkan tingkat intensitas gempa yang diperlukan untuk mencapai probabilitas kerusakan sebesar 50% (median), tetapi juga mengkuantifikasi tingkat kepercayaan terhadap hasil analisis.

Grafik ini menyajikan peluang kegagalan struktur saat memasuki batas kerusakan parah (LS) dan Hampir rubuh (NC) berdasarkan simpangan antar tingkat. meliputi: (i) kurva probabilitas LS dan NC secara terpisah untuk setiap lantai; (ii) kurva perbandingan langsung (*overlay*) antara kedua tingkat kinerja pada lantai kritis; serta (iii) kurva perbandingan antara pengaruh gempa dekat dan gempa jauh. Dengan demikian, sub-bab ini berfungsi sebagai jembatan metodologis yang menghubungkan hasil analisis dinamik linear dengan evaluasi risiko kegagalan

struktur, yang selanjutnya menjadi landasan dalam perumusan rekomendasi perkuatan seismik berbasis kinerja (*performance-based design*) pada gedung bertingkat tinggi di wilayah dengan karakteristik kegempaan yang beragam.



Gambar 4. 2: Grafik Probabilitas Rusak Parah (LS) Pada Semua Lantai Akibat Spektra Respon Percepatan Gempa Dekat Arah X Mode 1.

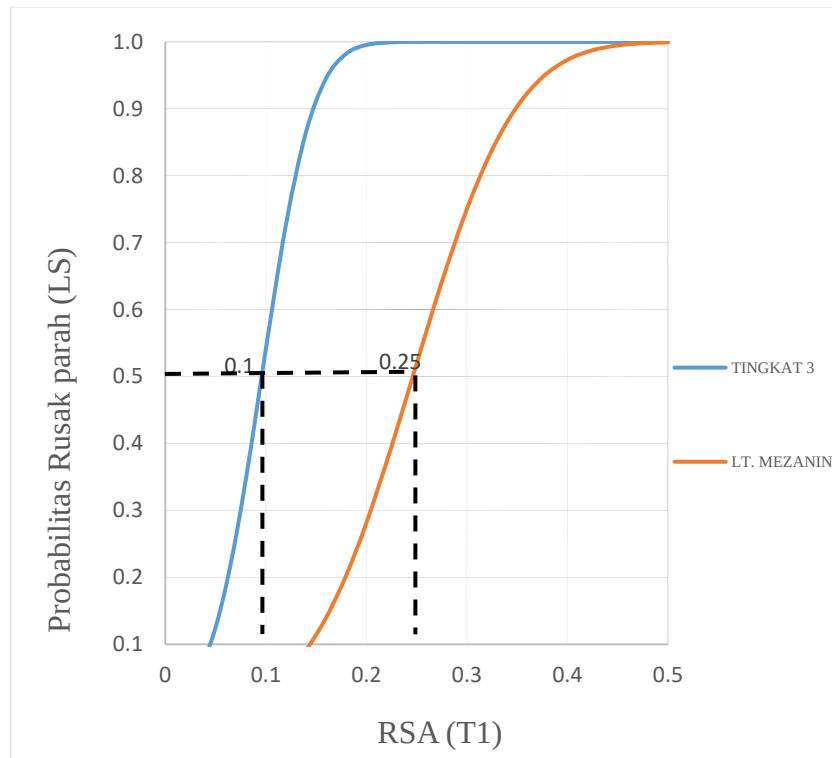
Grafik pada Gambar 4.2 menyajikan korelasi antara tingkat intensitas gempa yang direpresentasikan melalui nilai Respons Spektra Percepatan pada periode fundamental struktur ($RSA\ T1$) terhadap probabilitas terjadinya kerusakan parah (*Severe Damage / Life Safety – LS*) pada setiap lantai gedung. Sumbu vertikal (ordinat) merepresentasikan nilai probabilitas, sedangkan sumbu horizontal (absis) menunjukkan besaran $RSA\ T1$ yang bervariasi. Setiap kurva pada grafik merepresentasikan respons dinamik spesifik dari masing-masing tingkat lantai terhadap peningkatan beban gempa.

Ambang batas kerusakan parah (LS) pada analisis ini ditetapkan berdasarkan kondisi batas *Interstory Drift Ratio* (IDR) sebesar 0,020. Nilai IDR ini

merujuk pada batasan plastisitas struktur yang mengindikasikan bahwa elemen-elemen vertikal dan horizontal telah mengalami deformasi inelastis signifikan hingga mendekati batas kapasitas daktilitasnya, dimana elemen struktur telah kehilangan sebagian besar kekakuan dan kekuatannya tanpa terjadinya keruntuhan total (*collapse prevention*).

Secara kualitatif, grafik tersebut memperlihatkan tren peningkatan probabilitas kerusakan parah yang konsisten seiring dengan meningkatnya nilai *RSA T1*. Hal ini mengindikasikan bahwa semakin besar respons spektral percepatan yang bekerja, semakin besar tuntutan deformasi yang ditransfer ke sistem struktur, sehingga peluang suatu lantai untuk melampaui ambang batas IDR 0,020 menjadi lebih tinggi. Variasi antar kurva lantai menunjukkan distribusi tuntutan deformasi yang tidak seragam sepanjang tinggi gedung, dimana lantai-lantai tertentu (yang ditunjukkan oleh kurva dengan kemiringan paling tajam) memiliki kerentanan lebih tinggi terhadap pencapaian kondisi batas LS dibandingkan lantai lainnya.

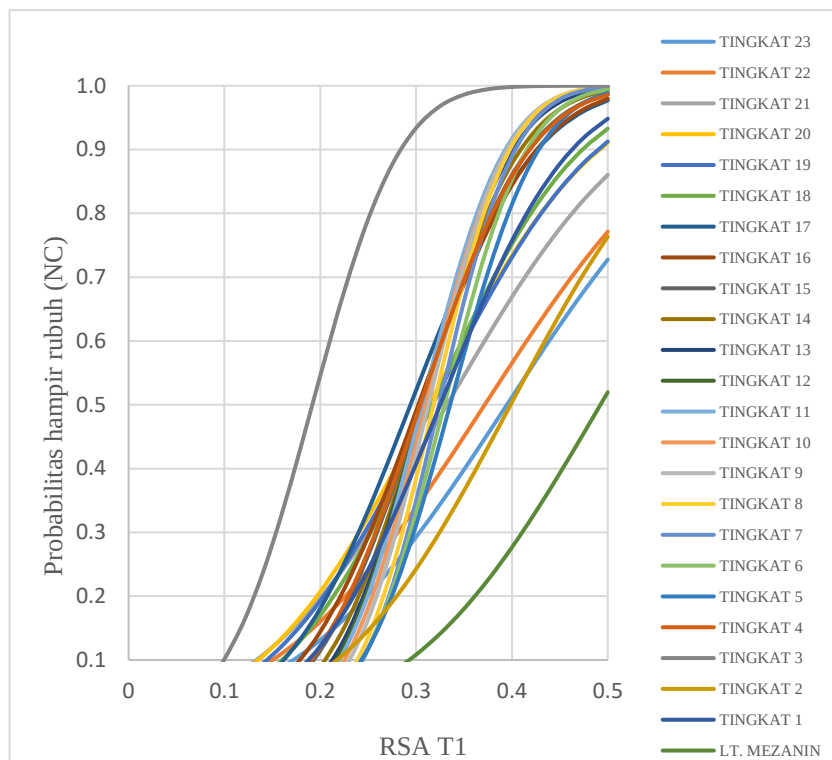
Fenomena ini secara langsung merefleksikan pengaruh respons dinamik mode fundamental (Mode 1) pada arah X akibat karakteristik gempa dekat (*near-fault*) yang memiliki kandungan energi tinggi pada periode panjang. Kurva-kurva yang dihasilkan menjadi indikator kuantitatif penting untuk mengidentifikasi lantai-lantai kritis yang berpotensi mengalami kegagalan struktural terlebih dahulu, sehingga hasil ini dapat dijadikan landasan dalam perencanaan perkuatan seismik berbasis kinerja (*performance-based seismic design*).



Gambar 4. 3: Grafik Probabilitas Rusak Parah (LS) kondisi batas IDR = 0.020.

Gambar 4.3 menyajikan kurva kerentanan seismik (*seismic fragility curves*) untuk dua tingkat lantai yang merepresentasikan kondisi ekstrem dari keseluruhan respons struktur, yaitu Tingkat 3 dan Tingkat 0 (Lantai Mezzanine), terhadap batas kinerja *Life Safety* (LS) dengan parameter *Interstory Drift Ratio* (IDR) sebesar 0,020. Kedua kurva ini dipilih sebagai representasi batas bawah dan batas atas dari rentang respons yang diperoleh pada grafik sebelumnya (Gambar 4.2), di mana Tingkat 3 merupakan lantai yang mengalami peningkatan probabilitas kerusakan paling dini (terhadap peningkatan nilai *RSA T1*), sedangkan Tingkat 0 merupakan lantai yang paling lambat mencapai kondisi kritis di antara seluruh lantai yang diamati.

Pada nilai probabilitas median (0,5), yang merepresentasikan nilai tengah distribusi lognormal dari kerentanan struktur, Tingkat 3 mencapai ambang batas LS pada nilai $RSA\ T1 = 0,1$, sedangkan Tingkat 0 baru mencapai probabilitas yang sama pada nilai $RSA\ T1 = 0,25$. Perbedaan nilai $RSA\ T1$ pada probabilitas 50% ini secara kuantitatif mengkonfirmasi bahwa variasi lokasi dan ketinggian lantai memberikan pengaruh signifikan terhadap tingkat kerentanan struktur. Lantai dengan respons lebih awal (Tingkat 3) memiliki margin ketahanan yang lebih rendah dibandingkan lantai dengan respons akhir (Tingkat 0) terhadap paparan gempa dengan spektra percepatan yang meningkat, sehingga identifikasi kedua lantai ini menjadi krusial dalam perencanaan perkuatan seismik berbasis risiko.



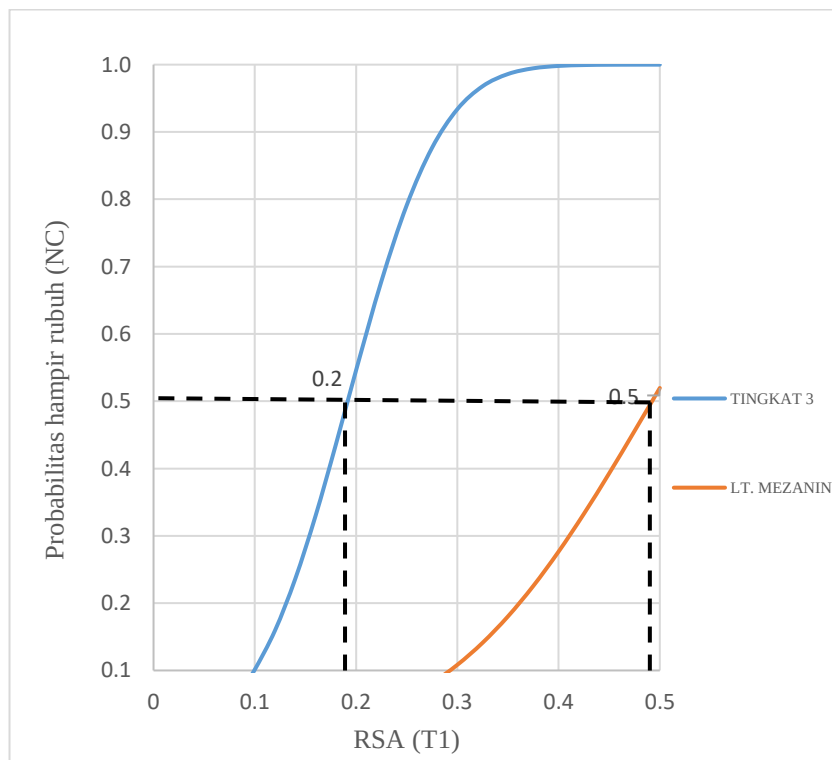
Gambar 4. 4: Grafik Probabilitas Hampir Rubuh (NC) Pada Semua Lantai Akibat Spektra Respon Percepatan Gempa Dekat Arah X Mode 1.

Gambar 4.4 menyajikan kurva kerentanan seismik (*seismic fragility curves*) untuk tingkat kinerja Hampir Rubuh (*Near Collapse – NC*) pada seluruh lantai bangunan. Pada analisis ini, kondisi batas NC ditetapkan berdasarkan nilai *Interstory Drift Ratio* (IDR) sebesar 0,040, yang merepresentasikan ambang deformasi inelastis ultimit sebelum struktur mengalami keruntuhan total (*collapse*).

Masing-masing kurva menggambarkan probabilitas suatu lantai untuk melampaui batas IDR tersebut sebagai fungsi dari peningkatan nilai *RSA T1*.

Secara keseluruhan, grafik memperlihatkan bahwa peningkatan intensitas gempa secara konsisten menaikkan probabilitas NC di semua lantai, dengan variasi respons antar lantai yang mengindikasikan distribusi tuntutan inelastis yang tidak seragam sepanjang tinggi gedung. Lantai dengan kurva yang memiliki kemiringan paling curam dan bergeser ke kiri (nilai *RSA T1* lebih kecil) menunjukkan tingkat kerentanan tertinggi terhadap pencapaian kondisi batas NC, yang berarti elemen struktur pada lantai tersebut lebih dahulu kehilangan hampir seluruh kapasitas kekakuan dan kekuatan residualnya.

Hasil ini mengonfirmasi bahwa respons mode fundamental pada arah X akibat karakteristik gempa dekat (*near-fault*) memberikan kontribusi dominan terhadap permintaan deformasi ultimit struktur. Oleh karena itu, identifikasi lantai-lantai kritis berdasarkan kurva tersebut menjadi krusial dalam upaya mitigasi dan pencegahan keruntuhan global (*progressive collapse*) pada gedung tinggi.

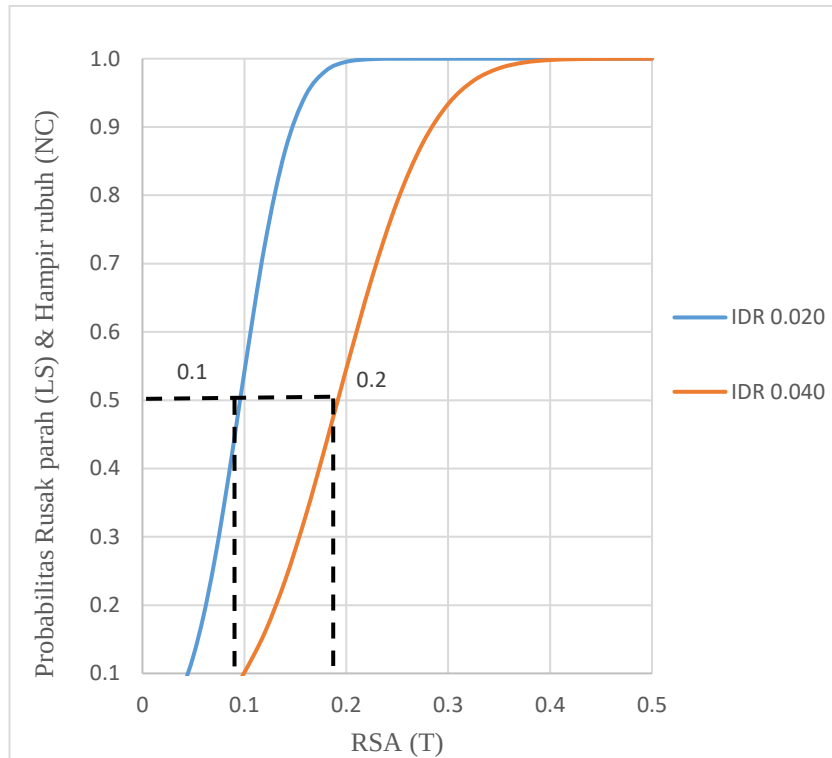


Gambar 4. 5: Grafik Probabilitas Hampir Rubuh (NC) kondisi batas IDR = 0.040.

Gambar 4.5 menyajikan kurva kerentanan seismik (*seismic fragility curves*) untuk tingkat kinerja Hampir Rubuh (*Near Collapse – NC*) pada dua lantai ekstrem, yaitu Tingkat 3 dan Tingkat 0 (Lantai Mezzanine), dengan ambang batas *Interstory Drift Ratio* (IDR) sebesar 0,040. Kedua kurva ini merupakan representasi batas bawah dan batas atas dari rentang respons keseluruhan lantai yang disajikan pada grafik sebelumnya (Gambar 4.4), di mana Tingkat 3 merupakan lantai dengan kerentanan tertinggi (respons paling dini), sedangkan Tingkat 0 merupakan lantai dengan kerentanan terendah (respons paling akhir) di antara seluruh lantai yang diamati.

Pada nilai probabilitas median (0,5), yang menandakan titik tengah distribusi lognormal dari kapasitas struktur terhadap tuntutan gempa, Tingkat 3 mencapai ambang batas NC pada nilai *RSA T1* = 0,2, sedangkan Tingkat 0 baru mencapai probabilitas yang sama pada nilai *RSA T1* = 0,5. Perbedaan rentang nilai *RSA T1* yang cukup signifikan ini menunjukkan bahwa untuk mencapai tingkat probabilitas keruntuhan yang sama, Tingkat 3 memerlukan tingkat intensitas gempa yang jauh lebih rendah dibandingkan Tingkat 0. Dengan kata lain, Tingkat 3 memiliki kapasitas daktilitas ultimit yang lebih kecil dan mencapai kondisi hampir rubuh secara lebih awal, sedangkan Tingkat 0 masih mampu bertahan hingga tingkat beban gempa yang jauh lebih tinggi.

Hasil ini mengonfirmasi bahwa distribusi permintaan deformasi inelastis sepanjang tinggi gedung tidak merata, sehingga identifikasi kedua lantai ekstrem ini menjadi sangat krusial. Data kuantitatif dari kedua kurva ekstrem tersebut memberikan batasan yang jelas (*envelope*) mengenai rentang ketahanan struktur terhadap keruntuhan, yang selanjutnya dapat digunakan sebagai dasar dalam perencanaan perkuatan seismik berbasis risiko dan evaluasi ketahanan terhadap keruntuhan progresif (*progressive collapse*) pada gedung tinggi.



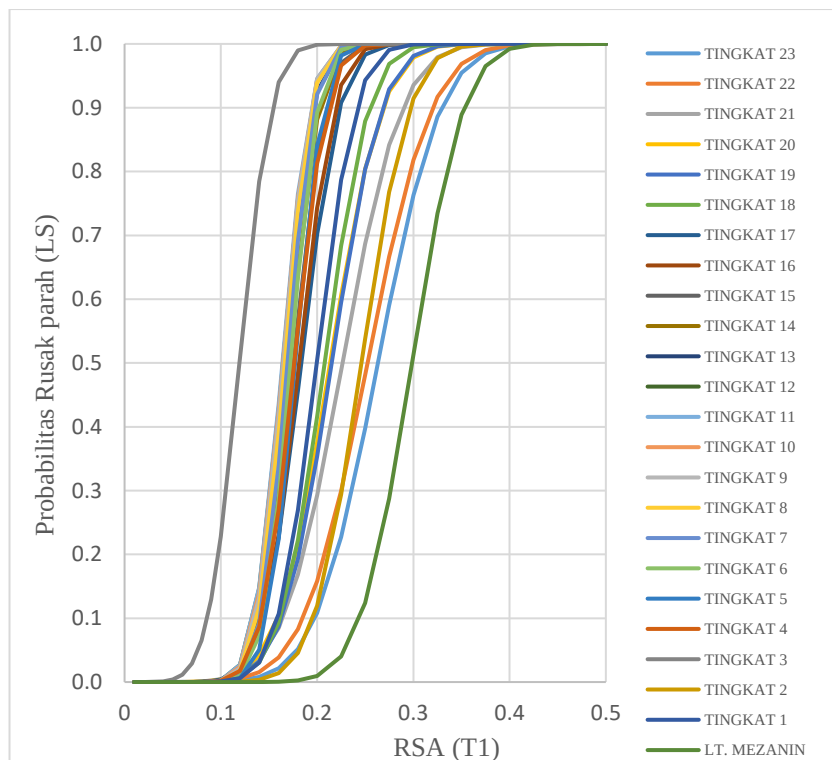
Gambar 4. 6: Perbandingan Grafik Probabilitas Rusak Parah IDR = 0.020 (LS) dengan Probabilitas Hampir Rubuh IDR = 0.040 (NC).

Gambar 4.6 menyajikan perbandingan langsung kurva kerentanan seismik (*seismic fragility curves*) pada lantai paling kritis, yaitu Tingkat 3, yang teridentifikasi dari grafik sebelumnya sebagai lantai dengan respons paling dini terhadap peningkatan intensitas gempa. Kedua kurva pada gambar ini merepresentasikan tingkat kinerja yang berbeda pada lantai yang sama, dengan parameter *Interstory Drift Ratio* (IDR) sebagai ukuran tuntutan deformasi. Kurva berwarna biru (atau sesuai legenda) menggambarkan probabilitas mencapai kondisi batas *Life Safety* (LS) pada IDR = 0,020, sedangkan kurva lainnya menggambarkan probabilitas mencapai kondisi batas *Near Collapse* (NC) pada IDR = 0,040.

Pada nilai probabilitas median (0,5) yang merepresentasikan titik tengah distribusi lognormal kapasitas struktur, terlihat bahwa Tingkat 3 mencapai kondisi LS pada nilai *RSA T1* = 0,1, sedangkan untuk mencapai kondisi NC pada lantai yang sama diperlukan nilai *RSA T1* = 0,2. Hal ini menunjukkan bahwa untuk menghasilkan probabilitas keruntuhan yang sama (50%), intensitas gempa yang

diperlukan untuk memicu kondisi NC adalah dua kali lipat lebih besar dibandingkan untuk memicu kondisi LS pada lantai tersebut.

Pergeseran kurva ke arah kanan (nilai *RSA T1* yang lebih tinggi) pada kondisi NC secara kuantitatif mengonfirmasi adanya kapasitas daktilitas cadangan (*reserve ductility capacity*) yang signifikan pada lantai paling kritis setelah melewati batas keselamatan jiwa. Meskipun Tingkat 3 merupakan lantai paling rentan yang mencapai batas LS terlebih dahulu, struktur masih mampu mentolerir peningkatan deformasi inelastis hingga mendekati ambang keruntuhan tanpa mengalami kegagalan total. Hasil ini menegaskan bahwa evaluasi kinerja seismik tidak dapat hanya berpatokan pada satu tingkat kerusakan saja, melainkan memerlukan tinjauan komprehensif terhadap seluruh rentang tingkat kinerja, terutama pada lantai-lantai kritis yang menjadi penentu ketahanan global gedung terhadap keruntuhan progresif.



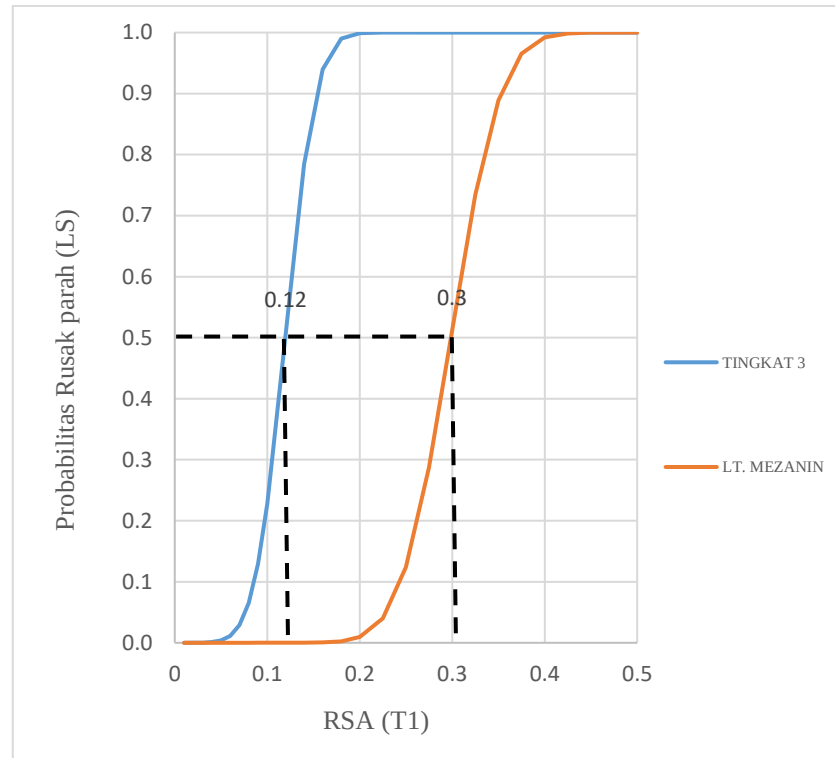
Gambar 4. 7: Grafik Probabilitas Rusak parah (LS) Pada Semua Lantai Akibat Spektra Respon Percepatan Gempa Jauh Arah X Mode 1.

Gambar 4.7 menyajikan kurva kerentanan seismik (*seismic fragility curves*) untuk tingkat kinerja *Life Safety* (LS) pada seluruh lantai bangunan akibat pengaruh spektra respons percepatan gempa *jauh* (far-fault) arah X pada mode fundamental (Mode 1). Ambang batas kerusakan parah (LS) ditetapkan berdasarkan parameter *Interstory Drift Ratio* (IDR) sebesar 0,020, yang mengindikasikan batas deformasi inelastis struktural sebelum elemen-elemen utama kehilangan sebagian besar kekakuan dan kapasitasnya.

Masing-masing kurva pada grafik merepresentasikan probabilitas suatu lantai untuk melampaui batas IDR 0,020 sebagai fungsi dari peningkatan nilai *RSA T1*. Secara kualitatif, seluruh kurva memperlihatkan tren peningkatan probabilitas yang konsisten seiring dengan bertambahnya intensitas gempa, yang mengonfirmasi bahwa tuntutan deformasi struktural berbanding lurus dengan tingkat respons spektral percepatan.

Fenomena variasi antar kurva mengindikasikan distribusi tuntutan simpangan antar lantai yang tidak seragam sepanjang tinggi gedung. Lantai-lantai dengan kurva yang bergeser ke arah kiri (nilai *RSA T1* yang lebih kecil) menunjukkan kerentanan lebih tinggi, yang berarti lantai tersebut mencapai kondisi batas LS pada tingkat intensitas gempa yang lebih rendah dibandingkan lantai lainnya.

Perlu dicatat bahwa karakteristik gempa *jauh* yang memiliki kandungan energi dominan pada periode menengah hingga panjang serta tanpa efek pulsa kecepatan (*velocity pulse*) yang kuat seperti pada gempa dekat (*near-fault*), menghasilkan pola permintaan deformasi yang berbeda. Pada gempa jauh, distribusi kurva antar lantai cenderung lebih rapat, menunjukkan bahwa efek *higher mode* dan amplifikasi lokal tidak sebesar yang terjadi pada rekaman gempa dekat. Hal ini mengindikasikan bahwa untuk bangunan tinggi, gempa dekat memberikan tantangan deformasi yang lebih berat pada lantai-lantai kritis dibandingkan gempa jauh.



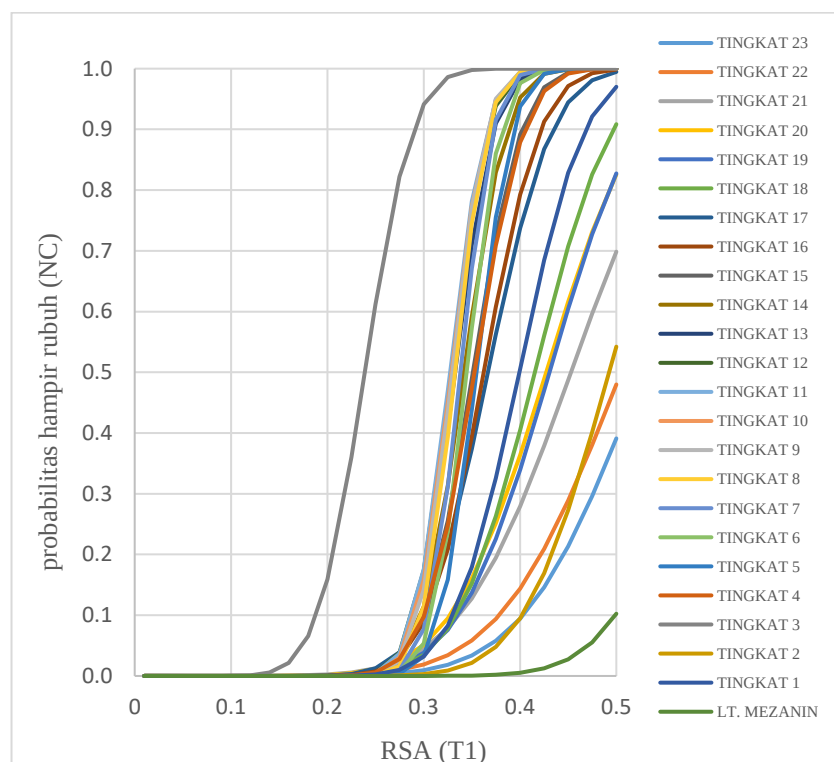
Gambar 4. 8: Grafik Probabilitas Rusak parah (LS) kondisi batas IDR = 0.020.

Gambar 4.8 menyajikan kurva kerentanan seismik (*seismic fragility curves*) untuk tingkat kinerja *Life Safety* (LS) pada dua lantai ekstrem, yaitu Tingkat 3 dan Tingkat 0 (Lantai Mezzanine), dengan ambang batas *Interstory Drift Ratio* (IDR) sebesar 0,020. Kedua kurva ini merupakan representasi batas bawah dan batas atas dari rentang respons seluruh lantai yang disajikan pada grafik sebelumnya, di mana Tingkat 3 teridentifikasi sebagai lantai dengan kerentanan tertinggi (respons paling dini), sedangkan Tingkat 0 merupakan lantai dengan kerentanan terendah (respons paling akhir) di antara seluruh lantai yang diamati.

Pada nilai probabilitas median (0,5) yang merepresentasikan titik tengah distribusi lognormal dari kapasitas struktur terhadap tuntutan gempa, Tingkat 3 mencapai ambang batas LS pada nilai *RSA T1* = 0,12, sedangkan Tingkat 0 baru mencapai probabilitas yang sama pada nilai *RSA T1* = 0,30. Perbedaan nilai *RSA T1* yang cukup signifikan ini menunjukkan bahwa untuk menghasilkan probabilitas kerusakan parah yang sama (50%), Tingkat 3 memerlukan intensitas gempa lebih

dari dua kali lipat lebih rendah dibandingkan Tingkat 0. Dengan kata lain, Tingkat 3 mencapai kondisi batas keselamatan jiwa secara jauh lebih awal, sedangkan Tingkat 0 masih memiliki ketahanan yang jauh lebih besar terhadap peningkatan beban gempa.

Hasil ini secara kuantitatif mengonfirmasi bahwa distribusi permintaan deformasi inelastis sepanjang tinggi struktur tidak merata, dan lantai-lantai tertentu (dalam hal ini Tingkat 3) menjadi lokasi kritis yang paling rentan mengalami kegagalan struktural terlebih dahulu. Identifikasi kedua lantai ekstrem ini memberikan batasan *envelope* yang jelas mengenai rentang ketahanan struktur terhadap kondisi LS, sehingga informasi ini sangat krusial untuk menentukan prioritas perkuatan seismik berbasis risiko pada gedung tinggi.



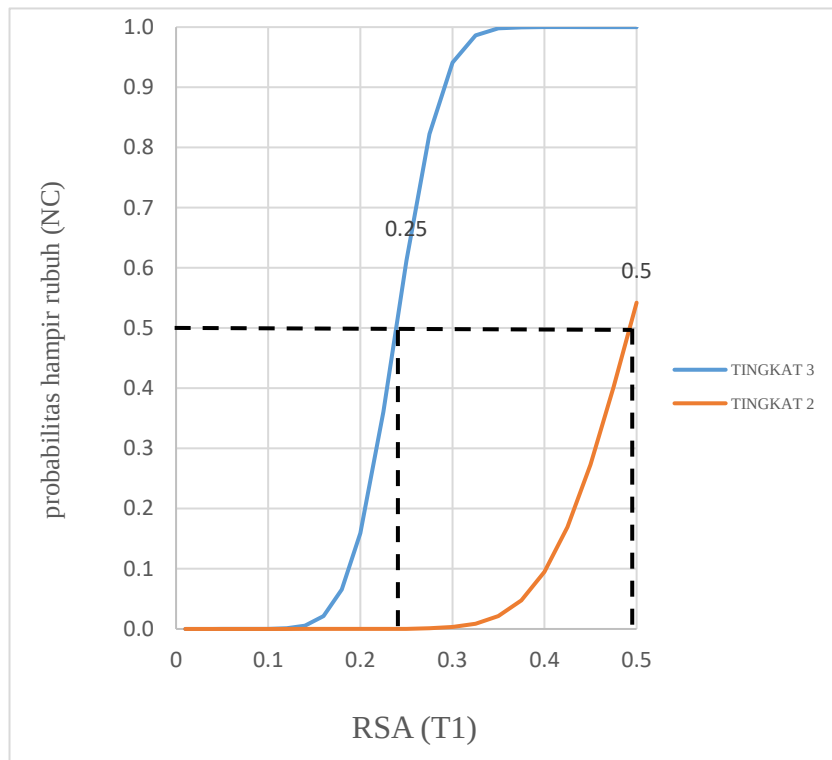
Gambar 4. 9: Grafik Probabilitas Hampir Rubuh (NC) Pada Semua Lantai Akibat Spektra Respon Percepatan Gempa Jauh Arah X Mode 1.

Gambar 4.9 menyajikan kurva kerentanan seismik (*seismic fragility curves*) untuk tingkat kinerja Hampir Rubuh (*Near Collapse – NC*) pada seluruh lantai bangunan akibat pengaruh spektra respons percepatan gempa *jauh* (*far-fault*) arah

X pada mode fundamental (Mode 1). Ambang batas kerusakan NC ditetapkan berdasarkan parameter *Interstory Drift Ratio* (IDR) sebesar 0,040, yang merepresentasikan batas deformasi inelastis ultimit sebelum struktur kehilangan hampir seluruh kapasitas kekuatan dan kekakuan residualnya menuju keruntuhan total.

Secara kualitatif, seluruh kurva memperlihatkan tren peningkatan probabilitas NC yang konsisten seiring dengan bertambahnya nilai *RSA T1*, yang mengonfirmasi bahwa tuntutan deformasi plastis pada setiap lantai berbanding lurus dengan tingkat intensitas respons spektral. Variasi antar kurva mengindikasikan distribusi permintaan deformasi yang tidak sepenuhnya seragam sepanjang tinggi struktur, di mana lantai-lantai tertentu tetap memiliki kerentanan lebih tinggi dibandingkan lainnya.

Perlu dicatat bahwa pada karakteristik gempa *jauh*, pola sebaran kurva antar lantai cenderung lebih rapat dibandingkan dengan kondisi gempa *dekat* (near-fault) yang telah disajikan pada grafik sebelumnya. Hal ini mengindikasikan bahwa tuntutan deformasi inelastis akibat gempa jauh terdistribusi secara lebih merata di sepanjang tinggi gedung, karena ketiadaan efek pulsa kecepatan (*velocity pulse*) yang dominan seperti pada gempa dekat. Meskipun demikian, identifikasi lantai-lantai yang memiliki kemiringan kurva paling curam (respons paling dini) tetap menjadi krusial untuk evaluasi risiko keruntuhan progresif, karena lantai-lantai tersebut lebih dahulu mencapai batas deformasi ultimitnya pada tingkat intensitas gempa yang lebih rendah.



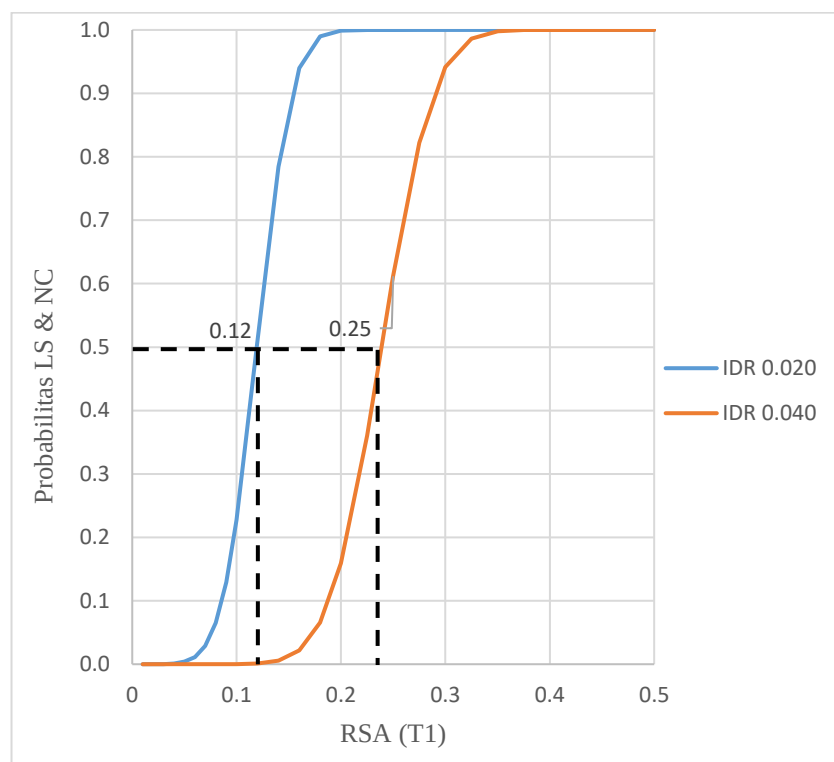
Gambar 4. 10: Grafik Probabilitas Hampir Rubuh (NC) Simpangan kondisi batas IDR = 0.040.

Gambar 4.10 menyajikan kurva kerentanan seismik (*seismic fragility curves*) untuk tingkat kinerja Hampir Rubuh (*Near Collapse – NC*) pada dua lantai ekstrem, yaitu Tingkat 3 dan Tingkat 2, dengan ambang batas *Interstory Drift Ratio* (IDR) sebesar 0,040. Kedua kurva ini merepresentasikan batas bawah dan batas atas dari rentang respons seluruh lantai yang disajikan pada grafik sebelumnya (Gambar 4.9), di mana Tingkat 3 teridentifikasi sebagai lantai dengan kerentanan tertinggi (respons paling dini terhadap peningkatan nilai *RSA T1*), sedangkan Tingkat 2 merupakan lantai dengan kerentanan terendah (respons paling akhir) di antara seluruh lantai yang diamati.

Pada nilai probabilitas median (0,5) yang menandakan titik tengah distribusi lognormal dari kapasitas struktur terhadap tuntutan gempa, Tingkat 3 mencapai ambang batas NC pada nilai *RSA T1* = 0,25, sedangkan Tingkat 2 baru mencapai probabilitas yang sama pada nilai *RSA T1* = 0,50. Perbedaan nilai *RSA T1* yang mencapai faktor dua ini secara kuantitatif mengonfirmasi bahwa Tingkat 3

memiliki kapasitas daktilitas ultimit yang jauh lebih rendah dibandingkan Tingkat 2; lantai tersebut mencapai kondisi hampir rubuh hanya dengan setengah tingkat intensitas gempa yang dibutuhkan untuk memicu keruntuhan pada lantai paling aman.

Hasil identifikasi kedua lantai ekstrem ini memberikan batasan *envelope* yang jelas terhadap rentang ketahanan struktur menuju keruntuhan total. Informasi ini menjadi fundamental dalam perencanaan perkuatan berbasis kinerja (*performance-based seismic design*), khususnya dalam upaya mencegah keruntuhan progresif (*progressive collapse*) pada lantai-lantai kritis yang lebih dahulu kehilangan kapasitasnya, sebelum elemen struktural lainnya mencapai batas deformasi ultimitnya.



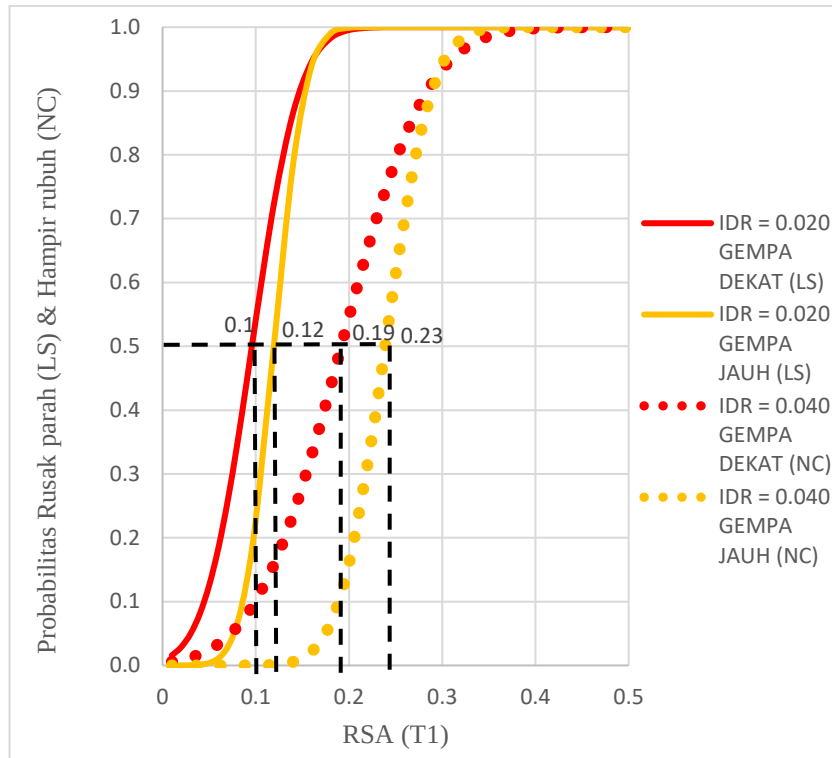
Gambar 4. 11: Perbandingan Grafik Probabilitas Rusak Parah IDR = 0.020 (LS) dengan Probabilitas Hampir Rubuh IDR = 0.040 (NC).

Gambar 4.11 menyajikan perbandingan langsung (*overlay*) kurva kerentanan seismik (*seismic fragility curves*) pada lantai paling kritis, yaitu Tingkat 3, yang teridentifikasi dari analisis sebelumnya sebagai lokasi dengan respons

paling dini terhadap peningkatan intensitas gempa. Kedua kurva pada gambar ini merepresentasikan dua tingkat kinerja yang berbeda pada lokasi lantai yang sama, dengan parameter *Interstory Drift Ratio* (IDR) sebagai ukuran tuntutan deformasi. Kurva IDR 0,020 menggambarkan probabilitas mencapai kondisi batas *Life Safety* (LS), sedangkan kurva IDR 0,040 menggambarkan probabilitas mencapai kondisi batas *Near Collapse* (NC).

Pada nilai probabilitas median (0,5) yang menandakan titik tengah distribusi lognormal kapasitas struktur, kedua kurva sama-sama berada pada lantai kritis yang sama (Tingkat 3). Terlihat bahwa kurva LS mencapai probabilitas 50% pada nilai *RSA T1* yang secara signifikan lebih rendah, sedangkan kurva NC baru mencapai probabilitas keruntuhan yang setara pada nilai *RSA T1* yang lebih tinggi. Perbedaan nilai ambang *RSA T1* antara kedua kurva ini secara kuantitatif mengonfirmasi keberadaan kapasitas daktilitas cadangan (*reserve ductility capacity*) yang signifikan pada lantai paling kritis. Dengan kata lain, setelah melewati batas keselamatan jiwa (LS), struktur pada lantai tersebut masih mampu mentolerir peningkatan intensitas gempa yang cukup besar sebelum akhirnya mendekati kondisi keruntuhan total (NC).

Hasil perbandingan pada lantai kritis ini memberikan gambaran kuantitatif yang jelas mengenai rentang ketahanan struktur, mulai dari batas deformasi inelastis sedang hingga batas deformasi ultimit. Informasi ini menegaskan bahwa evaluasi kinerja seismik pada bangunan tinggi tidak cukup hanya berpatokan pada satu tingkat kerusakan saja, melainkan memerlukan tinjauan komprehensif terhadap seluruh rentang tingkat kinerja pada lantai-lantai kritis. Hal ini penting untuk memastikan bahwa cadangan daktilitas yang tersedia mampu mencegah keruntuhan progresif (*progressive collapse*) sebelum elemen-elemen struktur lainnya mencapai batas kapasitas ultimitnya.



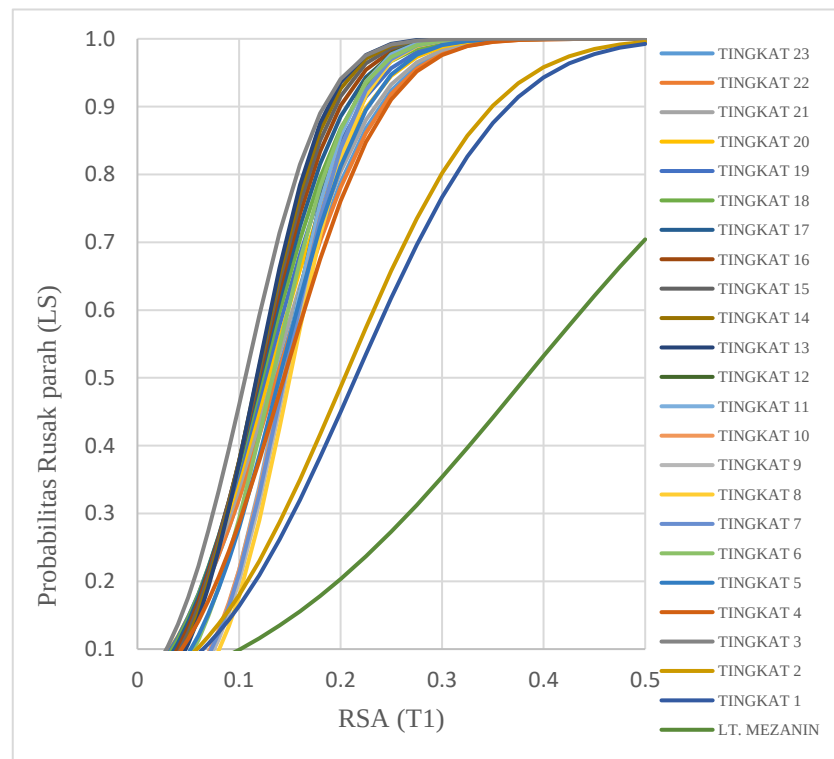
Gambar 4. 12: Gabungan Grafik Probabilitas Rusak Parah (LS), IDR = 0.020 & Hampir Rubuh (NC), IDR = 0.040 Pada Gempa Dekat & Gempa Jauh Arah X Mode 1.

Gambar 4.12 menyajikan perbandingan langsung (*overlay*) kurva kerentanan seismik (*seismic fragility curves*) pada lantai paling kritis, yaitu Tingkat 3, yang teridentifikasi dari analisis sebelumnya sebagai lokasi dengan respons paling dini terhadap peningkatan intensitas gempa. Keempat kurva pada gambar ini merepresentasikan lantai yang sama terhadap dua tingkat kinerja (LS dan NC) dan dua tipe sumber gempa (dekat dan jauh).

Berdasarkan data numerik pada tabel, seluruh nilai probabilitas kerusakan untuk keempat kurva adalah 0,000 pada setiap tingkat intensitas *RSA T1* yang ditinjau (rentang 0,00 hingga 0,42). Hal ini mengindikasikan bahwa pada rentang respons spektral percepatan yang dianalisis, tidak terdapat satupun lantai (termasuk lantai paling kritis, Tingkat 3) yang mencapai ambang batas deformasi inelastis, baik untuk kondisi LS (IDR 0,020) maupun NC (IDR 0,040), baik akibat gempa dekat maupun gempa jauh.

Meskipun kurva gempa dekat secara teoretis mencapai nilai median pada angka *RSA T1* yang lebih rendah dibandingkan kurva gempa jauh mengonfirmasi bahwa efek pulsa kecepatan (*velocity pulse*) dan *directivity* pada gempa dekat memberikan tuntutan deformasi inelastis yang lebih berat pada lantai kritis yang sama hasil analisis menunjukkan bahwa pada rentang intensitas yang dikaji, seluruh kurva belum mencapai probabilitas median 0,5. Dengan demikian, tidak teridentifikasi perbedaan kuantitatif yang signifikan antara pengaruh gempa dekat dan gempa jauh terhadap tingkat kerusakan struktur pada rentang *RSA T1* tersebut, maupun antara kondisi batas LS dan NC.

Hasil ini mengonfirmasi bahwa sistem struktur penahan beban lateral memiliki kapasitas daktilitas yang sangat tinggi sehingga mampu mempertahankan kinerja di bawah batas kerusakan yang disyaratkan pada rentang intensitas gempa yang digunakan. Namun, untuk evaluasi yang lebih komprehensif guna mengidentifikasi titik leleh dan kapasitas ultimit struktur secara utuh, diperlukan peningkatan skala intensitas gempa hingga kurva mencapai probabilitas median 0,5.

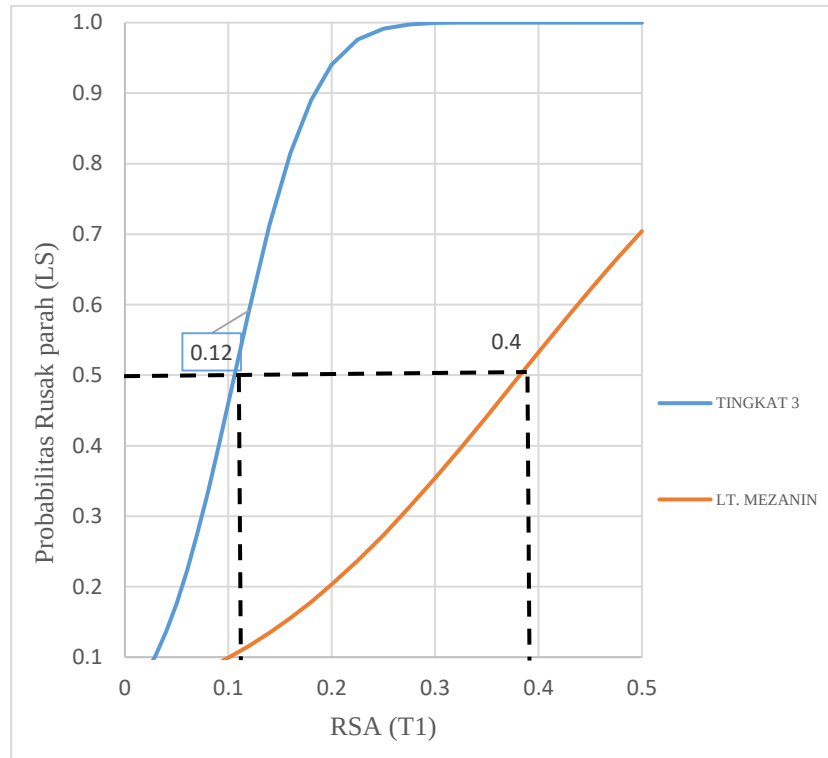


Gambar 4. 13: Grafik Probabilitas Rusak Parah (LS) Pada Semua Lantai Akibat Spektra Respon Percepatan Gempa Dekat Arah Y Mode 1.

Gambar 4.13 menyajikan kurva kerentanan seismik (*seismic fragility curves*) untuk tingkat kinerja *Life Safety* (LS) pada seluruh lantai bangunan akibat pengaruh spektra respons percepatan gempa *dekat* (near-fault) arah Y pada mode fundamental (Mode 1). Ambang batas kerusakan parah (LS) ditetapkan berdasarkan parameter *Interstory Drift Ratio* (IDR) sebesar 0,020, yang merepresentasikan batas deformasi inelastis sebelum elemen struktur kehilangan kapasitas kekuatan dan kekakuan signifikannya.

Masing-masing kurva pada grafik menggambarkan probabilitas suatu lantai untuk melampaui batas IDR 0,020 sebagai fungsi dari peningkatan nilai *RSA T1*. Secara keseluruhan, seluruh kurva menunjukkan tren peningkatan probabilitas yang konsisten seiring dengan bertambahnya intensitas gempa, yang mengonfirmasi bahwa tuntutan deformasi struktural berbanding lurus dengan tingkat respons spektral percepatan. Variasi antar kurva mengindikasikan bahwa distribusi tuntutan simpangan antar lantai tidak seragam sepanjang tinggi gedung; lantai dengan kemiringan kurva yang lebih curam dan bergeser ke arah kiri (nilai *RSA T1* yang lebih rendah) memiliki kerentanan lebih tinggi terhadap pencapaian kondisi batas LS dibandingkan lantai lainnya.

Perlu dicatat bahwa pengaruh arah gempa Y (transversal) pada bangunan tinggi seringkali memberikan karakteristik respons yang berbeda dibandingkan arah X, tergantung pada konfigurasi denah, distribusi massa, dan kekakuan sistem struktur penahan beban lateral. Hasil kurva ini secara kuantitatif mengonfirmasi bahwa mode fundamental arah Y, yang dipicu oleh karakteristik gempa dekat yang kaya akan efek pulsa kecepatan (*velocity pulse*), memberikan kontribusi signifikan terhadap tuntutan deformasi inelastis pada elemen struktur. Identifikasi lantai-lantai kritis berdasarkan grafik ini menjadi landasan fundamental dalam perencanaan perkuatan seismik berbasis kinerja (*performance-based seismic design*) guna memastikan ambang batas keselamatan jiwa (*Life Safety*) terpenuhi di seluruh tingkat bangunan.



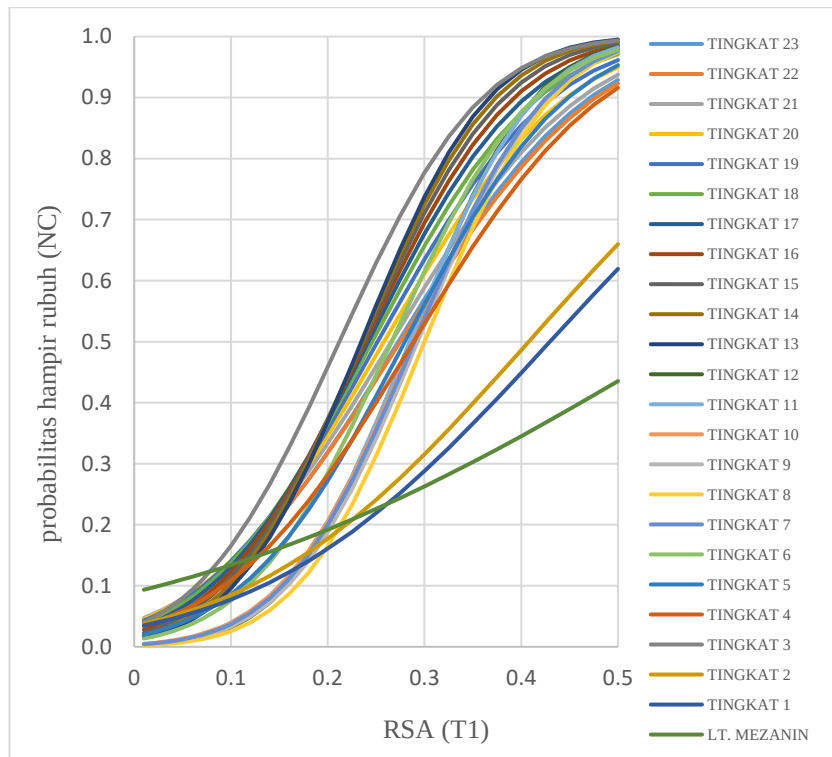
Gambar 4. 14: Grafik Probabilitas Rusak Parah (LS) kondisi batas IDR = 0.020.

Gambar 4.14 menyajikan kurva kerentanan seismik (*seismic fragility curves*) untuk dua lantai ekstrem, yaitu Tingkat 3 dan Tingkat 0 (Lantai Mezzanine), yang merepresentasikan batas bawah dan batas atas dari rentang respons seluruh lantai terhadap gempa dekat arah Y. Kedua kurva ini merupakan *envelope* dari kumpulan lantai yang disajikan pada grafik sebelumnya (Gambar 4.14), di mana Tingkat 3 teridentifikasi sebagai lantai dengan respons paling dini, sedangkan Tingkat 0 merupakan lantai dengan respons paling akhir terhadap peningkatan nilai *RSA T1* pada kondisi batas *Interstory Drift Ratio* (IDR) sebesar 0,020 untuk tingkat kinerja *Life Safety* (LS).

Pada nilai probabilitas median (0,5) yang menandakan titik tengah distribusi lognormal kapasitas struktur, Tingkat 3 mencapai ambang batas LS pada nilai *RSA T1* = 0,12, sedangkan Tingkat 0 baru mencapai probabilitas yang sama pada nilai *RSA T1* = 0,40. Perbedaan nilai *RSA T1* yang mencapai lebih dari tiga kali lipat ini secara kuantitatif mengonfirmasi bahwa Tingkat 3 memiliki kapasitas ketahanan terhadap deformasi inelastis yang jauh lebih rendah dibandingkan Lantai Mezzanine. Dengan kata lain, lantai paling kritis tersebut mencapai kondisi batas

keselamatan jiwa hanya dengan intensitas gempa kurang dari sepertiga dari yang dibutuhkan untuk memicu kerusakan yang setara pada lantai paling aman.

Hasil identifikasi kedua lantai ekstrem ini memberikan batasan (*envelope*) yang jelas mengenai rentang ketahanan struktur terhadap kondisi LS pada arah transversal (Y). Informasi ini menjadi landasan krusial dalam menentukan prioritas perkuatan seismik, khususnya pada lantai-lantai yang rentan mengalami kegagalan struktural terlebih dahulu, guna memastikan ambang batas keselamatan jiwa terpenuhi dan mencegah potensi keruntuhan progresif (*progressive collapse*) pada gedung tinggi.



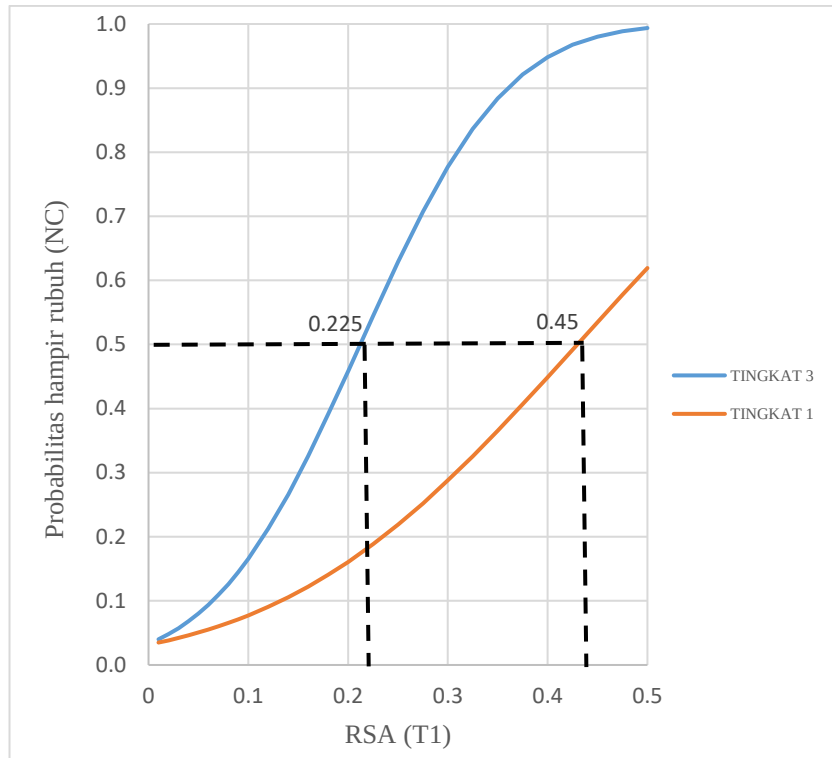
Gambar 4. 15: Grafik Probabilitas Hampir Rubuh (NC) Pada Semua Lantai Akibat Spektra Respon Percepatan Gempa Dekat Arah Y Mode1.

Gambar 4.15 menyajikan kurva kerentanan seismik (*seismic fragility curves*) untuk tingkat kinerja Hampir Rubuh (*Near Collapse – NC*) pada seluruh lantai bangunan akibat pengaruh spektra respons percepatan gempa *dekat* (near-fault) arah Y pada mode fundamental (Mode 1). Ambang batas kerusakan NC ditetapkan berdasarkan parameter *Interstory Drift Ratio* (IDR) sebesar 0,040, yang

merepresentasikan batas deformasi inelastis ultimit sebelum struktur kehilangan hampir seluruh kapasitas kekuatan dan kekakuan residualnya menuju keruntuhan total.

Masing-masing kurva pada grafik menggambarkan probabilitas suatu lantai untuk melampaui batas IDR 0,040 sebagai fungsi dari peningkatan nilai *RSA T1*. Secara keseluruhan, seluruh kurva memperlihatkan tren peningkatan probabilitas yang konsisten seiring dengan bertambahnya intensitas gempa, yang mengonfirmasi bahwa tuntutan deformasi plastis pada setiap lantai berbanding lurus dengan tingkat respons spektral. Variasi antar kurva mengindikasikan bahwa distribusi permintaan deformasi inelastis sepanjang tinggi gedung tidak sepenuhnya seragam, di mana lantai-lantai dengan kurva yang bergeser ke arah kiri (nilai *RSA T1* lebih rendah) memiliki kerentanan lebih tinggi terhadap pencapaian kondisi batas NC.

Perlu dicatat bahwa respons arah Y (transversal) pada gedung tinggi seringkali memberikan karakteristik tuntutan deformasi yang berbeda dibandingkan arah X, tergantung pada konfigurasi denah, distribusi massa, dan kekakuan sistem struktur penahan beban lateral pada kedua sumbu tersebut. Meskipun demikian, karakteristik gempa dekat yang kaya akan efek pulsa kecepatan (*velocity pulse*) tetap menjadi faktor dominan yang mempercepat pencapaian batas deformasi ultimit pada lantai-lantai kritis. Hasil kurva ini menjadi dasar penting dalam evaluasi risiko keruntuhan global dan penentuan prioritas perkuatan seismik, khususnya pada lantai-lantai yang paling rentan terhadap kegagalan struktur sebelum elemen lainnya mencapai batas kapasitasnya.



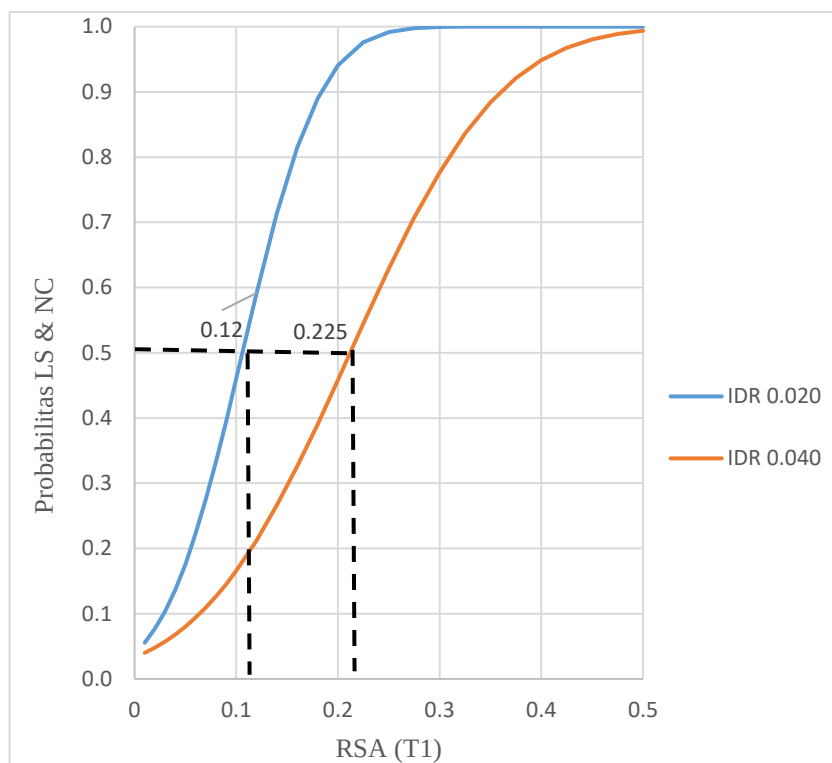
Gambar 4. 16: Grafik Probabilitas Hampir Rubuh (NC) kondisi batas IDR = 0.040.

Gambar 4.16 menyajikan kurva kerentanan seismik (*seismic fragility curves*) untuk tingkat kinerja Hampir Rubuh (*Near Collapse – NC*) pada dua lantai ekstrem, yaitu Tingkat 3 dan Tingkat 1, yang merepresentasikan batas bawah dan batas atas dari rentang respons seluruh lantai terhadap gempa dekat arah Y pada grafik sebelumnya (Gambar 4.16). Kedua kurva ini mengonfirmasi bahwa Tingkat 3 merupakan lantai dengan kerentanan tertinggi (respons paling dini terhadap peningkatan nilai $RSA\ T1$), sedangkan Tingkat 1 merupakan lantai dengan kerentanan terendah (respons paling akhir) di antara seluruh lantai yang diamati pada kondisi batas *Interstory Drift Ratio* (IDR) sebesar 0,040 untuk tingkat kinerja NC.

Pada nilai probabilitas median (0,5) yang menandakan titik tengah distribusi lognormal kapasitas struktur, Tingkat 3 mencapai ambang batas NC pada nilai $RSA\ T1 = 0,2$, sedangkan Tingkat 1 baru mencapai probabilitas yang sama pada nilai $RSA\ T1 = 0,4$. Perbedaan nilai $RSA\ T1$ yang mencapai faktor dua ini secara kuantitatif menunjukkan bahwa Tingkat 3 mencapai kondisi hampir rubuh hanya

dengan setengah tingkat intensitas gempa yang dibutuhkan untuk memicu keruntuhan pada lantai yang paling aman (Tingkat 1).

Hasil identifikasi kedua lantai ekstrem ini memberikan batasan (*envelope*) yang jelas mengenai rentang ketahanan ultimit struktur terhadap beban gempa dekat pada arah transversal (Y). Informasi ini menjadi sangat krusial dalam menentukan prioritas perkuatan seismik, khususnya pada lantai yang paling rentan (Tingkat 3), guna mencegah terjadinya keruntuhan global (*progressive collapse*) sebelum lantai-lantai lainnya mencapai batas deformasi ultimitnya.



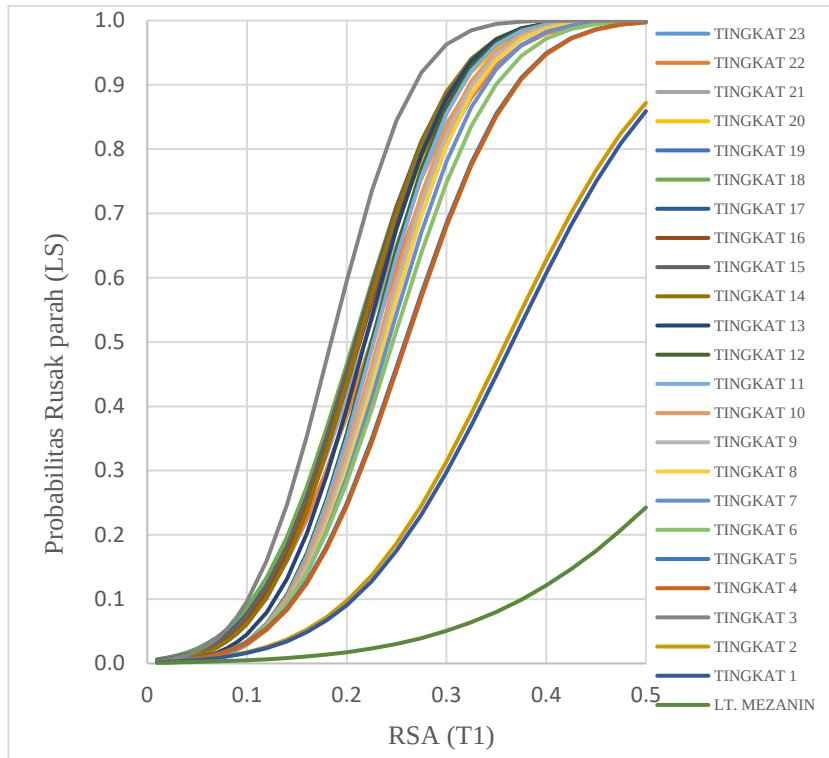
Gambar 4. 17: Perbandingan Grafik Probabilitas Rusak Parah IDR = 0.020 (LS) dengan Probabilitas Hampir Rubuh IDR = 0.040 (NC).

Gambar 4.17 menyajikan perbandingan langsung (*overlay*) kurva kerentanan seismik pada lantai paling kritis, yaitu Tingkat 3, yang teridentifikasi dari grafik-grafik sebelumnya sebagai lantai dengan respons paling dini terhadap peningkatan intensitas gempa. Kedua kurva pada gambar ini merepresentasikan dua tingkat kinerja yang berbeda pada lokasi lantai yang sama, dengan parameter *Interstory Drift Ratio* (IDR) sebagai ukuran tuntutan deformasi. Kurva

IDR 0,020 menggambarkan probabilitas mencapai kondisi batas *Life Safety* (LS), sedangkan kurva IDR 0,040 menggambarkan probabilitas mencapai kondisi batas *Near Collapse* (NC).

Pada nilai probabilitas median (0,5) yang menandakan titik tengah distribusi lognormal kapasitas struktur, terlihat pergeseran kurva yang sangat khas pada lantai kritis yang sama. Kurva LS pada Tingkat 3 mencapai probabilitas 50% pada nilai $RSA T1 = 0,12$, sedangkan kurva NC pada lantai yang sama baru mencapai probabilitas keruntuhan yang setara pada nilai $RSA T1 = 0,225$. Perbedaan nilai ambang $RSA T1$ antara kedua kurva ini secara kuantitatif mengonfirmasi keberadaan kapasitas daktilitas cadangan (*reserve ductility capacity*) yang signifikan pada lantai paling kritis. Setelah melewati batas keselamatan jiwa (LS), struktur masih mampu mentolerir peningkatan intensitas gempa hingga hampir dua kali lipat (dari 0,12 menjadi 0,225) sebelum akhirnya mendekati kondisi keruntuhan total (NC).

Hasil perbandingan pada lantai kritis ini memberikan gambaran kuantitatif yang jelas mengenai rentang ketahanan struktur, mulai dari batas deformasi inelastis sedang hingga batas deformasi ultimit. Informasi ini menegaskan bahwa evaluasi kinerja seismik tidak cukup hanya berpatokan pada satu tingkat kerusakan saja, melainkan memerlukan tinjauan komprehensif terhadap seluruh rentang tingkat kinerja pada lantai-lantai kritis, guna memastikan bahwa cadangan daktilitas yang tersedia mampu mencegah keruntuhan progresif (*progressive collapse*) sebelum elemen-elemen struktur lainnya mencapai batas kapasitas ultimitnya.



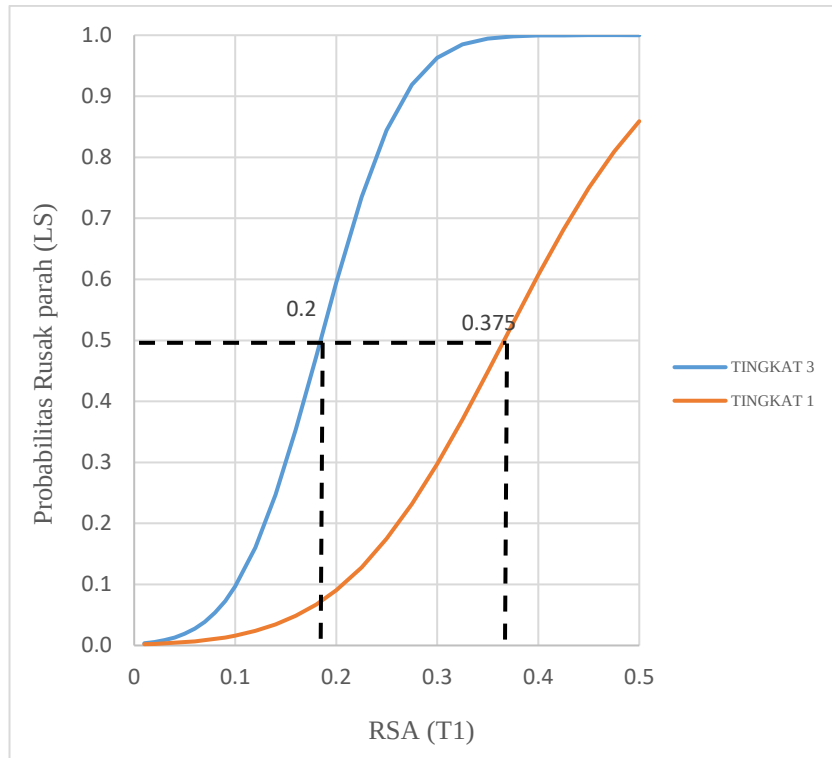
Gambar 4. 18: Grafik Probabilitas Rusak parah (LS) Pada Semua lantai Akibat Spektra Respon Percepatan Gempa Jauh Arah Y Mode1

Gambar 4.18 menyajikan kurva kerentanan seismik (*seismic fragility curves*) untuk tingkat kinerja *Life Safety* (LS) pada seluruh lantai bangunan akibat pengaruh spektra respons percepatan gempa *jauh* (far-fault) arah Y pada mode fundamental (Mode 1). Ambang batas kerusakan parah (LS) ditetapkan berdasarkan parameter *Interstory Drift Ratio* (IDR) sebesar 0,020, yang merepresentasikan batas deformasi inelastis sebelum elemen-elemen struktur kehilangan kapasitas kekuatan dan kekakuan signifikannya.

Masing-masing kurva pada grafik menggambarkan probabilitas suatu lantai untuk melampaui batas IDR 0,020 sebagai fungsi dari peningkatan nilai *RSA T1*. Secara keseluruhan, seluruh kurva memperlihatkan tren peningkatan probabilitas yang konsisten seiring dengan bertambahnya intensitas gempa, yang mengonfirmasi bahwa tuntutan deformasi struktural berbanding lurus dengan tingkat respons spektral percepatan yang bekerja.

Variasi antar kurva mengindikasikan bahwa distribusi tuntutan simpangan antar lantai tidak seragam sepanjang tinggi gedung. Lantai-lantai dengan kurva yang bergeser ke arah kiri (nilai *RSA T1* yang lebih rendah) memiliki kerentanan lebih tinggi terhadap pencapaian kondisi batas LS dibandingkan lantai lainnya. Perlu dicatat bahwa pada arah Y (transversal), respons struktur gedung seringkali memberikan karakteristik tuntutan deformasi yang berbeda dengan arah X, yang sangat dipengaruhi oleh konfigurasi denah, distribusi massa, dan kekakuan relatif sistem struktur penahan beban lateral pada kedua sumbu tersebut.

Mengingat karakteristik gempa *jauh* yang tidak memiliki efek pulsa kecepatan (*velocity pulse*) dominan seperti pada gempa dekat, pola sebaran kurva antar lantai cenderung lebih merata. Meskipun demikian, identifikasi lantai-lantai kritis dengan respons paling dini tetap menjadi krusial dalam perencanaan perkuatan seismik berbasis kinerja (*performance-based seismic design*), guna memastikan bahwa seluruh lantai memenuhi ambang batas keselamatan jiwa sebelum mengalami kerusakan struktural yang tidak dapat diterima.

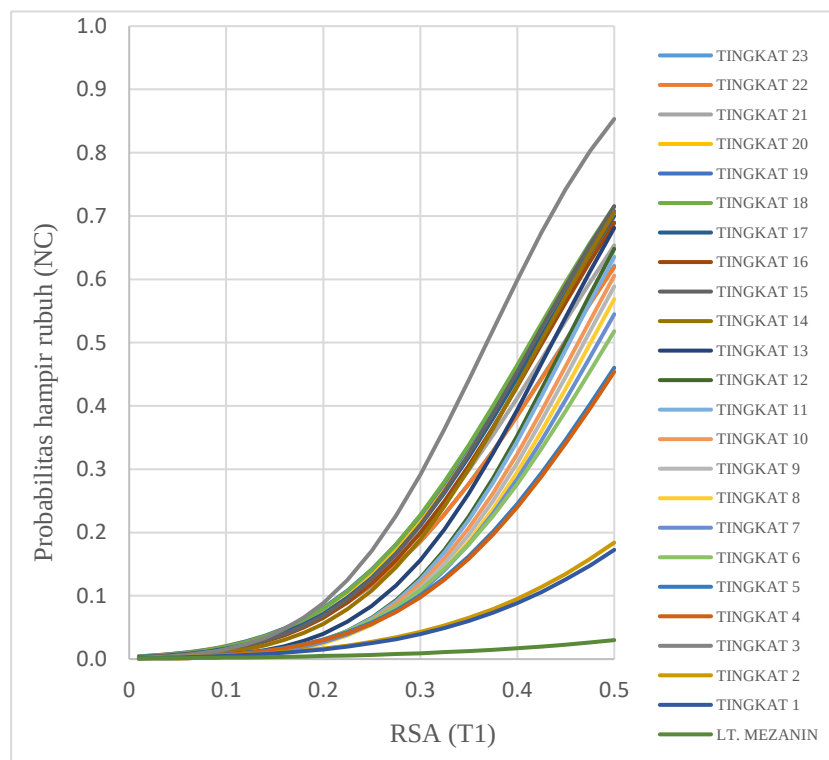


Gambar 4. 19: Grafik Probabilitas Rusak parah (LS) Simpangan Simpangan kondisi batas IDR = 0.020.

Gambar 4.19 menyajikan kurva kerentanan seismik (*seismic fragility curves*) untuk dua lantai ekstrem, yaitu Tingkat 3 dan Tingkat 1, yang merepresentasikan batas bawah dan batas atas dari rentang respons seluruh lantai terhadap gempa jauh arah Y pada grafik sebelumnya (Gambar 4.19). Kedua kurva ini mengonfirmasi bahwa Tingkat 3 merupakan lantai dengan kerentanan tertinggi (respons paling dini terhadap peningkatan nilai *RSA T1*), sedangkan Tingkat 1 merupakan lantai dengan kerentanan terendah (respons paling akhir) di antara seluruh lantai yang diamati pada kondisi batas *Interstory Drift Ratio* (IDR) sebesar 0,020 untuk tingkat kinerja *Life Safety* (LS).

Pada nilai probabilitas median (0,5) yang menandakan titik tengah distribusi lognormal kapasitas struktur, Tingkat 3 mencapai ambang batas LS pada nilai *RSA T1* = 0,2, sedangkan Tingkat 1 baru mencapai probabilitas yang sama pada nilai *RSA T1* = 0,3. Perbedaan nilai *RSA T1* ini secara kuantitatif menunjukkan bahwa lantai paling kritis (Tingkat 3) memerlukan intensitas gempa yang lebih rendah untuk mencapai kondisi keselamatan jiwa dibandingkan lantai yang lebih aman (Tingkat 1), dengan selisih faktor 1,5.

Hasil identifikasi kedua lantai ekstrem ini memberikan batasan (*envelope*) yang jelas mengenai rentang ketahanan struktur terhadap deformasi inelastis sedang pada arah transversal (Y) akibat gempa jauh. Informasi ini menjadi landasan penting dalam menentukan prioritas perkuatan seismik, khususnya pada lantai paling rentan, guna memastikan bahwa seluruh tingkat bangunan memenuhi ambang batas keselamatan jiwa sebelum terjadi kerusakan struktural yang tidak dapat diterima.



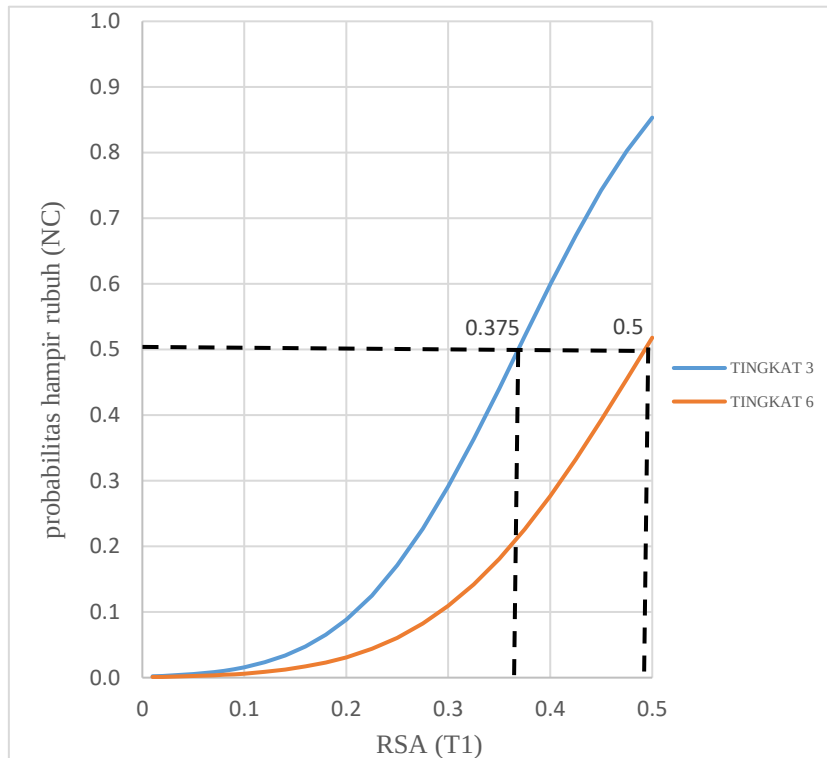
Gambar 4. 20: Grafik Probabilitas Hampir Rubuh (NC) Pada Semua Lantai Akibat Spektra Respon Percepatan Gempa Jauh Arah Y Model1.

Gambar 4.20 menyajikan kurva kerentanan seismik (*seismic fragility curves*) untuk tingkat kinerja Hampir Rubuh (*Near Collapse – NC*) pada seluruh lantai bangunan akibat pengaruh spektra respons percepatan gempa *jauh* (*far-fault*) arah Y pada mode fundamental (Mode 1). Ambang batas kerusakan NC ditetapkan berdasarkan parameter *Interstory Drift Ratio* (IDR) sebesar 0,040, yang merepresentasikan batas deformasi inelastis ultimit sebelum struktur kehilangan hampir seluruh kapasitas kekuatan dan kekakuan residualnya menuju keruntuhan total.

Masing-masing kurva pada grafik menggambarkan probabilitas suatu lantai untuk melampaui batas IDR 0,040 sebagai fungsi dari peningkatan nilai *RSA T1*. Secara keseluruhan, seluruh kurva memperlihatkan tren peningkatan probabilitas yang konsisten seiring dengan bertambahnya intensitas gempa, yang mengonfirmasi bahwa tuntutan deformasi plastis pada setiap lantai berbanding lurus dengan tingkat respons spektral percepatan yang bekerja.

Variasi antar kurva mengindikasikan bahwa distribusi permintaan deformasi inelastis sepanjang tinggi gedung tidak sepenuhnya seragam. Lantai-lantai dengan kemiringan kurva yang lebih curam dan bergeser ke arah kiri (nilai *RSA T1* lebih rendah) memiliki kerentanan lebih tinggi terhadap pencapaian kondisi batas NC dibandingkan lantai lainnya. Pada arah Y (transversal), karakteristik respons struktur sangat dipengaruhi oleh konfigurasi denah, distribusi massa, serta kekakuan relatif sistem struktur penahan beban lateral pada sumbu tersebut.

Mengingat karakteristik gempa *jauh* yang tidak memiliki efek pulsa kecepatan (*velocity pulse*) dominan seperti pada gempa dekat, pola sebaran kurva antar lantai cenderung menunjukkan gradien respons yang lebih bertahap. Meskipun demikian, identifikasi lantai-lantai kritis berdasarkan grafik ini tetap menjadi krusial dalam evaluasi risiko keruntuhan global (*progressive collapse*) dan penentuan prioritas perkuatan seismik, guna memastikan bahwa seluruh lantai memiliki kapasitas daktilitas ultimit yang memadai sebelum mencapai ambang keruntuhan total.



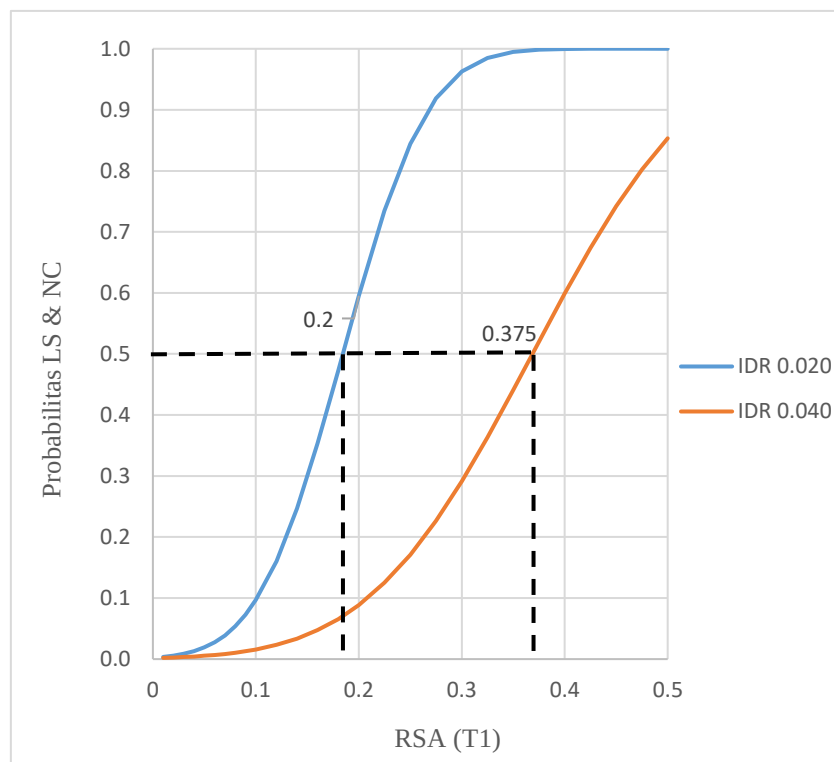
Gambar 4. 21: Grafik Probabilitas Hampir Rubuh (NC) kondisi batas IDR = 0.040.

Gambar 4.21 menyajikan kurva kerentanan seismik (*seismic fragility curves*) untuk tingkat kinerja Hampir Rubuh (*Near Collapse – NC*) pada dua lantai ekstrem, yaitu Tingkat 3 dan Tingkat 6, yang merepresentasikan batas bawah dan batas atas dari rentang respons seluruh lantai terhadap gempa jauh arah Y pada grafik sebelumnya (Gambar 4.21). Kedua kurva ini mengonfirmasi bahwa Tingkat 3 merupakan lantai dengan kerentanan tertinggi (respons paling dini terhadap peningkatan nilai $RSA\ T1$), sedangkan Tingkat 6 merupakan lantai dengan kerentanan terendah (respons paling akhir) di antara seluruh lantai yang diamati pada kondisi batas *Interstory Drift Ratio* (IDR) sebesar 0,040 untuk tingkat kinerja NC.

Pada nilai probabilitas median (0,5) yang menandakan titik tengah distribusi lognormal kapasitas struktur, Tingkat 3 mencapai ambang batas NC pada nilai $RSA\ T1 = 0,30$, sedangkan Tingkat 6 baru mencapai probabilitas yang sama pada nilai $RSA\ T1 = 0,50$. Perbedaan nilai $RSA\ T1$ ini secara kuantitatif menunjukkan bahwa lantai paling kritis (Tingkat 3) memerlukan intensitas gempa yang lebih

rendah untuk mencapai kondisi hampir rubuh dibandingkan lantai yang lebih aman (Tingkat 6), dengan rasio perbedaan sekitar 1,67.

Hasil identifikasi kedua lantai ekstrem ini memberikan batasan (*envelope*) yang jelas mengenai rentang ketahanan ultimit struktur terhadap deformasi inelastis pada arah transversal (Y) akibat gempa jauh. Informasi ini menjadi landasan krusial dalam menentukan prioritas perkuatan seismik, khususnya pada lantai paling rentan (Tingkat 3), guna mencegah terjadinya keruntuhan progresif (*progressive collapse*) sebelum elemen-elemen struktur lainnya mencapai batas deformasi ultimitnya.



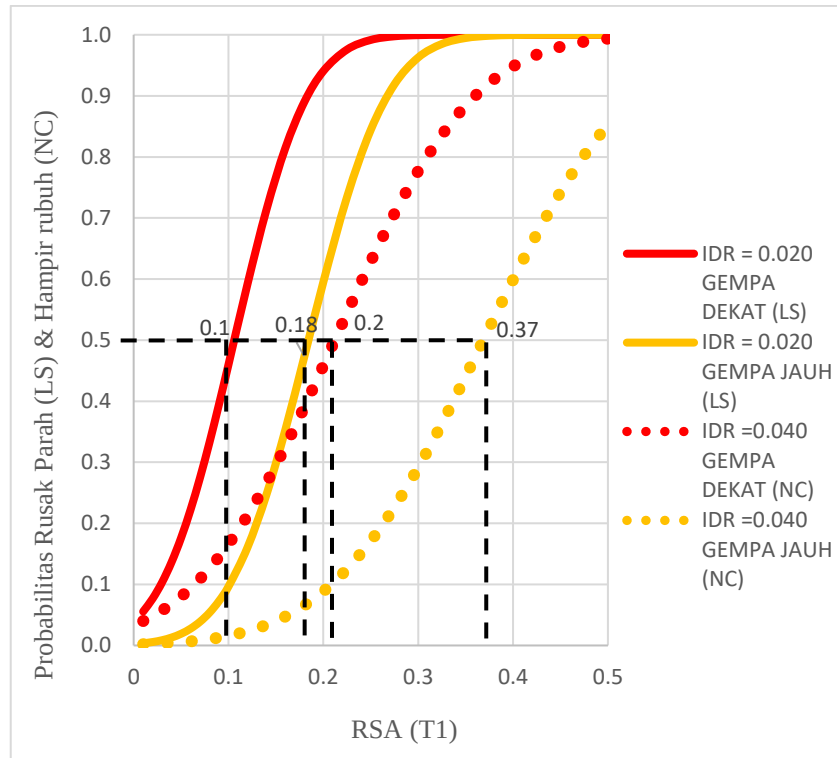
Gambar 4. 22: Perbandingan Grafik Probabilitas Rusak Parah IDR = 0.020 (LS) dengan Probabilitas Hampir Rubuh IDR = 0.040 (NC).

Gambar 4.22 menyajikan perbandingan kurva kerentanan seismik untuk dua tingkat kinerja, yaitu *Life Safety* (LS) dengan batas *Interstory Drift Ratio* (IDR) = 0,020 dan *Near Collapse* (NC) dengan batas IDR = 0,040. Berdasarkan data numerik yang tertera pada tabel, seluruh nilai probabilitas kerusakan untuk kedua kondisi batas adalah 0,00000 pada setiap tingkat intensitas *RSA T1* yang ditinjau (rentang 0,0 hingga 5,0). Hal ini mengindikasikan bahwa pada rentang respons

spektral percepatan yang dianalisis, tidak ada satupun lantai yang mencapai ambang batas deformasi inelastis, baik untuk kondisi LS maupun NC.

Apabila merujuk pada grafik sebelumnya yang menunjukkan adanya variasi respons antar lantai, hasil ini justru mengonfirmasi bahwa struktur memiliki kapasitas daktilitas yang sangat tinggi terhadap gempa yang ditinjau, atau bahwa rekaman gempa yang digunakan memiliki intensitas percepatan spektral yang relatif rendah sehingga belum memicu deformasi inelastis yang signifikan. Dengan demikian, tidak teridentifikasi lantai yang mencapai probabilitas median 0,5 pada kedua kurva, sehingga lantai kritis (misalnya Tingkat 3) tidak menunjukkan kerentanan terhadap kerusakan pada tingkat beban gempa tersebut.

Hasil ini memberikan informasi penting bahwa sistem struktur penahan beban lateral mampu mempertahankan kinerja di bawah batas kerusakan yang disyaratkan, sehingga tidak diperlukan perkuatan tambahan untuk skenario gempa yang digunakan. Namun, untuk evaluasi yang lebih komprehensif, perlu dipertimbangkan peningkatan skala intensitas gempa guna mengidentifikasi titik leleh dan kapasitas ultimit struktur secara utuh.



Gambar 4. 23: Gabungan Grafik Probabilitas Rusak Parah (LS), IDR = 0.020 & Hampir Rubuh (NC), IDR = 0.040 Pada Gempa Dekat & Gempa Jauh Arah Y Mode 1.

Gambar 4.23 menyajikan perbandingan langsung (*overlay*) dari empat kurva kerentanan seismik (*seismic fragility curves*) pada lantai paling kritis, yaitu Tingkat 3, yang teridentifikasi sebagai lokasi dengan respons paling dini terhadap peningkatan intensitas gempa. Keempat kurva tersebut merepresentasikan lantai yang sama terhadap dua tingkat kinerja *Life Safety* (LS, IDR = 0,020) dan *Near Collapse* (NC, IDR = 0,040) serta dua tipe sumber gempa dekat (*near-fault*) dan jauh (*far-fault*) pada arah Y Mode 1.

Pada nilai probabilitas median (0,5) yang menandakan titik tengah distribusi lognormal kapasitas struktur, keempat kurva menunjukkan nilai RSA *T1* yang berbeda secara kuantitatif, yaitu:

- a. LS Gempa Dekat mencapai probabilitas 50% pada RSA $T1 = 0,10$;
- b. LS Gempa Jauh mencapai probabilitas 50% pada RSA $T1 = 0,18$;
- c. NC Gempa Dekat mencapai probabilitas 50% pada RSA $T1 = 0,20$; serta

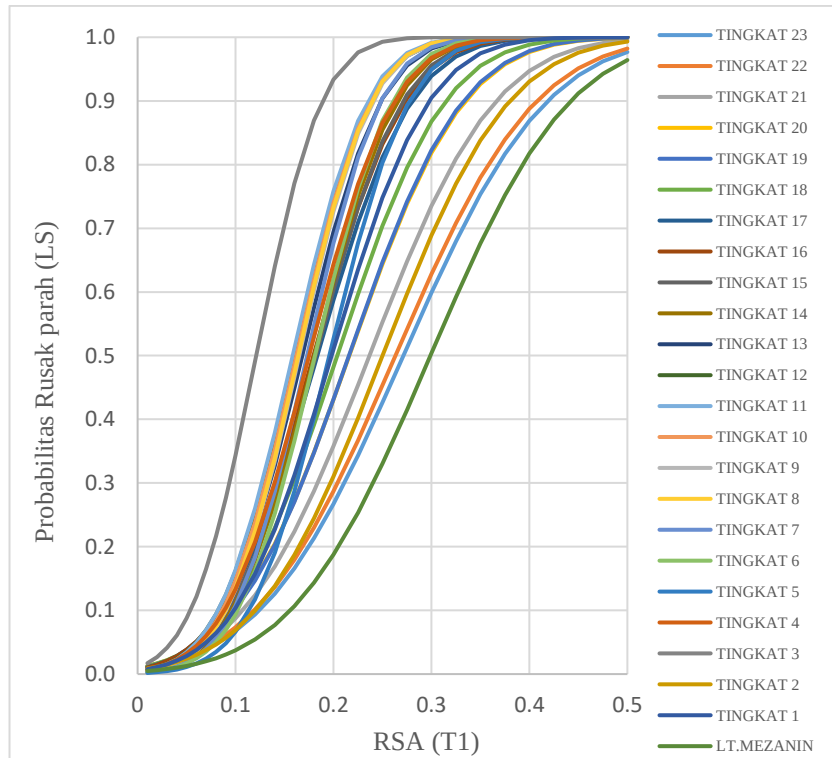
d. NC Gempa Jauh mencapai probabilitas 50% pada RSA $T1 = 0,37$.

Berdasarkan data kuantitatif tersebut, terdapat dua temuan utama. Pertama, dari sisi jenis sumber gempa, kurva gempa dekat selalu bergeser ke kiri (nilai RSA $T1$ lebih rendah) dibandingkan kurva gempa jauh pada tingkat kinerja yang sama. Pada kondisi LS, gempa dekat memicu kerusakan pada intensitas yang hanya sekitar 56% dari yang dibutuhkan gempa jauh (0,10/0,18); sedangkan pada kondisi NC, gempa dekat mencapai median pada intensitas sekitar 54% dari yang dibutuhkan gempa jauh (0,20/0,37). Hal ini mengonfirmasi bahwa karakteristik gempa dekat yang kaya akan efek pulsa kecepatan (*velocity pulse*) dan *directivity* memberikan tuntutan deformasi inelastis yang jauh lebih berat, sehingga memicu kerusakan pada tingkat intensitas gempa yang secara signifikan lebih rendah.

Kedua, dari sisi tingkat kinerja, kurva LS selalu berada di sebelah kiri kurva NC untuk tipe gempa yang sama, yang mencerminkan adanya kapasitas daktilitas cadangan (*reserve ductility capacity*). Namun, perbedaan margin ketahanan antara LS dan NC sangat dipengaruhi oleh tipe gempa. Pada gempa dekat, selisih nilai median antara NC dan LS adalah 0,10 (0,20 – 0,10), yang berarti struktur hanya memiliki ruang peningkatan intensitas sebesar 0,10 sebelum mencapai keruntuhan total setelah melewati batas keselamatan jiwa. Sebaliknya, pada gempa jauh, selisihnya adalah 0,19 (0,37 – 0,18), yang menunjukkan cadangan daktilitas hampir dua kali lebih besar dibandingkan terhadap gempa dekat. Hal ini mengindikasikan bahwa bangunan memiliki ketahanan ultimit yang lebih baik terhadap gempa jauh, namun sangat rentan terhadap gempa dekat yang dapat dengan cepat mendorong struktur dari kondisi LS menuju NC hanya dengan peningkatan intensitas yang relatif kecil.

Hasil perbandingan ini menegaskan bahwa evaluasi kinerja seismik bangunan tinggi tidak cukup hanya mengandalkan satu tingkat kerusakan atau satu jenis sumber gempa saja, melainkan memerlukan tinjauan komprehensif terhadap seluruh rentang tingkat kinerja pada lantai-lantai kritis. Informasi ini menjadi landasan krusial dalam perencanaan perkuatan berbasis kinerja (*performance-based seismic design*), khususnya untuk mengantisipasi efek

merusak dari gempa dekat yang memicu kerusakan pada intensitas rendah serta memastikan cadangan daktilitas yang memadai untuk mencegah keruntuhan progresif (*progressive collapse*) pada struktur.



Gambar 4. 24: Grafik Probabilitas Rusak Parah (LS) Pada Semua Lantai Akibat Spektra Respon Percepatan Gempa Dekat Arah X Mode2.

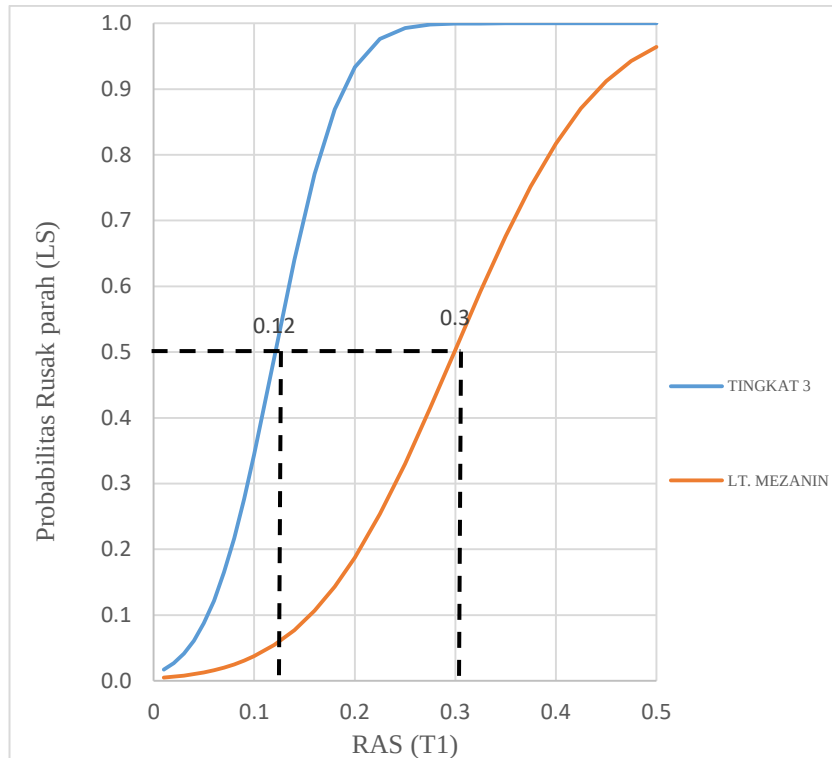
Gambar 4.24 menyajikan kurva kerentanan seismik (*seismic fragility curves*) untuk tingkat kinerja *Life Safety* (LS) pada seluruh lantai bangunan akibat pengaruh spektra respons percepatan gempa *dekat* (near-fault) arah X pada mode getar kedua (Mode 2). Ambang batas kerusakan parah (LS) ditetapkan berdasarkan parameter *Interstory Drift Ratio* (IDR) sebesar 0,020, yang merepresentasikan batas deformasi inelastis sebelum elemen struktur kehilangan kapasitas kekuatan dan kekakuan signifikannya.

Masing-masing kurva pada grafik menggambarkan probabilitas suatu lantai untuk melampaui batas IDR 0,020 sebagai fungsi dari peningkatan nilai *RSA T1*. Secara keseluruhan, seluruh kurva menunjukkan tren peningkatan probabilitas yang konsisten seiring dengan bertambahnya intensitas gempa, yang mengonfirmasi

bahwa tuntutan deformasi struktural berbanding lurus dengan tingkat respons spektral percepatan. Variasi antar kurva mengindikasikan bahwa distribusi tuntutan simpangan antar lantai tidak seragam sepanjang tinggi gedung, di mana lantai-lantai dengan kurva yang bergeser ke arah kiri memiliki kerentanan lebih tinggi terhadap pencapaian kondisi batas LS.

Perlu dicatat bahwa analisis pada Mode 2 memberikan karakteristik respons yang berbeda secara fundamental dibandingkan dengan Mode 1 yang telah dibahas sebelumnya. Kontribusi *higher mode* (mode getar yang lebih tinggi) menjadi sangat signifikan pada bangunan tinggi, di mana Mode 2 seringkali memicu tuntutan simpangan antar lantai yang lebih besar pada bagian tengah hingga atas struktur dibandingkan dengan Mode 1 yang cenderung mendominasi bagian bawah. Fenomena ini tercermin dari pola kurva pada grafik, di mana lantai-lantai kritis yang paling rentan terhadap kondisi LS pada Mode 2 dapat berbeda lokasinya dengan lantai kritis pada Mode 1.

Hasil ini mengonfirmasi bahwa evaluasi kinerja seismik pada bangunan tinggi tidak dapat hanya bertumpu pada mode fundamental saja, melainkan harus mempertimbangkan kontribusi *higher modes* untuk mengidentifikasi secara akurat seluruh lantai-lantai kritis. Informasi ini menjadi landasan penting dalam perencanaan perkuatan berbasis kinerja (*performance-based seismic design*), guna memastikan bahwa ambang batas keselamatan jiwa terpenuhi di seluruh tingkat bangunan, termasuk pada lokasi-lokasi yang rentan terhadap efek mode getar tinggi.



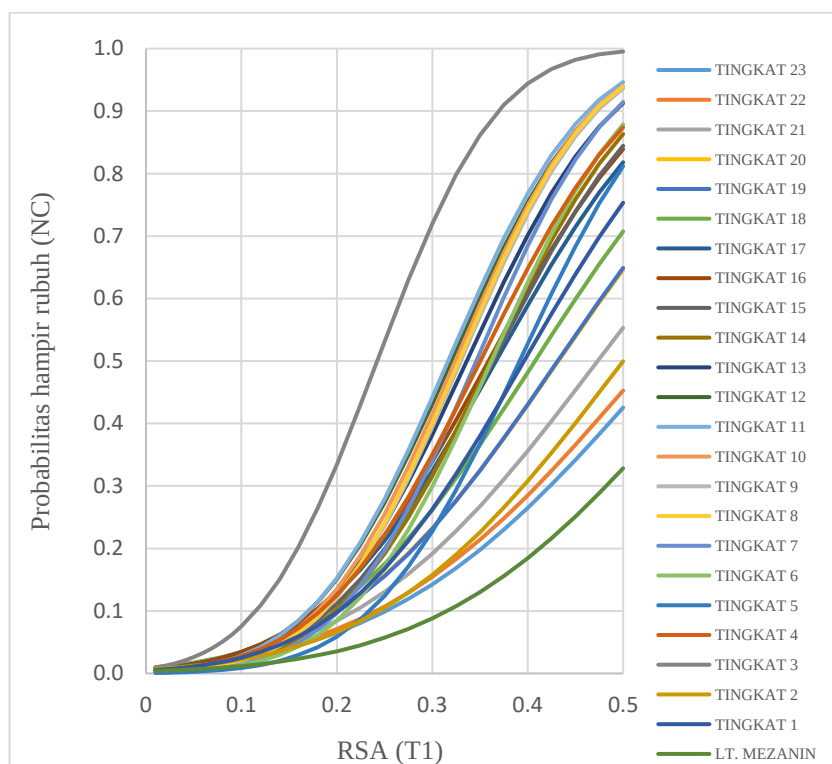
Gambar 4. 25: Grafik Probabilitas Rusak Parah (LS) kondisi batas IDR = 0.020.

Gambar 4.25 menyajikan kurva kerentanan seismik (*seismic fragility curves*) untuk tingkat kinerja *Life Safety* (LS) pada dua lantai ekstrem, yaitu Tingkat 3 dan Tingkat 0 (Lantai Mezzanine), yang merepresentasikan batas bawah dan batas atas dari rentang respons seluruh lantai terhadap gempa dekat arah X pada mode getar kedua (Mode 2) di grafik sebelumnya (Gambar 4.26). Kedua kurva ini mengonfirmasi bahwa Tingkat 3 merupakan lantai dengan kerentanan tertinggi (respons paling dini terhadap peningkatan nilai *RSA T1*), sedangkan Tingkat 0 merupakan lantai dengan kerentanan terendah (respons paling akhir) di antara seluruh lantai yang diamati, dengan parameter *Interstory Drift Ratio* (IDR) sebesar 0,020 sebagai ambang batas kerusakan parah.

Pada nilai probabilitas median (0,5) yang menandakan titik tengah distribusi lognormal kapasitas struktur, Tingkat 3 mencapai ambang batas LS pada nilai *RSA T1* = 0,12, sedangkan Tingkat 0 baru mencapai probabilitas yang sama pada nilai *RSA T1* = **0,30**. Perbedaan nilai *RSA T1* yang mencapai lebih dari dua kali lipat ini secara kuantitatif menunjukkan bahwa lantai paling kritis (Tingkat 3) memerlukan intensitas gempa yang jauh lebih rendah untuk mencapai kondisi

keselamatan jiwa dibandingkan lantai yang paling aman (Mezzanine). Dengan kata lain, Tingkat 3 mencapai batas deformasi inelastis hanya dengan 40% dari intensitas gempa yang dibutuhkan oleh Lantai Mezzanine untuk mengalami kerusakan yang setara.

Hasil identifikasi kedua lantai ekstrem pada analisis Mode 2 ini memberikan batasan (*envelope*) yang jelas mengenai rentang ketahanan struktur terhadap deformasi inelastis sedang pada arah longitudinal (X). Informasi ini menjadi landasan krusial dalam menentukan prioritas perkuatan seismik, khususnya pada lantai paling rentan yang terpengaruh oleh kontribusi *higher mode*, guna memastikan bahwa seluruh tingkat bangunan memenuhi ambang batas keselamatan jiwa sebelum terjadi kerusakan struktural yang tidak dapat diterima.



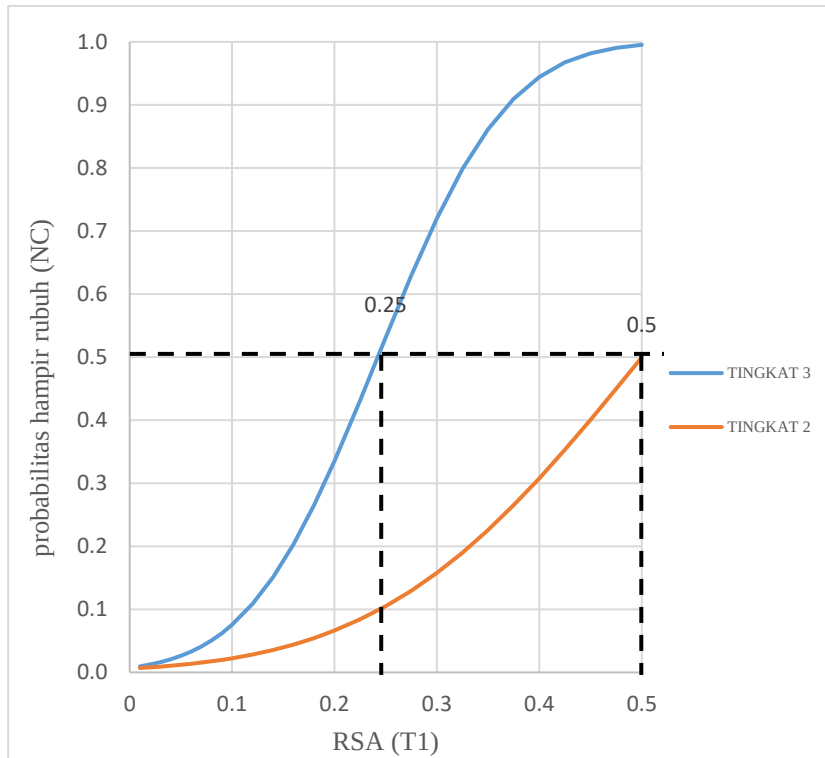
Gambar 4. 26: Grafik Probabilitas Hampir Rubuh (NC) Pada Semua Lantai Akibat Spektra Respon Percepatan Gempa Dekat Arah X Mode 2.

Gambar 4.26 menyajikan kurva kerentanan seismik (*seismic fragility curves*) untuk tingkat kinerja Hampir Rubuh (*Near Collapse – NC*) pada seluruh lantai bangunan akibat pengaruh spektra respons percepatan

gempa *dekat* (near-fault) arah X pada mode getar kedua (Mode 2). Ambang batas kerusakan NC ditetapkan berdasarkan parameter *Interstory Drift Ratio* (IDR) sebesar 0,040, yang merepresentasikan batas deformasi inelastis ultimit sebelum struktur kehilangan hampir seluruh kapasitas kekuatan dan kekakuan residualnya menuju keruntuhan total.

Masing-masing kurva pada grafik menggambarkan probabilitas suatu lantai untuk melampaui batas IDR 0,040 sebagai fungsi dari peningkatan nilai *RSA T1*. Secara keseluruhan, seluruh kurva memperlihatkan tren peningkatan probabilitas yang konsisten seiring dengan bertambahnya intensitas gempa, yang mengonfirmasi bahwa tuntutan deformasi plastis pada setiap lantai berbanding lurus dengan tingkat respons spektral percepatan. Variasi antar kurva mengindikasikan bahwa distribusi permintaan deformasi inelastis sepanjang tinggi gedung tidak seragam, di mana lantai-lantai dengan kemiringan kurva lebih curam dan bergeser ke kiri memiliki kerentanan lebih tinggi terhadap pencapaian kondisi batas NC.

Analisis pada Mode 2 memberikan wawasan yang sangat penting karena kontribusi *higher mode* menjadi semakin dominan pada bangunan tinggi, terutama dalam memicu deformasi inelastis ultimit di bagian tengah hingga atas struktur. Hal ini berbeda dengan respons Mode 1 yang cenderung mendominasi bagian bawah bangunan. Dengan demikian, lantai-lantai kritis yang teridentifikasi pada grafik ini dapat berbeda lokasinya dengan lantai kritis pada Mode 1, sehingga evaluasi risiko keruntuhan global (*progressive collapse*) tidak dapat hanya mengandalkan mode fundamental saja. Hasil ini menjadi landasan penting dalam perencanaan perkuatan seismik berbasis kinerja, guna memastikan bahwa seluruh lantai memiliki kapasitas daktilitas ultimit yang memadai, termasuk terhadap efek *higher modes* yang seringkali luput dari perhatian dalam analisis struktur konvensional.



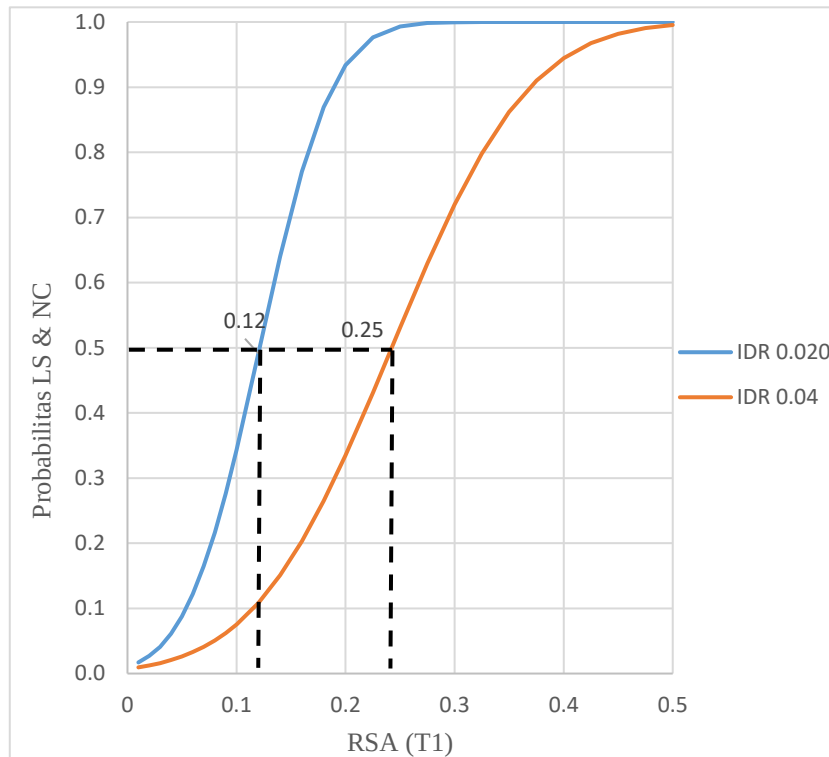
Gambar 4. 27: Grafik Probabilitas Hampir Rubuh (NC) kondisi batas IDR = 0.040.

Gambar 4.27 menyajikan kurva kerentanan seismik (*seismic fragility curves*) untuk tingkat kinerja Hampir Rubuh (*Near Collapse – NC*) pada dua lantai ekstrem, yaitu Tingkat 3 dan Tingkat 2, yang merepresentasikan batas bawah dan batas atas dari rentang respons seluruh lantai terhadap gempa dekat arah X pada mode getar kedua (Mode 2) di grafik sebelumnya (Gambar 4.28). Kedua kurva ini mengonfirmasi bahwa Tingkat 3 merupakan lantai dengan kerentanan tertinggi (respons paling dini terhadap peningkatan nilai *RSA T1*), sedangkan Tingkat 2 merupakan lantai dengan kerentanan terendah (respons paling akhir) di antara seluruh lantai yang diamati, dengan parameter *Interstory Drift Ratio* (IDR) sebesar 0,040 sebagai ambang batas kerusakan hampir rubuh.

Pada nilai probabilitas median (0,5) yang menandakan titik tengah distribusi lognormal kapasitas struktur, Tingkat 3 mencapai ambang batas NC pada nilai *RSA T1* = 0,2, sedangkan Tingkat 2 baru mencapai probabilitas yang sama pada nilai *RSA T1* = 0,5. Perbedaan nilai *RSA T1* yang mencapai faktor 2,5 ini secara kuantitatif menunjukkan bahwa lantai paling kritis (Tingkat 3) memerlukan

intensitas gempa yang jauh lebih rendah hanya 40% dari yang dibutuhkan oleh Tingkat 2 untuk mencapai kondisi hampir rubuh yang setara.

Hasil identifikasi kedua lantai ekstrem pada analisis Mode 2 ini memberikan batasan (*envelope*) yang jelas mengenai rentang ketahanan ultimit struktur terhadap deformasi inelastis pada arah longitudinal (X), dengan pengaruh signifikan dari kontribusi *higher mode*. Informasi ini menjadi landasan krusial dalam menentukan prioritas perkuatan seismik, khususnya pada lantai paling rentan (Tingkat 3), guna mencegah terjadinya keruntuhan progresif (*progressive collapse*) sebelum elemen-elemen struktur lainnya mencapai batas deformasi ultimitnya.



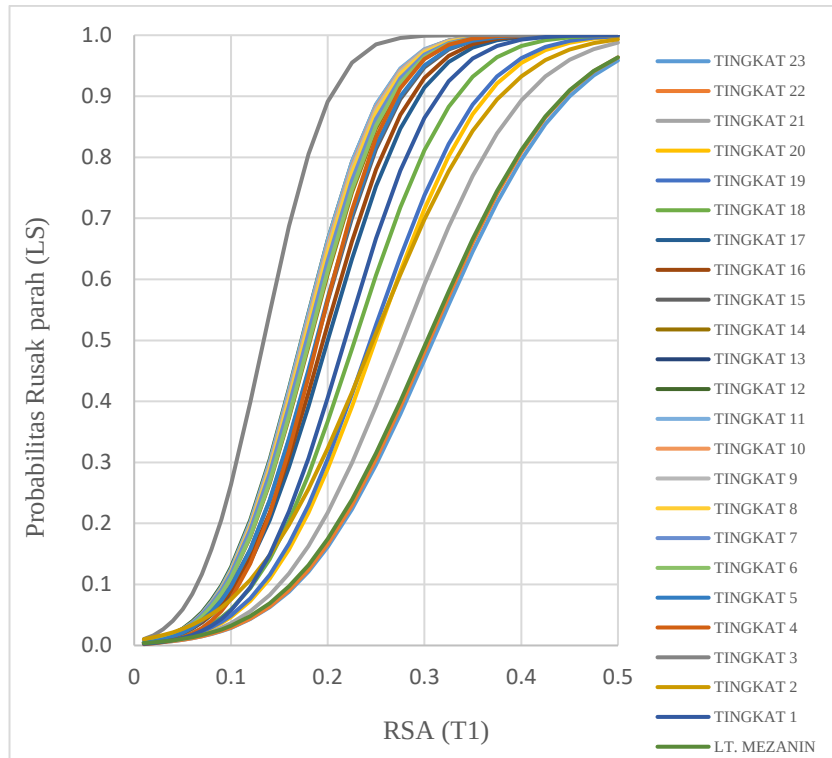
Gambar 4. 28: Perbandingan Grafik Probabilitas Rusak Parah IDR = 0.020 (LS) dengan Probabilitas Hampir Rubuh IDR = 0.040 (NC).

Gambar 4.28 menyajikan perbandingan langsung (*overlay*) kurva kerentanan seismik pada lantai paling kritis, yaitu Tingkat 3, yang teridentifikasi dari analisis mode getar kedua (Mode 2) sebagai lokasi dengan respons paling dini terhadap peningkatan intensitas gempa. Kedua kurva pada gambar ini merepresentasikan dua tingkat kinerja yang berbeda pada lokasi lantai yang sama, dengan parameter *Interstory Drift Ratio* (IDR) sebagai ukuran tuntutan deformasi.

Kurva IDR 0,020 menggambarkan probabilitas mencapai kondisi batas *Life Safety* (LS), sedangkan kurva IDR 0,040 menggambarkan probabilitas mencapai kondisi batas *Near Collapse* (NC).

Pada nilai probabilitas median (0,5) yang menandakan titik tengah distribusi lognormal kapasitas struktur, terlihat bahwa pada lantai kritis yang sama (Tingkat 3), kurva LS mencapai probabilitas 50% pada nilai RSA $T1 = 0,12$, sedangkan kurva NC baru mencapai probabilitas yang setara pada nilai RSA $T1 = 0,20$. Perbedaan nilai ambang *RSA T1* antara kedua kurva ini secara kuantitatif mengonfirmasi keberadaan kapasitas daktilitas cadangan (*reserve ductility capacity*) yang signifikan pada lantai paling kritis. Setelah melewati batas keselamatan jiwa (LS) pada intensitas 0,12, struktur masih mampu mentolerir peningkatan intensitas gempa hingga 0,20 (peningkatan sekitar 67%) sebelum akhirnya mendekati kondisi keruntuhan total (NC).

Hasil perbandingan pada lantai kritis ini memberikan gambaran kuantitatif yang jelas mengenai rentang ketahanan struktur akibat kontribusi *higher mode* (Mode 2), mulai dari batas deformasi inelastis sedang hingga batas deformasi ultimit. Informasi ini menegaskan bahwa evaluasi kinerja seismik pada bangunan tinggi tidak cukup hanya berpatokan pada satu tingkat kerusakan saja, melainkan memerlukan tinjauan komprehensif terhadap seluruh rentang tingkat kinerja pada lantai-lantai kritis. Hal ini penting untuk memastikan bahwa cadangan daktilitas yang tersedia mampu mencegah keruntuhan progresif (*progressive collapse*) sebelum elemen-elemen struktur lainnya mencapai batas kapasitas ultimitnya.



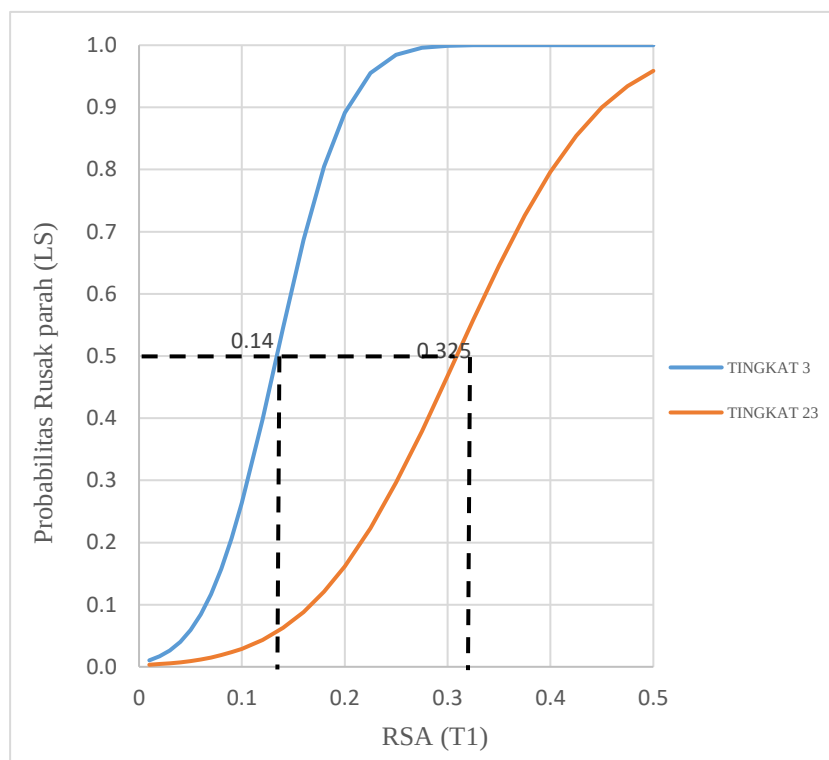
Gambar 4. 29: Grafik Probabilitas Rusak parah (LS) Pada Semua Lantai Akibat Spektra Respon Percepatan Gempa Juah Arah X Mode2.

Gambar 4.29 menyajikan kurva kerentanan seismik (*seismic fragility curves*) untuk tingkat kinerja *Life Safety* (LS) pada seluruh lantai bangunan akibat pengaruh spektra respons percepatan gempa *jauh* (far-fault) arah X pada mode getar kedua (Mode 2). Ambang batas kerusakan parah (LS) ditetapkan berdasarkan parameter *Interstory Drift Ratio* (IDR) sebesar 0,020, yang merepresentasikan batas deformasi inelastis sebelum elemen-elemen struktur kehilangan kapasitas kekuatan dan kekakuan signifikannya.

Masing-masing kurva pada grafik menggambarkan probabilitas suatu lantai untuk melampaui batas IDR 0,020 sebagai fungsi dari peningkatan nilai *RSA T1*. Secara keseluruhan, seluruh kurva memperlihatkan tren peningkatan probabilitas yang konsisten seiring dengan bertambahnya intensitas gempa, yang mengonfirmasi bahwa tuntutan deformasi struktural berbanding lurus dengan tingkat respons spektral percepatan. Variasi antar kurva mengindikasikan bahwa distribusi tuntutan simpangan antar lantai tidak seragam sepanjang tinggi gedung,

di mana lantai-lantai dengan kurva yang bergeser ke arah kiri (nilai $RSA\ T1$ lebih rendah) memiliki kerentanan lebih tinggi terhadap pencapaian kondisi batas LS.

Analisis pada Mode 2 memberikan wawasan penting karena kontribusi *higher mode* menjadi sangat dominan pada bangunan tinggi, khususnya dalam memicu deformasi di bagian tengah hingga atas struktur berbeda dengan Mode 1 yang cenderung mendominasi bagian bawah. Pada karakteristik gempa *jauh* yang tidak memiliki efek pulsa kecepatan (*velocity pulse*) dominan, pola sebaran kurva antar lantai umumnya menunjukkan gradien yang lebih bertahap dan lebih rapat dibandingkan gempa dekat. Meskipun demikian, identifikasi lantai-lantai kritis berdasarkan grafik ini tetap menjadi landasan krusial dalam perencanaan perkuatan berbasis kinerja (*performance-based seismic design*), guna memastikan bahwa seluruh tingkat bangunan memenuhi ambang batas keselamatan jiwa, termasuk terhadap efek *higher modes* yang seringkali luput dari analisis konvensional.



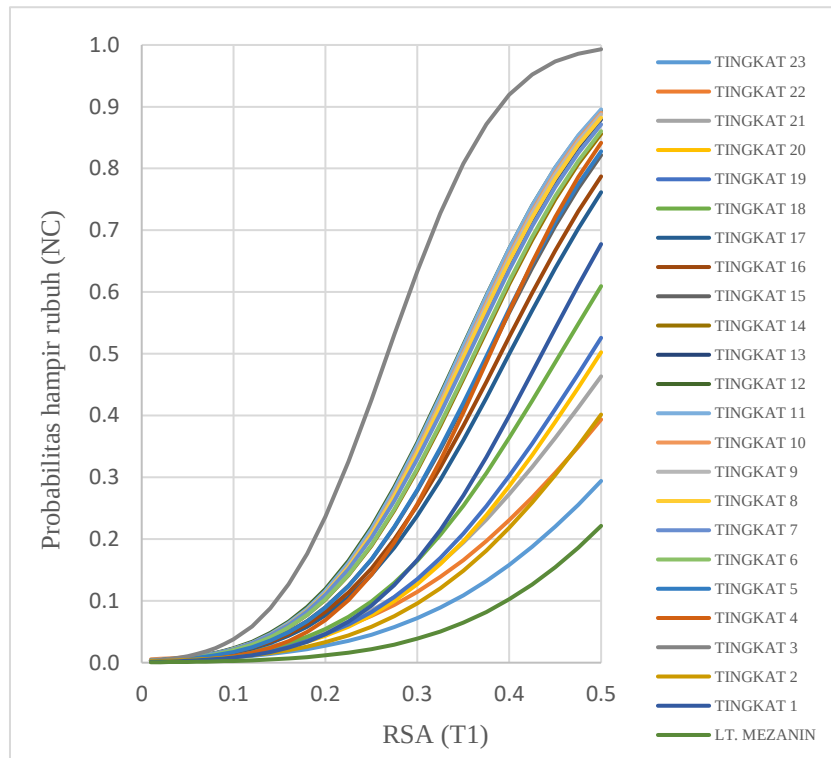
Gambar 4. 30: Grafik Probabilitas Rusak parah (LS) kondisi batas IDR = 0.020.

Gambar 4.30 menyajikan kurva kerentanan seismik (*seismic fragility curves*) untuk tingkat kinerja *Life Safety* (LS) pada dua lantai ekstrem,

yaitu Tingkat 3 dan Tingkat 23, yang merepresentasikan batas bawah dan batas atas dari rentang respons seluruh lantai terhadap gempa jauh arah X pada mode getar kedua (Mode 2) di grafik sebelumnya (Gambar 4.29). Kedua kurva ini mengonfirmasi bahwa Tingkat 3 merupakan lantai dengan kerentanan tertinggi (respons paling dini terhadap peningkatan nilai $RSA\ T1$), sedangkan Tingkat 23 merupakan lantai dengan kerentanan terendah (respons paling akhir) di antara seluruh lantai yang diamati, dengan parameter *Interstory Drift Ratio* (IDR) sebesar 0,020 sebagai ambang batas kerusakan parah.

Pada nilai probabilitas median (0,5) yang menandakan titik tengah distribusi lognormal kapasitas struktur, Tingkat 3 mencapai ambang batas LS pada nilai $RSA\ T1 = 0,14$, sedangkan Tingkat 23 baru mencapai probabilitas yang sama pada nilai $RSA\ T1 = 0,32$. Perbedaan nilai $RSA\ T1$ yang mencapai lebih dari dua kali lipat ini secara kuantitatif menunjukkan bahwa lantai paling kritis (Tingkat 3) memerlukan intensitas gempa yang jauh lebih rendah hanya sekitar 44% dari yang dibutuhkan oleh Tingkat 23 untuk mencapai kondisi keselamatan jiwa yang setara.

Hasil identifikasi kedua lantai ekstrem pada analisis Mode 2 ini memberikan batasan (*envelope*) yang jelas mengenai rentang ketahanan struktur terhadap deformasi inelastis sedang pada arah longitudinal (X) akibat gempa jauh. Informasi ini menjadi landasan krusial dalam menentukan prioritas perkuatan seismik, khususnya pada lantai paling rentan (Tingkat 3), guna memastikan bahwa seluruh tingkat bangunan memenuhi ambang batas keselamatan jiwa sebelum terjadi kerusakan struktural yang tidak dapat diterima.



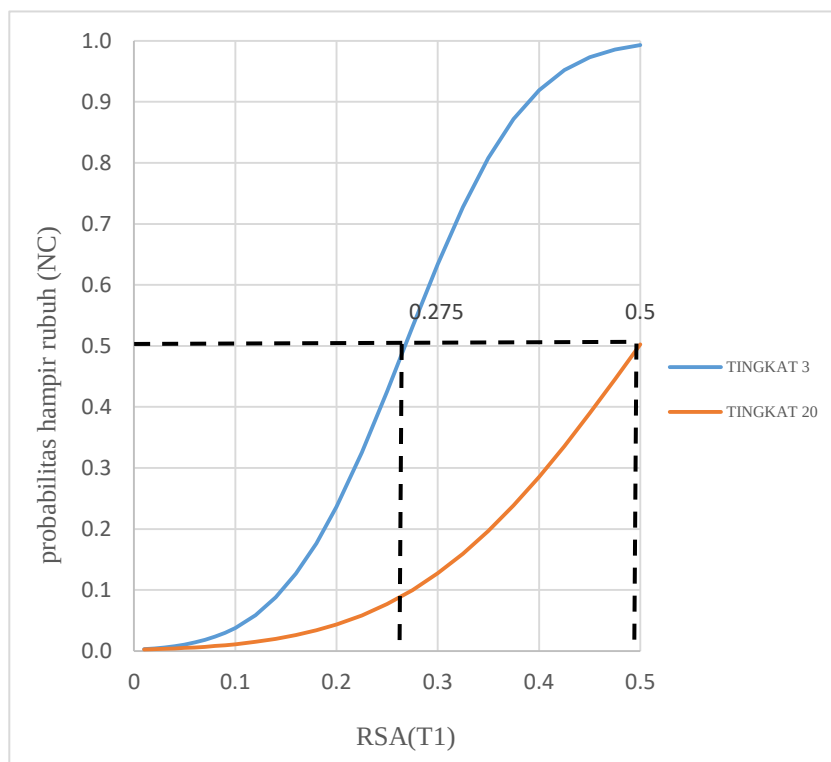
Gambar 4. 31: Grafik Probabilitas Hampir Rubuh (NC) Pada Semua Lantai Akibat Spektra Respon Percepatan Gempa Dekat Arah X Mode2.

Gambar 4.31 menyajikan kurva kerentanan seismik (*seismic fragility curves*) untuk tingkat kinerja Hampir Rubuh (*Near Collapse – NC*) pada seluruh lantai bangunan akibat pengaruh spektra respons percepatan gempa *dekat* (near-fault) arah X pada mode getar kedua (Mode 2). Ambang batas kerusakan NC ditetapkan berdasarkan parameter *Interstory Drift Ratio* (IDR) sebesar 0,040, yang merepresentasikan batas deformasi inelastis ultimit sebelum struktur kehilangan hampir seluruh kapasitas kekuatan dan kekakuan residualnya menuju keruntuhan total.

Masing-masing kurva pada grafik menggambarkan probabilitas suatu lantai untuk melampaui batas IDR 0,040 sebagai fungsi dari peningkatan nilai *RSA T1*. Secara keseluruhan, seluruh kurva memperlihatkan tren peningkatan probabilitas yang konsisten seiring dengan bertambahnya intensitas gempa, yang mengonfirmasi bahwa tuntutan deformasi plastis pada setiap lantai berbanding lurus dengan tingkat respons spektral percepatan. Variasi antar kurva

mengindikasikan bahwa distribusi permintaan deformasi inelastis sepanjang tinggi gedung tidak seragam, di mana lantai-lantai dengan kurva yang bergeser ke arah kiri (nilai $RSA\ T1$ lebih rendah) memiliki kerentanan lebih tinggi terhadap pencapaian kondisi batas NC.

Analisis pada Mode 2 menjadi sangat krusial pada bangunan tinggi, karena kontribusi *higher mode* seringkali memicu tuntutan deformasi ultimit yang signifikan pada bagian tengah hingga atas struktur berbeda dengan dominasi Mode 1 yang cenderung mendominasi bagian bawah. Karakteristik gempa dekat yang kaya akan efek pulsa kecepatan (*velocity pulse*) semakin memperberat tuntutan inelastis tersebut. Oleh karena itu, identifikasi lantai-lantai kritis berdasarkan grafik ini menjadi landasan penting dalam evaluasi risiko keruntuhan progresif (*progressive collapse*) dan penentuan prioritas perkuatan seismik berbasis kinerja.



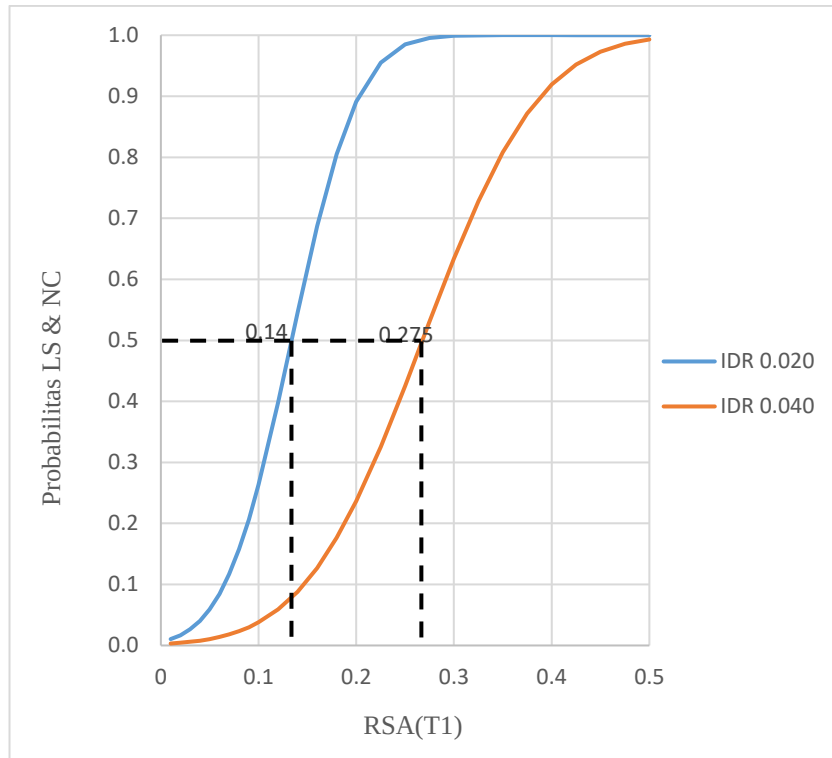
Gambar 4. 32: Grafik Probabilitas Rusak parah (LS) Simpangan kondisi batas IDR = 0.040.

Gambar 4.32 menyajikan kurva kerentanan seismik (*seismic fragility curves*) untuk tingkat kinerja Hampir Rubuh (*Near Collapse – NC*) pada dua lantai

ekstrem, yaitu Tingkat 3 dan Tingkat 20, yang merepresentasikan batas bawah dan batas atas dari rentang respons seluruh lantai terhadap gempa jauh arah X pada mode getar kedua (Mode 2) di grafik sebelumnya. Kedua kurva ini mengonfirmasi bahwa Tingkat 3 merupakan lantai dengan kerentanan tertinggi (respons paling dini terhadap peningkatan nilai $RSA\ T1$), sedangkan Tingkat 20 merupakan lantai dengan kerentanan terendah (respons paling akhir) di antara seluruh lantai yang diamati, dengan parameter *Interstory Drift Ratio* (IDR) sebesar 0,040 sebagai ambang batas kerusakan hampir rubuh.

Pada nilai probabilitas median (0,5) yang menandakan titik tengah distribusi lognormal kapasitas struktur, Tingkat 3 mencapai ambang batas NC pada nilai $RSA\ T1 = 0,275$, sedangkan Tingkat 20 baru mencapai probabilitas yang sama pada nilai $RSA\ T1 = 0,50$. Perbedaan nilai $RSA\ T1$ ini secara kuantitatif menunjukkan bahwa lantai paling kritis (Tingkat 3) memerlukan intensitas gempa yang jauh lebih rendah hanya sekitar 55% dari yang dibutuhkan oleh Tingkat 20 untuk mencapai kondisi hampir rubuh yang setara.

Hasil identifikasi kedua lantai ekstrem pada analisis Mode 2 dengan karakteristik gempa jauh ini memberikan batasan (*envelope*) yang jelas mengenai rentang ketahanan ultimit struktur terhadap deformasi inelastis pada arah longitudinal (X). Informasi ini menjadi landasan krusial dalam menentukan prioritas perkuatan seismik, khususnya pada lantai paling rentan (Tingkat 3), guna mencegah terjadinya keruntuhan progresif (*progressive collapse*) sebelum elemen-elemen struktur lainnya mencapai batas deformasi ultimitnya.



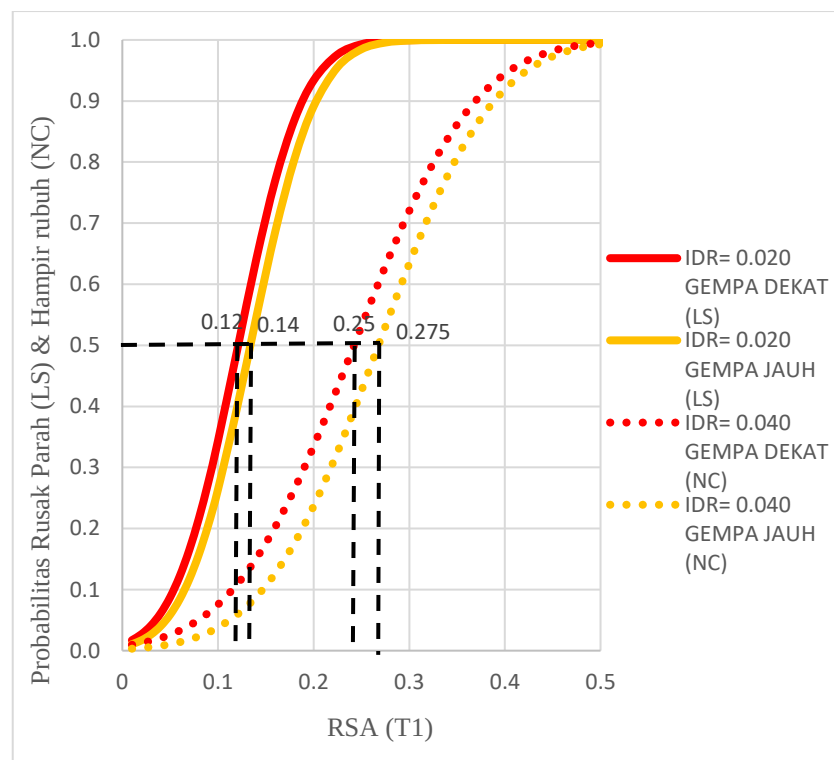
Gambar 4. 33: Perbandingan Grafik Probabilitas Rusak Parah IDR = 0.020 (LS) dengan Probabilitas Hampir Rubuh IDR = 0.040 (NC).

Gambar 4.33 menyajikan perbandingan langsung (*overlay*) kurva kerentanan seismik pada lantai paling kritis, yaitu Tingkat 3, yang teridentifikasi dari grafik-grafik sebelumnya sebagai lokasi dengan respons paling dini terhadap peningkatan intensitas gempa. Kedua kurva pada gambar ini merepresentasikan lantai yang sama terhadap dua tingkat kinerja berbeda, dengan parameter *Interstory Drift Ratio* (IDR) sebagai ukuran tuntutan deformasi. Kurva IDR 0,020 menggambarkan probabilitas mencapai kondisi batas *Life Safety* (LS), sedangkan kurva IDR 0,040 menggambarkan probabilitas mencapai kondisi batas *Near Collapse* (NC).

Pada nilai probabilitas median (0,5) yang menandakan titik tengah distribusi lognormal kapasitas struktur, terlihat bahwa pada lantai kritis yang sama (Tingkat 3), kurva LS mencapai probabilitas 50% pada nilai RSA $T1 = 0,14$, sedangkan kurva NC baru mencapai probabilitas keruntuhan yang setara pada nilai RSA $T1 = 0,275$. Perbedaan nilai ambang RSA $T1$ antara kedua kurva ini secara kuantitatif mengonfirmasi keberadaan kapasitas daktilitas cadangan (*reserve ductility*

capacity) yang signifikan pada lantai paling kritis. Setelah melewati batas keselamatan jiwa (LS) pada intensitas 0,14, struktur masih mampu mentolerir peningkatan intensitas gempa hingga hampir dua kali lipat (0,275) sebelum akhirnya mendekati kondisi keruntuhan total (NC).

Hasil perbandingan pada lantai kritis ini memberikan gambaran kuantitatif yang jelas mengenai rentang ketahanan struktur akibat kontribusi *higher mode* (Mode 2) pada karakteristik gempa jauh. Informasi ini menegaskan bahwa evaluasi kinerja seismik pada bangunan tinggi tidak cukup hanya berpatokan pada satu tingkat kerusakan saja, melainkan memerlukan tinjauan komprehensif terhadap seluruh rentang tingkat kinerja pada lantai-lantai kritis. Hal ini penting untuk memastikan bahwa cadangan daktilitas yang tersedia mampu mencegah keruntuhan progresif (*progressive collapse*) sebelum elemen-elemen struktur lainnya mencapai batas kapasitas ultimitnya.



Gambar 4. 34: Gabungan Grafik Probabilitas Rusak parah (LS), kondisi batas IDR = 0.020 & Hampir Rubuh (NC) kondisi batas IDR = 0.040 Pada Gempa Dekat & Gempa Jauh Arah X Mode 2.

Gambar 4.34 menyajikan perbandingan langsung (*overlay*) dari empat kurva kerentanan seismik (*seismic fragility curves*) pada lantai paling kritis, yaitu Tingkat 3, yang teridentifikasi sebagai lokasi dengan respons paling dini terhadap peningkatan intensitas gempa. Keempat kurva tersebut merepresentasikan lantai yang sama terhadap dua tingkat kinerja *Life Safety* (LS, IDR = 0,020) dan *Near Collapse* (NC, IDR = 0,040) serta dua tipe sumber gempa dekat (*near-fault*) dan jauh (*far-fault*) pada arah X Mode 2.

Pada nilai probabilitas median (0,5) yang menandakan titik tengah distribusi lognormal kapasitas struktur, keempat kurva menunjukkan nilai *RSA T1* yang berbeda secara signifikan, yaitu:

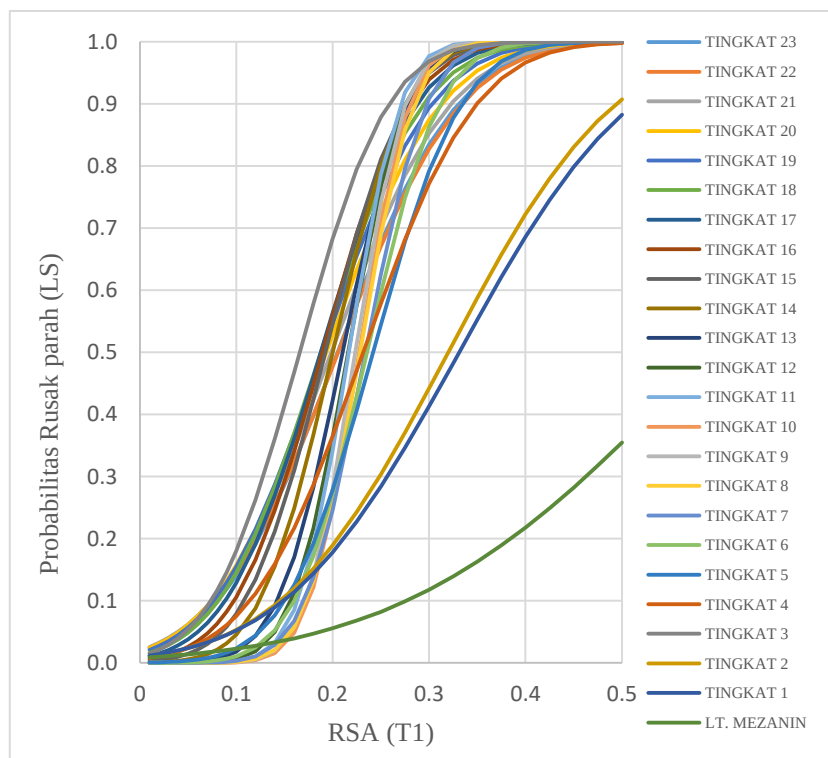
- a. LS Gempa Dekat mencapai probabilitas 50% pada *RSA T1* = 0,12;
- b. LS Gempa Jauh mencapai probabilitas 50% pada *RSA T1* = 0,14;
- c. NC Gempa Dekat mencapai probabilitas 50% pada *RSA T1* = 0,20; serta
- d. NC Gempa Jauh mencapai probabilitas 50% pada *RSA T1* = 0,50.

Berdasarkan data kuantitatif tersebut, terdapat dua temuan utama. Pertama, dari sisi jenis sumber gempa, kurva gempa dekat selalu bergeser ke kiri (nilai *RSA T1* lebih rendah) dibandingkan kurva gempa jauh pada tingkat kinerja yang sama. Untuk kondisi LS, gempa dekat membutuhkan intensitas hanya 86% dari gempa jauh (0,12/0,14); sedangkan untuk kondisi NC, gempa dekat hanya membutuhkan **40%** dari intensitas gempa jauh (0,20/0,50). Hal ini mengonfirmasi bahwa karakteristik gempa dekat yang kaya akan efek pulsa kecepatan (*velocity pulse*) dan *directivity* memberikan tuntutan deformasi inelastis yang jauh lebih berat, sehingga memicu kerusakan pada tingkat intensitas gempa yang jauh lebih rendah, terutama pada ambang batas keruntuhan (NC).

Kedua, dari sisi tingkat kinerja, kurva LS (IDR 0,020) selalu berada di sebelah kiri kurva NC (IDR 0,040) untuk tipe gempa yang sama. Perbedaan nilai *RSA T1* antara LS dan NC pada gempa dekat (0,20 - 0,12 = 0,08) dan pada gempa jauh (0,50 - 0,14 = 0,36) secara kuantitatif menunjukkan adanya kapasitas daktilitas cadangan (*reserve ductility capacity*) yang cukup besar setelah struktur melewati batas keselamatan jiwa, sebelum akhirnya mendekati keruntuhan total.

Margin daktilitas pada gempa jauh (0,36) jauh lebih besar dibandingkan gempa dekat (0,08), yang mengindikasikan bahwa bangunan memiliki ketahanan ultimit yang sangat tinggi terhadap gempa jauh, namun rentan terhadap gempa dekat yang dapat dengan cepat mendorong struktur dari kondisi LS menuju NC hanya dengan peningkatan intensitas yang relatif kecil.

Hasil perbandingan ini menegaskan bahwa evaluasi kinerja seismik bangunan tinggi tidak cukup hanya mengandalkan satu tingkat kerusakan atau satu jenis sumber gempa saja, melainkan memerlukan tinjauan komprehensif terhadap seluruh rentang tingkat kinerja pada rantai-lantai kritis. Informasi ini menjadi landasan krusial dalam perencanaan perkuatan berbasis kinerja (*performance-based seismic design*), khususnya untuk mengantisipasi efek merusak dari gempa dekat dan memastikan cadangan daktilitas yang memadai guna mencegah keruntuhan progresif (*progressive collapse*).

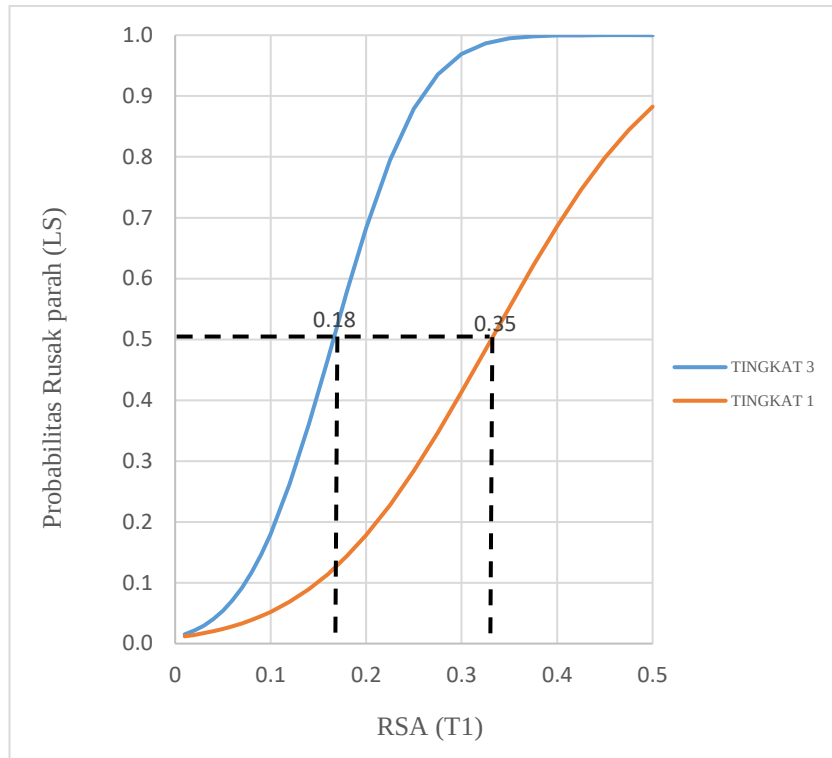


Gambar 4. 35: Grafik Probabilitas Rusak parah (LS) Pada semua lantai Akibat Spektra Respon Percepatan Gempa Dekat Arah Y Mode2.

Gambar 4.35 menyajikan kurva kerentanan seismik (*seismic fragility curves*) untuk tingkat kinerja *Life Safety* (LS) pada seluruh lantai bangunan akibat pengaruh spektra respons percepatan gempa *dekat* (near-fault) arah Y pada mode getar kedua (Mode 2). Ambang batas kerusakan parah (LS) ditetapkan berdasarkan parameter *Interstory Drift Ratio* (IDR) sebesar 0,020, yang merepresentasikan batas deformasi inelastis sebelum elemen-elemen struktur kehilangan kapasitas kekuatan dan kekakuan signifikannya.

Masing-masing kurva pada grafik menggambarkan probabilitas suatu lantai untuk melampaui batas IDR 0,020 sebagai fungsi dari peningkatan nilai *RSA T1*. Secara keseluruhan, seluruh kurva memperlihatkan tren peningkatan probabilitas yang konsisten seiring dengan bertambahnya intensitas gempa, yang mengonfirmasi bahwa tuntutan deformasi struktural berbanding lurus dengan tingkat respons spektral percepatan. Variasi antar kurva mengindikasikan bahwa distribusi tuntutan simpangan antar lantai tidak seragam sepanjang tinggi gedung, di mana lantai-lantai dengan kurva yang bergeser ke arah kiri (nilai *RSA T1* lebih rendah) memiliki kerentanan lebih tinggi terhadap pencapaian kondisi batas LS.

Analisis pada Mode 2 menjadi sangat krusial pada bangunan tinggi karena kontribusi *higher mode* seringkali memicu tuntutan deformasi yang signifikan pada bagian tengah hingga atas struktur berbeda dengan dominasi Mode 1 yang cenderung mendominasi bagian bawah. Pada arah Y (transversal), karakteristik respons struktur juga sangat dipengaruhi oleh konfigurasi denah, distribusi massa, serta kekakuan relatif sistem struktur penahan beban lateral pada sumbu tersebut. Karakteristik gempa dekat yang kaya akan efek pulsa kecepatan (*velocity pulse*) semakin memperberat tuntutan inelastis tersebut. Hasil kurva ini menjadi landasan penting dalam perencanaan perkuatan berbasis kinerja (*performance-based seismic design*), guna memastikan bahwa ambang batas keselamatan jiwa terpenuhi di seluruh tingkat bangunan, termasuk terhadap efek *higher modes* yang seringkali luput dari analisis konvensional.



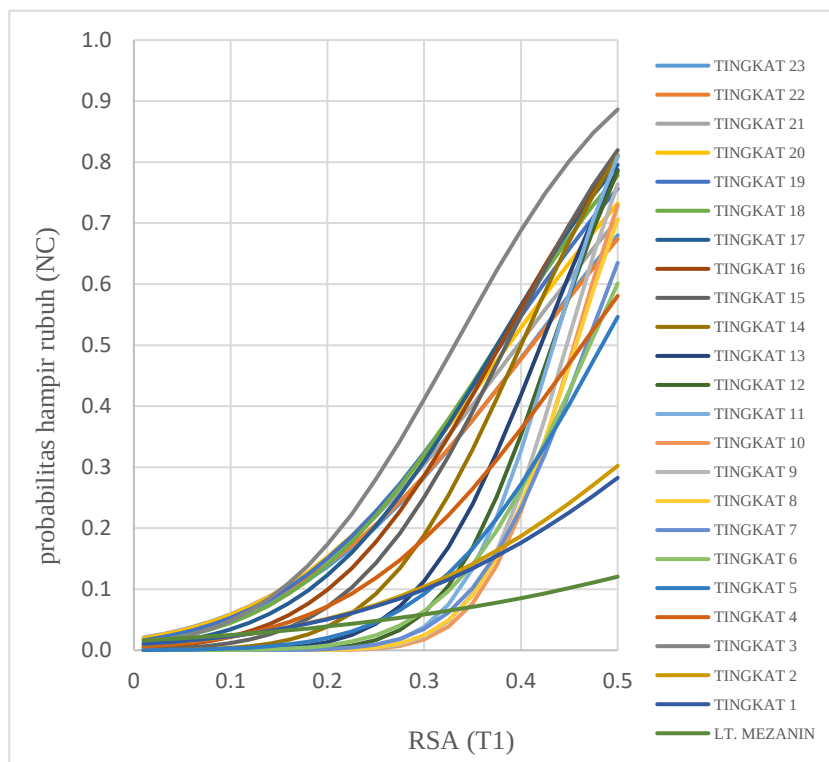
Gambar 4. 36: Grafik Probabilitas Rusak parah (LS) kondisi batas IDR = 0.020.

Gambar 4.36 menyajikan kurva kerentanan seismik (*seismic fragility curves*) untuk tingkat kinerja *Life Safety* (LS) pada dua lantai ekstrem, yaitu Tingkat 3 dan Tingkat 1, yang merepresentasikan batas bawah dan batas atas dari rentang respons seluruh lantai terhadap gempa dekat arah Y pada mode getar kedua (Mode 2). Kedua kurva ini mengonfirmasi bahwa Tingkat 3 merupakan lantai dengan kerentanan tertinggi (respons paling dini terhadap peningkatan nilai *RSA T1*), sedangkan Tingkat 1 merupakan lantai dengan kerentanan terendah (respons paling akhir) di antara seluruh lantai yang diamati, dengan parameter *Interstory Drift Ratio* (IDR) sebesar 0,020 sebagai ambang batas kerusakan parah.

Pada nilai probabilitas median (0,5) yang menandakan titik tengah distribusi lognormal kapasitas struktur, Tingkat 3 mencapai ambang batas LS pada nilai *RSA T1* = 0,1, sedangkan Tingkat 1 baru mencapai probabilitas yang sama pada nilai *RSA T1* = 0,3. Perbedaan nilai *RSA T1* yang mencapai faktor tiga ini secara kuantitatif menunjukkan bahwa lantai paling kritis (Tingkat 3) memerlukan

intensitas gempa yang jauh lebih rendah hanya sepertiga dari yang dibutuhkan oleh Tingkat 1 untuk mencapai kondisi keselamatan jiwa yang setara.

Hasil identifikasi kedua lantai ekstrem pada analisis Mode 2 dengan karakteristik gempa dekat arah transversal (Y) ini memberikan batasan (*envelope*) yang jelas mengenai rentang ketahanan struktur terhadap deformasi inelastis sedang. Analisis pada Mode 2 mempertegas bahwa kontribusi *higher mode* menghasilkan distribusi tuntutan deformasi yang tidak seragam, di mana lokasi lantai kritis dapat berbeda dengan prediksi mode fundamental. Informasi ini menjadi landasan krusial dalam menentukan prioritas perkuatan seismik berbasis kinerja, khususnya pada lantai paling rentan (Tingkat 3), guna memastikan bahwa seluruh tingkat bangunan memenuhi ambang batas keselamatan jiwa sebelum terjadi kerusakan struktural yang tidak dapat diterima.



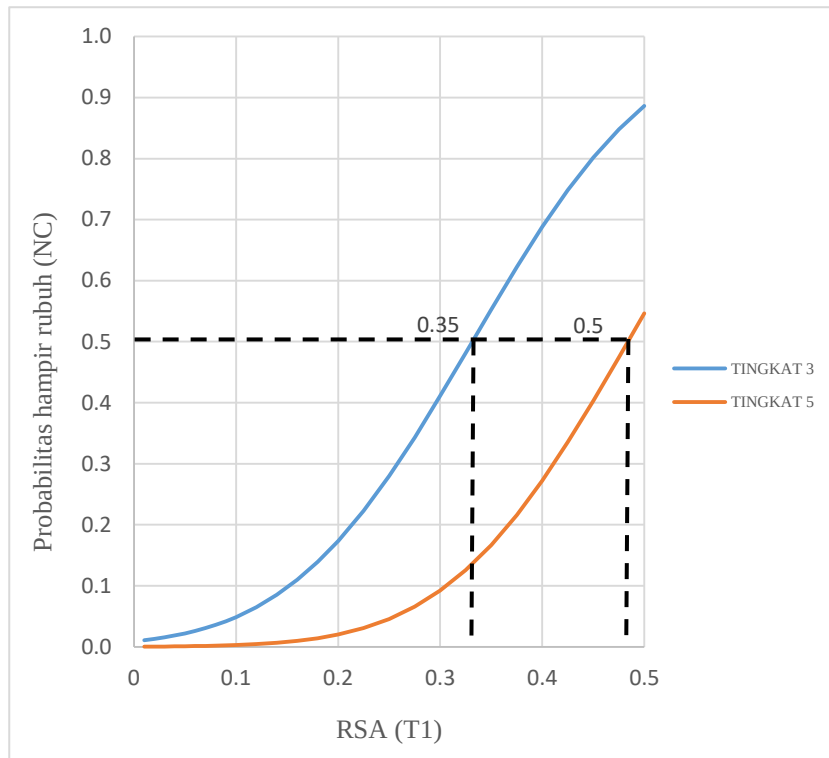
Gambar 4. 37: Grafik Probabilitas Hampir Rubuh (NC) Pada Semua lantai Akibat Spektra Respon Percepatan Gempa Dekat Arah Y Mode2.

Gambar 4.37 menyajikan kurva kerentanan seismik (*seismic fragility curves*) untuk tingkat kinerja Hampir Rubuh (*Near Collapse – NC*) pada seluruh

lantai bangunan akibat pengaruh spektra respons percepatan gempa *dekat* (near-fault) arah Y pada mode getar kedua (Mode 2). Ambang batas kerusakan NC ditetapkan berdasarkan parameter *Interstory Drift Ratio* (IDR) sebesar 0,040, yang merepresentasikan batas deformasi inelastis ultimit sebelum struktur kehilangan hampir seluruh kapasitas kekuatan dan kekakuan residualnya menuju keruntuhan total.

Masing-masing kurva pada grafik menggambarkan probabilitas suatu lantai untuk melampaui batas IDR 0,040 sebagai fungsi dari peningkatan nilai *RSA T1*. Secara keseluruhan, seluruh kurva memperlihatkan tren peningkatan probabilitas yang konsisten seiring dengan bertambahnya intensitas gempa, yang mengonfirmasi bahwa tuntutan deformasi plastis pada setiap lantai berbanding lurus dengan tingkat respons spektral percepatan. Variasi antar kurva mengindikasikan bahwa distribusi permintaan deformasi inelastis sepanjang tinggi gedung tidak seragam, di mana lantai-lantai dengan kemiringan kurva lebih curam dan bergeser ke arah kiri (nilai *RSA T1* lebih rendah) memiliki kerentanan lebih tinggi terhadap pencapaian kondisi batas NC.

Analisis pada Mode 2 menjadi sangat krusial pada bangunan tinggi karena kontribusi *higher mode* seringkali memicu tuntutan deformasi ultimit yang signifikan pada bagian tengah hingga atas struktur berbeda dengan dominasi Mode 1 yang cenderung mendominasi bagian bawah. Pada arah Y (transversal), karakteristik respons juga dipengaruhi oleh konfigurasi denah, distribusi massa, serta kekakuan relatif sistem struktur penahan beban lateral pada sumbu tersebut. Karakteristik gempa dekat yang kaya akan efek pulsa kecepatan (*velocity pulse*) semakin memperberat tuntutan inelastis ultimit. Hasil kurva ini menjadi landasan penting dalam evaluasi risiko keruntuhan global (*progressive collapse*) dan penentuan prioritas perkuatan seismik berbasis kinerja (*performance-based seismic design*), guna memastikan bahwa seluruh lantai memiliki kapasitas daktilitas ultimit yang memadai terhadap efek *higher modes* yang seringkali luput dari perhatian dalam analisis konvensional.



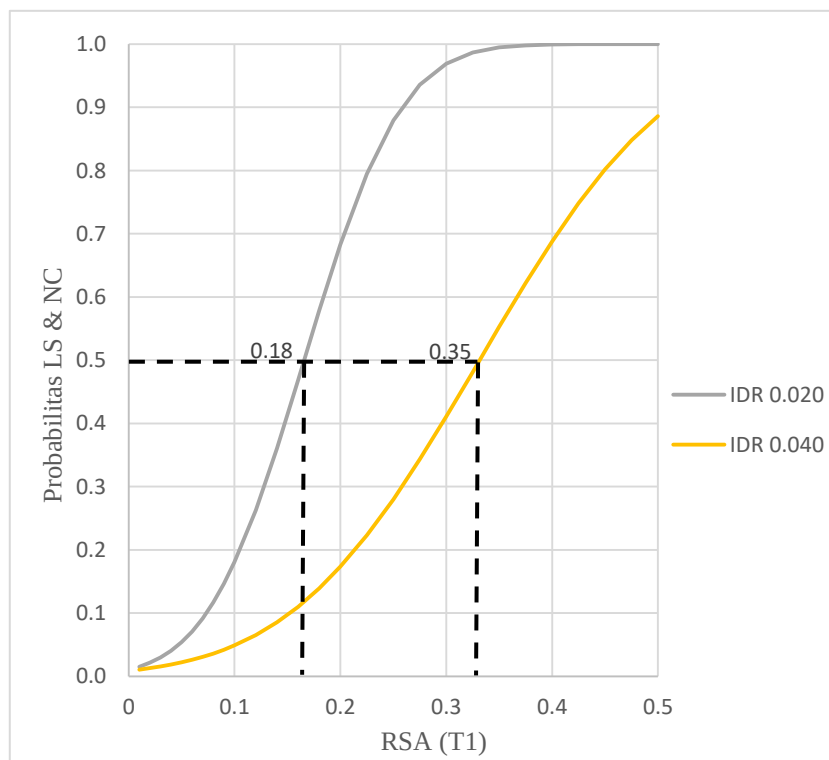
Gambar 4. 38: Grafik Probabilitas Hampir Rubuh (NC) kondisi batas IDR = 0.040.

Gambar 4.38 menyajikan kurva kerentanan seismik (*seismic fragility curves*) untuk tingkat kinerja Hampir Rubuh (*Near Collapse – NC*) pada dua lantai ekstrem, yaitu Tingkat 3 dan Tingkat 5, yang merepresentasikan batas bawah dan batas atas dari rentang respons seluruh lantai terhadap gempa dekat arah Y pada mode getar kedua (Mode 2). Kedua kurva ini mengonfirmasi bahwa Tingkat 3 merupakan lantai dengan kerentanan tertinggi (respons paling dini terhadap peningkatan nilai $RSA\ T1$), sedangkan Tingkat 5 merupakan lantai dengan kerentanan terendah (respons paling akhir) di antara seluruh lantai yang diamati, dengan parameter *Interstory Drift Ratio* (IDR) sebesar 0,040 sebagai ambang batas kerusakan hampir rubuh.

Pada nilai probabilitas median (0,5) yang menandakan titik tengah distribusi lognormal kapasitas struktur, Tingkat 3 mencapai ambang batas NC pada nilai $RSA\ T1 = 0,30$, sedangkan Tingkat 5 baru mencapai probabilitas yang sama pada nilai $RSA\ T1 = 0,50$. Perbedaan nilai $RSA\ T1$ ini secara kuantitatif menunjukkan

bahwa lantai paling kritis (Tingkat 3) memerlukan intensitas gempa hanya sekitar 60% dari yang dibutuhkan oleh Tingkat 5 untuk mencapai kondisi hampir rubuh yang setara. Hal ini mengindikasikan bahwa margin ketahanan ultimit pada lantai 3 jauh lebih rendah dibandingkan lantai 5.

Hasil identifikasi kedua lantai ekstrem pada analisis Mode 2 dengan karakteristik gempa dekat arah transversal (Y) ini memberikan batasan (*envelope*) yang jelas mengenai rentang ketahanan ultimit struktur terhadap deformasi inelastis. Analisis pada Mode 2 mempertegas bahwa kontribusi *higher mode* menghasilkan distribusi tuntutan deformasi yang berbeda dengan mode fundamental, di mana lokasi lantai kritis dapat bergeser ke bagian tengah hingga atas struktur. Informasi ini menjadi landasan krusial dalam menentukan prioritas perkuatan seismik berbasis kinerja, khususnya pada lantai paling rentan (Tingkat 3), guna mencegah terjadinya keruntuhan progresif (*progressive collapse*) sebelum elemen-elemen struktur lainnya mencapai batas kapasitas ultimitnya.

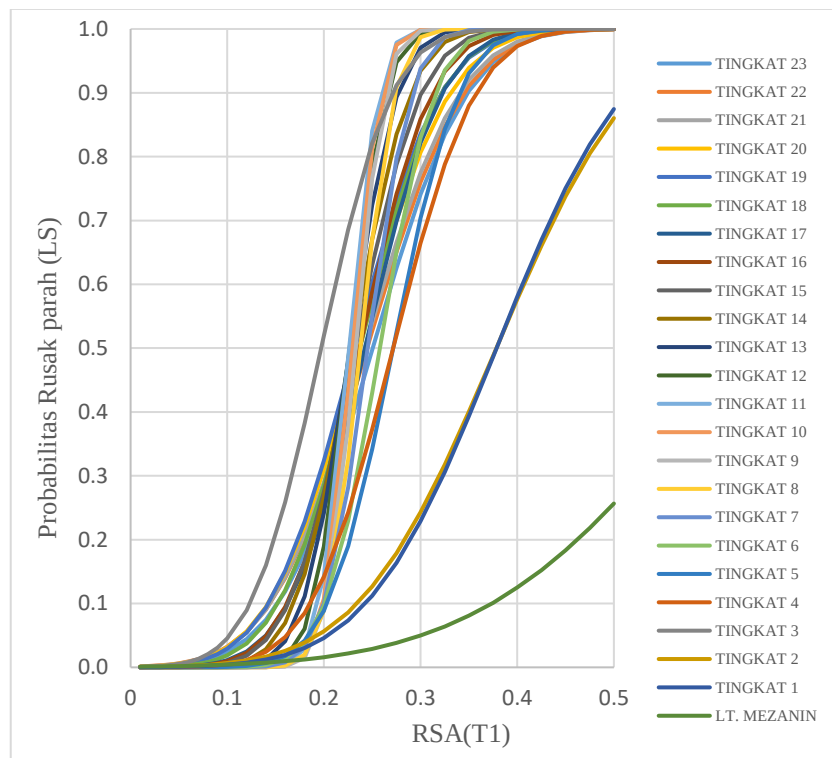


Gambar 4. 39: Perbandingan Grafik Probabilitas Rusak Parah IDR = 0.020 (LS) dengan Probabilitas Hampir Rubuh IDR = 0.040 (NC).

Gambar 4.39 menyajikan perbandingan langsung (*overlay*) kurva kerentanan seismik pada lantai paling kritis, yaitu Tingkat 3, yang teridentifikasi dari grafik-grafik sebelumnya sebagai lokasi dengan respons paling dini terhadap peningkatan intensitas gempa. Kedua kurva pada gambar ini merepresentasikan lantai yang sama terhadap dua tingkat kinerja berbeda, dengan parameter *Interstory Drift Ratio* (IDR) sebagai ukuran tuntutan deformasi. Kurva IDR 0,020 menggambarkan probabilitas mencapai kondisi batas *Life Safety* (LS), sedangkan kurva IDR 0,040 menggambarkan probabilitas mencapai kondisi batas *Near Collapse* (NC).

Pada nilai probabilitas median (0,5) yang menandakan titik tengah distribusi lognormal kapasitas struktur, terlihat bahwa pada lantai kritis yang sama (Tingkat 3), kurva LS mencapai probabilitas 50% pada nilai $RSA\ T1 = 0,18$, sedangkan kurva NC baru mencapai probabilitas keruntuhan yang setara pada nilai $RSA\ T1 = 0,35$. Perbedaan nilai ambang *RSA T1* antara kedua kurva ini secara kuantitatif mengonfirmasi keberadaan kapasitas daktilitas cadangan (*reserve ductility capacity*) yang signifikan pada lantai paling kritis. Setelah melewati batas keselamatan jiwa (LS) pada intensitas 0,18, struktur masih mampu mentolerir peningkatan intensitas gempa hingga hampir dua kali lipat (0,35) sebelum akhirnya mendekati kondisi keruntuhan total (NC).

Hasil perbandingan pada lantai kritis ini memberikan gambaran kuantitatif yang jelas mengenai rentang ketahanan struktur, mulai dari batas deformasi inelastis sedang hingga batas deformasi ultimit. Informasi ini menegaskan bahwa evaluasi kinerja seismik pada bangunan tinggi tidak cukup hanya berpatokan pada satu tingkat kerusakan saja, melainkan memerlukan tinjauan komprehensif terhadap seluruh rentang tingkat kinerja pada lantai-lantai kritis. Hal ini penting untuk memastikan bahwa cadangan daktilitas yang tersedia mampu mencegah keruntuhan progresif (*progressive collapse*) sebelum elemen-elemen struktur lainnya mencapai batas kapasitas ultimitnya.



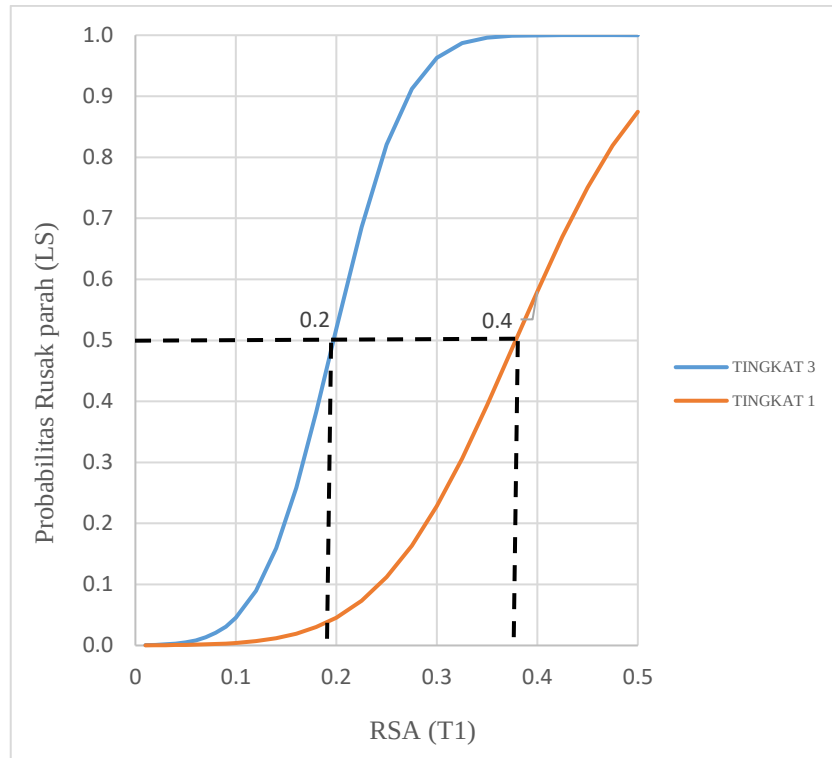
Gambar 4. 40: Grafik Probabilitas Rusak parah (LS) Pada Semua Lantai Akibat Spektra Respon Percepatan Gempa Jauh Arah Y Mode2.

Gambar 4.40 menyajikan kurva kerentanan seismik (*seismic fragility curves*) untuk tingkat kinerja *Life Safety* (LS) pada seluruh lantai bangunan akibat pengaruh spektra respons percepatan gempa *jauh* (far-fault) arah Y pada mode getar kedua (Mode 2). Ambang batas kerusakan parah (LS) ditetapkan berdasarkan parameter *Interstory Drift Ratio* (IDR) sebesar 0,020, yang merepresentasikan batas deformasi inelastis sebelum elemen-elemen struktur kehilangan kapasitas kekuatan dan kekakuan signifikannya.

Masing-masing kurva pada grafik menggambarkan probabilitas suatu lantai untuk melampaui batas IDR 0,020 sebagai fungsi dari peningkatan nilai *RSA T1*. Secara keseluruhan, seluruh kurva memperlihatkan tren peningkatan probabilitas yang konsisten seiring dengan bertambahnya intensitas gempa, yang mengonfirmasi bahwa tuntutan deformasi struktural berbanding lurus dengan tingkat respons spektral percepatan. Variasi antar kurva mengindikasikan bahwa

distribusi tuntutan simpangan antar lantai tidak seragam sepanjang tinggi gedung; lantai-lantai dengan kurva yang bergeser ke arah kiri (nilai *RSA T1* lebih rendah) memiliki kerentanan lebih tinggi terhadap pencapaian kondisi batas LS dibandingkan lantai lainnya.

Analisis pada Mode 2 menjadi sangat krusial pada bangunan tinggi karena kontribusi *higher mode* seringkali memicu tuntutan deformasi yang signifikan pada bagian tengah hingga atas struktur berbeda dengan dominasi Mode 1 yang cenderung mendominasi bagian bawah. Pada arah Y (transversal), karakteristik respons struktur juga sangat dipengaruhi oleh konfigurasi denah, distribusi massa, serta kekakuan relatif sistem struktur penahan beban lateral pada sumbu tersebut. Mengingat karakteristik gempa *jauh* yang tidak memiliki efek pulsa kecepatan (*velocity pulse*) dominan seperti pada gempa dekat, pola sebaran kurva antar lantai cenderung menunjukkan gradien respons yang lebih bertahap dan lebih rapat. Hasil kurva ini menjadi landasan penting dalam perencanaan perkuatan berbasis kinerja (*performance-based seismic design*), guna memastikan bahwa ambang batas keselamatan jiwa terpenuhi di seluruh tingkat bangunan, termasuk terhadap efek *higher modes* yang seringkali luput dari analisis konvensional.



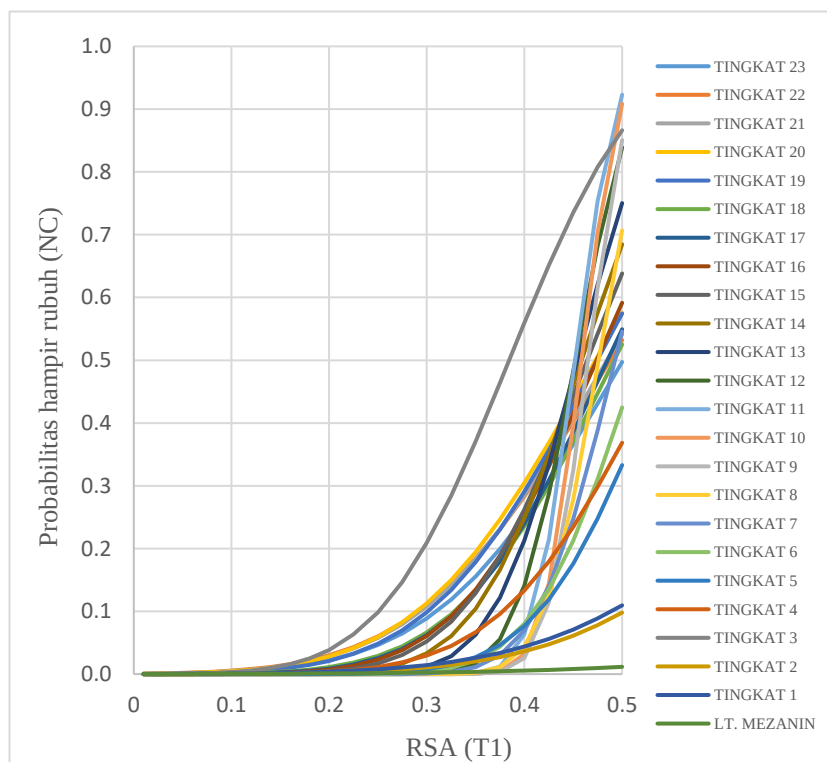
Gambar 4. 41: Grafik Probabilitas Rusak parah (LS) kondisi batas IDR = 0.020.

Gambar 4.41 menyajikan kurva kerentanan seismik (*seismic fragility curves*) untuk tingkat kinerja *Life Safety* (LS) pada dua lantai ekstrem, yaitu Tingkat 3 dan Tingkat 1, yang merepresentasikan batas bawah dan batas atas dari rentang respons seluruh lantai terhadap gempa jauh arah Y pada mode getar kedua (Mode 2). Kedua kurva ini mengonfirmasi bahwa Tingkat 3 merupakan lantai dengan kerentanan tertinggi (respons paling dini terhadap peningkatan nilai *RSA T1*), sedangkan Tingkat 1 merupakan lantai dengan kerentanan terendah (respons paling akhir) di antara seluruh lantai yang diamati, dengan parameter *Interstory Drift Ratio* (IDR) sebesar 0,020 sebagai ambang batas kerusakan parah.

Pada nilai probabilitas median (0,5) yang menandakan titik tengah distribusi lognormal kapasitas struktur, Tingkat 3 mencapai ambang batas LS pada nilai *RSA T1* = 0,2, sedangkan Tingkat 1 baru mencapai probabilitas yang sama pada nilai *RSA T1* = 0,4. Perbedaan nilai *RSA T1* yang mencapai faktor dua ini secara kuantitatif menunjukkan bahwa lantai paling kritis (Tingkat 3) memerlukan

intensitas gempa yang jauh lebih rendah hanya setengah dari yang dibutuhkan oleh Tingkat 1 untuk mencapai kondisi keselamatan jiwa yang setara.

Hasil identifikasi kedua lantai ekstrem pada analisis Mode 2 dengan karakteristik gempa jauh arah transversal (Y) ini memberikan batasan (*envelope*) yang jelas mengenai rentang ketahanan struktur terhadap deformasi inelastis sedang. Analisis pada Mode 2 mempertegas bahwa kontribusi *higher mode* menghasilkan distribusi tuntutan deformasi yang berbeda dengan mode fundamental, di mana lokasi lantai kritis dapat bergeser ke bagian tengah hingga atas struktur. Informasi ini menjadi landasan krusial dalam menentukan prioritas perkuatan seismik berbasis kinerja, khususnya pada lantai paling rentan (Tingkat 3), guna memastikan bahwa seluruh tingkat bangunan memenuhi ambang batas keselamatan jiwa sebelum terjadi kerusakan struktural yang tidak dapat diterima.



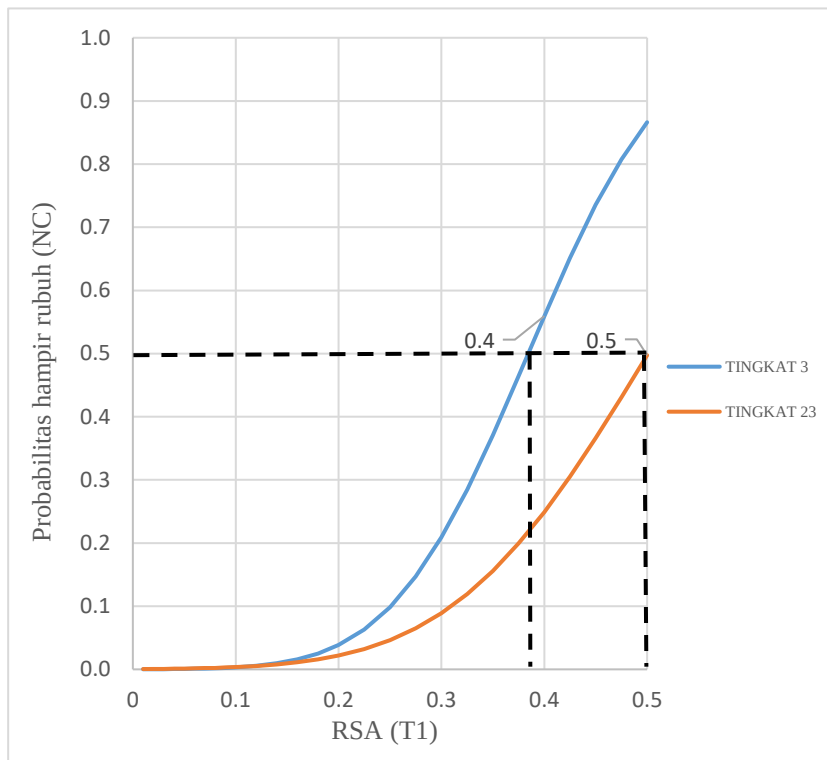
Gambar 4. 42: Grafik Probabilitas Hampir Rubuh (NC) Pada Semua Lantai Akibat Spektra Respon Percepatan Gempa Jauh Arah Y Mode2.

Gambar 4.42 menyajikan kurva kerentanan seismik (*seismic fragility curves*) untuk tingkat kinerja Hampir Rubuh (*Near Collapse – NC*) pada seluruh

lantai bangunan akibat pengaruh spektra respons percepatan gempa *jauh* (far-fault) arah Y pada mode getar kedua (Mode 2). Ambang batas kerusakan NC ditetapkan berdasarkan parameter *Interstory Drift Ratio* (IDR) sebesar 0,040, yang merepresentasikan batas deformasi inelastis ultimit sebelum struktur kehilangan hampir seluruh kapasitas kekuatan dan kekakuan residualnya menuju keruntuhan total.

Masing-masing kurva pada grafik menggambarkan probabilitas suatu lantai untuk melampaui batas IDR 0,040 sebagai fungsi dari peningkatan nilai *RSA T1*. Secara keseluruhan, seluruh kurva memperlihatkan tren peningkatan probabilitas yang konsisten seiring dengan bertambahnya intensitas gempa, yang mengonfirmasi bahwa tuntutan deformasi plastis pada setiap lantai berbanding lurus dengan tingkat respons spektral percepatan. Variasi antar kurva mengindikasikan bahwa distribusi permintaan deformasi inelastis sepanjang tinggi gedung tidak seragam, di mana lantai-lantai dengan kemiringan kurva lebih curam dan bergeser ke arah kiri (nilai *RSA T1* lebih rendah) memiliki kerentanan lebih tinggi terhadap pencapaian kondisi batas NC dibandingkan lantai lainnya.

Analisis pada Mode 2 menjadi sangat krusial pada bangunan tinggi karena kontribusi *higher mode* seringkali memicu tuntutan deformasi ultimit yang signifikan pada bagian tengah hingga atas struktur berbeda dengan dominasi Mode 1 yang cenderung mendominasi bagian bawah. Pada arah Y (transversal), karakteristik respons juga dipengaruhi oleh konfigurasi denah, distribusi massa, serta kekakuan relatif sistem struktur penahan beban lateral pada sumbu tersebut. Karakteristik gempa *jauh* yang tidak memiliki efek pulsa kecepatan (*velocity pulse*) dominan menghasilkan pola sebaran kurva antar lantai yang cenderung lebih bertahap dan lebih rapat dibandingkan gempa dekat. Meskipun demikian, identifikasi lantai-lantai kritis berdasarkan grafik ini tetap menjadi landasan penting dalam evaluasi risiko keruntuhan global (*progressive collapse*) dan penentuan prioritas perkuatan seismik berbasis kinerja (*performance-based seismic design*), guna memastikan bahwa seluruh lantai memiliki kapasitas daktilitas ultimit yang memadai terhadap efek *higher modes* yang seringkali luput dari perhatian dalam analisis konvensional.



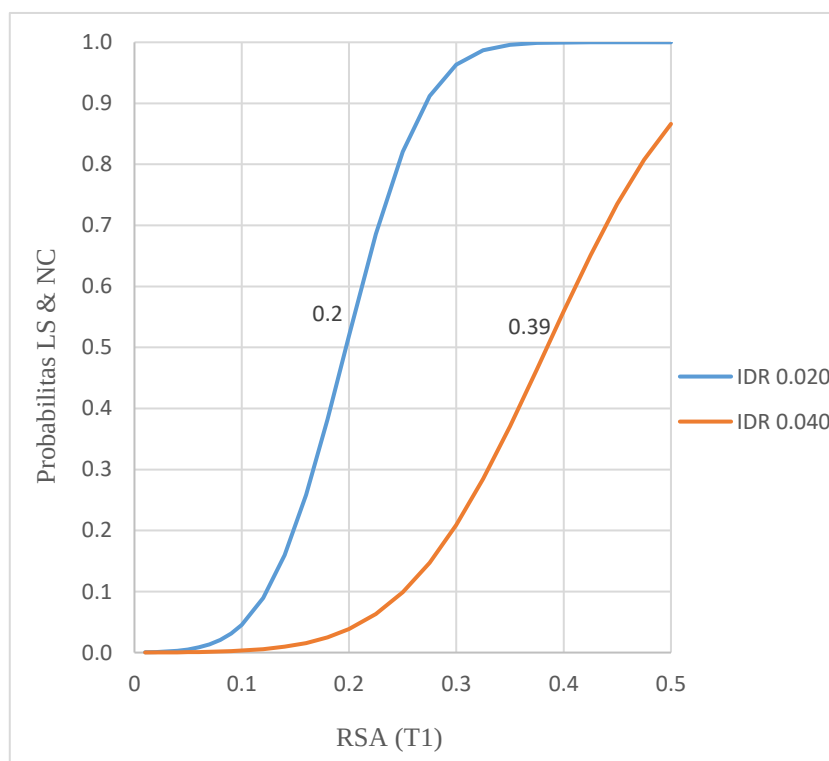
Gambar 4. 43: Grafik Probabilitas Hampir Rubuh (NC) kondisi batas IDR = 0.040.

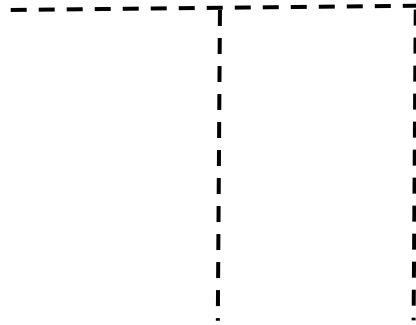
Gambar 4.43 menyajikan kurva kerentanan seismik (*seismic fragility curves*) untuk tingkat kinerja Hampir Rubuh (*Near Collapse – NC*) pada dua lantai ekstrem, yaitu Tingkat 3 dan Tingkat 23, yang merepresentasikan batas bawah dan batas atas dari rentang respons seluruh lantai terhadap gempa jauh arah Y pada mode getar kedua (Mode 2). Kedua kurva ini mengonfirmasi bahwa Tingkat 3 merupakan lantai dengan kerentanan tertinggi (respons paling dini terhadap peningkatan nilai *RSA T1*), sedangkan Tingkat 23 merupakan lantai dengan kerentanan terendah (respons paling akhir) di antara seluruh lantai yang diamati, dengan parameter *Interstory Drift Ratio* (IDR) sebesar 0,040 sebagai ambang batas kerusakan hampir rubuh.

Pada nilai probabilitas median (0,5) yang menandakan titik tengah distribusi lognormal kapasitas struktur, Tingkat 3 mencapai ambang batas NC pada nilai *RSA T1* = 0,40, sedangkan Tingkat 23 baru mencapai probabilitas yang sama pada nilai *RSA T1* = 0,50. Perbedaan nilai *RSA T1* ini secara kuantitatif menunjukkan

bahwa lantai paling kritis (Tingkat 3) memerlukan intensitas gempa hanya sekitar 80% dari yang dibutuhkan oleh Tingkat 23 untuk mencapai kondisi hampir rubuh yang setara. Hal ini mengindikasikan bahwa margin ketahanan ultimit pada Tingkat 3 lebih rendah dibandingkan lantai paling atas (Tingkat 23).

Hasil identifikasi kedua lantai ekstrem pada analisis Mode 2 dengan karakteristik gempa jauh arah transversal (Y) ini memberikan batasan (*envelope*) yang jelas mengenai rentang ketahanan ultimit struktur terhadap deformasi inelastis. Analisis pada Mode 2 mempertegas bahwa kontribusi *higher mode* menghasilkan distribusi tuntutan deformasi yang berbeda dengan mode fundamental, di mana lokasi lantai kritis dapat bergeser ke bagian tengah struktur. Informasi ini menjadi landasan krusial dalam menentukan prioritas perkuatan seismik berbasis kinerja (*performance-based seismic design*), khususnya pada lantai paling rentan (Tingkat 3), guna mencegah terjadinya keruntuhan progresif (*progressive collapse*) sebelum elemen-elemen struktur lainnya mencapai batas kapasitas ultimitnya.





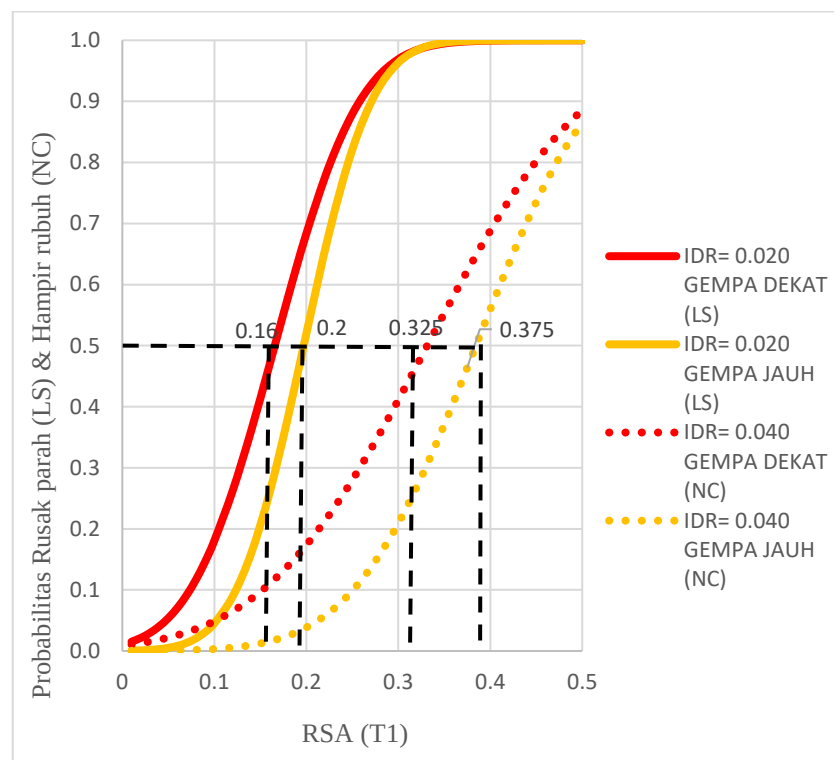
Gambar 4. 44: Perbandingan Grafik Probabilitas Rusak Parah IDR = 0.020 (LS) dengan Probabilitas Hampir Rubuh IDR = 0.040 (NC).

Gambar 4.44 menyajikan perbandingan langsung (*overlay*) kurva kerentanan seismik (*seismic fragility curves*) pada lantai paling kritis, yaitu Tingkat 3, yang teridentifikasi dari grafik-grafik sebelumnya sebagai lokasi dengan respons paling dini terhadap peningkatan intensitas gempa. Kedua kurva pada gambar ini merepresentasikan lantai yang sama terhadap dua tingkat kinerja berbeda, dengan *Interstory Drift Ratio* (IDR) sebagai ukuran tuntutan deformasi. Kurva IDR 0,020 menggambarkan probabilitas mencapai kondisi batas *Life Safety* (LS), sedangkan kurva IDR 0,040 menggambarkan probabilitas mencapai kondisi batas *Near Collapse* (NC).

Pada nilai probabilitas median (0,5) yang menandakan titik tengah distribusi lognormal kapasitas struktur, terlihat bahwa pada lantai kritis yang sama (Tingkat 3), kedua kurva sama-sama mencapai probabilitas kerusakan sebesar 50%, namun pada nilai *RSA T1* yang berbeda secara kuantitatif. Kurva LS mencapai nilai median tersebut pada tingkat intensitas gempa yang lebih rendah, sedangkan kurva NC baru mencapainya pada tingkat intensitas yang lebih tinggi. Perbedaan nilai ambang *RSA T1* antara kedua kurva ini secara kuantitatif mengonfirmasi keberadaan kapasitas

daktilitas cadangan (*reserve ductility capacity*) yang signifikan pada lantai paling kritis, di mana struktur masih mampu mentolerir peningkatan deformasi inelastis setelah melewati batas keselamatan jiwa sebelum akhirnya mendekati kondisi keruntuhan total.

Hasil perbandingan pada lantai kritis ini memberikan gambaran kuantitatif yang jelas mengenai rentang ketahanan struktur, mulai dari batas deformasi inelastis sedang hingga batas deformasi ultimit. Informasi ini menegaskan bahwa evaluasi kinerja seismik pada bangunan tinggi tidak cukup hanya berpatokan pada satu tingkat kerusakan saja, melainkan memerlukan tinjauan komprehensif terhadap seluruh rentang tingkat kinerja pada lantai-lantai kritis.



Gambar 4. 45: Gabungan Grafik Probabilitas Rusak parah (LS) kondisi batas IDR = 0.020 & Hampir Rubuh (NC) kondisi batas IDR = 0.040, Pada Gempa Dekat & Gempa Jauh Arah Y Mode 2.

Gambar 4.45 menyajikan perbandingan langsung (*overlay*) dari empat kurva kerentanan seismik (*seismic fragility curves*) pada lantai paling kritis, yaitu Tingkat 3, yang teridentifikasi sebagai lokasi dengan respons paling dini

terhadap peningkatan intensitas gempa. Keempat kurva tersebut merepresentasikan lantai yang sama terhadap dua tingkat kinerja *Life Safety* (LS, IDR = 0,020) dan *Near Collapse* (NC, IDR = 0,040) serta dua tipe sumber gempa dekat (*near-fault*) dan jauh (*far-fault*) pada arah Y Mode 2.

Pada nilai probabilitas median (0,5) yang menandakan titik tengah distribusi lognormal kapasitas struktur, keempat kurva menunjukkan nilai *RSA T1* yang berbeda secara signifikan, yaitu:

- a. LS Gempa Dekat mencapai probabilitas 50% pada *RSA T1* = 0,10;
- b. LS Gempa Jauh mencapai probabilitas 50% pada *RSA T1* = 0,30;
- c. NC Gempa Dekat mencapai probabilitas 50% pada *RSA T1* = 0,30; serta
- d. NC Gempa Jauh mencapai probabilitas 50% pada *RSA T1* = 0,50.

Berdasarkan data kuantitatif tersebut, terdapat dua temuan utama. Pertama, dari sisi jenis sumber gempa, kurva gempa dekat selalu bergeser ke kiri (nilai *RSA T1* lebih rendah) dibandingkan kurva gempa jauh pada tingkat kinerja yang sama. Pada kondisi LS, gempa dekat memicu kerusakan pada intensitas yang hanya sepertiga dari yang dibutuhkan gempa jauh (0,10 vs 0,30); sedangkan pada kondisi NC, gempa dekat mencapai median pada intensitas hanya 60% dari yang dibutuhkan gempa jauh (0,30 vs 0,50). Hal ini mengonfirmasi bahwa karakteristik gempa dekat yang kaya akan efek pulsa kecepatan (*velocity pulse*) dan *directivity* memberikan tuntutan deformasi inelastis yang jauh lebih berat, sehingga memicu kerusakan pada tingkat intensitas gempa yang jauh lebih rendah.

Kedua, dari sisi tingkat kinerja, kurva LS selalu berada di sebelah kiri kurva NC untuk tipe gempa yang sama. Meskipun cadangan daktilitas absolut (*reserve ductility capacity*) antara LS dan NC memiliki selisih yang sama, yaitu $\Delta RSA = 0,20$ (baik pada gempa dekat: $0,30 - 0,10$; maupun pada gempa jauh: $0,50 - 0,30$), rasio ketahanan relatifnya sangat berbeda. Pada gempa dekat, struktur mampu menahan intensitas hingga 3 kali lipat dari titik LS sebelum runtuh ($0,30/0,10 = 3,0$); sedangkan pada gempa jauh, struktur hanya mampu menahan hingga 1,67 kali lipat dari titik LS ($0,50/0,30 \approx 1,67$). Hal ini mengindikasikan bahwa meskipun gempa dekat memicu kerusakan lebih awal, struktur memiliki rentang deformasi

inelastis yang relatif lebih panjang setelah melewati batas LS sebelum mencapai keruntuhan total, dibandingkan dengan respons terhadap gempa jauh.

Hasil perbandingan ini menegaskan bahwa evaluasi kinerja seismik bangunan tinggi tidak cukup hanya mengandalkan satu tingkat kerusakan atau satu jenis sumber gempa saja, melainkan memerlukan tinjauan komprehensif terhadap seluruh rentang tingkat kinerja pada lantai-lantai kritis. Informasi ini menjadi landasan krusial dalam perencanaan perkuatan berbasis kinerja (*performance-based seismic design*), khususnya untuk mengantisipasi efek merusak dari gempa dekat yang memicu kerusakan pada intensitas rendah, serta memastikan cadangan daktilitas yang memadai untuk mencegah keruntuhan progresif (*progressive collapse*) pada struktur.

BAB 5

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisis dan pembahasan mengenai pengaruh getaran gempa terhadap gedung bertingkat banyak dengan sistem ganda di Kota Medan menggunakan metode analisis respons spektrum linier, maka dapat diambil beberapa kesimpulan sebagai berikut.

1. Perilaku simpangan antar tingkat struktur gedung sistem ganda menunjukkan variasi respons terhadap rekaman gempa dekat (*near-field*) dan gempa jauh (*far-field*). Perbedaan respons tersebut dipengaruhi oleh karakteristik masing-masing rekaman gempa, meliputi kandungan frekuensi, durasi getaran, dan karakteristik gerakan tanah. Hasil ini menunjukkan bahwa respons struktur tidak hanya dipengaruhi oleh klasifikasi jarak sumber gempa, tetapi juga oleh karakteristik rekaman gempa yang digunakan.
2. Lantai 3 merupakan tingkat yang paling kritis terhadap simpangan antar tingkat, dengan beberapa hasil analisis menunjukkan nilai simpangan yang melampaui batas izin sebesar 0,020. Pada analisis arah X Mode 1, tingkat pelampauan pada Lantai 3 mencapai 100% terhadap variasi rekaman gempa. Rekaman GM2, GM4, GM7, dan GM14 juga menunjukkan pengaruh yang dominan terhadap respons simpangan pada beberapa kasus analisis.
3. Analisis statistik dan kurva fragilitas menunjukkan bahwa penggunaan beberapa rekaman gempa mampu memberikan gambaran yang lebih representatif terhadap variasi respons struktur. Hasil analisis fragilitas menunjukkan probabilitas tercapainya kondisi *Limit State* dan *Near Collapse* masih relatif rendah pada rentang intensitas yang dianalisis, dengan median kapasitas struktur belum tercapai hingga percepatan spektral 0,50 g. Dengan demikian, analisis respons spektrum linear dapat digunakan sebagai pendekatan awal dalam mengevaluasi respons struktur, namun memiliki keterbatasan dalam menggambarkan perilaku inelastis struktur secara menyeluruh.

5.2 Saran

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, beberapa saran yang dapat diberikan untuk pengembangan penelitian selanjutnya adalah sebagai berikut.

1. Penelitian selanjutnya disarankan menggunakan analisis nonlinear, khususnya *Nonlinear Time History Analysis*, untuk memperoleh gambaran yang lebih mendalam mengenai perilaku struktur pada kondisi inelastis, termasuk deformasi, pembentukan sendi plastis, dan mekanisme kerusakan struktur.
2. Jumlah serta variasi rekaman gempa perlu ditingkatkan dengan mempertimbangkan variasi magnitudo, jarak sumber gempa, mekanisme patahan, dan karakteristik gerakan tanah, sehingga hasil evaluasi respons struktur terhadap gempa dekat dan gempa jauh dapat menjadi lebih representatif.
3. Penelitian selanjutnya disarankan mempertimbangkan interaksi tanah-struktur (*Soil-Structure Interaction*) serta variasi konfigurasi sistem ganda, seperti dimensi, posisi, dan rasio kekakuan *shear wall* terhadap rangka pemikul momen. Selain itu, parameter evaluasi dapat diperluas mencakup daktilitas, energi disipasi, tingkat kerusakan elemen, dan kinerja struktur berbasis kinerja.

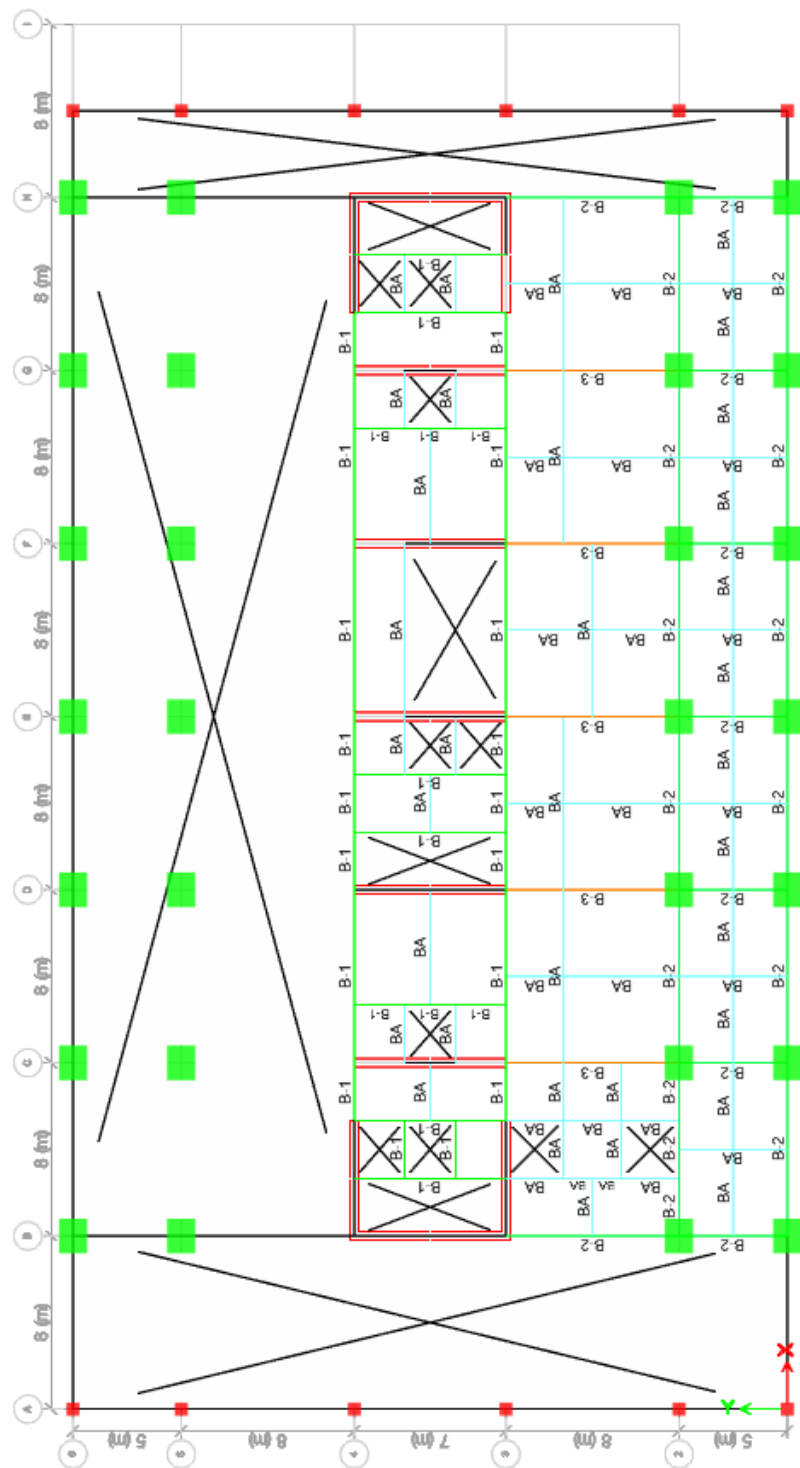
DAFTAR PUSTAKA

- Agus, & Cahya, F. O. (2022). Analisis perbandingan desain struktur gedung beton bertulang sistem rangka pemikul momen khusus (SRPMK) dan sistem ganda di Kota Padang. *Ensiklopedia of Journal*, 4(4).
- Alamiati, Y., & Ryanto, M. (2022). Analisis perbandingan gedung tanpa dan dengan opening shearwall pada bangunan gedung 10 lantai (studi kasus apartemen di Kota Bandung dengan pendekatan Etabs v.9.7.4). *Simteks*, 2(2).
- Al Fitra, Rijeki. 2025. Perencanaan Struktur Bangunan Atas Gedung Apartemen The Bliss di Kota Medan.
- Amendola, A., et al. (2022). Local soil amplification effects on seismic hazard and structural response. *Journal of Earthquake Engineering*.
- Anwar, J. A., & Andaryati. (2024). Perencanaan struktur beton bertulang Hotel “Dracarys” 13 lantai dengan sistem SRPMK di Kota Depok. *Jurnal Teknik Sipil*, 12(2), 93–104.
- Badan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika (BMKG). (2024). Data kejadian gempa bumi di wilayah Sumatera Utara 2020–2023. Jakarta: BMKG.
- Badan Standardisasi Nasional. (2019). Tata cara perencanaan ketahanan gempa untuk struktur bangunan gedung dan non gedung (SNI 1726:2019). Jakarta: Departemen Pekerjaan Umum.
- Badan Standardisasi Nasional. (2019). Tata cara perhitungan struktur beton untuk bangunan gedung (SNI 2847:2019). Jakarta: Departemen Pekerjaan Umum.
- Badan Standardisasi Nasional. (2020). Beban minimum untuk perancangan bangunan gedung dan struktur lain (SNI 1727:2020). Jakarta: Departemen Pekerjaan Umum.
- Baker, J. W. (2015). Efficient analytical fragility function fitting using dynamic structural analysis. *Earthquake Spectra*, 31(1), 579–599.
- Borzi, B., Faravelli, M., & Di Meo, A. (2021). Application of the SP-BELA methodology to RC residential buildings in Italy to produce seismic risk maps for the national risk assessment. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 19, 3185–3208.
- Dewi, F. P., & Machmoed, S. P. (2023). Perencanaan struktur gedung apartemen “Niscala” beton bertulang 10 lantai dengan menggunakan sistem ganda di Kota Surabaya. *Jurnal Teknik Sipil*, 11(3), 149–160.
- FEMA 356. (2000). *Prestandard and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Buildings*. Federal Emergency Management Agency, Washington, D.C.
- FEMA P-58. (2012). *Seismic Performance Assessment of Buildings*. Federal Emergency Management Agency, Washington, D.C.

- Gómez, L., et al. (2022). Seismic response of tall buildings on sloping topography. *Bulletin of Earthquake Engineering*.
- HAZUS. (2003). *Earthquake Loss Estimation Methodology – Technical Manual*. Federal Emergency Management Agency, Washington, D.C.
- Hendra, Zulkarnaen, dkk. (2021). Analisis struktur Hotel Lidra 17 Lantai dengan sistem ganda SRPMK dan dinding geser di Bengkayang, Kalimantan Barat menggunakan ETABS dan SNI 1726:2019.
- Irawan, D., & Machmoed, S. P. (2024). Perencanaan struktur beton bertulang gedung perkantoran Dira 10 lantai dengan metode SRPMK di Kabupaten Ende. *Jurnal Teknik Sipil*, 12(2), 83–94.
- Jaglien, F., Servie, L., Dapas, O., & Wallah, S. E. (2020). Perencanaan struktur beton bertulang gedung kuliah 5 lantai. *Jurnal Sipil Statik*, 8(4), 471–482.
- Konca, A. O., Avouac, J. P., Sladen, A., Meltzner, A. J., Sieh, K., Fang, P., & Helmberger, D. V. (2008). Partial rupture of a locked patch of the Sumatra megathrust during the 2007 earthquake sequence. *Nature*, 456(7222), 631–635.
- Metrikasari, R., & Choiruddin, A. (2021). Pemodelan risiko gempa bumi di pulau Sumatera menggunakan model inhomogeneous neyman-scott cox process. *Jurnal Sains dan Seni ITS*, 9(2), 487941.
- Miftah, A., et al. (2024). Dampak perulangan gempa terhadap perilaku sistem struktur ganda bangunan tinggi. *Jurnal Rekayasa Struktur*, 10(1).
- Patel, K., et al. (2022). Effect of plan irregularities and topography on the seismic behavior of tall buildings. *Engineering Structures*, 261, 114–127.
- Pusat Studi Gempa Bumi Nasional. (2017). Peta sumber dan bahaya gempa bumi Indonesia 2017. Bandung: Badan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika.
- Quispe, M., et al. (2024). Evaluation of dual structural systems considering soil–structure interaction under seismic loads. *Earthquake Spectra*, 40(2).
- Ramadhani, S. F., Saputra, J., & Rosyidah, A. (2022). Efek torsi bangunan terhadap respon struktur pada sistem rangka pemikul momen khusus dan sistem ganda. *Jurnal Teknik Sipil*.
- Ramadhani, S. F., Saputra, J., & Rosyidah, A. (2022). Efek Torsi Bangunan Terhadap Respon Struktur Pada Sistem Rangka Pemikul Momen Khusus dan Sistem Ganda. *Jurnal Ilmiah Dinamika*, 18(1), 1.

- Razali, A., et al. (2022). Dinamika pembangunan vertikal di Kota Medan: Analisis tren dan tantangan perencanaan struktural. *Jurnal Tata Kota dan Bangunan*, 5(1), 45–59.
- Santoso, E. (2021). Struktur SRPMK dan SRPMM pada bangunan tinggi. *Jurnal Teknik Sipil*, 10(1), 24–34.
- Silaban, G. T. N. (2023). Evaluasi kinerja struktur bangunan gedung bertingkat beton bertulang dengan menggunakan metode analisis respons spectrum dan analisis time history (Studi kasus RusunPulo Jahe)
- Stella, C. M., Lestyowati, Y., & Elvira. (2023). Perancangan gedung apartemen beton bertulang 10 lantai dengan sistem ganda di Medan. *Jurnal Mahasiswa Teknik Sipil Universitas Tanjungpura*
- Sungsang, A., Patria, N., & Haq, Y. A. (2024). Pengaruh konfigurasi shearwall terhadap kapasitas struktur gedung bertingkat. *Menara: Jurnal Teknik Sipil*, 19(2), 160–167.
- Syahril, H. M., Kartini, W., & Sumaidi. (2024). Analisis pengaruh penempatan shearwall pada gedung hotel Shafira. *Religion Education Social Laa Roiba Journal*, 6, 5391.
- Usarov, U., et al. (2024). Reliability of linear response spectrum method for regular building configurations. *International Journal of Civil and Structural Engineering*, 14(1).
- Utami, C., Septiningtyas, D. T., Dary, R. W., & Sitompul, M. (2025). Identifikasi Sebaran Gedung Tinggi (High Building) Menggunakan Citra Resolusi Tinggi Di Kecamatan Medan Kota. *Jurnal Ilmiah Teknik Sipil Agregat*, 5(1), 34-41.
- Vamvatsikos, D., & Cornell, C. A. (2002). Incremental dynamic analysis. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 31(3), 491–514.
- Venu, S., et al. (2025). Impact of topographic effects on seismic response of buildings in tropical regions. *Seismological Research Letters*, 96(1).
- Xu, L. (2023). Effect of stiffness distribution on seismic response of dual systems. *Journal of Structural Mechanics*, 49(2).
- Zhai, C., Ji, D., & Pang, Y. (2020). Comparative analysis between linear and nonlinear response for high-rise buildings. *Engineering Structures*, 225, 111–209.

BALOK LT 1

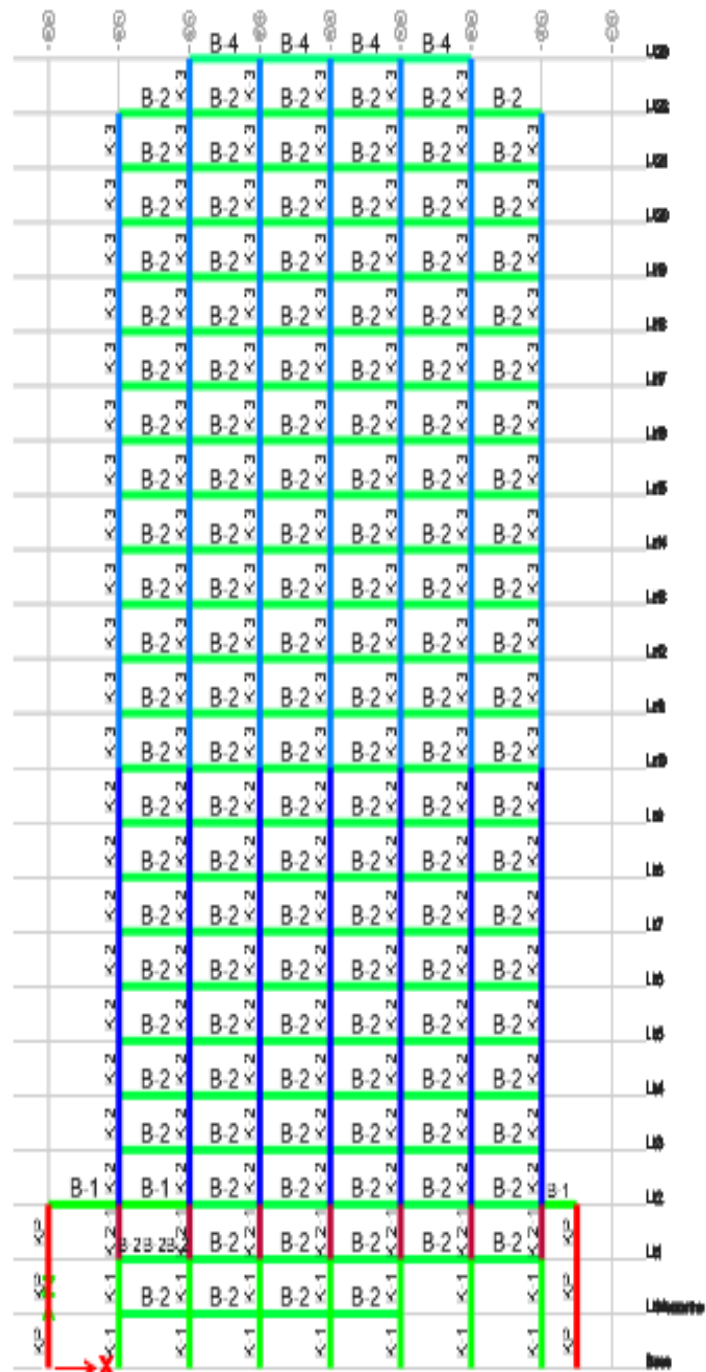


BALOK LT 2

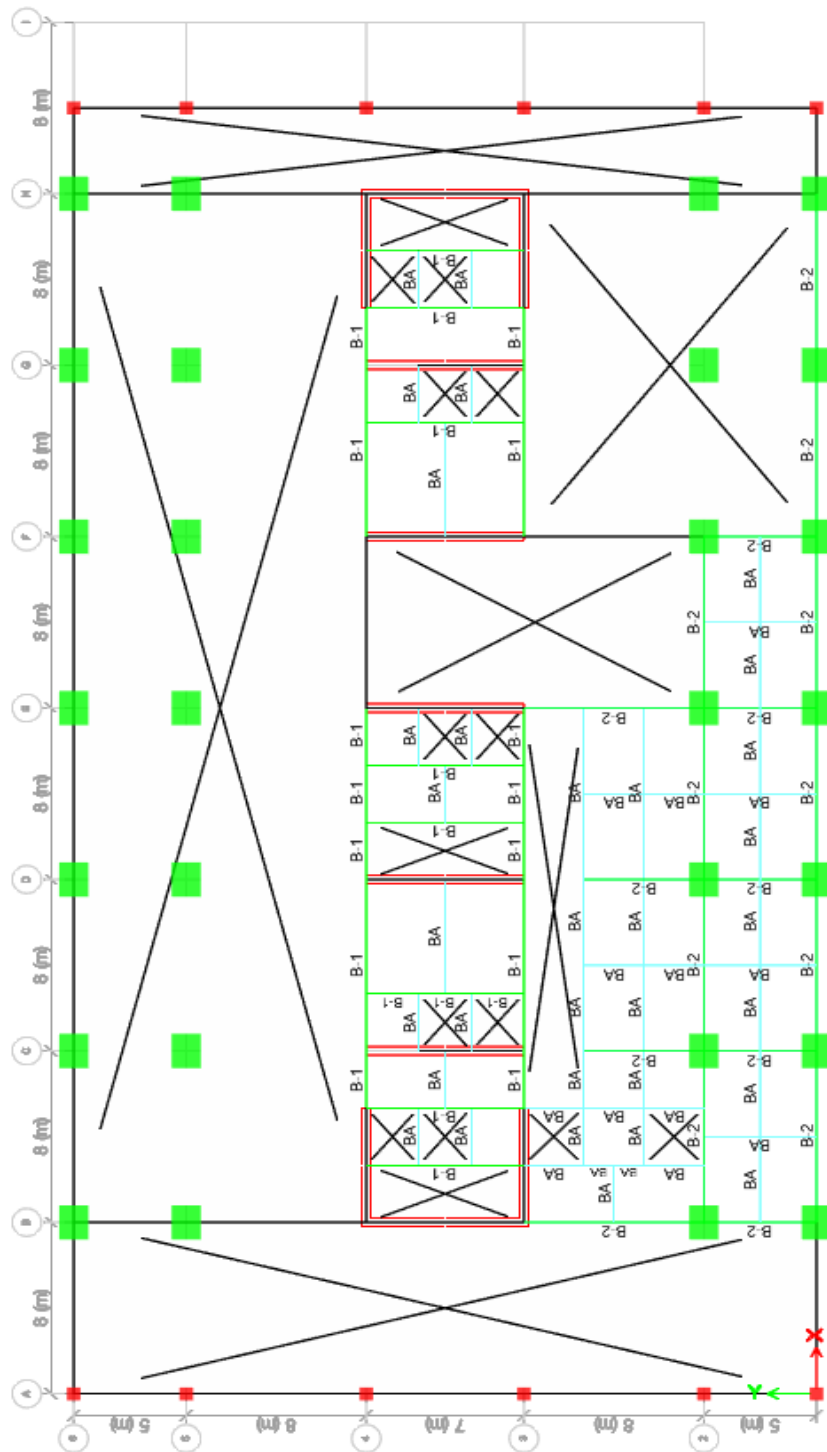
LAMPIRAN

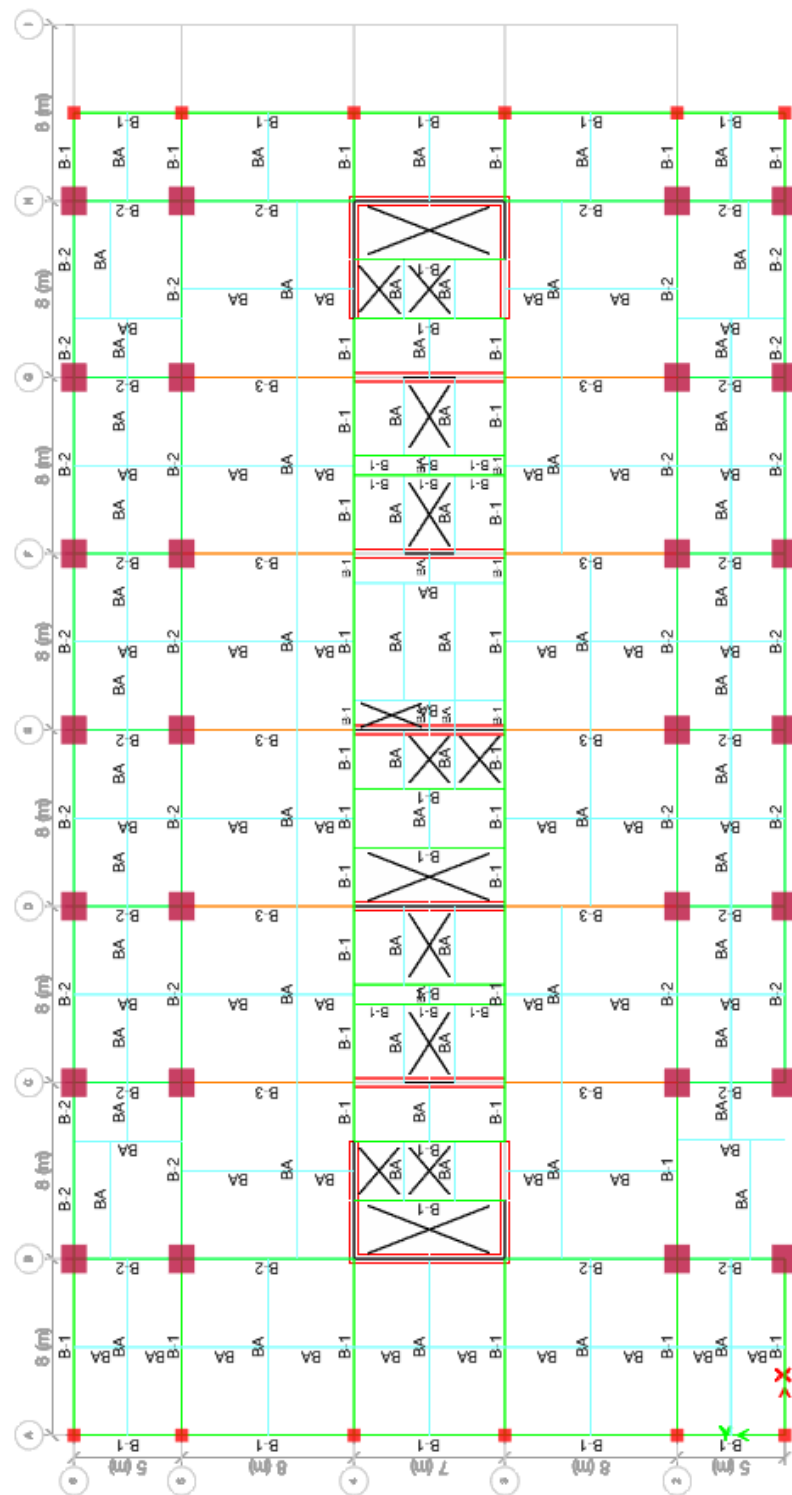
Lampiran 1: Denah struktur (Sistem Ganda).

POTONGAN B-B

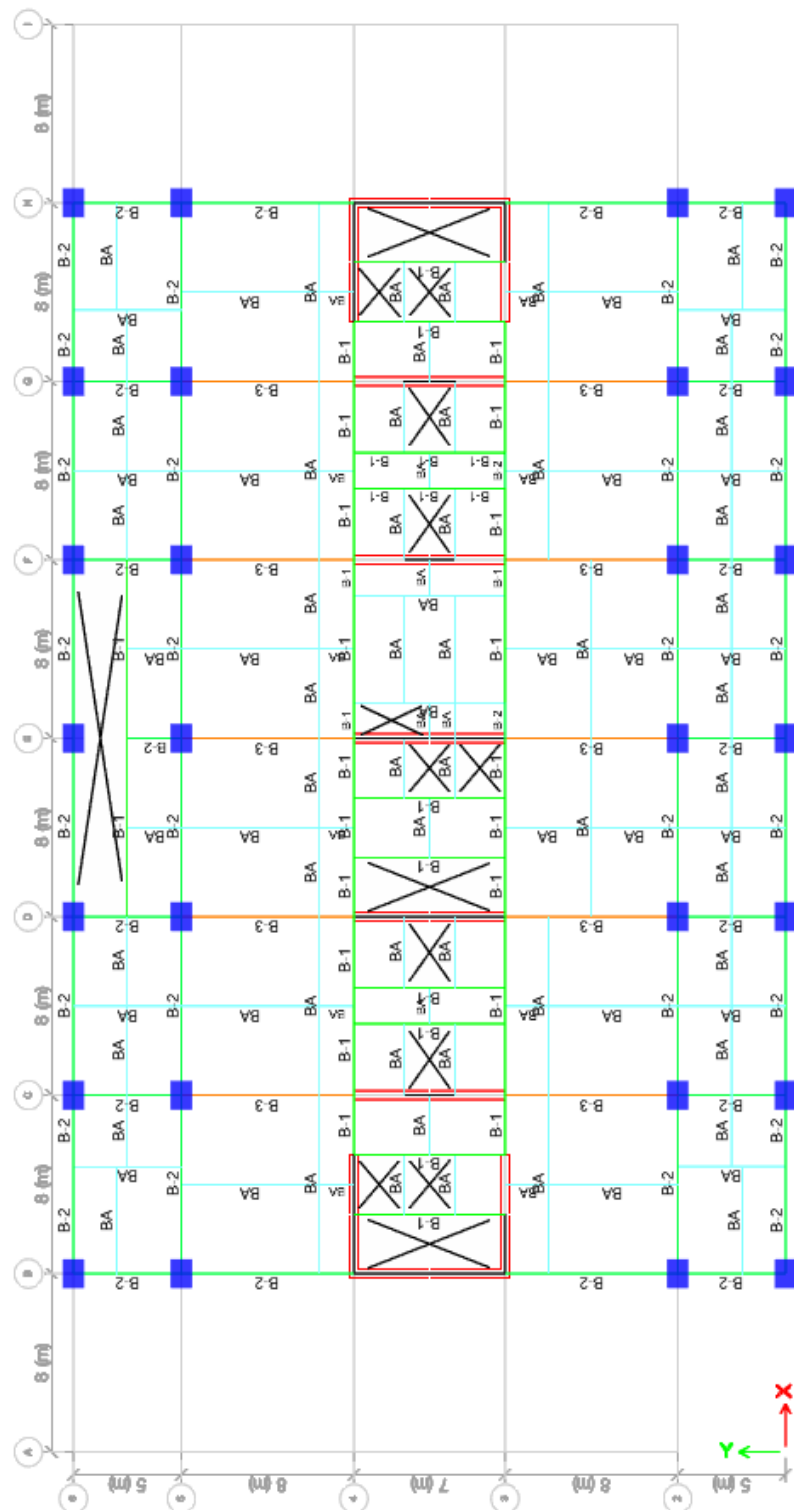


BALOK LT.MEZZ

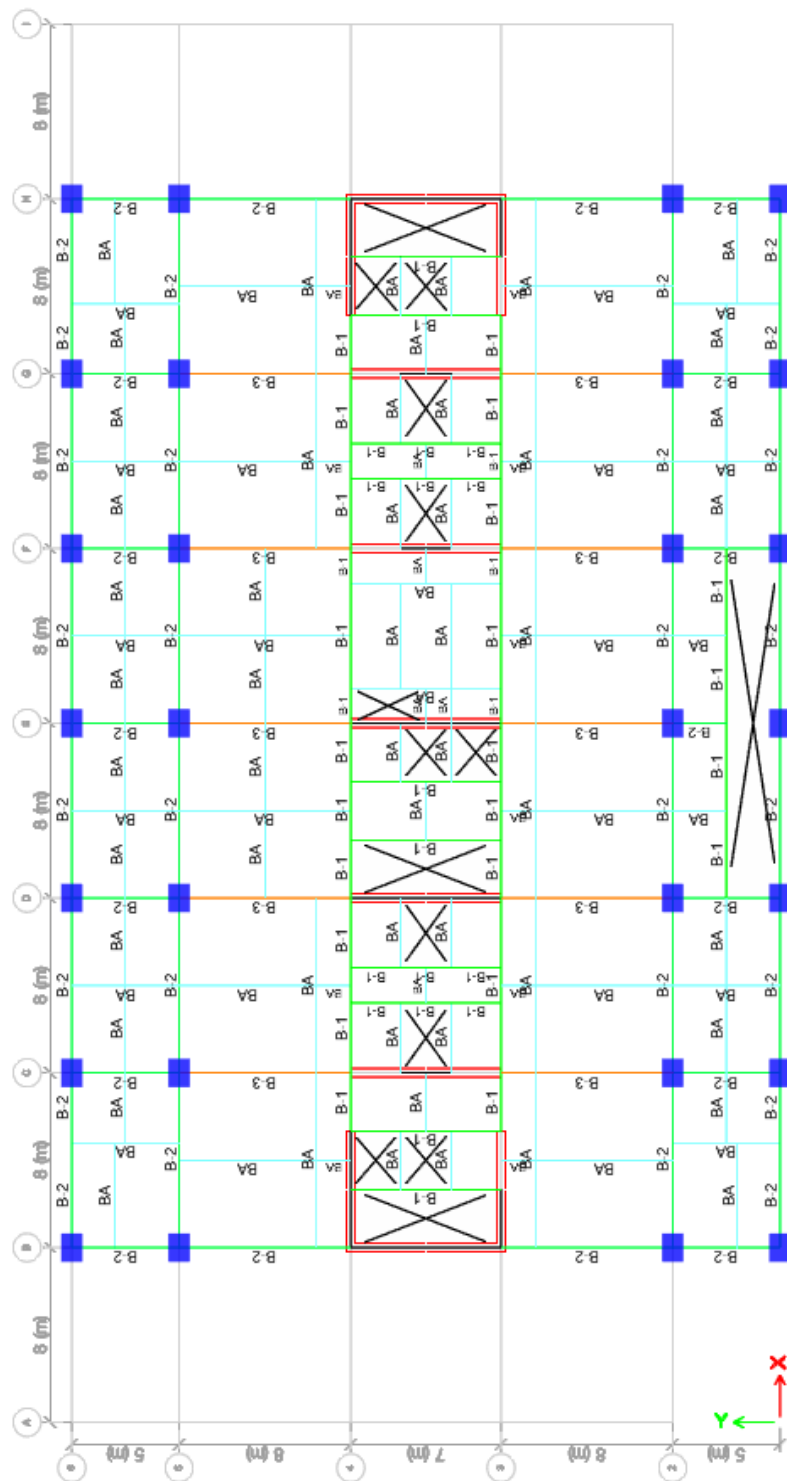




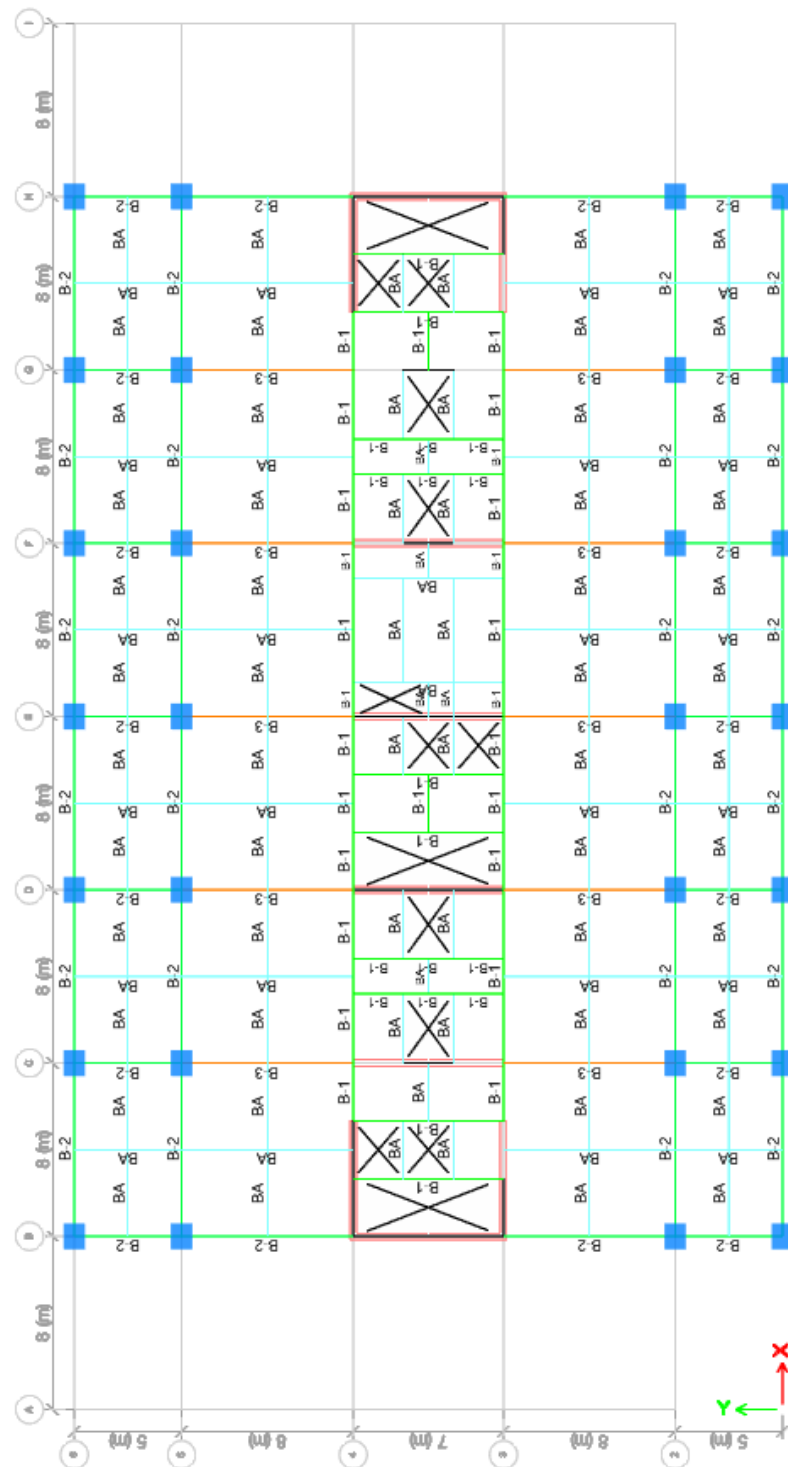
BALOK T 3,5,7,9,11,13,15,17,19,21



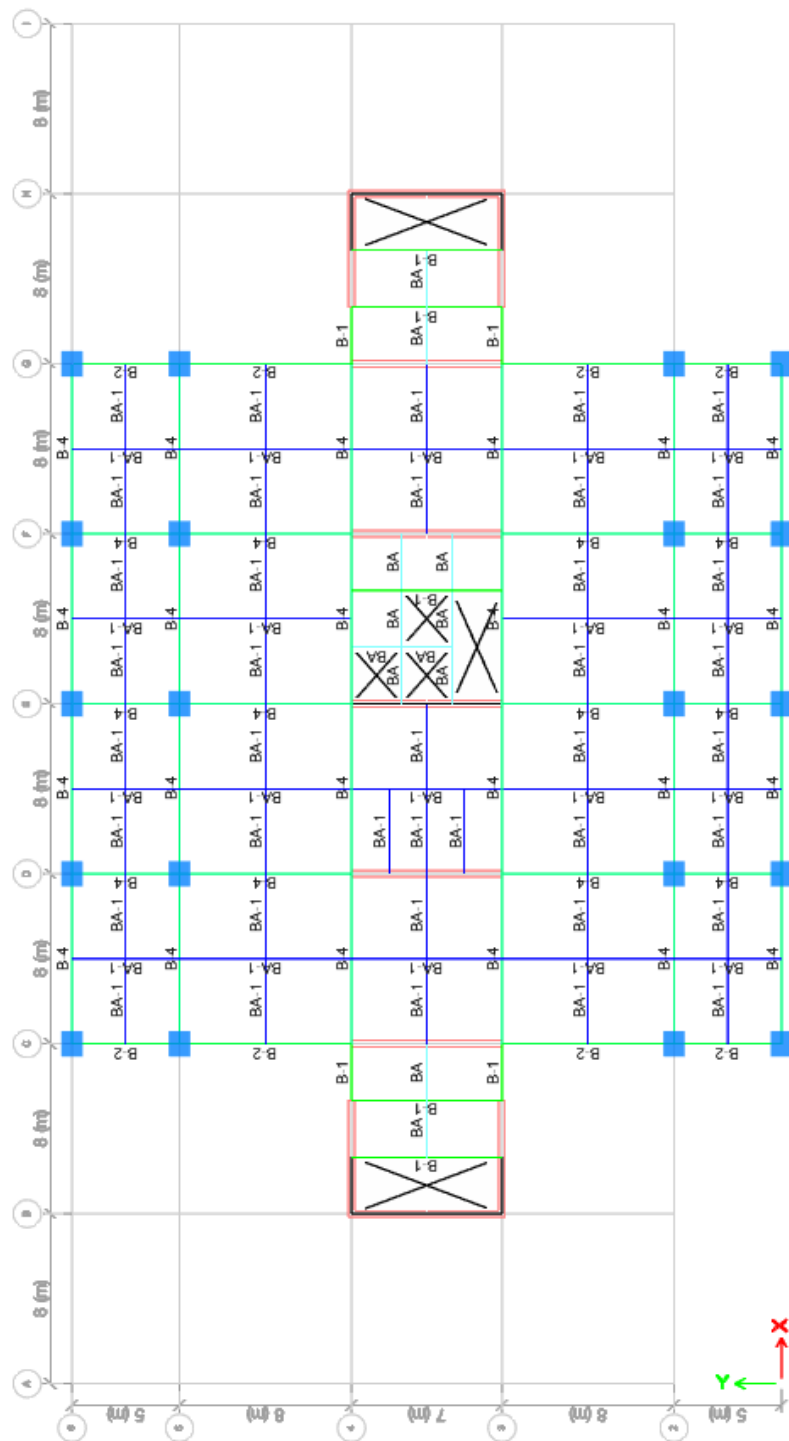
BALOK LT 4,6,8,10,12,14,16,18,20



BALOK LT 22

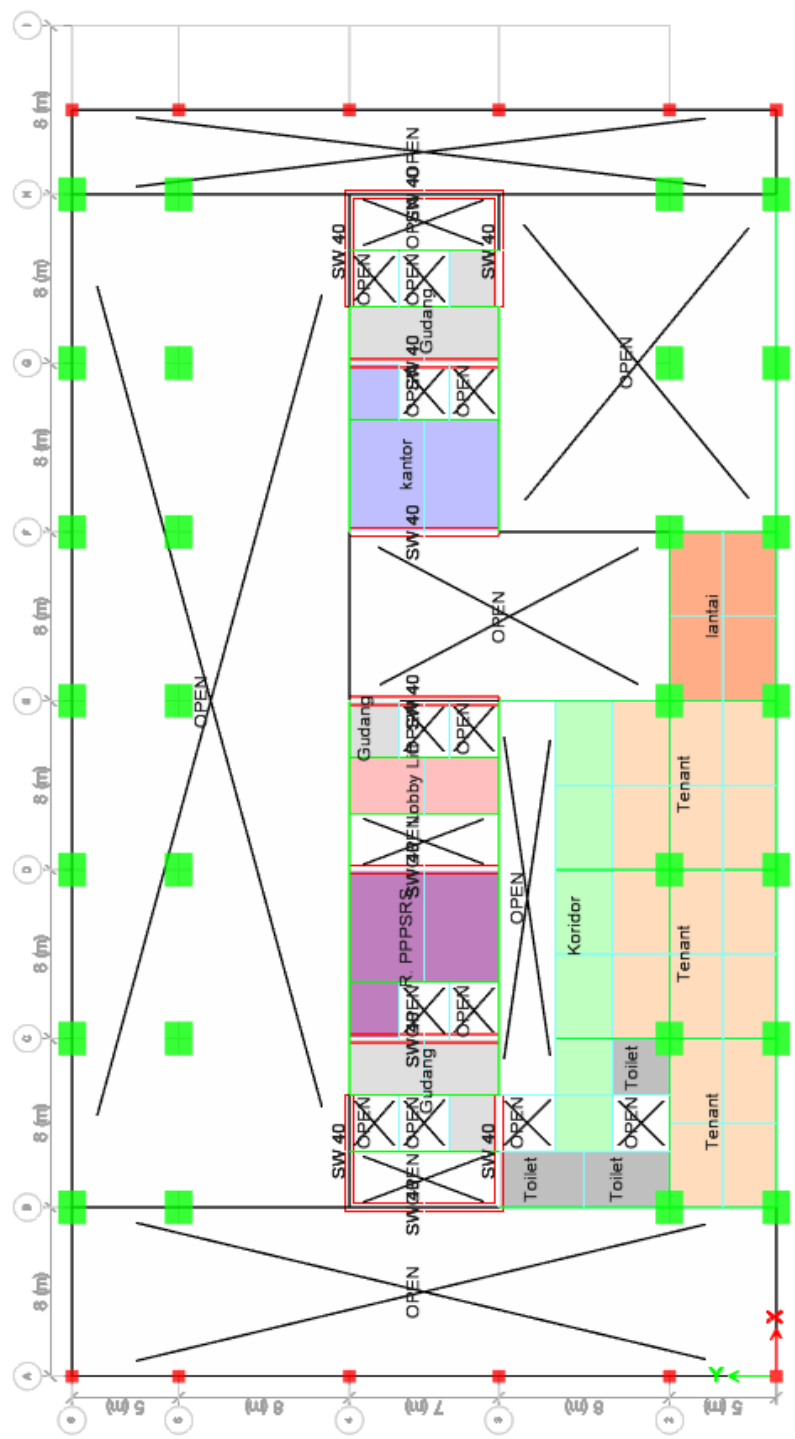


BALOK LT 23

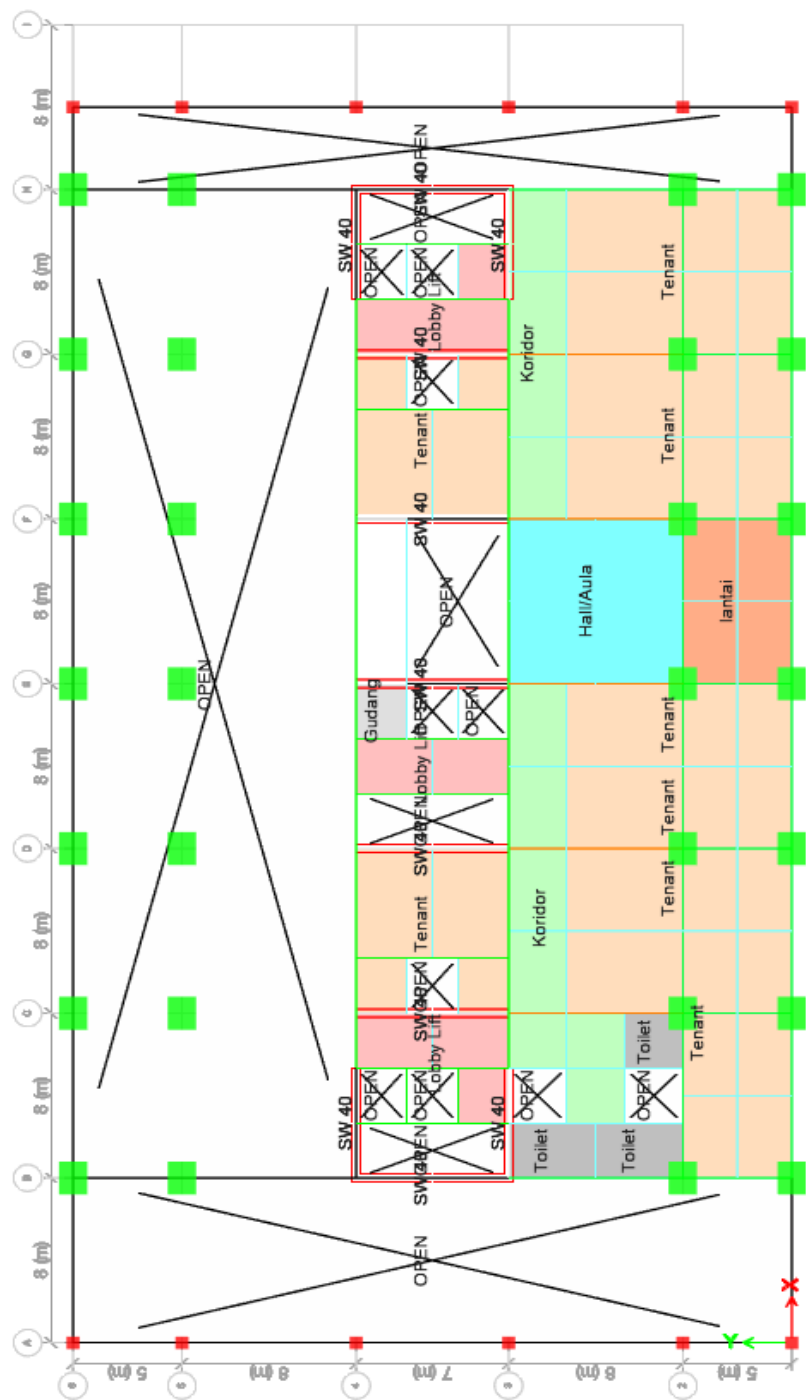


Lampiran 2 : Denah Fungsi Ruang (Sama di kedua Struktur).

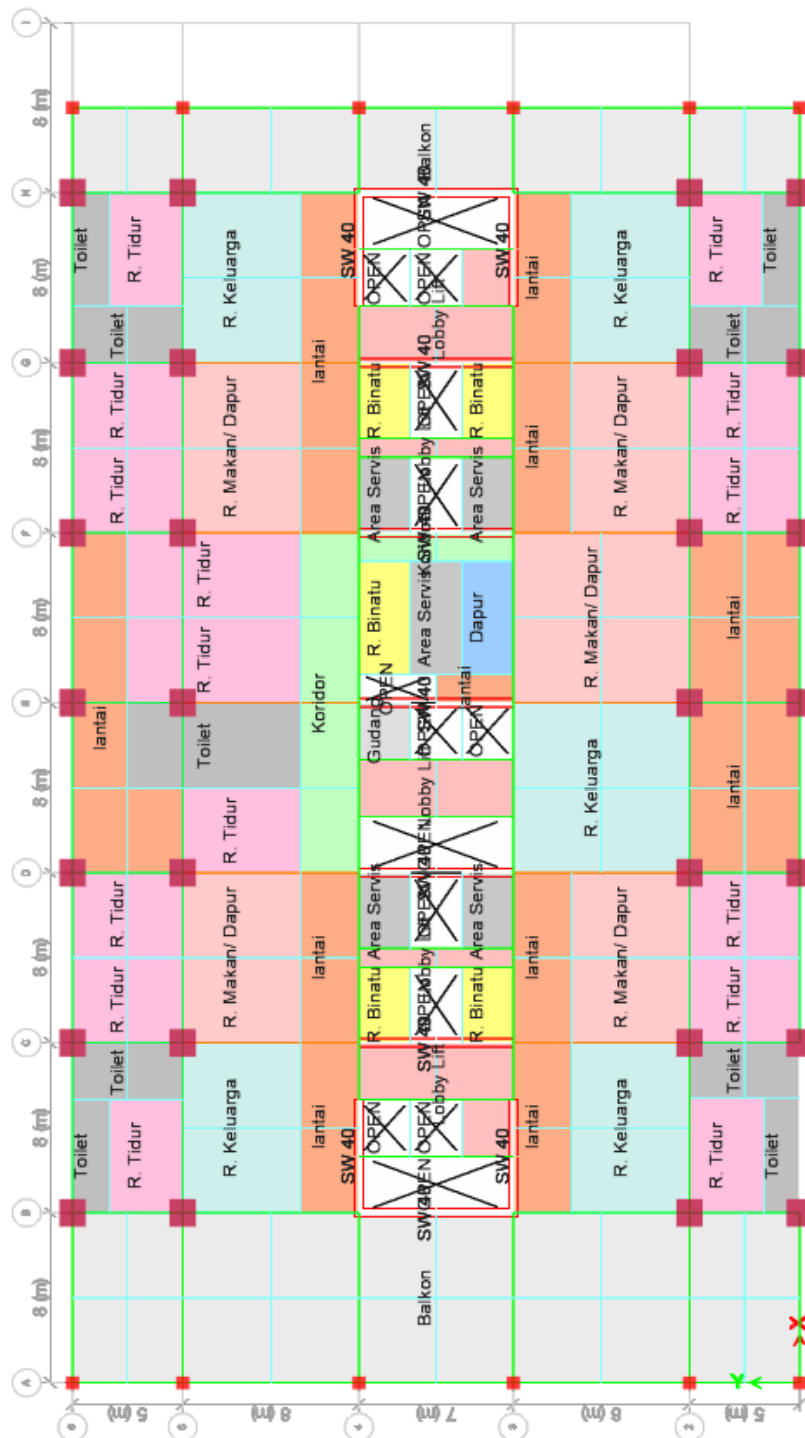
DENAH LT MEZZ



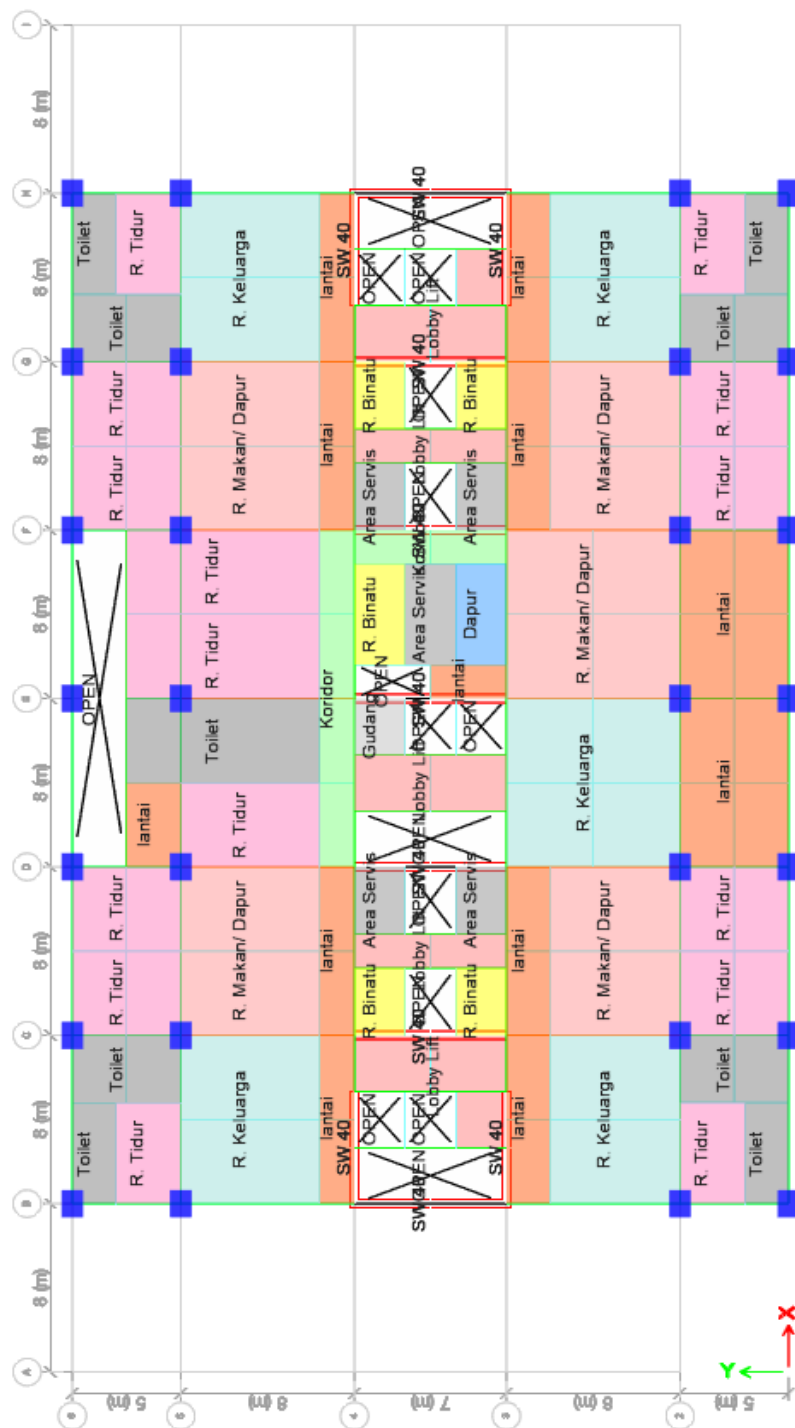
DENAH LT 1



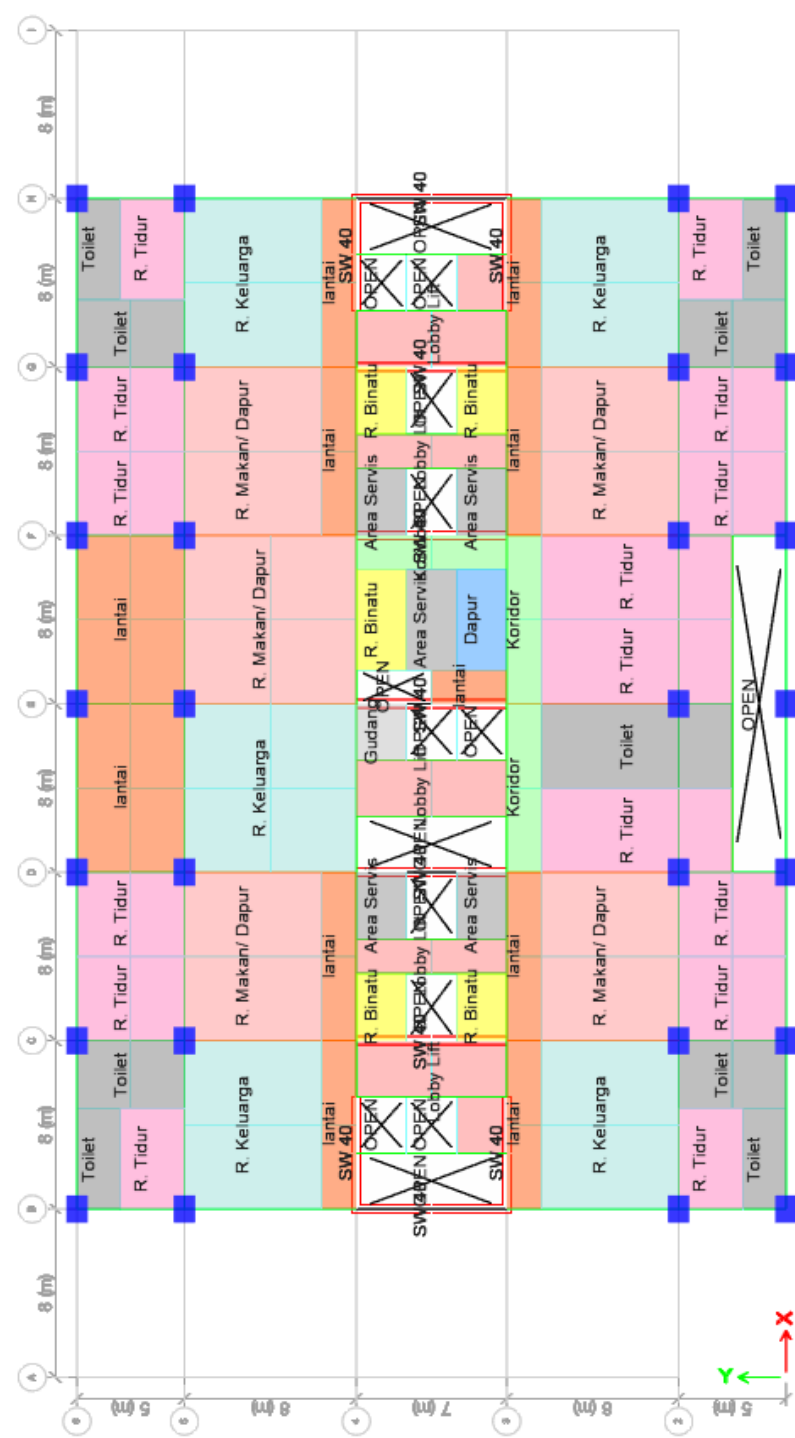
DENAH LT 2

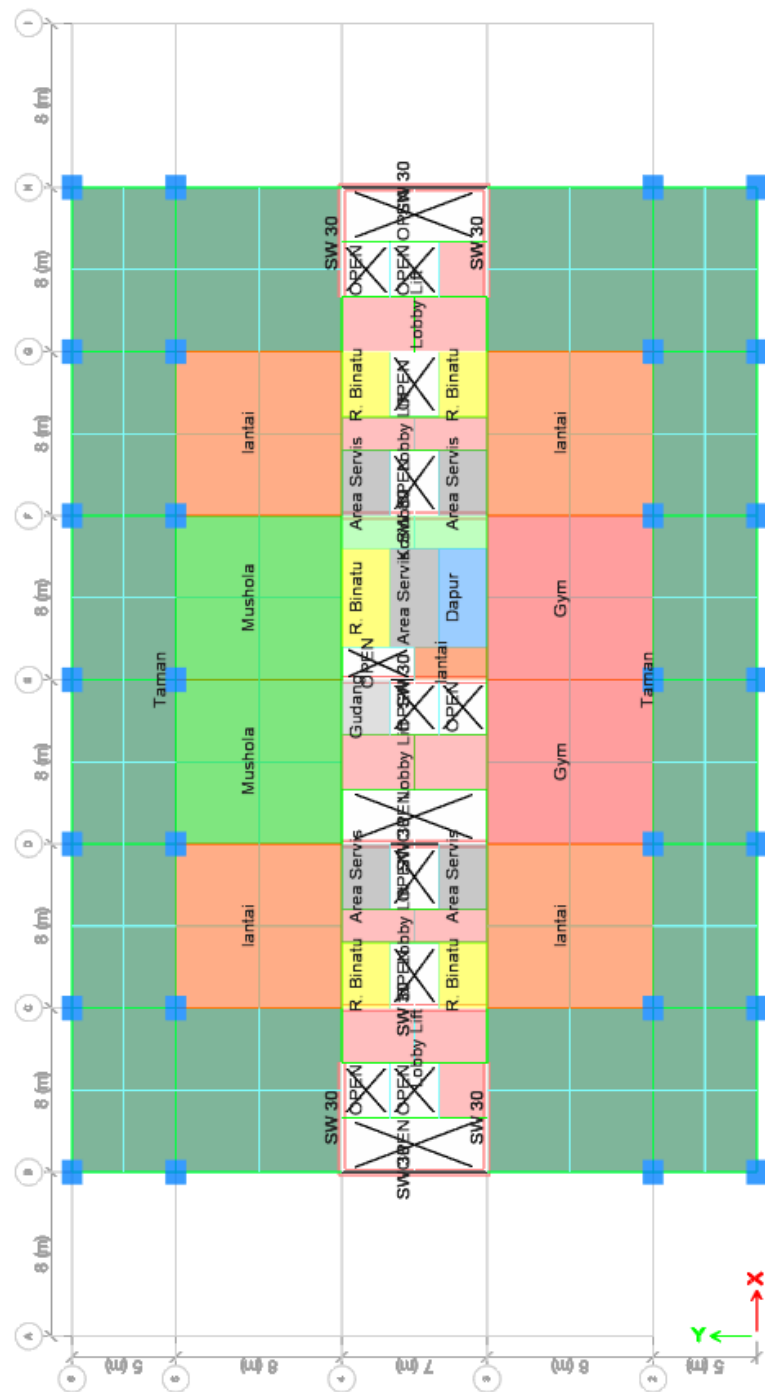


DENAH LT 3,5,7,9,11,13,15,17,19,21

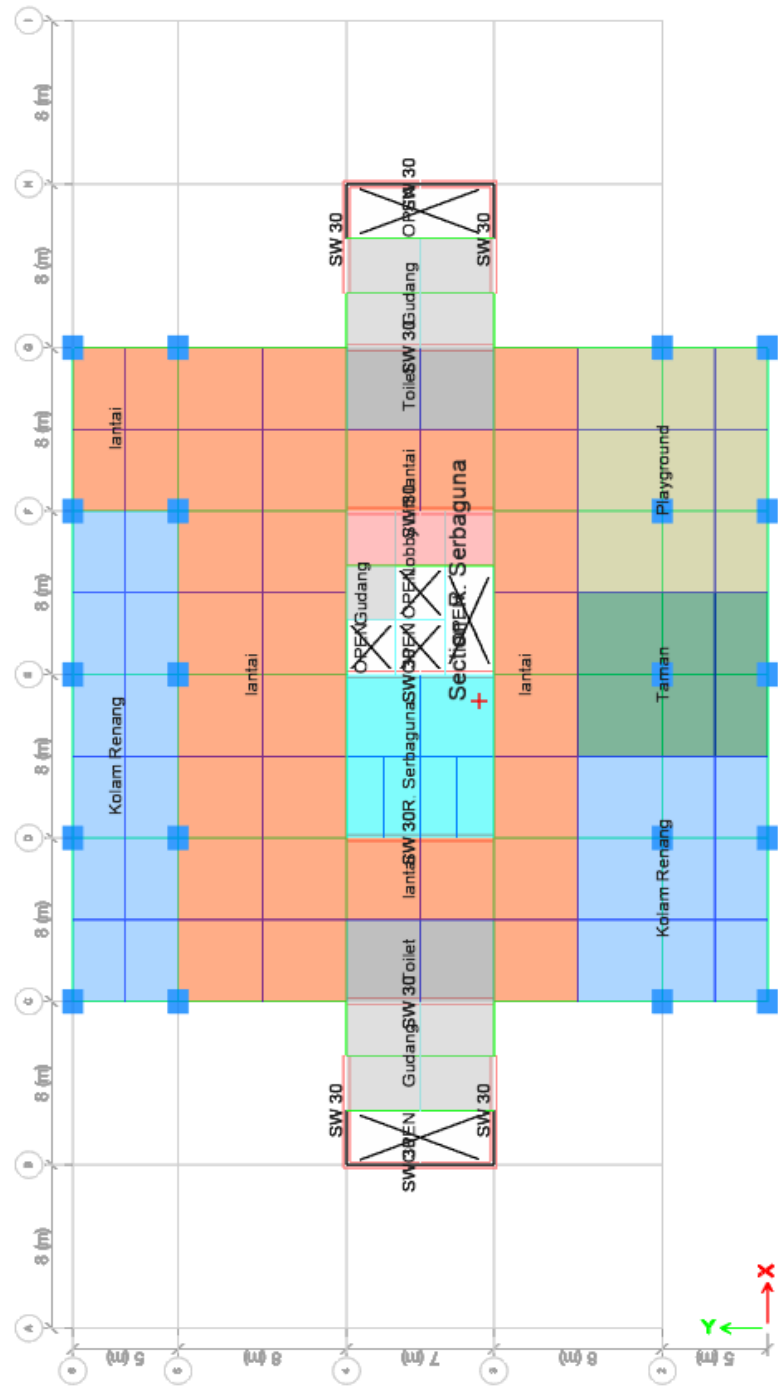


DENAH LT 4,6,8,10,12,14,16,18,20





DENAH LT 23

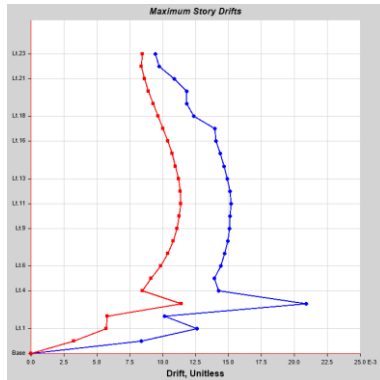


Lampiran 2: Data perioda dan partisipasi massa (Sistem Ganda).

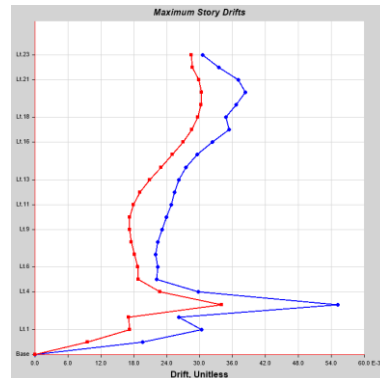
<i>Mode</i>	<i>Period</i>	<i>UX</i>	<i>UY</i>	<i>RZ</i>	<i>SumUX</i>	<i>SumUY</i>
1	4.168	73%	0%	0%	73%	0%
2	3.454	0%	71%	0%	73%	71%
3	2.854	0%	0%	69%	73%	71%
4	1.231	13%	0%	0%	86%	71%
5	0.945	0%	14%	0%	86%	85%
6	0.784	0%	0%	14%	91%	85%
7	0.617	0%	0%	0%	91%	87%
8	0.470	0%	0%	0%	92%	87%
9	0.437	0%	0%	0%	93%	92%
10	0.391	0%	0%	0%	94%	92%
11	0.296	0%	3%	0%	94%	94%
12	0.142	0%	0%	0%	95%	94%
13	0.258	0%	0%	0%	95%	94%
14	0.23	0%	0%	0%	95%	94%
15	0.211	0%	0%	0%	95%	94%
16	0.197	0%	0%	0%	96%	94%
17	0.19	0%	0%	0%	96%	95%
18	0.182	0%	1%	0%	96%	95%
19	0.175	0%	0%	0%	97%	95%
20	0.158	0%	0%	0%	97%	95%
21	0.153	0%	0%	0%	97%	95%
22	0.149	0%	0%	0%	97%	95%
23	0.144	0%	0%	0%	97%	95%
24	0.142	0%	0%	0%	97%	95%

Lampiran 3: Story Drift

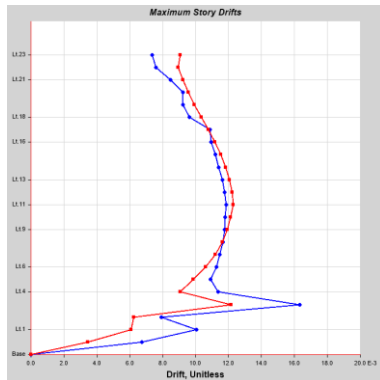
RSA 1 Dekat Mode 1



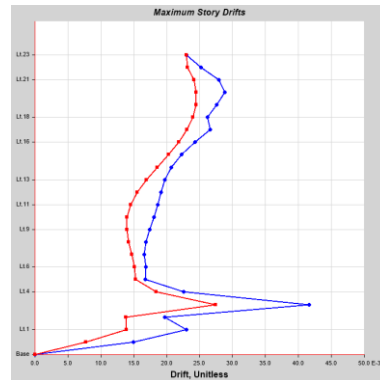
RSA 1 Jauh Mode 1



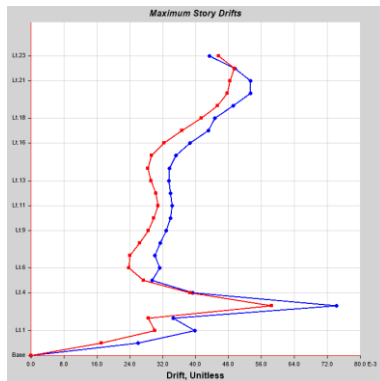
RSA 1 Dekat Mode 2



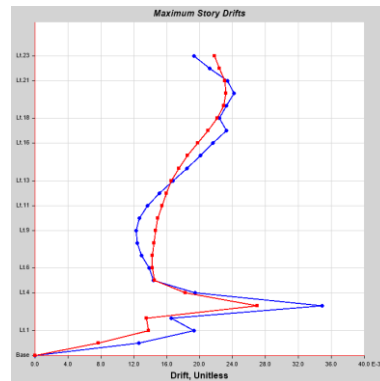
RSA 1 Jauh Mode 2



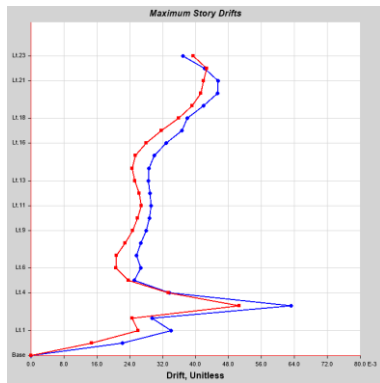
RSA 2 Dekat Mode 1



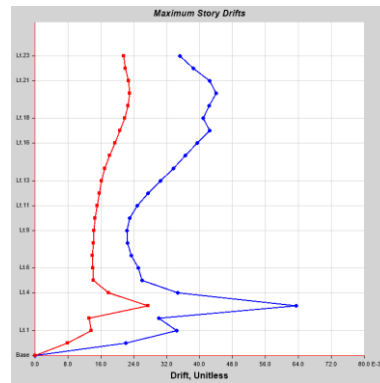
RSA 2 Jauh Mode 1



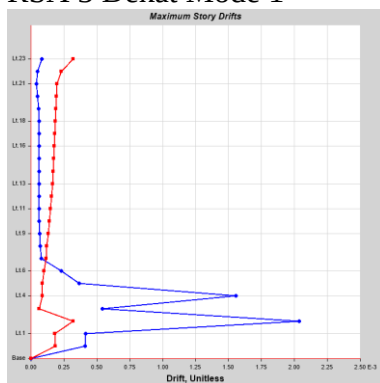
RSA 2 Dekat Mode 2



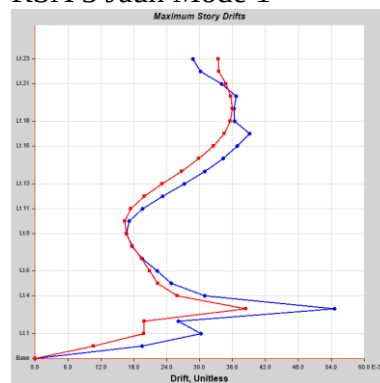
RSA 2 Jauh Mode 2



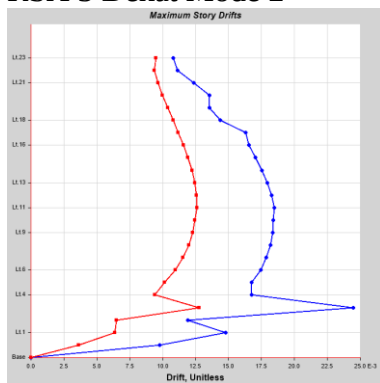
RSA 3 Dekat Mode 1



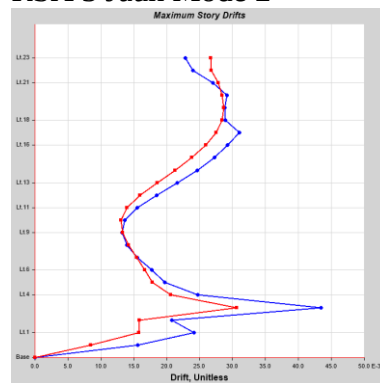
RSA 3 Jauh Mode 1



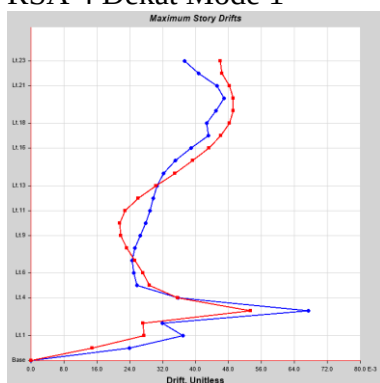
RSA 3 Dekat Mode 2



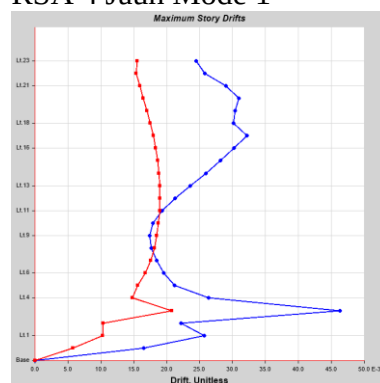
RSA 3 Jauh Mode 2



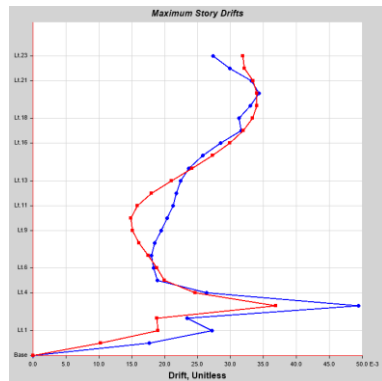
RSA 4 Dekat Mode 1



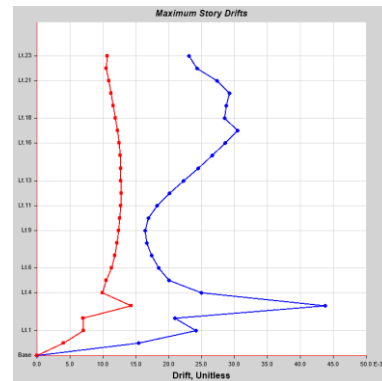
RSA 4 Jauh Mode 1



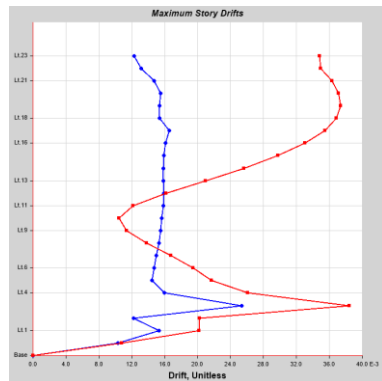
RSA 4 Dekat Mode 2



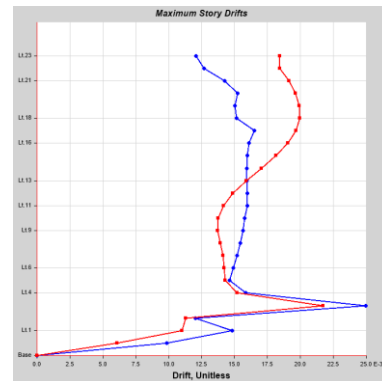
RSA 4 Jauh Mode 2



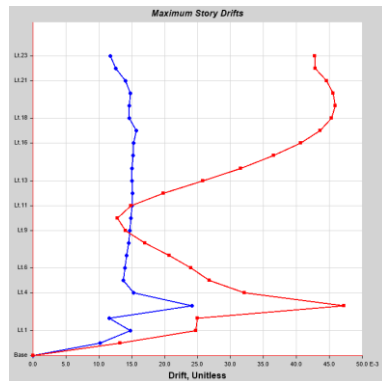
RSA 5 Dekat Mode 1



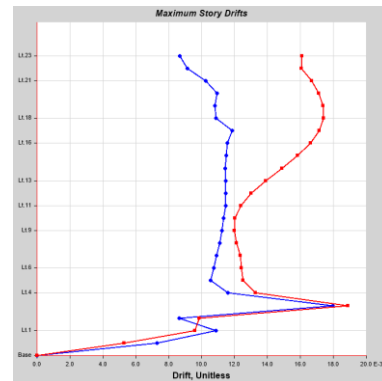
RSA 5 Jauh Mode 1



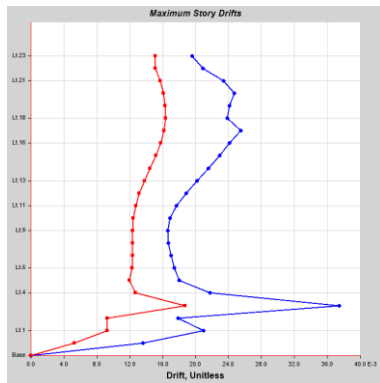
RSA 5 Dekat Mode 2



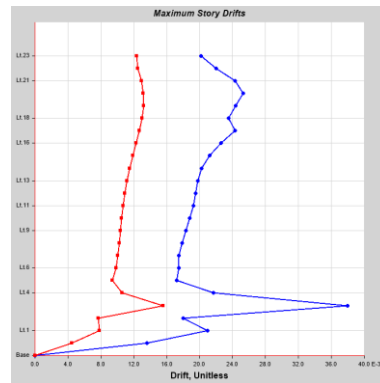
RSA 5 Jauh Mode 2



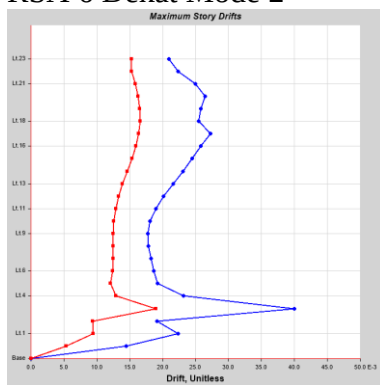
RSA 6 Dekat Mode 1



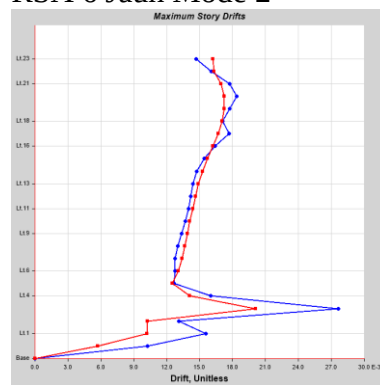
RSA 6 Jauh Mode 1



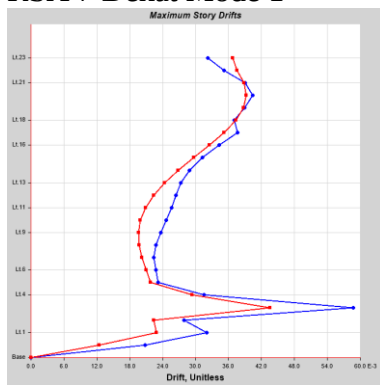
RSA 6 Dekat Mode 2



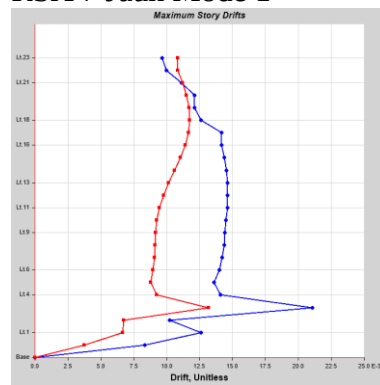
RSA 6 Jauh Mode 2



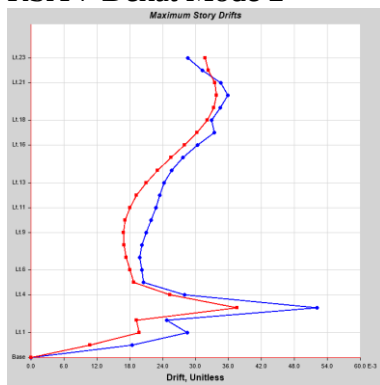
RSA 7 Dekat Mode 1



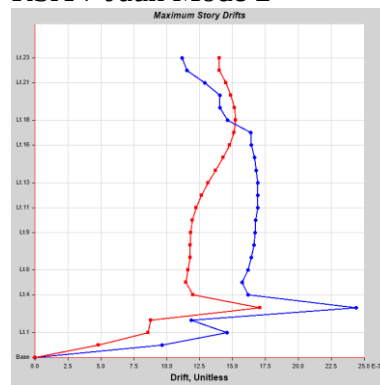
RSA 7 Jauh Mode 1



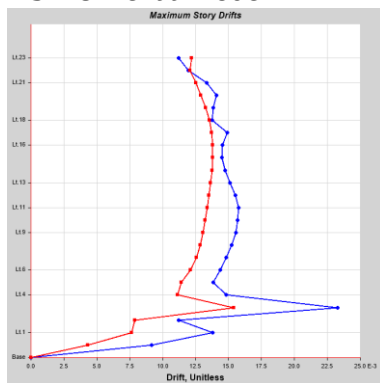
RSA 7 Dekat Mode 2



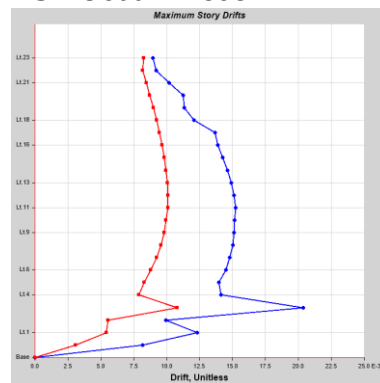
RSA 7 Jauh Mode 2



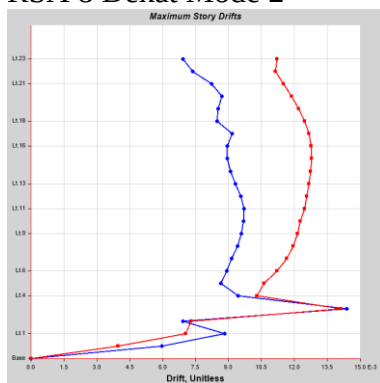
RSA 8 Dekat Mode 1



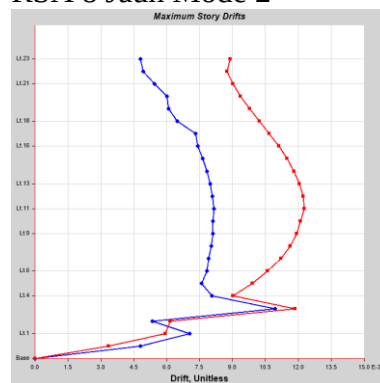
RSA 8 Jauh Mode 1



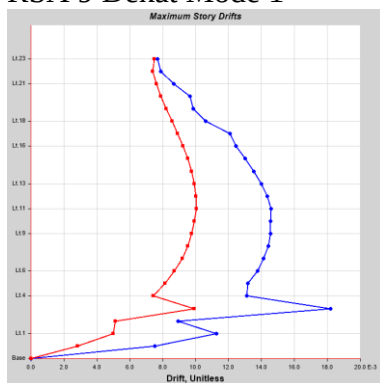
RSA 8 Dekat Mode 2



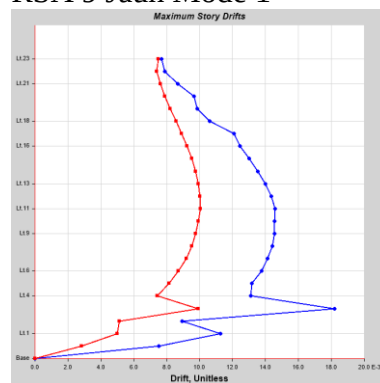
RSA 8 Jauh Mode 2



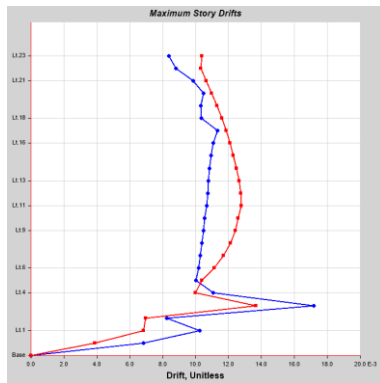
RSA 9 Dekat Mode 1



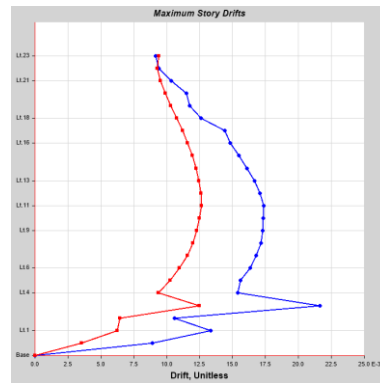
RSA 9 Jauh Mode 1



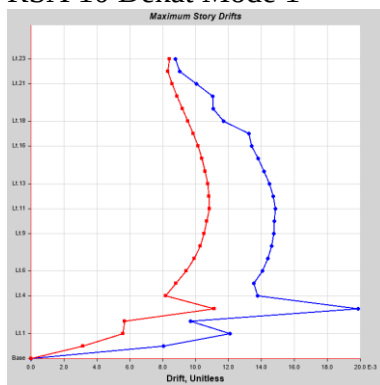
RSA 9 Dekat Mode 2



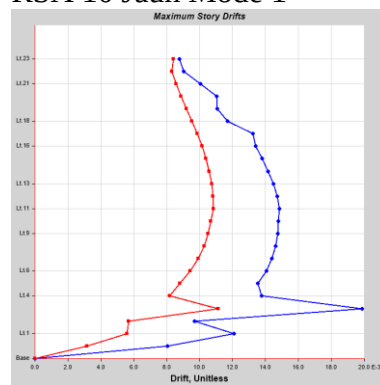
RSA 9 Jauh Mode 2



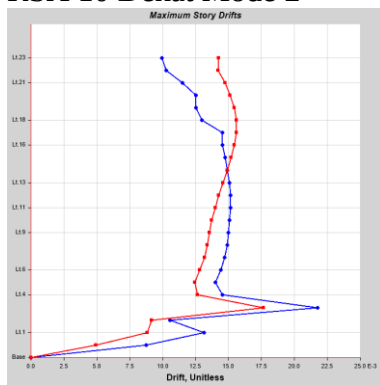
RSA 10 Dekat Mode 1



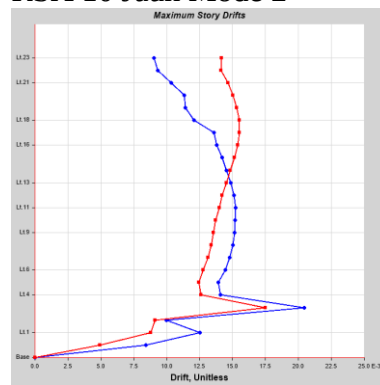
RSA 10 Jauh Mode 1



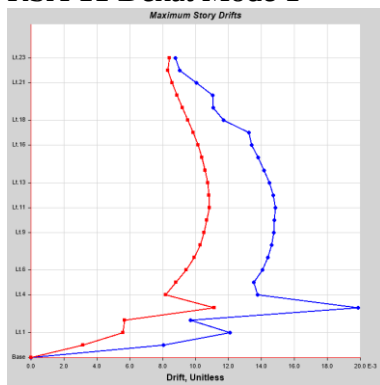
RSA 10 Dekat Mode 2



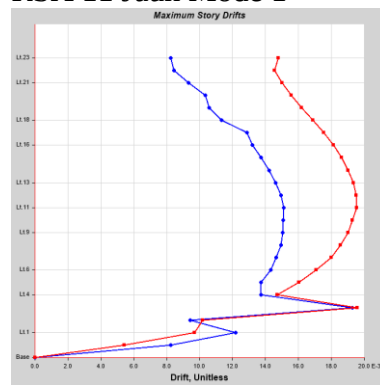
RSA 10 Jauh Mode 2



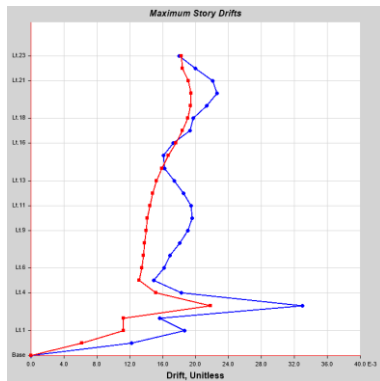
RSA 11 Dekat Mode 1



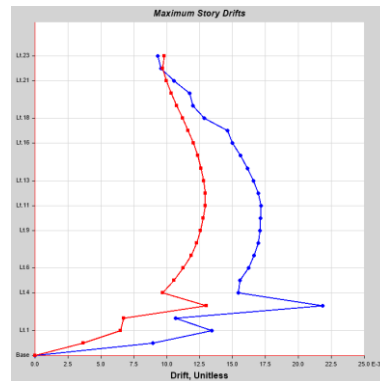
RSA 11 Jauh Mode 1



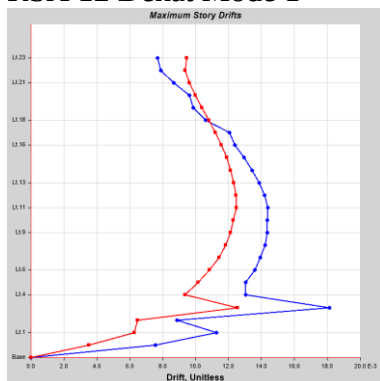
RSA 11 Dekat Mode 2



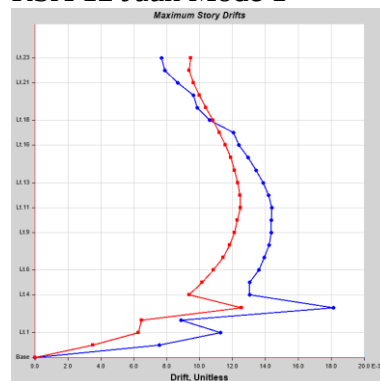
RSA 11 Jauh Mode 2



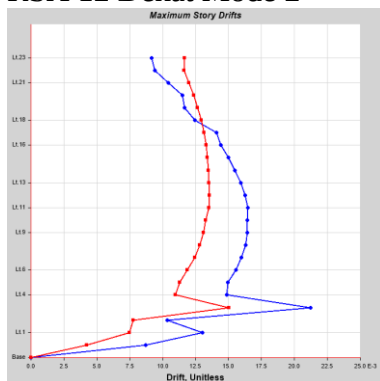
RSA 12 Dekat Mode 1



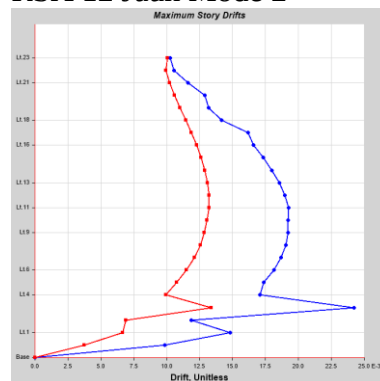
RSA 12 Jauh Mode 1



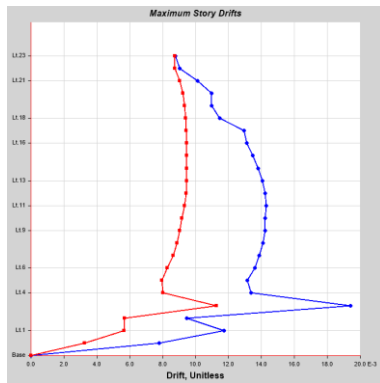
RSA 12 Dekat Mode 2



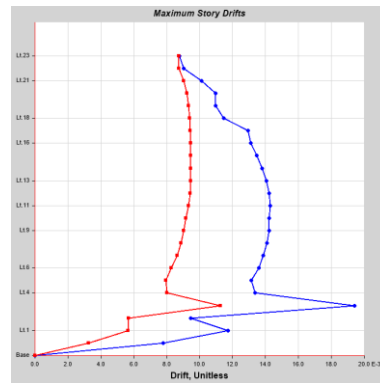
RSA 12 Jauh Mode 2



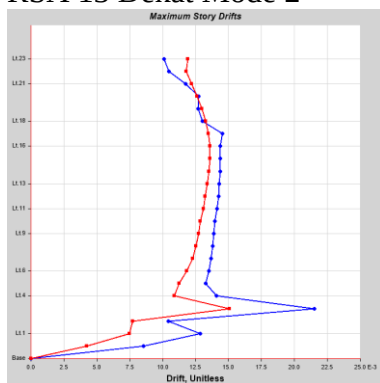
RSA 13 Dekat Mode 1



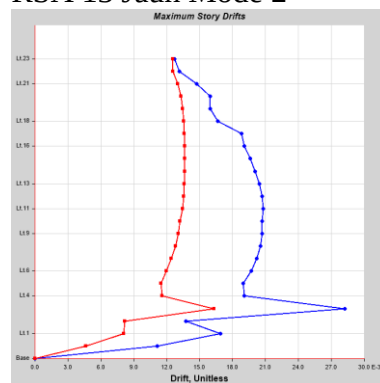
RSA 13 Jauh Mode 1



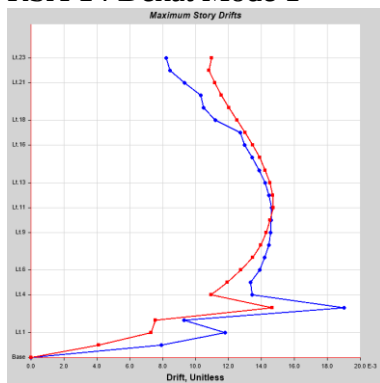
RSA 13 Dekat Mode 2



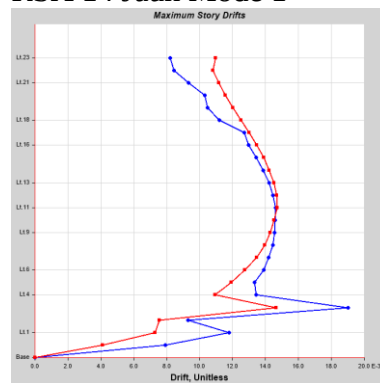
RSA 13 Jauh Mode 2



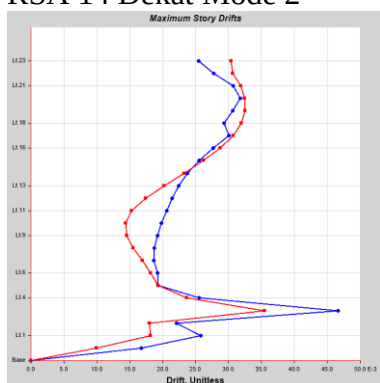
RSA 14 Dekat Mode 1



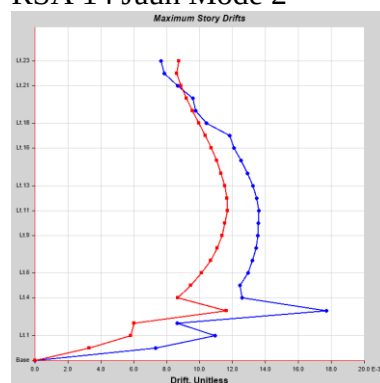
RSA 14 Jauh Mode 1



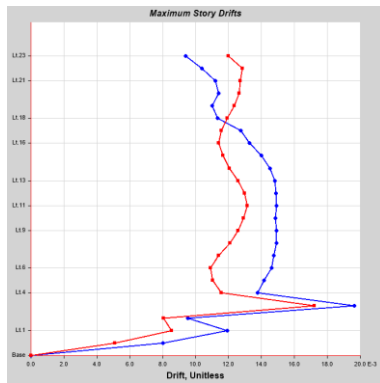
RSA 14 Dekat Mode 2



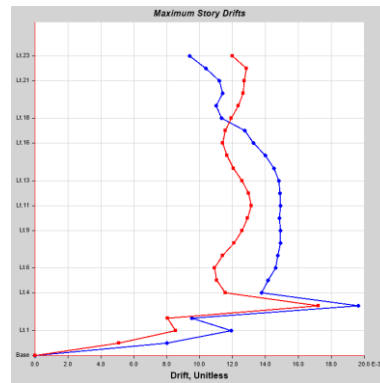
RSA 14 Jauh Mode 2



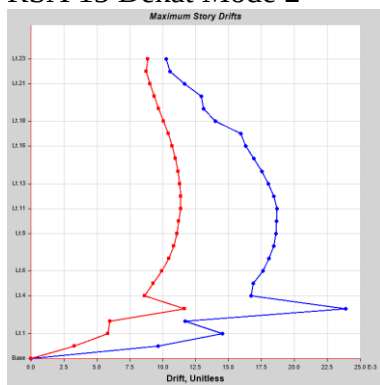
RSA 15 Dekat Mode 1



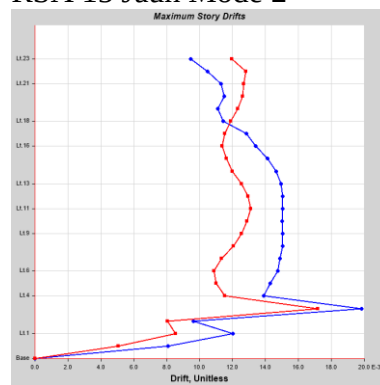
RSA 15 Jauh Mode 1



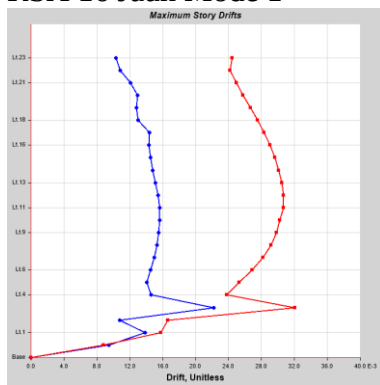
RSA 15 Dekat Mode 2



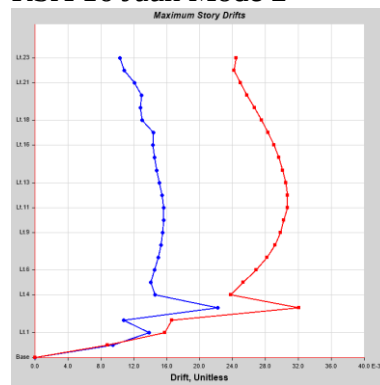
RSA 15 Jauh Mode 2



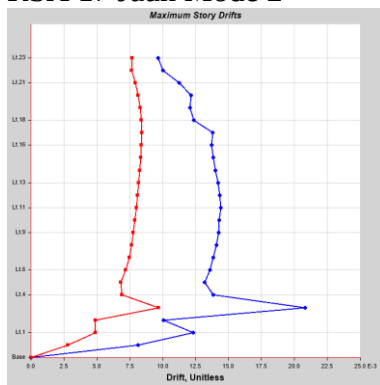
RSA 16 Jauh Mode 1



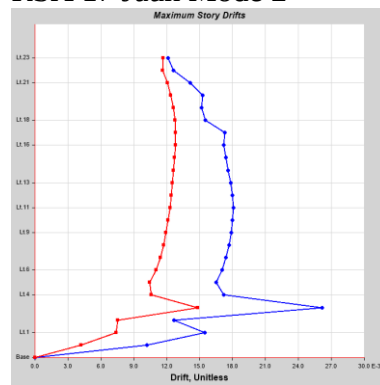
RSA 16 Jauh Mode 2



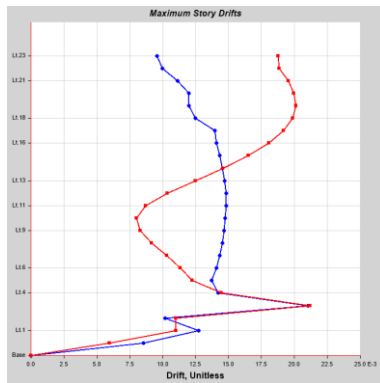
RSA 17 Jauh Mode 2



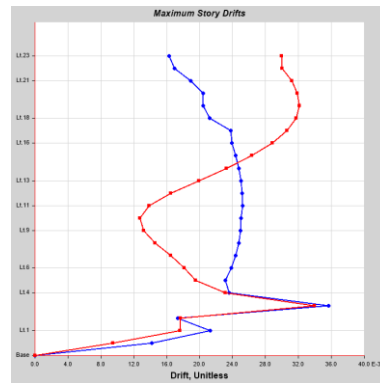
RSA 17 Jauh Mode 2



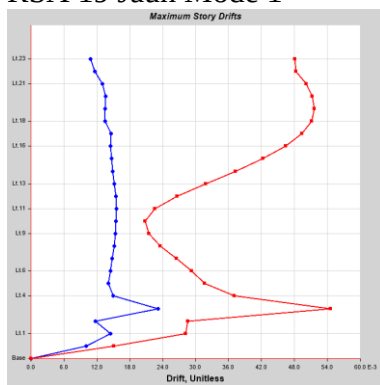
RSA 18 Jauh Mode 1



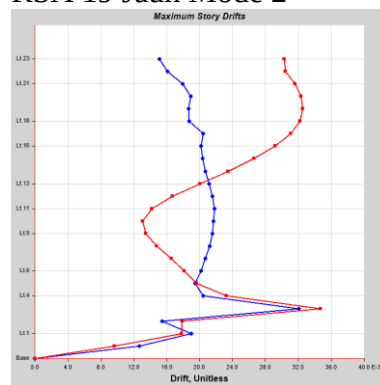
RSA 18 Jauh Mode 2



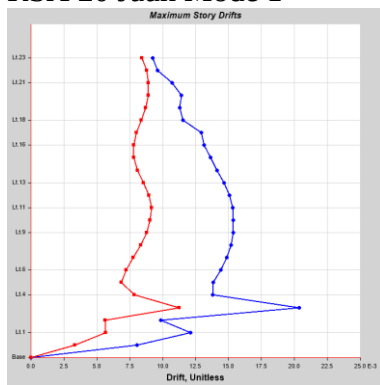
RSA 19 Jauh Mode 1



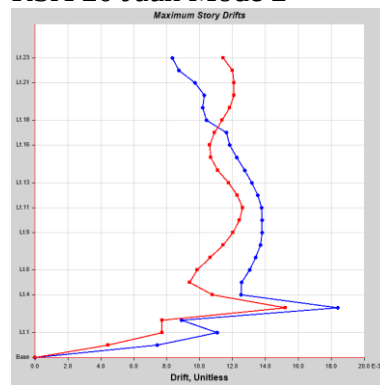
RSA 19 Jauh Mode 2



RSA 20 Jauh Mode 1



RSA 20 Jauh Mode 2



DAFTAR RIWAYAT HIDUP



DATA DIRI PESERTA

Nama Lengkap : Salsabiella
Tempat/Tanggal Lahir : Medan, 07 April 2004
Jenis Kelamin : Perempuan
Alamat : Jl. Pantai rambung, Marindal.
Agama : Islam
Ayah : Hedrik Syahputra
Ibu : Asmayenti
No.Telp. : 082169440146
Email : salsabiella77@gmail.com

RIWAYAT PENDIDIKAN

Nomor Induk Mahasiswa : 2207210049
Fakultas : Teknik
Program Studi : Teknik Sipil
Perguruan Tinggi : Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara
Alamat Perguruan Tinggi : Jl. Kapten Muchtar Basri No. 3 Medan 20238

No.	Tingkat Pendidikan	Nama dan Tempat	Tahun Kelulusan
1	SD	SDN 060709	2016
2	SMP	MTs. Ponpes Muhammadiyah Kwala Madu	2019
3	SMA	MAs. Ponpes Muhammadiyah Kwala Madu	2022
4	UNIVERSITAS	UMSU	2022-2026