

**EVALUASI KINERJA STRUKTUR BANGUNAN *LOW RISE BUILDING*
DAN *MEDIUM RISE BUILDING* DENGAN MENGGUNAKAN
*PUSHOVER ANALYSIS***

(Skripsi)

Oleh:

**ABDURAHMAN HARITS FADILLAH
1715011052**



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

ABSTRAK

EVALUASI KINERJA STRUKTUR BANGUNAN *LOW RISE BUILDING* DAN *MEDIUM RISE BUILDING* DENGAN MENGGUNAKAN PUSHOVER ANALYSIS

Oleh

ABDURAHMAN HARITS FADILLAH

Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi kinerja struktur bangunan dengan meninjau gedung 4 lantai yang termasuk bangunan *low rise building* dan gedung 5 lantai yang mendapatkan penambahan tingkat dari keadaan eksisting menjadi bangunan *medium rise building* menggunakan analisis *pushover*. Analisis *pushover* adalah analisis statik nonlinier dimana pengaruh gempa rencana terhadap struktur bangunan gedung dianggap sebagai beban-beban statik yang bekerja pada pusat massa masing-masing lantai. Dengan studi kasus gedung Bank Tabungan Negara Kantor Cabang Karawang, peraturan yang digunakan dalam analisis sesuai dengan SNI 1726:2019, SNI 1727:2020, FEMA 356, dan ATC-40.

Berdasarkan hasil analisis *pushover* dengan metode ATC-40 diperoleh nilai *drift ratio* arah x = 0,0088 m dan arah y = 0,0090 m untuk gedung 4 lantai (*low rise building*). Sedangkan untuk gedung 5 lantai (*medium rise building*) diperoleh nilai *drift ratio* arah x = 0,0091 m dan arah y = 0,0092 m. Berdasarkan hasil perhitungan dari kedua gedung yang ditinjau termasuk dalam level kinerja *Damage Control*. Sedangkan dengan metode FEMA 356 diperoleh nilai target perpindahan arah x = 0,0078 (0,7835%) dan arah y = 0,0080 (0,8039%) untuk gedung 4 lantai (*low rise building*). Sedangkan untuk gedung 5 lantai (*medium rise building*) diperoleh nilai target perpindahan arah x = 0,0081 (0,8101%) dan arah y = 0,0083 (0,8318%). Berdasarkan hasil tersebut kedua struktur gedung termasuk kedalam level kinerja *Immediate Occupancy* (IO).

Kata kunci: *pushover*, *low rise building*, *medium rise building*, level kinerja.

ABSTRACT

EVALUATION OF LOW RISE BUILDING AND MEDIUM RISE BUILDING STRUCTURE PERFORMANCE USING PUSHOVER ANALYSIS

By

ABDURAHMAN HARITS FADILLAH

This study aims to evaluate the performance of the building structure by reviewing a 4-storey building which includes a low-rise building and a 5-storey building that gets an additional level from the existing state to a middle-rise building using pushover analysis. Pushover analysis is a nonlinear static analysis where the influence of the design earthquake on the building structure is considered as static loads acting on the center of mass of each floor. With a case study of the State Savings Bank Karawang Branch Office building, the rules used in the analysis are in accordance with SNI 1726:2019, SNI 1727:2020, FEMA 356, and ATC-40.

Based on the results of pushover analysis using the ATC-40 method, the drift ratio value in the direction of $x = 0.0088$ m and direction of $y = 0.0090$ m for a 4-storey building (low rise building). Meanwhile, for a 5-story building (medium rise building), the drift ratio value in the direction of $x = 0.0091$ m and direction of $y = 0.0092$ m is obtained. Based on the results of calculations from the two buildings reviewed, they are included in the Damage Control performance level. Meanwhile, with the FEMA 356 method, the target value for the displacement of the direction $x = 0.0078$ (0.7835%) and the direction of $y = 0.0080$ (0.8039%) for a 4-storey building (low rise building). Meanwhile, for a 5-story building (medium rise building), the target value for the displacement of the direction $x = 0.0081$ (0.8101%) and the direction of $y = 0.0083$ (0.8318%) is obtained. Based on these results, the two building structures are included in the Immediate Occupancy (IO).

Key words: pushover, low rise building, medium rise building, performance level.

**EVALUASI KINERJA STRUKTUR BANGUNAN *LOW RISE BUILDING*
DAN *MEDIUM RISE BUILDING* DENGAN MENGGUNAKAN
*PUSHOVER ANALYSIS***

Oleh

ABDURAHMAN HARITS FADILLAH

Skripsi

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

Pada

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



**FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2023**

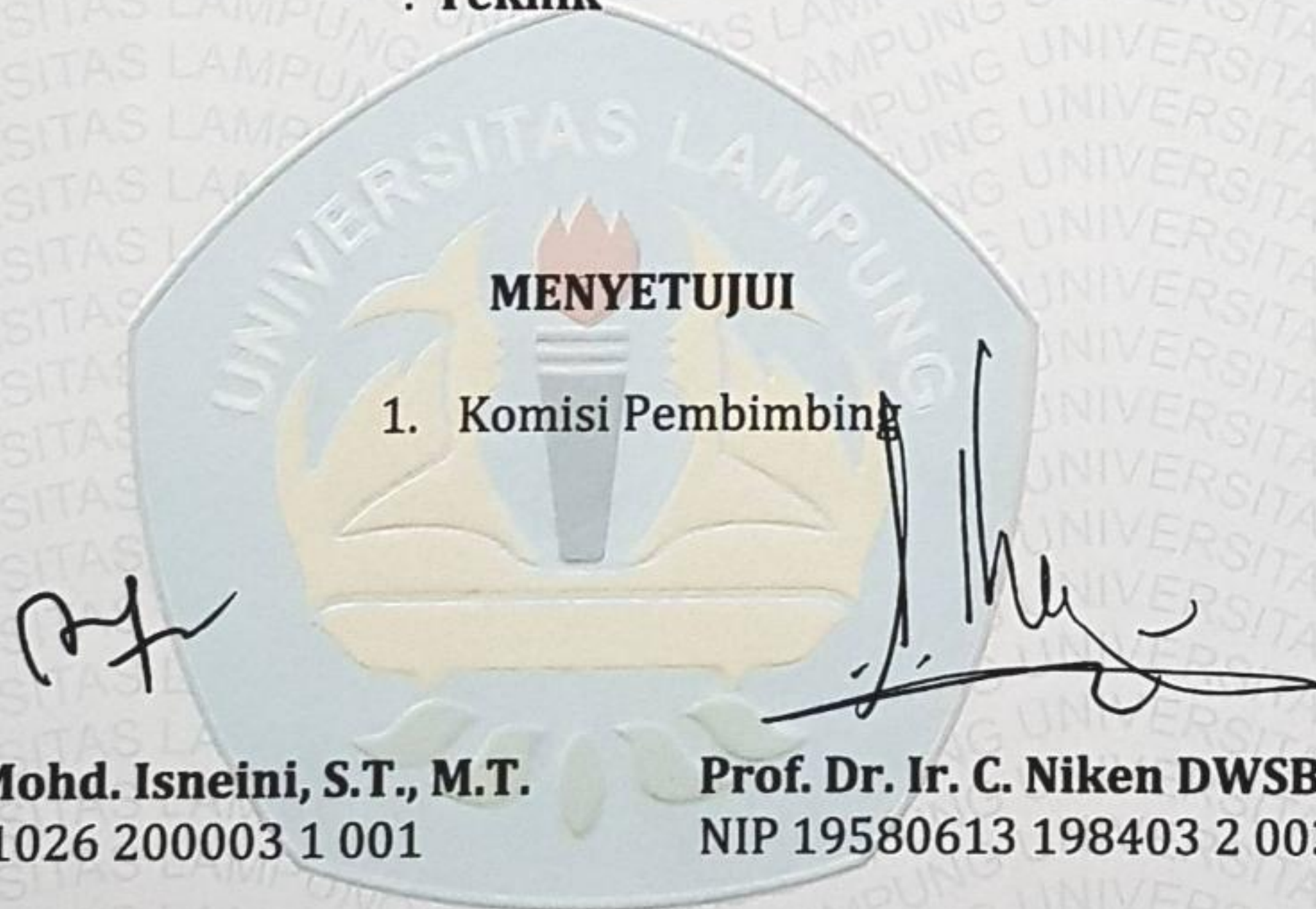
Judul Skripsi : **EVALUASI KINERJA STRUKTUR BANGUNAN *LOW RISE BUILDING* DAN *MEDIUM RISE BUILDING* DENGAN MENGGUNAKAN *PUSHOVER ANALYSIS***

Nama Mahasiswa : **Abdurahman Harits Fadillah**

Nomor Pokok Mahasiswa : **1715011052**

Program Studi : **S1 Teknik Sipil**

Fakultas : **Teknik**



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

Prof. Dr. Ir. C. Niken DWSBU, S.T., M.T.
NIP 19580613 198403 2 003

2. Ketua Program Studi S1 Teknik Sipil

3. Ketua Jurusan Teknik Sipil

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

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

MENGESAHKAN

1. Tim Penguji

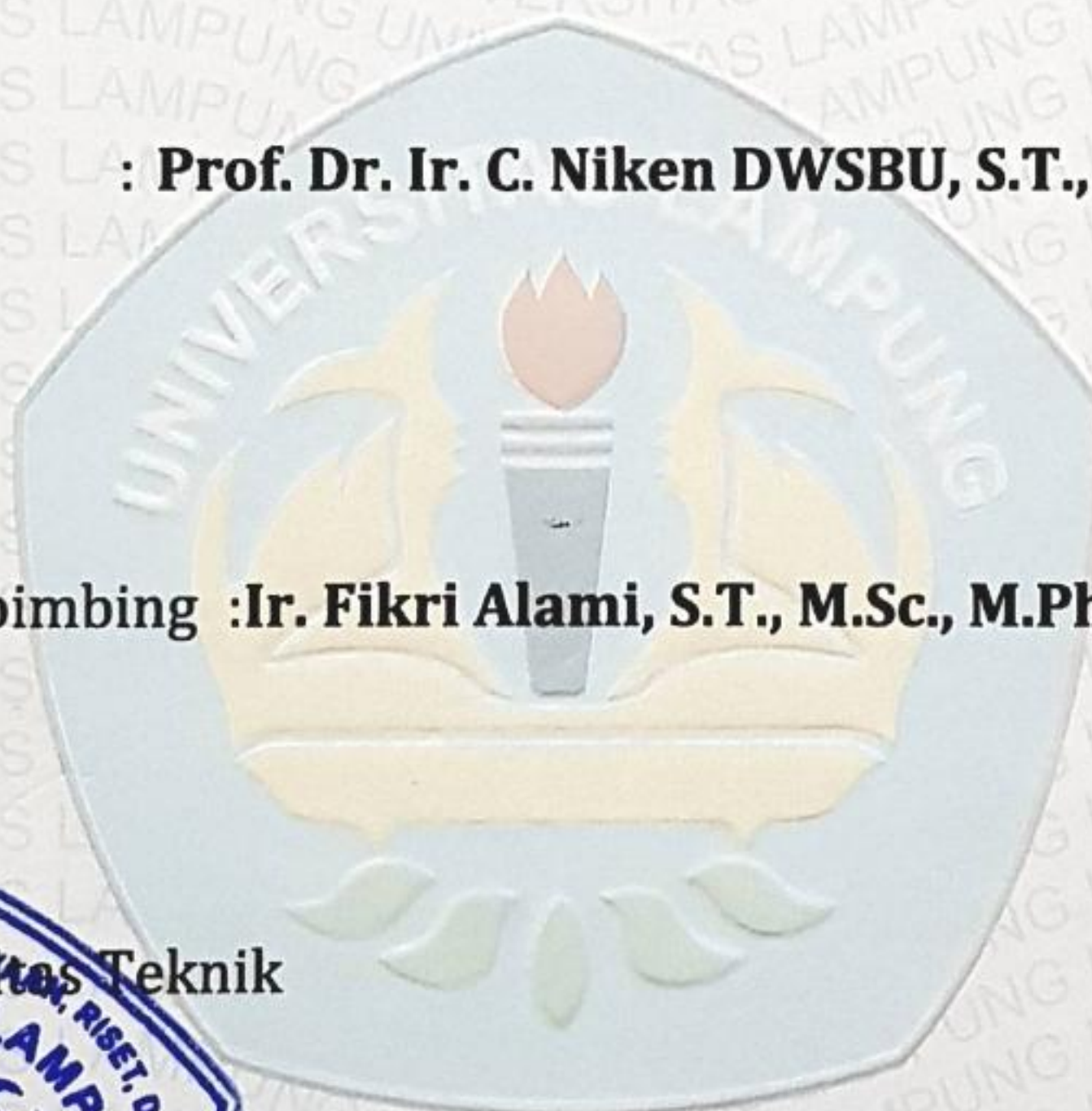
Ketua : Dr. Eng. Mohd. Isneini, S.T., M.T..



Sekretaris : Prof. Dr. Ir. C. Niken DWSBU, S.T., M.T.



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



2. Dekan Fakultas Teknik



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

Tanggal Lulus Ujian Skripsi : 10 Juli 2023

PERNYATAAN

Saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Abdurahman Harits Fadillah

NPM : 1715011052

Profil/Jurusan : S1/Teknik Sipil

Fakultas : Teknik

Judul : Evaluasi Kinerja Struktur Bangunan *Low Rise Building* Dan
Medium Rise Building Dengan Menggunakan *Pushover Analysis*.

Dengan ini menyatakan bahwa skripsi ini benar-benar karya saya sendiri.

Sepanjang pengetahuan saya, tidak terdapat karya yang ditulis atau diterbitkan orang lain kecuali sebagai acuan atau kutipan dengan mengikuti tata penulisan karya ilmiah yang telah ditetapkan. Ide penelitian didapatkan dari diskusi antara saya dengan pembimbing I, oleh karena itu baik atas data penelitian berada pada saya dan pembimbing I, bapak Dr. Eng. Mohd. Isneini., S.T., M.T.

Apabila dikemudian hari ternyata ditemukan adanya ketidakbenaran, saya bersedia menanggung akibat dan sanksi yang berlaku.

Bandar Lampung, 10 Juli 2023



Abdurahman Harits Fadillah
NPM. 1715011052

RIWAYAT HIDUP



Penulis bernama lengkap Abdurahman Harits Fadillah. Penulis dilahirkan di kota Bekasi, Jawa Barat pada tanggal 15 Februari 1999, sebagai anak keempat dari lima bersaudara, dari bapak Ton Iman Pribadi dan ibu Rahayu Sunarti.

Penulis memulai jenjang pendidikan dari Pendidikan Taman Kanak-Kanak (TK) Ar-Rasyidu diselesaikan tahun 2004, Sekolah Dasar (SD) diselesaikan di SDN Jatirahayu V, Kota Bekasi yang diselesaikan pada tahun 2010, Sekolah Menengah Pertama (SMP) di SMP Al-Falah Kota Bekasi yang diselesaikan pada tahun 2013, dan Sekolah Menengah Akhir (SMA) di SMAN 16 Bekasi yang diselesaikan pada tahun 2016.

Tahun 2017, penulis terdaftar sebagai mahasiswa jurusan Teknik Sipil Universitas Lampung melalui jalur SBMPTN. Selama menjadi mahasiswa, penulis aktif menjadi anggota Himpunan Mahasiswa Teknik Sipil (HIMATEKS) Universitas Lampung periode 2018/2019 dan periode 2019/2020. Penulis telah mengikuti Kuliah Kerja Nyata (KKN) di Kelurahan Karet Tengsin, Kecamatan Bendungan Hilir, Jakarta Pusat, DKI Jakarta selama 40 hari pada periode I (Satu), 2 Februari-12 Maret 2021. Dalam pengaplikasian ilmu di bidang Teknik Sipil, penulis melaksanakan Kerja Praktik di proyek pembangunan gedung Bank Tabungan Negara Kantor Cabang Karawang selama 3 Bulan.

Selanjutnya, penulis mengambil tugas akhir untuk skripsi pada tahun 2021, dengan judul skripsi Evaluasi Kinerja Struktur Bangunan *Low Rise Building* Dan *Medium Rise Building* Dengan Menggunakan *Pushover Analysis*.

MOTTO

“Allah tidak akan membebani seorang hamba kecuali sesuai dengan batas kemampuannya”

(Q.S Al-Baqarah: 286)

“Procrastination will delay your dream”

“Better to jump and make a mistake than to sit there cause too frightened to make a move”

PERSEMBAHAN

Bismillahirrahmanirrahim

Alhamdulillahirabbil'alamiin telah engkau ridhoi Ya Allah langkah hambaMU
Sehingga skripsi ini akhirnya dapat terselesaikan.

Teriring shalawat serta salam kepada Nabi Muhammad SAW semoga kelak skripsi
ini dapat memberikan ilmu yang bermanfaat.

Abi dan Umi tercinta yang selalu mendukung dalam banyak hal, menuntun,
mendoakan dan juga memberikan semangat kepadaku untuk terus melaksanakan
kewajibanku.

Abang, kaka, Shobron, Rahma, dan teman-teman yang telah mendoakan, menemani
dan memberi support selama ini

Dosen Pembimbing dan Penguji yang sangat menginspirasi dan turut andil dalam
menyelesaikan tanggung jawab ini.

Almamaterku Universitas Lampung

SANWACANA

Puji dan syukur kepada Tuhan Yang Maha Esa yang telah senantiasa memberikan rahmat dan anugrah-Nya. Sehingga diberikan kemudahan dan kelancaran kepada penulis dalam menyelesaikan Skripsi dengan judul “Evaluasi Kinerja Struktur Bangunan *Low Rise Building* Dan *Medium Rise Building* Dengan Menggunakan *Pushover Analysis*”, dengan studi kasus gedung Bank Tabungan Negara Kantor Cabang Karawang. Skripsi ini diajukan untuk memenuhi persyaratan akademik guna memperoleh gelar Sarjana Teknik Sipil Strata Satu (S1) pada Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Lampung.

Penulis juga menyampaikan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada berbagai pihak yang telah berkontribusi dalam menuntaskan Skripsi ini, yaitu :

1. Kedua orang tua tercinta, abi dan umi yang telah dengan tulus penuh kasih sayang dan kesabaran memberikan dukungan serta doa yang tidak pernah putus sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi ini dengan baik;
2. Bapak Dr. Eng. Helmy Fitriawan, S.T., M.Sc., selaku Dekan Fakultas Teknik Universitas Lampung;
3. Ibu Ir. Laksmi Irianti, M.T., selaku Ketua Jurusan Teknik Sipil Universitas Lampung;
4. Bapak Muhammad Karami, S.T., M.Sc., Ph.D., selaku Ketua Program Studi S1 Teknik Sipil Universitas Lampung;
5. Bapak Ir. Nur Arifaini, M.S., selaku Dosen Pembimbing Akademik;

6. Bapak Dr. Eng. Mohd. Isneini, S.T., M.T., selaku pembimbing pertama atas kesediaannya memberikan bimbingan, kritik dan saran dalam proses penyelesaian skripsi ini;
7. Ibu Prof. Dr. Ir. C. Niken DWSBU, S.T., M.T., selaku pembimbing kedua atas kesediaannya memberikan bimbingan, kritik dan saran dalam proses penyelesaian skripsi ini;
8. Bapak Ir. Fikri Alami, S.T., M.Sc., M.Phil., selaku Dosen Penguji atas masukan dan saran pada seminar proposal dan hasil;
9. Bapak Naufal selaku konsultan manajemen konstruksi dalam Proyek Pembangunan Gedung Bank Tabungan Indonesia Kantor Cabang Karawang yang telah memberi izin kepada penulis untuk menggunakan data *Shop Drawing* di proyek yang bersangkutan;
10. Seluruh rekan-rekan angkatan 2017 yang telah banyak membantu penulis baik secara langsung ataupun tidak langsung.

Penulis menyadari akan keterbatasan pengetahuan dan kemampuan yang dimiliki, sehingga masih terdapat kekurangan dalam pengerjaan Skripsi ini. Untuk itu, penulis mengharapkan kritik dan saran dari berbagai pihak yang berkepentingan. Semoga Skripsi ini dapat bermanfaat kepada pembaca.

Bandar Lampung, 2023

Penulis,

Abdurahman Harits F.
NPM. 1715011052

DAFTAR ISI

Halaman

DAFTAR ISI	i
DAFTAR GAMBAR	iii
DAFTAR TABEL	v
I. PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	4
1.3 Batasan Masalah.....	5
1.4 Tujuan Penelitian	6
1.5 Manfaat Penelitian	7
II. TINJAUAN PUSTAKA	8
2.1 Studi Literatur	8
2.2 Konsep Dasar Mekanisme Gempa.....	10
2.2.1 Proses Gempa	10
2.3 Struktur Gedung Bertingkat	12
2.4 Ketentuan Umum Bangunan Gedung dalam Pengaruh Gempa.....	13
2.4.1 Faktor Keutamaan.....	13
2.4.2 Parameter percepatan gempa terpetakan (S_s , S_1).....	15
2.4.3 Kelas situs (SA - SF).....	17
2.4.4 Koefisien-koefisien situs dan parameter-parameter respons spektral percepatan gempa maksimum yang dipertimbangkan risiko-tertarget <i>Maximum Considered Earthquake</i> (MCER)..	18
2.4.5 Parameter percepatan spektral desain	20
2.4.6 Spektrum respons desain.....	20
2.4.7 Kategori desain seismik (A-D)	22
2.4.8 Sistem struktur dan parameter sistem (R , C_d , Ω_0).....	24
2.4.9 Gaya geser dasar seismik	26
2.4.10 Penentuan perioda fundamental.....	27
2.4.11 Distribusi vertikal gaya gempa.....	28

2.4.12	Distribusi horizontal gaya gempa.....	29
2.5	Kombinasi Pembebanan.....	29
2.6	Pemodelan Sendi Plastis	30
2.7	Analisis <i>Pushover</i>	32
2.7.1	Pembebanan pada Analisis <i>Pushover</i>	34
2.7.2	Tahapan Analisis <i>Pushover</i>	34
2.7.3	Target perpindahan	35
2.7.4	Metode <i>Capacity Spektrum (Applied Technology Council - 40)</i>	37
2.7.5	Metode Koefisien Perpindahan (FEMA 356).....	43
III.	METODE PENELITIAN.....	50
3.1	Data Struktur Bangunan.....	50
3.1.1	Lokasi dan Deskripsi Gedung.....	50
3.1.2	Spesifikasi Bahan.....	51
3.1.3	Gambar Kerja dan Desain Gedung	51
3.2	Prosedur Penelitian	56
IV.	HASIL DAN PEMBAHASAN.....	61
4.1	Pemodelan Struktur Gedung	61
4.2	Analisis Pembebanan Struktur Gedung	66
4.2.1	Analisis Beban Gravitasi.....	66
4.2.2	Analisis Beban Gempa.....	73
4.2.3	Analisis Kombinasi Pembebanan.....	86
4.3	Kontrol Struktur Gedung	87
4.3.1	Kontrol gaya geser dasar (V)	87
4.3.2	Kontrol partisipasi massa	89
4.3.3	Kontrol simpangan antar lantai struktur gedung (Δ).....	91
4.3.4	Pengaruh P-delta	93
4.4	Analisis <i>Pushover</i>	94
4.4.1	Membuat <i>Nonlinear Case</i>	94
4.4.2	Mendefinisikan Sendi Plastis (<i>Hinge</i>) pada Kolom dan Balok	95
4.4.3	<i>Running Pushover Analysis</i>	97
4.4.4	Kapasitas Struktur	97
4.4.5	Evaluasi Kinerja Struktur.....	104
V.	KESIMPULAN DAN SARAN	
5.1	Kesimpulan	122
5.2	Saran.....	124
	DAFTAR PUSTAKA	126

DAFTAR GAMBAR

	Halaman
Gambar 1.1. Peta Episenter Gempa Indonesia.....	2
Gambar 2.1. Skema pergerakan permukaan tanah.....	11
Gambar 2.2. Skema pergeseran /benturan antar plat tektonik	12
Gambar 2.3. Parameter gerak tanah Ss, gempa maksimum yang dipertimbangkan risiko tertarget (MCER) wilayah Indonesia untuk spektrum respons 0,2-detik (redaman kritis 5 %).....	16
Gambar 2.4. Parameter gerak tanah, S1, gempa maksimum yang dipertimbangkan risiko tertarget (MCER) wilayah Indonesia untuk spektrum respons 0,2- detik (redaman kritis 5 %).....	16
Gambar 2.5. Spektrum respons desain.....	21
Gambar 2.6. Sistem Rangka Pemikul Momen Biasa	25
Gambar 2.7. Sistem Rangka Pemikul Momen Menengah	25
Gambar 2.8. Sistem Rangka Pemikul Momen Khusus	25
Gambar 2.9. Posisi Sumbu lokal Balok Struktur	30
Gambar 2.10 Posisi Sumbu lokal Kolom Struktur.....	31
Gambar 2.11 Sendi plastis yang terjadi pada balok dan kolom	32
Gambar 2.12. (a) Respon Spektrum Standar (b) Respon Spektrum Format ADRS	38
Gambar 2.13. Ilustrasi <i>Pushover</i> dan <i>Capacity Curve</i>	39
Gambar 2.14. Penentuan <i>Performance Point</i>	40
Gambar 2.15. Kurva kriteria kinerja	41
Gambar 2.16. Tingkat Kinerja Struktur (FEMA 356).....	44
Gambar 3.1. Lokasi Penelitian	50
Gambar 3.2. Tampak depan gedung	51
Gambar 3.3. Tampak samping gedung	52
Gambar 3.4. Denah kolom dan balok lantai dasar	52
Gambar 3.5. Denah kolom dan balok lantai 2 dan 3	53
Gambar 3.6. Data penampang kolom.....	53
Gambar 3.7. Data penampang balok	54
Gambar 3.8. Data tanah.....	55
Gambar 3.9. Diagram alir penelitian.....	60
Gambar 4.1. Denah Model Struktur	61
Gambar 4.2. Tampak Depan (4 lantai).....	62
Gambar 4.3. Tampak Belakang (4 lantai)	62
Gambar 4.4. Tampak Perspektif Kanan (4 lantai).....	63

Gambar 4.5. Tampak Perspektif Kiri (4 lantai).....	63
Gambar 4.6. Tampak Depan (5 lantai).....	64
Gambar 4.7. Tampak Belakang (5 lantai).....	64
Gambar 4.8. Tampak Perspektif Kanan (4 lantai).....	65
Gambar 4.9. Tampak Perspektif Kiri (4 lantai).....	65
Gambar 4.10. Denah tangga.....	68
Gambar 4.11. Denah <i>lift</i>	71
Gambar 4.12. Diagram alir perhitungan gempa statik perlantai	73
Gambar 4.13. Diagram alir perhitungan gempa dinamik perlantai.....	74
Gambar 4.14. Grafik <i>respon spektrum</i>	84
Gambar 4.15. <i>Load case</i> untuk beban nonlinear gravitasi	94
Gambar 4.16. <i>Load case</i> untuk beban nonlinear pushover arah x	95
Gambar 4.17. <i>Load case</i> untuk beban nonlinear pushover arah y	95
Gambar 4.18. Nilai titik kontrol sendi plastis (<i>Hinge</i>) pada kolom	96
Gambar 4.19. Nilai titik kontrol sendi plastis (<i>Hinge</i>) pada balok	96
Gambar 4.20. <i>Load case</i> yang dijalankan arah x	97
Gambar 4.21. <i>Load case</i> yang dijalankan arah y	97
Gambar 4.22. Distribusi Sendi Plastis Arah x-x (Gedung 4 lantai).....	98
Gambar 4.23. Distribusi Sendi Plastis Arah x-x (Gedung 5 lantai).....	99
Gambar 4.24. Kurva Kapasitas Sistem Rangka Arah x-x (Gedung 4 lantai).....	100
Gambar 4.25. Kurva Kapasitas Sistem Rangka Arah x-x (Gedung 5 lantai).....	100
Gambar 4.26. Distribusi Sendi Plastis Arah y-y (Gedung 4 lantai).....	101
Gambar 4.27. Distribusi Sendi Plastis Arah y-y (Gedung 5 lantai).....	101
Gambar 4.28. Distribusi Sendi plastis <i>Push Y</i> elevasi 1 (Gedung 5 lantai).....	102
Gambar 4.29. Distribusi Sendi plastis <i>Push Y</i> elevasi C (Gedung 5 lantai).....	103
Gambar 4.30. Kurva Kapasitas Sistem Rangka Arah y-y (Gedung 4 lantai).....	104
Gambar 4.31. Kurva Kapasitas Sistem Rangka Arah y-y (Gedung 5 lantai).....	104
Gambar 4.32. Kurva <i>Respon Spectrum PushX</i> (Gedung 4 lantai).....	105
Gambar 4.33. Kurva <i>Respon Spectrum PushY</i> (Gedung 4 lantai).....	105
Gambar 4.34. Kurva <i>Respon Spectrum PushX</i> (Gedung 5 lantai).....	106
Gambar 4.35. Kurva <i>Respon Spectrum PushY</i> (Gedung 5 lantai).....	106
Gambar 4.36. Kurva FEMA 356 <i>PushX</i> (Gedung 4 lantai)	111
Gambar 4.37. Kurva FEMA 356 <i>PushY</i> (Gedung 4 lantai)	111
Gambar 4.38. Kurva FEMA 356 <i>PushX</i> (Gedung 5 lantai)	114
Gambar 4.39. Kurva FEMA 356 <i>PushY</i> (Gedung 5 lantai)	114

DAFTAR TABEL

	Halaman
Tabel 2.1. Kategori risiko bangunan gedung dan nongedung untuk beban gempa	14
Tabel 2.1. Kategori risiko bangunan gedung dan nongedung untuk beban gempa (Lanjutan)	15
Tabel 2.2. Faktor keutamaan gempa	15
Tabel 2.3. Klasifikasi situs	17
Tabel 2.3. Klasifikasi situs (Lanjutan)	18
Tabel 2.4. Koefisien situs, F_a	19
Tabel 2.5. Koefisien situs, F_v	19
Tabel 2.6. Kategori desain seismik berdasarkan parameter respons percepatan pada periode pendek	23
Tabel 2.7. Kategori desain seismik berdasarkan parameter respons percepatan pada periode 1 detik	23
Tabel 2.8. Prosedur analisis yang diizinkan	23
Tabel 2.9. Faktor R , C_d , dan Ω_0 , untuk sistem penahan gaya gempa	24
Tabel 2.10. Nilai parameter periode pendekatan C_t dan x	27
Tabel 2.11. Koefisien untuk batas atas pada periode yang dihitung	28
Tabel 2.12. Simpangan antar lantai ijin, Δ_a	40
Tabel 2.13. Batasan rasio drift atap menurut ATC-40	43
Tabel 2.14. Batasan Tipe bangunan pada <i>Capacity Spectrum Method</i>	43
Tabel 2.15: Kondisi bangunan pasca gempa dan kategori bangunan pada tingkat kinerja struktur (FEMA 356)	44
Tabel 2.15: Kondisi bangunan pasca gempa dan kategori bangunan pada tingkat kinerja struktur (FEMA 356), (Lanjutan)	45
Tabel 2.16: Faktor modifikasi C_o FEMA 356	48
Tabel 2.17: Faktor modifikasi C_2 FEMA 356	49
Tabel 2.18: Faktor modifikasi C_m FEMA 356	49
Tabel 2.19: Batasan <i>drift</i> untuk berbagai level kinerja struktur (FEMA 356, 2000)	49
Tabel 4.1. Beban mati tambahan per lantai	66
Tabel 4.2. Beban mati tambahan pada lantai atap	67
Tabel 4.3. Beban mati tambahan pada balok	67
Tabel 4.4. Beban hidup	67
Tabel 4.5. Hasil <i>running</i> pembebanan tangga	69
Tabel 4.6. Beban perlantai (4 lantai)	72

Tabel 4.7. Beban perlantai (5 lantai).....	72
Tabel 4.8. Data desain spektra Indonesia.....	75
Tabel 4.9. Distribusi gaya gempa arah x gedung 4 lantai	78
Tabel 4.10. Distribusi gaya gempa arah y gedung 4 lantai	79
Tabel 4.11. Distribusi gaya gempa arah x gedung 5 lantai	81
Tabel 4.12. Distribusi gaya gempa arah y gedung 5 lantai	82
Tabel 4.13. Perhitungan nilai S_a	83
Tabel 4.14. Beban gempa dinamik arah x (4 lantai)	84
Tabel 4.15. Beban gempa dinamik arah y (4 lantai)	85
Tabel 4.16. Beban gempa dinamik arah x (5 lantai)	85
Tabel 4.17. Beban gempa dinamik arah y (5 lantai)	85
Tabel 4.18. Kombinasi pembebanan.....	86
Tabel 4.19. Hasil gaya geser dasar perlantai (Gedung 4 lantai).....	87
Tabel 4.20. Hasil gaya geser dasar perlantai (Gedung 5 lantai).....	87
Tabel 4.21. Hasil gaya geser dasar perlantai yang telah dikoreksi (Gedung 4 lantai)	89
Tabel 4.22. Hasil gaya geser dasar perlantai yang telah dikoreksi (Gedung 5 lantai)	89
Tabel 4.23. <i>Modal participating mass ratio</i> (Gedung 4 lantai)	90
Tabel 4.24. <i>Modal participating mass ratio</i> (Gedung 5 lantai)	90
Tabel 4.25. Nilai simpangan antar lantai akibat Gempa X (Gedung 4 lantai)	91
Tabel 4.26. Nilai simpangan antar lantai akibat Gempa Y (Gedung 4 lantai)	91
Tabel 4.27. Nilai simpangan antar lantai akibat Gempa X (Gedung 5 lantai)	92
Tabel 4.28. Nilai simpangan antar lantai akibat Gempa Y (Gedung 5 lantai)	92
Tabel 4.29. Nilai P-delta arah x (Gedung 4 lantai)	92
Tabel 4.30. Nilai P-delta arah y (Gedung 4 lantai)	93
Tabel 4.31. Nilai P-delta arah x (Gedung 5 lantai)	93
Tabel 4.32. Nilai P-delta arah y (Gedung 5 lantai)	93
Tabel 4.33. Evaluasi Kinerja Struktur Arah X (Gedung 4 lantai).....	107
Tabel 4.34. Evaluasi Kinerja Struktur Arah Y (Gedung 4 lantai).....	107
Tabel 4.35. Evaluasi Kinerja Struktur Arah X (Gedung 5 lantai).....	108
Tabel 4.36. Evaluasi Kinerja Struktur Arah Y (Gedung 5 lantai).....	108
Tabel 4.37. Hasil Kurva Parameter <i>Pushover</i> X (Gedung 4 lantai).....	112
Tabel 4.38. Hasil Kurva Parameter <i>Pushover</i> Y (Gedung 4 lantai).....	112
Tabel 4.39. Hasil Kurva Parameter <i>Pushover</i> X (Gedung 5 lantai)	114
Tabel 4.40. Hasil Kurva Parameter <i>Pushover</i> Y (Gedung 5 lantai)	115
Tabel 4.41. Kinerja Struktural dan Tingkat Kerusakan Elemen Vertikal (FEMA 356	117

I. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

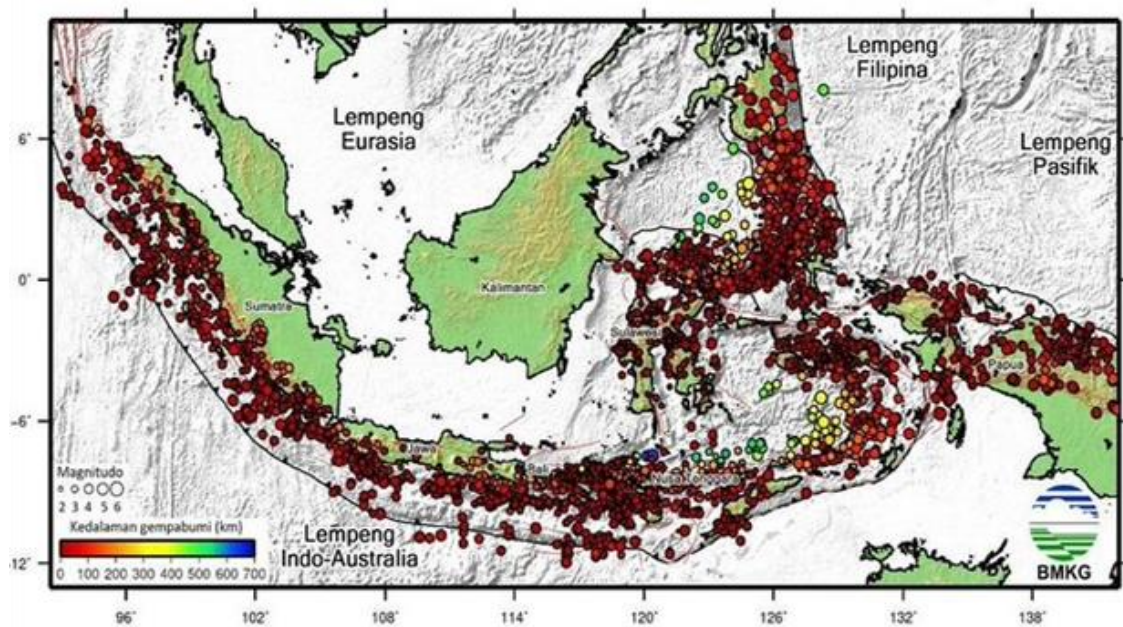
Sebagai negara yang terletak di jalur gempa Pasifik (*Circum Pacific Earthquake Belt*) dan jalur Gempa Asia (*Trans Asiatic Earthquake Belt*) Indonesia mempunyai potensi gempa bumi yang besar. Karena hal tersebut Indonesia termasuk dalam kawasan Cincin Api Pasifik (*Ring of Fire*). Rangkaian gunung berapi aktif di dunia yang biasa disebut Cincin Api Pasifik, menyebabkan Indonesia sering mengalami gempa bumi. Dimana Indonesia juga terletak pada pertemuan lempeng tektonik yaitu lempeng Pasifik, Filipina, Eurasia dan Indo-Australia.

Provinsi Jawa Barat terletak di daerah rawan bencana khususnya gempa bumi, seperti kasus gempa bumi yang terjadi beberapa waktu lalu di wilayah selatan Jawa Barat dengan magnitudo 5,1 pada 14 April 2021, berdasarkan analisis BMKG (Chandra G, 2021, <https://www.cnbcindonesia.com/news/20210414152653-4-237854/penjelasan-lengkap-bmkg-soal-gempa-m-51-di-banten>, 2 Agustus 2022).

Kabupaten Karawang terletak di provinsi Jawa Barat yang merupakan lokasi dari berbagai kawasan industri, dikarenakan menjadi pusat kegiatan perekonomian, maka kabupaten ini memiliki penduduk dalam jumlah yang cukup banyak. Dengan banyaknya penduduk yang ada maka dibutuhkan pula bangunan yang memiliki ketahanan terhadap gempa. Perencanaan struktur khususnya struktur bangunan

gedung beton bertulang harus dirancang dengan mempertimbangkan pengaruh beban gempa terhadap struktur dengan harapan bangunan tersebut dapat digunakan dengan nyaman dan aman dikarenakan potensi gempa yang tinggi. Beberapa faktor yang mempengaruhi besarnya gaya gempa pada struktur bangunan, salah satunya adalah beban kerja, karakteristik struktur bangunan, bentuk bangunan, kekakuan, massa bangunan dan lain-lain.

Pada Gambar 1.1. dapat dilihat intensitas dan besarnya gempa yang terjadi di Indonesia berdasarkan tempat terjadinya. Dikarenakan potensi gempa yang tinggi, maka penentuan desain struktur yang tepat sangatlah penting dengan menyesuaikan kondisi dan lokasi.



Gambar 1.1 Peta Episenter Gempa Indonesia

Penggunaan suatu bangunan harus sesuai dengan rencana desain awalnya, jika awalnya direncanakan sebanyak 4 lantai maka bangunan gedung tersebut harus dibangun sebanyak 4 lantai. Jika terjadi suatu perubahan dari desain awalnya seperti penambahan jumlah lantai, maka diperlukan kembali analisis struktur bangunan yang lebih mendalam, salah satunya adalah dengan menggunakan analisis *pushover* untuk mengetahui apakah kinerja struktur bangunan yang ditinjau dalam kondisi aman atau tidak setelah mengalami perubahan dari desain awal.

Kinerja struktur adalah tingkat kinerja suatu struktur terhadap gempa rencana. Tingkat kinerja struktur dapat diketahui dengan melihat tingkat kerusakan struktur pada saat terkena gempa yang direncanakan dengan periode ulang tertentu. (Tavio & Wijaya, 2018).

Yosafat Aji Pranata (2006) menyatakan *pushover analysis* adalah suatu analisis statik nonlinier dimana pengaruh gempa rencana terhadap struktur bangunan gedung dianggap sebagai beban-beban statik. Beban tersebut dianggap bekerja pada pusat massa masing-masing lantai. Beban ditingkatkan secara berangsur-angsur sampai melampaui pembebanan yang menyebabkan terjadinya pelelehan (sendi plastis) pertama di dalam struktur bangunan gedung. Peningkatan beban lebih lanjut menyebabkan penampang mengalami perubahan bentuk pasca-elastik yang besar sampai mencapai kondisi elastik, kemudian disusul pelelehan (sendi plastis) di lokasi yang lain di struktur tersebut.

Penelitian ini mengacu pada penelitian yang dilakukan Fajar Nugroho (2016) dengan judul “Penerapan Analisis *Pushover* untuk Menentukan Kinerja Struktur pada Bangunan Eksisting Gedung Beton Bertulang”. Pada penelitian ini dilakukan

analisis ulang struktur eksisting gedung sekolah 2 lantai yang memasuki kategori resiko bangunan IV dan terhadap penambahan lantai menjadi 3 lantai yang menggunakan analisis *pushover* untuk mengetahui kinerja bangunan tersebut dengan bantuan program ETABS. Dari penelitian ini diperoleh hasil sesuai dengan kriteria kinerja batas ultimit SNI, dengan perpindahan ultimit (δ_t) arah X = 0,98 cm. Kinerja yang diperlihatkan oleh struktur tidak ada yang melewati kondisi *Life Safety* (LS). Kinerja juga sesuai dengan kriteria koefisien perpindahan FEMA, dengan perpindahan ultimit (δ_t) arah X = 8,68 cm, namun kinerja yang diperlihatkan oleh struktur sudah ada yang melewati kondisi LS bahkan mengalami *collapse*. Untuk arah Y Sesuai dengan kriteria kinerja batas ultimit SNI, dengan perpindahan ultimit (δ_t) arah Y = 0,85 cm, kinerja yang diperlihatkan oleh struktur tidak ada yang melewati kondisi LS. Sedangkan dengan kriteria koefisien perpindahan FEMA, dengan perpindahan ultimit (δ_t) arah Y = 8,53 cm, kinerja yang diperlihatkan oleh struktur sudah ada yang melewati kondisi LS bahkan mengalami *collapse*. Sedangkan penelitian yang penulis lakukan merupakan analisis bangunan perkantoran dengan kondisi eksisting 4 lantai yang memasuki kategori resiko bangunan II dan terhadap penambahan lantai menjadi 5 lantai, yang menggunakan analisis *pushover* untuk meninjau kinerja bangunan berdasarkan metode SNI, FEMA, dan ATC-40, dengan program bantu ETABS.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah diuraikan, maka dapat disimpulkan permasalahan yang ditinjau sebagai berikut:

1. Bagaimana pemodelan struktur gedung yang ditinjau menggunakan ETABS dan penerapannya dengan prosedur analisis *pushover* terhadap kondisi awal gedung sebanyak 4 lantai dan penambahan 1 lantai menjadi 5 lantai.
2. Bagaimana *output* dari hasil analisis *pushover* pada pemakaian program bantu ETABS terhadap bangunan *low rise building* dan *medium rise building*.
3. Bagaimana pola keruntuhan gedung sebelum dan sesudah ditambahkan satu tingkat yang dianalisis dengan *pushover*.
4. Bagaimana *performance point* dan kriteria dari gedung yang ditinjau dengan ATC-40 dan FEMA 356.

1.3 Batasan Masalah

Dalam analisis *pushover* ini batasan masalah yang digunakan sebagai berikut:

1. Analisis yang dilakukan hanya pada struktur atas gedung.
2. Pengaruh pondasi tidak ditinjau dalam analisis bangunan.
3. Struktur gedung terdiri dari 4 lantai dan berfungsi sebagai gedung perkantoran dan diasumsikan dapat penambahan 1 lantai saja.
4. Struktur yang digunakan adalah struktur beton, meliputi:
 - a. Struktur portal beton bertulang.
 - b. Pelat lantai beton bertulang.
 - c. *Lift* dan tangga.
5. Struktur gedung yang ditinjau merupakan struktur beton bertulang yang beraturan, dengan sistem rangka.

6. Pembebanan mengikuti: Peraturan Pembebanan Indonesia untuk Rumah dan Gedung SNI 1727:2020, meliputi:
 - a. Beban mati (berat sendiri stuktur).
 - b. Beban hidup.
 - c. Beban lateral (berupa beban gempa sesuai dengan SNI 03-1726-2019 Tata Cara Perencanaan Ketahanan Gempa untuk Gedung, tanpa memperhitungkan beban angin).
7. Batasan kriteria kinerja menggunakan ATC-40 dan FEMA 356.
8. Perilaku struktur dianalisis menggunakan metode *pushover* dengan program bantu ETABS.
9. Kinerja struktur gedung dibatasi pada kondisi *Life Safety* (LS).

1.4 Tujuan Penelitian

Tujuan penelitian ini adalah:

1. Mengetahui *Performance point* dan kriteria dari kondisi awal gedung dengan 4 lantai (*low rise building*) dan penambahan 1 lantai (*medium rise building*), yang ditinjau dengan ATC-40 dan FEMA 356.
2. Mengetahui pola keruntuhan bangunan sebelum ditambahkan satu tingkat dan sesudah ditambahkan.
3. Memperlihatkan skema kelelahan (distribusi sendi plastis) dari kondisi awal gedung dan sesudah ditambahkan 1 lantai.
4. Mengetahui keamanan struktur pada kondisi awal gedung dan setelah ditambahkan satu tingkat.

1.5 Manfaat Penelitian

Manfaat penelitian ini adalah:

1. Mengetahui perilaku struktur yang masuk kedalam jenis gedung *low rise building* dan *medium rise building* ketika mengalami pembebanan gempa dua arah.
2. Mengetahui kriteria kinerja struktur gedung sebelum dan sesudah mengalami penambahan lantai berdasarkan *performance level*.

II. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Studi Literatur

Fajar Nugroho (2016) telah melakukan penerapan analisis *pushover* dengan tujuan menentukan kinerja struktur gedung eksisting beton bertulang. Analisis diterapkan pada bagian struktur atas gedung, penelitian dimulai dengan menganalisis ulang struktur eksisting dua lantai, yang kemudian dilanjutkan analisis struktur gedung tiga lantai. Selanjutnya analisis *pushover* dilakukan untuk mendapatkan kinerja bangunan tersebut. Dari penelitian tersebut diperoleh hasil sesuai dengan kriteria kinerja batas ultimit SNI, dengan perpindahan ultimit (δ_t) arah X = 0,98 cm, kinerja yang diperlihatkan oleh struktur tidak ada yang melewati kondisi LS. Sedangkan dengan kriteria koefisien perpindahan FEMA, dengan perpindahan ultimit (δ_t) arah X = 8,68 cm, kinerja yang diperlihatkan oleh struktur sudah ada yang melewati kondisi LS bahkan mengalami *collapse*. Sesuai dengan kriteria kinerja batas ultimit SNI, dengan perpindahan ultimit (δ_t) arah Y = 0,85 cm, kinerja yang diperlihatkan oleh struktur tidak ada yang melewati kondisi LS. Sedangkan dengan kriteria koefisien perpindahan FEMA, dengan perpindahan ultimit (δ_t) arah Y = 8,53 cm, kinerja yang diperlihatkan oleh struktur sudah ada yang melewati kondisi LS bahkan mengalami *collapse*.

Hendarto Prasetyo, dkk (2020) dalam penelitian tugas akhir yang bertujuan untuk menentukan *performance point* berdasarkan ATC-40, dan FEMA 356. Metode penelitian yang digunakan adalah *response spectrum* dengan program bantu SAP2000 v14. Hasil *performance point* pada gedung yang ditinjau dengan nilai $S_a = 0,737$, dan $S_d = 0,200$ untuk *push X*, sedangkan untuk *push Y* $S_a = 0,680$, dan $S_d = 0,225$. Perhitungan ATC-40 pada gedung menunjukkan nilai *drift ratio* pada arah X sebesar 0,01165 dan pada arah Y sebesar 0,0127 dengan tingkat kinerja *Immediate Occupancy (IO)*. Hasil perhitungan FEMA 356 pada bangunan menunjukkan bahwa nilai target perpindahan lateral struktur pada arah X = 0,00437 (0,437%), dan pada arah dari Y = 0,006 (0,6%) dengan tingkat kinerja *Immediate Occupancy (IO)*. Dari hasil yang diperoleh dapat disimpulkan bahwa Gedung Rumah Sakit Gigi dan Mulut UGM, Prof. Soedomo termasuk pada tingkat kinerja IO (*Immediate Occupancy*), artinya bangunan aman dan dapat difungsikan kembali setelah gempa dan tidak terjadi kerusakan serius.

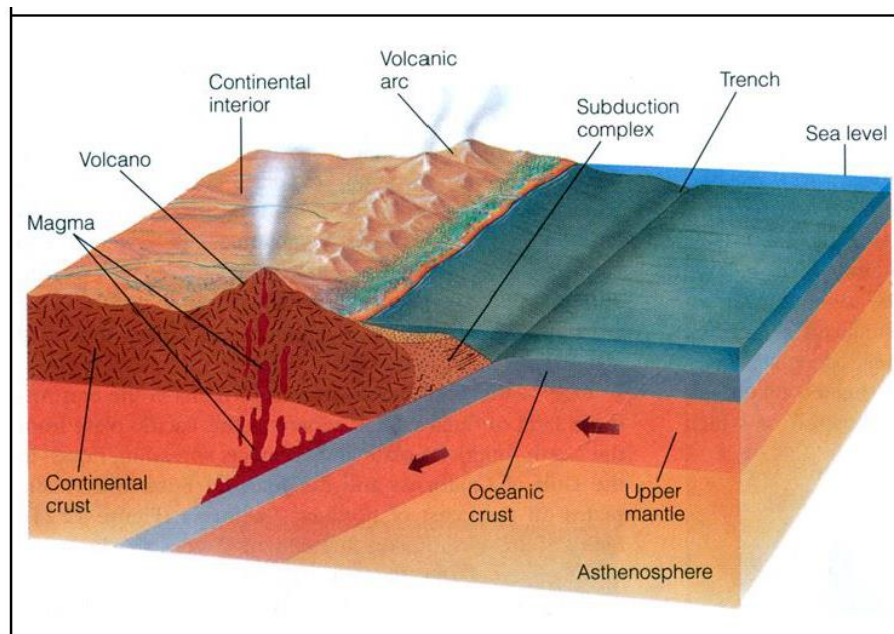
Muhamad Gigih Realdy, & Rika Nuraini (2019) telah melakukan penelitian studi kasus gedung beton bertulang dengan fungsi bangunan sebagai Rumah Sakit Umum Daerah. Bangunan ini selesai dibangun pada Desember 2018. Tinggi bangunan 27,95 m dengan total 6 lantai. Tingkat kinerja suatu struktur bangunan ditentukan oleh kriteria *drift* aktual yang dipersyaratkan oleh FEMA 356 (1997). Setelah melakukan analisis pushover, terlihat lokasi sendi plastis. Hasil analisa *pushover* dengan program bantu SAP2000 V.19.2.1 menghasilkan nilai target *displacement* FEMA 356 *push X* dan *push Y* sebesar 0,253 m, nilai *drift* aktual FEMA 356 sebesar 0,186 untuk target perpindahan *push X* dan *push Y* FEMA 440, dan nilai

drift aktual FEMA 356 sebesar 0,009. nilai *drift* sebenarnya untuk FEMA 440 adalah 0,006. Berdasarkan hasil penelitian, tingkat kinerja struktur gedung adalah *immediate occupancy*. Artinya, pada saat gempa terjadi, bangunan tidak terjadi kerusakan struktural, dan kekakuan dan kekuatan bangunan tetap hampir sama dengan struktur sebelum gempa. Bangunan bisa berperilaku *nonlinier* selama gempa bumi.

2.2 Konsep Dasar Mekanisme Gempa

2.2.1 Proses Gempa

Gempa bumi merupakan pelepasan energi dari permukaan bumi, yang bergerak melalui tanah. Gempa bumi terjadi karena tumbukan/gesekan antara lempeng tektonik (lempeng bumi) atau oleh penurunan dasar laut. Lempeng samudera yang lebih padat bertabrakan dengan lempeng benua di zona subduksi. Pergerakan lempeng melambat karena gesekan di mantel bumi. Pergerakan lambat ini menyebabkan akumulasi energi pada zona subduksi dan patahan. Hal ini menciptakan tarikan, tekanan dan geser di daerah ini. Ketika batas elastis pelat terlampaui, batuan akan retak, diikuti oleh pelepasan energi secara spontan. Proses tersebut menyebabkan partikel bergetar ke segala arah, disebut dengan gelombang seismik. Pergeseran/tumbukan antar lempeng tektonik menyebabkan lempeng tektonik bergerak (Gambar 2.1).

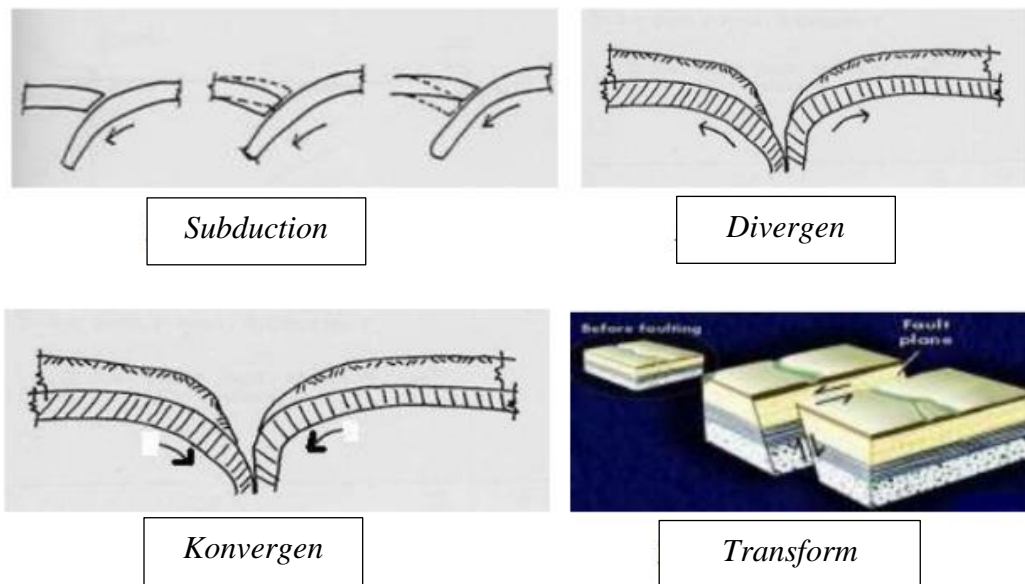


Gambar 2.1. Skema pergerakan permukaan tanah

Berikut adalah mekanisme pergeseran/tumbukan antar lempeng tektonik:

(Gambar 2.2) :

1. *Subduction*, yaitu satu lempeng tektonik menekuk ke bawah sedangkan lempeng tektonik lainnya sedikit naik.
2. Gerakan *Divergen*, yaitu dimana kedua lempeng tektonik bergerak ke atas kemudian saling menjauh.
3. Gerakan *Konvergen*, yaitu dimana dua lempeng tektonik mendekat dan bergerak ke bawah.
4. Gerakan *Transform*, yaitu lempeng tektonik yang satu bergerak vertikal atau horizontal ke lempeng lainnya.



Gambar 2.2. Skema pergeseran /benturan antar plat tektonik

Ketika terjadi gempa, struktur bangunan dipengaruhi oleh getaran gempa. Setelahnya, struktur dari bangunan akan merespon gempa. Struktur beresonansi dan memberikan kekuatan gaya-gaya dalam. Jika gaya gempa $<$ gaya pada struktur, dapat dikatakan struktur bangunan kuat dan aman untuk menahan beban seismik. Sebaliknya, jika gaya gempa $>$ gaya pada struktur, maka struktur tersebut tidak kuat dan tidak aman untuk menahan beban seismik, yang dapat menyebabkan struktur runtuh.

2.3 Struktur Gedung Bertingkat

Gedung bertingkat adalah bangunan dengan lantai lebih dari satu lantai secara vertikal (Sudarman, 2014). Karena keterbatasan lahan di daerah perkotaan yang

mahal, gedung-gedung bertingkat dibangun. Bangunan bertingkat dikelompokkan menjadi:

1. Gedung bertingkat rendah (*low rise building*) yaitu gedung dengan ketinggian \leq 15 m atau dengan jumlah lantai 2 - 4 lantai.
2. Gedung bertingkat menengah (*middle rise building*) yaitu gedung dengan ketinggian 15 - 40 m atau dengan jumlah lantai 5 – 10 lantai.
3. Gedung bertingkat tinggi (*high rise building*) yaitu gedung dengan ketinggian 40 sampai dengan 150 m atau dengan jumlah lantai 10 – 40 lantai.
4. Gedung pencakar langit (*sky scrapper*) dengan ketinggian lebih dari 40 lantai.

2.4 Ketentuan Umum Bangunan Gedung dalam Pengaruh Gempa

2.4.1 Faktor Keutamaan

Faktor keutamaan untuk kategori risiko yang berbeda untuk konstruksi arsitektur dan non-struktural disajikan pada Tabel 2.1. Pengaruh gempa rencana pada bangunan harus dikalikan dengan faktor keutamaan gempa (I_e) menurut Tabel 2.2. Khususnya dalam kasus struktur gedung dengan kategori risiko IV, jika pintu masuk diperlukan untuk pengoperasian struktur yang berdekatan, maka struktur yang berdekatan harus dirancang berdasarkan kategori risiko IV.

Tabel 2.1 Kategori risiko bangunan gedung dan nongedung untuk beban gempa

Jenis pemanfaatan	Kategori risiko
<p>Gedung dan nongedung yang memiliki risiko rendah terhadap jiwa manusia pada saat terjadi kegagalan, termasuk, tapi tidak dibatasi untuk, antara lain:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Fasilitas pertanian, perkebunan, perternakan, dan perikanan - Fasilitas sementara - Gudang penyimpanan - Rumah jaga dan struktur kecil lainnya 	I
<p>Semua gedung dan struktur lain, kecuali yang termasuk dalam kategori risiko I, III, IV, termasuk, tapi tidak dibatasi untuk:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Perumahan - Rumah toko dan rumah kantor - Pasar - Gedung perkantoran - Gedung apartemen/ rumah susun - Pusat perbelanjaan/ mall - Bangunan industri - Fasilitas manufaktur - Pabrik 	II
<p>Gedung dan nongedung yang memiliki risiko tinggi terhadap jiwa manusia pada saat terjadi kegagalan, termasuk, tapi tidak dibatasi untuk:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Bioskop - Gedung pertemuan - Stadion - Fasilitas kesehatan yang tidak memiliki unit bedah dan unit gawat darurat - Fasilitas penitipan anak - Penjara - Bangunan untuk orang jompo <p>Gedung dan nongedung, tidak termasuk kedalam kategori risiko IV, yang memiliki potensi untuk menyebabkan dampak ekonomi yang besar dan/atau gangguan massal terhadap kehidupan masyarakat sehari-hari bila terjadi kegagalan, termasuk, tapi tidak dibatasi untuk:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Pusat pembangkit listrik biasa - Fasilitas penanganan air - Fasilitas penanganan limbah - Pusat telekomunikasi <p>Gedung dan nongedung yang tidak termasuk dalam kategori risiko IV, (termasuk, tetapi tidak dibatasi untuk fasilitas manufaktur, proses, penanganan, penyimpanan, penggunaan atau tempat pembuangan bahan bakar berbahaya, bahan kimia berbahaya, limbah berbahaya, atau bahan yang mudah meledak) yang mengandung bahan beracun atau peledak di mana jumlah kandungan bahannya melebihi nilai batas yang disyaratkan oleh instansi yang berwenang dan cukup menimbulkan bahaya bagi masyarakat jika terjadi kebocoran.</p>	III

Tabel 2.1. Kategori risiko bangunan gedung dan nongedung untuk beban gempa (Lanjutan)

Jenis pemanfaatan	Kategori risiko
<p>Gedung dan nongedung yang dikategorikan sebagai fasilitas yang penting, termasuk, tetapi tidak dibatasi untuk:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Bangunan-bangunan monumental - Gedung sekolah dan fasilitas pendidikan - Rumah ibadah - Rumah sakit dan fasilitas kesehatan lainnya yang memiliki fasilitas bedah dan unit gawat darurat - Fasilitas pemadam kebakaran, ambulans, dan kantor polisi, serta garasi kendaraan darurat - Tempat perlindungan terhadap gempa bumi, tsunami, angin badai, dan tempat perlindungan darurat lainnya - Fasilitas kesiapan darurat, komunikasi, pusat operasi dan fasilitas lainnya untuk tanggap darurat - Pusat pembangkit energi dan fasilitas publik lainnya yang dibutuhkan pada saat keadaan darurat - Struktur tambahan (termasuk menara telekomunikasi, tangki penyimpanan bahan bakar, menara pendingin, struktur stasiun listrik, tangki air pemadam kebakaran atau struktur rumah atau struktur pendukung air atau material atau peralatan pemadam kebakaran) yang disyaratkan untuk beroperasi pada saat keadaan darurat <p>Gedung dan nongedung yang dibutuhkan untuk mempertahankan fungsi struktur bangunan lain yang masuk ke dalam kategori risiko IV.</p>	IV

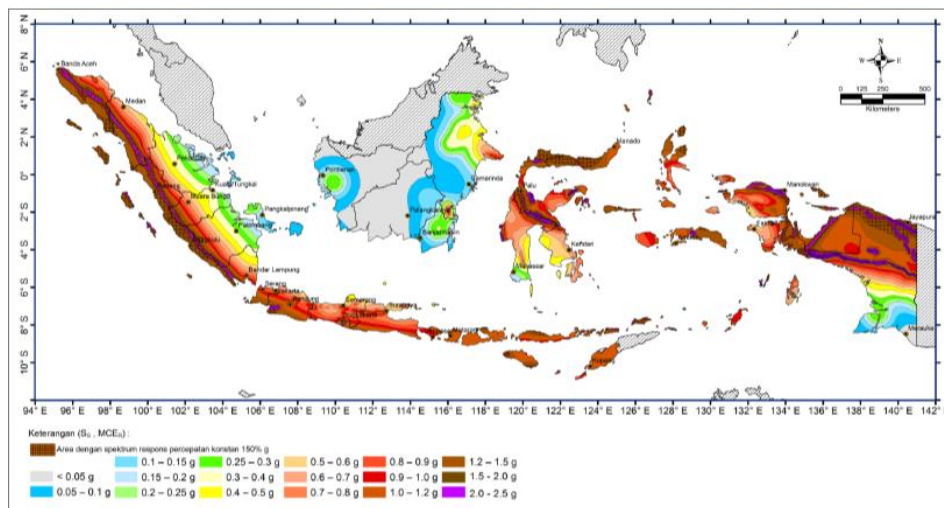
Tabel 2.2. Faktor keutamaan gempa

Kategori risiko	Faktor keutamaan gempa, Ie
I atau II	1,0
III	1,25
IV	1,50

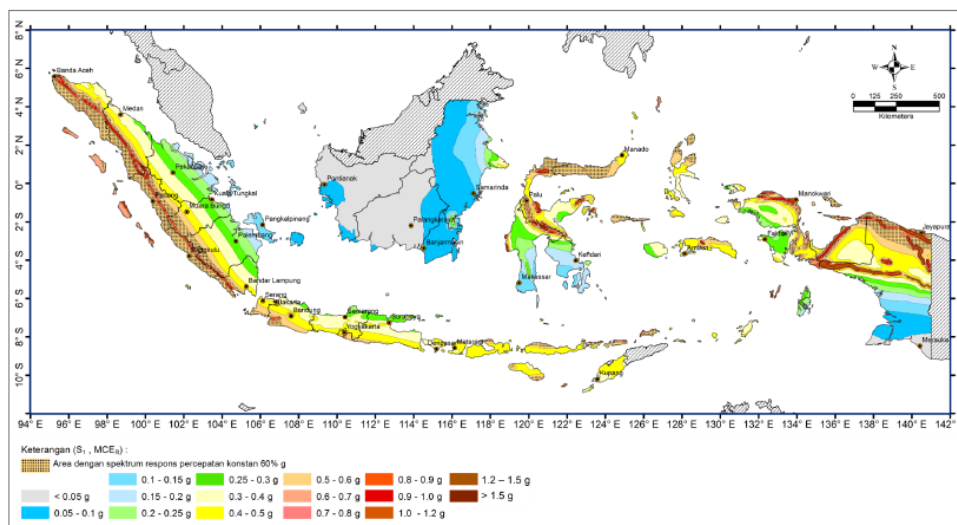
2.4.2 Parameter percepatan gempa terpetakan (S_s , S_1)

Parameter S_s (percepatan batuan dalam periode pendek) dan S_1 (percepatan batuan dasar periode 1 detik) ditentukan dari respons spektral 0,2 detik dan 1 detik pada peta pergerakan seismik tanah menurut Pasal 15 (SNI 1726:2019) dengan probabilitas terlampaui 2%, masing-masing dalam lima puluh tahun

(MCER, 2% dalam lima puluh tahun), dan dinyatakan sebagai angka desimal terhadap percepatan gravitasi.



Gambar 2.3 Parameter gerak tanah S_s , gempa maksimum yang dipertimbangkan risiko tertarget (MCER) wilayah Indonesia untuk spektrum respons 0,2-detik (redaman kritis 5 %)



Gambar 2.4 Parameter gerak tanah S_1 , gempa maksimum yang dipertimbangkan risiko tertarget (MCER) wilayah Indonesia untuk spektrum respons 0,2- detik (redaman kritis 5 %)

2.4.3 Kelas situs (SA - SF)

Klasifikasi suatu situs untuk memberikan kriteria desain seismik berupa faktor amplifikasi pada bangunan gedung. Ketika merumuskan kriteria desain seismik untuk gedung di permukaan tanah atau menentukan besarnya perolehan percepatan puncak gempa dari batuan dasar ke permukaan tanah untuk suatu lokasi, lokasi terlebih dahulu harus diklasifikasikan.

Profil tanah di lokasi wajib diklasifikasikan sesuai Tabel 2.3, dalam hal ini harus diterapkan kelas situs dengan kondisi terburuk. Jika tidak memiliki data tanah khusus di lokasi hingga kedalaman 30 m, sifat tanah harus diestimasi oleh ahli geoteknik yang memiliki izin pengesahan/pemeriksaan dengan menyusun laporan penyelidikan tanah berdasarkan kondisi geoteknik. Penetapan kelas situs SA dan SB tidak diperkenankan jika terdapat lebih dari 3 meter lapisan tanah antara dasar telapak atau rakit pondasi dan permukaan batuan dasar.

Tabel 2.3. Klasifikasi situs

Kelas Situs	V_s (m/dt)	N atau Nch	Su (kPa)
SA (batuan keras)	> 1500	N/A	N/A
SB (batuan)	750 s/d 1500	N/A	N/A
SC (tanah keras, sangat padat dan batuan lunak)	350 s/d 750	> 50	≥ 100
SD (tanah sedang)	175 s/d 350	15 s/d 50	50 s/d 100
SE (tanah lunak)	< 175	< 15	< 50
	Atau setiap profil tanah yang mengandung lebih dari 3 m tanah dengan karakteristik sebagai berikut: 1. Indeks plastisitas, $PI > 20$ 2. Kadar air, $w \geq 40\%$ 3. Kuat geser niralir $S_u \ll 25$ kPa		

Tabel 2.3 Klasifikasi situs (Lanjutan)

Kelas Situs	V_s (m/dt)	N atau Nch	Su (kPa)
SF (tanah khusus, yang membutuhkan investigasi geoteknik spesifik dan analisis respon spesifik-situs)			Setiap profil lapisan tanah yang memiliki salah satu atau lebih dari karakteristik berikut: 1. Rawan dan erpotensi gagal atau runtuh 2. Lempung sangat organik dan/atau gambut ($H > 3m$) 3. Lempung berplastisitas sangat tinggi ($PI > 75$) 4. Lapisan lempung lunak ($Su < 50$ kPa)

Catatan: N/A = tidak dapat dipakai

2.4.4. Koefisien-koefisien situs dan parameter-parameter respons spektral percepatan gempa maksimum yang dipertimbangkan risiko-tertarget *Maximum Considered Earthquake* (MCER)

Untuk menentukan respon spektral tanah terhadap percepatan seismik MCER, diperlukan faktor amplifikasi seismik dengan periode 0,2 s dan periode 1 s. Perbesaran meliputi perbesaran getaran bergantung percepatan dalam getaran periode pendek (F_a) dan perbesaran bergantung percepatan yang mewakili getaran periodik 1 detik (F_v). Parameter respons percepatan spektral untuk periode pendek (S_M) dan periode 1 detik (S_{M1}) yang menyesuaikan dengan pengaruh klasifikasi lokasi ditentukan dengan rumus sebagai berikut:

$$S_{Ms} = F_a \times S_s \dots\dots\dots (2-4)$$

$$S_{M1} = F_v \times S_1 \dots\dots\dots (2-5)$$

Keterangan:

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

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

Koefisien situs F_a dan F_v mengikuti Tabel 2.4 dan Tabel 2.5. Jika kelas situs SE digunakan sebagai kelas situs berdasarkan Pasal 8 (SNI 1726:2019), maka nilai F_a tidak boleh lebih rendah dari 1,2. Jika prosedur desain yang digunakan menurut Pasal 8 (SNI 1726:2019), maka nilai F_a harus ditentukan menurut Pasal 8.8.1 (SNI 1726:2019) dan nilai F_v , SMS dan SM1 tidak perlu ditentukan lebih lanjut.

Tabel 2.4. Koefisien situs, F_a

Kelas Situs	Parameter respons spektral percepatan gempa (MCE _R) terpetakan pada periode pendek, T=0,2 detik, S_s					
	$S_s \leq 0,25$	$S_s = 0,5$	$S_s = 0,75$	$S_s = 1,0$	$S_s \geq 1,25$	$S_s \geq 1,5$
SA	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
SB	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9
SC	1,3	1,3	1,2	1,2	1,2	1,2
SD	1,6	1,4	1,2	1,1	1,0	1,0
SE	2,4	1,7	1,3	1,1	0,9	0,8
SF	SS^a					

CATATAN:

(a) SS = Situs yang memerlukan investigasi geoteknik spesifik dan analisis respons situs-spesifik, lihat 0

Tabel 2.5. Koefisien situs, F_v

Kelas Situs	Parameter respons spektral percepatan gempa (MCE _R) terpetakan pada periode 1 detik, S_1					
	$S_s \leq 0,1$	$S_s = 0,2$	$S_s = 0,3$	$S_s = 0,4$	$S_s \geq 0,5$	$S_s \geq 0,6$
SA	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
SB	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
SC	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,4
SD	2,4	2,2	2,0	1,9	1,8	1,7
SE	4,2	3,3	2,8	2,4	2,2	2,0
SF	SS^a					

CATATAN:

(a) SS = Situs yang memerlukan investigasi geoteknik spesifik dan analisis respons situs-spesifik, lihat 0

2.4.5. Parameter percepatan spektral desain

Parameter desain untuk percepatan spektral untuk periode pendek dan untuk periode 1 detik, 1 harus ditentukan dengan rumus berikut:

$$S_{DS} = \frac{2}{3} \times S_{MS} \dots\dots\dots (2-6)$$

$$S_{D1} = \frac{2}{3} \times S_{M1} \dots\dots\dots (2-7)$$

2.4.6. Spektrum respons desain

Jika spektrum respons desain dibutuhkan pada prosedur ini dan prosedur gerakan tanah spesifik lokasi tidak digunakan, kurva spektrum respons desain wajib dikembangkan berdasarkan pada Gambar 2.5 dan dengan mempertimbangkan ketentuan berikut:

1. Untuk periode yang lebih kecil dari T_0 , spektrum respons percepatan desain, S_a , harus diambil dari persamaan;

$$S_a = S_{DS} \left(0,4 + 0,6 \frac{T}{T_0} \right) \dots\dots\dots (2-8)$$

2. Untuk periode lebih besar dari atau sama dengan T_0 dan lebih kecil dari atau sama dengan T_s , spektrum respons percepatan desain, S_a , sama dengan S_{DS} ;

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

$$S_a = \frac{SD1}{T} \dots\dots\dots (2-9)$$

4. Untuk periode lebih besar dari T_L , respons spektral percepatan desain, S_a , diambil berdasarkan persamaan:

$$S_a = \frac{SD1T_L}{T} \dots\dots\dots (2-10)$$

Keterangan:

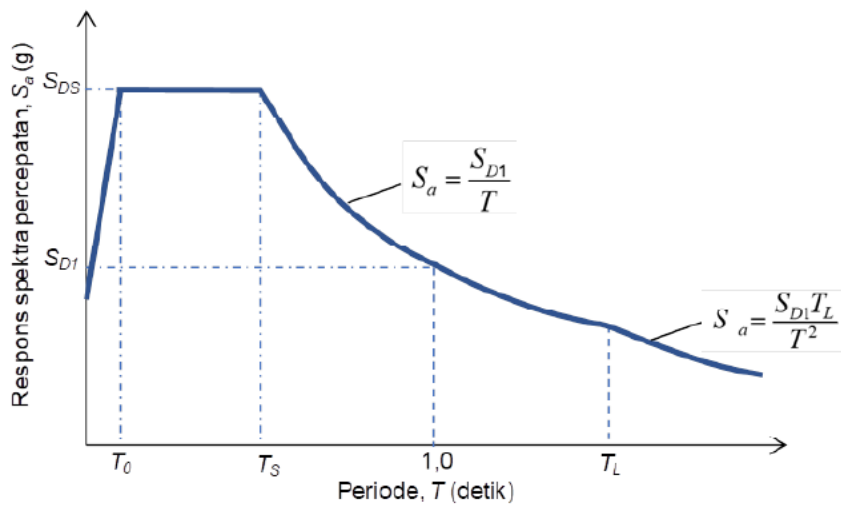
SDS = parameter respons spektral percepatan desain pada periode pendek;

$SD1$ = parameter respons spektral percepatan desain pada periode 1 detik;

T = periode getar fundamental struktur.

$$T_0 = 0,2 \frac{SD1}{SDS} \dots\dots\dots (2-11)$$

$$T_s = \frac{SD1}{SDS} \dots\dots\dots (2-12)$$



Gambar 2.5 Spektrum respons desain

2.4.7. Kategori desain seismik (A-D)

Struktur harus ditentukan memiliki kategori desain seismik menurut Pasal 6.5 (SNI 1726:2019). Struktur kategori risiko I, II atau III yang parameter percepatan respons spektral $S_1 \geq 0,75$ dipetakan dalam 1 detik didefinisikan sebagai struktur kategori desain seismik E. Struktur yang berkategori risiko IV yang berlokasi di mana parameter respons spektral percepatan terpetakan pada periode 1 detik, $S_1 \geq 0,75$, harus ditetapkan sebagai struktur dengan kategori desain seismik F. Semua struktur lainnya harus ditetapkan kategori desain seismiknya berdasarkan kategori risikonya dan parameter respons spektral percepatan desainnya, SDS dan SD1 sesuai dengan kategori risiko dan parameter respons sesuai Pasal 6.3 (SNI 1726:2019). Berdasarkan Tabel 2.6 dan 2.7, setiap bangunan dan struktur wajib dimasukkan kategori desain seismik yang lebih parah tanpa memperhatikan nilai periode getaran fundamental T dari struktur. Jika $S_1 < 0,75$, kategori desain seismik hanya dapat ditentukan sesuai dengan Tabel 2.6, bila semua kondisi berikut berlaku:

1. Di masing-masing dari dua arah ortogonal, perkiraan periode fundamental struktur, T_a , mengacu pada Pasal 7.8.2.1 (SNI 1726:2019), kurang dari $0,8T_s$, di mana T_s mengacu pada Pasal 6.4 (SNI 1726:2019);
2. Pada masing-masing dari dua arah ortogonal, periode fundamental struktur dipakai untuk menghitung simpangan antara lantai kurang dari T_s ;
3. Persamaan (2-14) dipakai untuk menentukan koefisien respon seismik C_s ;
4. Diafragma struktural bersifat kaku sebagaimana dimaksud dalam Pasal

7.3.1 (SNI 1726:2019) atau untuk membran fleksibel jarak antar elemen vertikal yang memikul gaya gempa tidak lebih dari 12 m.

Tabel 2.6. Kategori desain seismik berdasarkan parameter respons percepatan pada periode pendek

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

Tabel 2.7. Kategori desain seismik berdasarkan parameter respons percepatan pada periode 1 detik

Nilai SD_1	Kategori Risiko	
	I atau II atau III	IV
$SD_1 < 0,067$	A	A
$0,067 \leq SD_1 \leq 0,133$	B	C
$0,133 \leq SD_1 \leq 0,20$	C	D
$0,20 \leq SD_1$	D	D

Tabel 2.8. Prosedur analisis yang diizinkan

Kategori desain seismik	Karakteristik struktur	Analisis gaya lateral ekuivalen	Analisis spektrum respons ragam	Prosedur respons riwayat waktu seismik
B, C	Semua struktur			
D, E, F	Bangunan dengan kategori risiko I atau II yang tidak melebihi 2 tingkat diatas dasar			
	Struktur tanpa ketidakberaturan struktural dan ketinggiannya tidak melebihi 48,8 m			
	Struktur tanpa ketidakberaturan struktural dengan ketinggian melebihi 48,8 m dan $T < 3,5 T_s$			
	Struktur dengan ketinggian tidak melebihi 48,8 m dan hanya memiliki ketidakberaturan horizontal tipe 2,3,4 atau 5 atau ketidakberaturan vertikal tipe 4, 5a atau 5b			
	Semua struktur lainnya	TI		

CATATAN I: Diizinkan, TI: Tidak Diizinkan

2.4.8. Sistem struktur dan parameter sistem (R , C_d , Ω_0)

Sistem penahan untuk menahan gaya seismik lateral dan vertikal wajib sesuai dengan salah satu jenis yang ditunjukkan pada Tabel 2.9. Klasifikasi masing-masing tipe didasarkan untuk elemen vertikal yang dipakai menahan gaya seismik lateral. Pada sistem struktur yang dipakai harus memenuhi batasan sistem struktur dan batasan ketinggian struktur, seperti terlihat pada Tabel 2.9. Seperti ditunjukkan pada Tabel 2.9, faktor koreksi respons yang sesuai R , faktor kekuatan berlebih sistem Ω_0 , dan faktor pembesaran defleksi C_d harus digunakan untuk menentukan geser pondasi, gaya desain elemen, dan deviasi tingkat desain antar lantai.

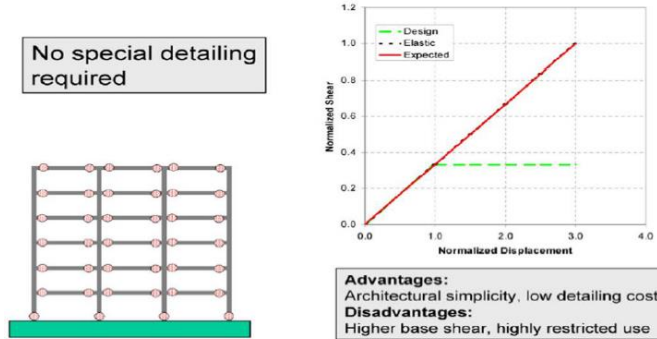
Setiap sistem gaya gempa yang dipilih wajib dirancang dan dirinci berdasarkan persyaratan khusus untuk sistem tersebut dalam dokumen referensi yang berlaku yang tercantum dalam Tabel 2.9.

Tabel 2.9. Faktor R , C_d , dan Ω_0 , untuk sistem penahan gaya gempa

Sistem penahan gaya seismik	Koefisien modifikasi respons, R	Faktor Kuat lebih sistem Ω_0	Faktor Pembesaran defleksi, C_d	Batasan sistem dan tinggi struktur $h_n(m)c$				
				Kategori desain				
				B	C	Dd	Ed	Fe
Sistem Rangka Beton Pemikul Momen								
Khusus	8	3	5 ½	TB	TB	TB	TB	TB
Menengah	5	3	4 ½	TB	TB	TI	TI	TI
Biasa	3	3	2 ½	TB	TI	TI	TI	TI

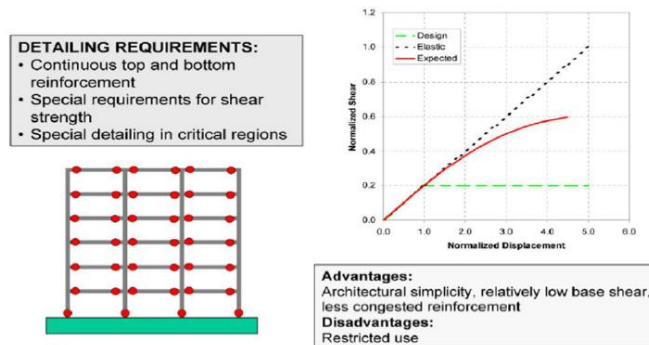
Catatan: TB = Tidak Dibatasi dan TI = Tidak Diiijinkan.

Ordinary Concrete Moment Frame



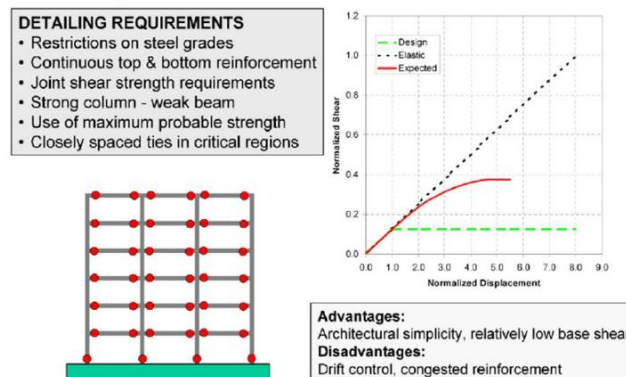
Gambar 2.6 Sistem Rangka Pemikul Momen Biasa

Intermediate Concrete Moment Frame



Gambar 2.7 Sistem Rangka Pemikul Momen Menengah

Special Concrete Moment Frame



Gambar 2.8 Sistem Rangka Pemikul Momen Khusus
Sumber: Aplikasi SNI Gempa (1726-2012) for Dummies

2.4.9 Gaya geser dasar seismik

Geser dasar seismik, V , dalam arah yang ditentukan harus sesuai menurut Persamaan 2-13.

$$V = C_s W \dots\dots\dots (2-13)$$

dengan:

V = Geser dasar seismik.

C_s = Koefisien respons seismik.

W = Berat seismik efektif.

Untuk perhitungan koefisien respons seismik, C_s , harus ditentukan sesuai dengan Persamaan 2-14.

$$C_s = \frac{SDS}{\frac{R}{I_e}} \dots\dots\dots (2-14)$$

Keterangan:

SDS = parameter percepatan respons spektral desain dalam rentang periode pendek seperti ditentukan dalam Pasal 6.3 atau Pasal 6.9 (SNI 1726:2019)

R = koefisien modifikasi respons dalam Tabel 12

I_e = faktor keutamaan gempa yang ditentukan sesuai dengan Pasal 4.1.2 (SNI 1726:2019).

2.4.10. Penentuan periode fundamental

Periode fundamental T struktur pada arah yang ditinjau wajib didapatkan dengan menggunakan sifat struktural dan deformasi elemen penahan pada analisis yang diuji. Periode fundamental T struktur tidak diperbolehkan melampaui batas atas periode terhitung (C_u) yang ditentukan dari Persamaan 2-15 dan koefisien hasil dari perkiraan periode fundamental T_a . Sebagai alternatif untuk melakukan analisis untuk menentukan periode dasar T struktur, dapat langsung menggunakan perkiraan periode bangunan T_a .

Penentuan periode fundamental pendekatan (T_a), dalam detik, harus ditentukan oleh Persamaan 2-15.

$$T_a = C_t \times h_n^x \dots\dots\dots (2-15)$$

dengan:

h_n = Ketinggian struktur.

C_t, x = Koefisien periode, (ditentukan dalam Tabel 2.10)

Tabel 2.10. Nilai parameter periode pendekatan C_t dan x

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

Tabel 2.11. Koefisien untuk batas atas pada periode yang dihitung

Parameter percepatan respons spektral desain pada 1 detik, S_{DI}	Koefisien C_u
$\geq 0,4$	1,4
0,3	1,4
0,2	1,5
0,15	1,6
$\leq 0,1$	1,7

2.4.11. Distribusi vertikal gaya gempa

Gaya seismik lateral, F_x , (kN) di sebarang tingkat harus ditentukan dari Persamaan 2-16.

$$F_x = C_{vx}V \dots\dots\dots (2-16)$$

$$C_{vx} = \frac{W_x \times h_x^k}{\sum_{i=1}^n W_i h_i^k} \dots\dots\dots (2-17)$$

Keterangan:

C_{vx} = faktor distribusi vertikal

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

w_i dan w_x = bagian berat seismik efektif total struktur (W) yang

ditempatkan atau dikenakan pada tingkat i atau x

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

k = eksponen yang terkait dengan periode struktur dengan nilai

sebagai berikut:

untuk struktur dengan $T \leq 0,5$ detik, = 1

untuk struktur dengan $T \geq 2,5$ detik, = 2

untuk struktur dengan $0,5 < T < 2,5$ detik, = 2 atau ditentukan dengan interpolasi linier antara 1 dan 2.

2.4.12. Distribusi horizontal gaya gempa

Geser tingkat desain gempa di semua tingkat (V_x), harus ditentukan dari Persamaan 2-18.

$$V_x = \sum_{i=x}^n F_i \dots\dots\dots (2-18)$$

dengan:

V_x = Geser tingkat desain gempa di semua tingkat.

F_i = Bagian dari geser dasar seismik.

2.5. Kombinasi Pembebanan

Kombinasi pembebanan yang digunakan mengacu pada SNI 1726:2019. Kombinasi beban untuk metode ultimit struktur, komponen struktur dan elemen pondasi harus sedemikian rupa sehingga kekuatan desain sama dengan atau lebih besar dari pengaruh beban terfaktor.

Menurut Budiono dan Supriatna (2011), faktor dan kombinasi beban untuk beban mati nominal, beban hidup nominal, dan beban gempa nominal adalah:

1. 1,4 DL
2. 1,2 DL + 1,6 LL
3. 1,2 DL + 1 LL \pm 0,3 (ρ QE + 0,2 SDS DL) \pm 1 (ρ QE + 0,2 SDS DL)
4. 1,2 DL + 1 LL \pm 1 (ρ QE + 0,2 SDS DL) \pm 0,3 (ρ QE + 0,2 SDS DL)

$$5. 0,9 DL \pm 0,3 (\rho QE - 0,2 SDS DL) \pm 1 (\rho QE - 0,2 SDS DL)$$

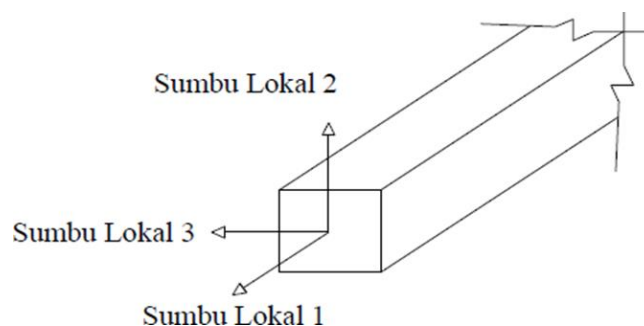
$$6. 0,9 DL \pm 1 (\rho QE + 0,2 SDS DL) \pm 0,3 (\rho QE - 0,2 SDS DL) 1,4D$$

2.6. Pemodelan Sendi Plastis

Ketika struktur gedung terdampak beban seismik pada tingkat/kondisi tertentu, sendi plastis (*hinge*) ditempatkan pada balok-balok pada gedung. Sendi plastis adalah suatu bentuk elemen struktur (balok dan kolom) yang tidak kuat menahan gaya dalam. Desain bangunan diharuskan sesuai dengan konsep desain kolom kuat dan balok lemah. Ketika sebuah struktur runtuh, balok-balok yang runtuh lebih dulu. Jika kolom runtuh lebih dulu, struktur akan langsung runtuh.

1. *Hinge* (Sendi plastis) properti balok

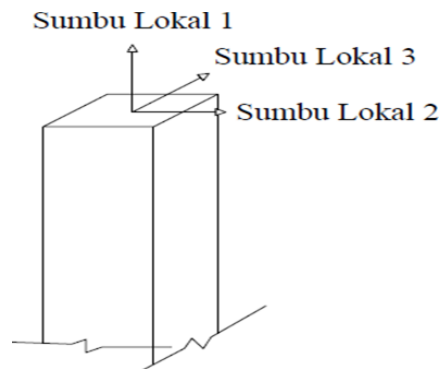
Data *hinge* properti pada tumpuan balok, adalah lokasi sendi plastis yang diharapkan. Setiap tumpuan balok dimodelkan dengan model momen M3, artinya sendi plastis hanya terjadi akibat momen pada arah sumbu lokal 3. Lokasi sumbu lokal 3 ditunjukkan pada Gambar 2.9.



Gambar 2.9 Posisi Sumbu lokal Balok Struktur

2. *Hinge* (Sendi plastis) Properti Kolom

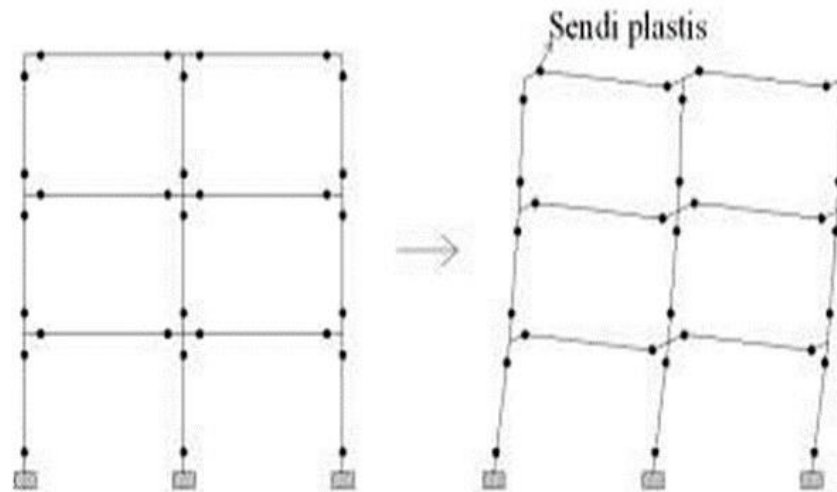
Data *hinge* pada kolom adalah Model P-M2-M3 yang artinya sendi plastis terjadi akibat interaksi gaya aksial (P) dan momen (M). Sumbu lokal 2 dan sumbu lokal 3 memiliki kapasitas lentur yang sama pada penelitian ini karena dimensi kolom berbentuk bujur sangkar dan tulangan kolom eksisting terdistribusi merata pada keempat sisinya. Sumbu lokal 2 dan 3 pada kolom struktur ditunjukkan pada Gambar 2.10.



Gambar 2.10 Posisi Sumbu lokal Kolom Struktur

3. Penentuan letak sendi plastis

Setelah menentukan properti sendi plastis dari data balok-kolom, perlu untuk menentukan lokasi sendi plastis yang diinginkan. Posisi 0,1 merupakan awal dari blok bersih, dan posisi 0,9 akhir dari blok bersih. Keduanya berada di depan kolom. Seperti halnya kolom, posisi 0,1 menunjukkan posisi awal panjang jaring kolom, dan posisi 0,9 menunjukkan posisi akhir panjang jaring kolom. Kedua lokasi ini berada di tepi muka balok (Gambar 2.11).



Gambar 2.11 Sendi plastis yang terjadi pada balok dan kolom

2.7. Analisis *Pushover*

Analisis statik nonlinier adalah prosedur analitis untuk menentukan perilaku keruntuhan suatu bangunan terhadap gempa bumi, yang juga dikenal sebagai analisis *pushover* atau analisis gaya dorong statis. Kecuali untuk struktur yang sederhana, maka analisis ini membutuhkan program komputer untuk dapat mewujudkannya pada bangunan nyata. Beberapa program komputer yang tersedia secara komersial adalah SAP2000, ETABS, GTStrudl, Adina.

Analisis *pushover* dilakukan dengan memberikan pola beban lateral statik pada struktur, yang setelahnya dinaikkan secara bertahap dengan faktor pengali sampai tercapai suatu target tertentu. Biasanya titik ini adalah titik di atap, atau lebih tepatnya pada pusat massa atap.

Analisis *pushover* menghasilkan kurva kapasitas yaitu kurva yang menampilkan hubungan antara gaya geser dasar (V) versus perpindahan titik di atap (D).

Pada proses *pushover*, struktur didorong sampai meleleh pada satu atau lebih lokasi dalam struktur. Kurva kapasitas menggambarkan keadaan linier sebelum mencapai keadaan leleh dan kemudian berperilaku non-linier.

Kurva *pushover* dipengaruhi oleh pola distribusi gaya lateral yang digunakan sebagai gaya dorong.

Tujuan dari analisis *pushover* adalah untuk memperkirakan gaya maksimum dan deformasi yang akan terjadi dan untuk mendapatkan informasi tentang bagian mana yang kritis. Selanjutnya dapat diketahui bagian yang membutuhkan perhatian khusus pada detail atau stabilitas. Cukup banyak penelitian yang menunjukkan bahwa analisis statik *pushover* dapat memberikan hasil yang memadai (dibandingkan dengan hasil analisis dinamik nonlinier) untuk bangunan normal dan tidak tinggi. Analisis *pushover* dapat dipakai sebagai alat bantu untuk perencanaan ketahanan gempa selama memenuhi kendala yang ada, yaitu:

1. Hasil analisis *pushover* masih berupa pendekatan, karena perilaku gempa sebenarnya bolak-balik selama siklus tertentu, sedangkan sifat beban dalam analisis *pushover* adalah statis monoton.
2. Pola pembebanan lateral yang dipilih untuk digunakan dalam analisis sangat penting.
3. Model analisis nonlinier harus memperhitungkan karakteristik beban deformasi inelastis dari elemen kritis dan efek $P-\Delta$.

2.7.1. Pembebanan pada Analisis Pushover

Analisis pushover dilakukan dalam dua tahap pembebanan, yaitu:

1. Pada tahap pertama, struktur gedung dibebani dengan beban gravitasi, yaitu kombinasi dari beban mati dan beban mati tambahan dengan koefisien beban 1,0 dan beban hidup dengan koefisien beban 0,25 sebagaimana diatur dalam ASCE 41-17 Pasal 7.2.2. Pada tahap ini, kondisi non-linier telah diperhitungkan.
2. Pada tahap kedua, analisis dilanjutkan dengan memberikan pola beban dorong lateral pada struktur. Pendefinisian fase kedua hanya dilakukan setelah fase pertama selesai, setelah itu opsi *Continue from State at End of Nonlinear Case* diaktifkan, dengan akhir analisis GRAV sebagai awal dari fase analisis kedua. Jenis beban adalah *Acceleration* untuk beban arah X dan untuk beban arah Y faktor skala yang digunakan adalah 1,0.

2.7.2. Tahapan Analisis Pushover

Tahapan yang digunakan dalam analisis *pushover* sebagai berikut:

1. Tentukan titik kontrol untuk mengontrol pergerakan struktur. catatan besar perpindahan titik kontrol dan gaya geser dasar yang digunakan untuk membentuk kurva *pushover*.
2. Memperoleh kurva *pushover* dari pola distribusi gaya lateral yang berbeda, terutama yang sama dengan distribusi gaya inersia, sehingga deformasi yang terjadi diharapkan mendekati atau mendekati deformasi akibat

gempa. Karena sifat gempa tidak pasti, maka perlu dibuat pola beban lateral yang berbeda untuk mendapatkan kondisi yang paling menentukan.

3. Menentukan estimasi besar perpindahan lateral selama gempa rencana (target perpindahan). Titik kontrol didorong hingga ke taraf tingkat perpindahan tersebut, yang menggambarkan perpindahan maksimum oleh gempa seismik rencana desain yang ditentukan.
4. Mengevaluasi tingkat kinerja struktur saat titik kontrol tepat target perpindahan: itulah inti dari perencanaan berbasis kinerja. Komponen struktural dan perilakunya terbilang memuaskan jika memenuhi kriteria yang ditetapkan, baik dari segi deformasi maupun persyaratan kekuatan. Karena memiliki komponen yang relatif banyak, proses ini harus dilakukan sepenuhnya oleh komputer.

2.7.3. Target perpindahan

Target perpindahan merupakan gaya dan perpindahan dari setiap bagian/elemen yang dihitung terhadap perpindahan yang ditentukan untuk titik kontrol yang dinamakan dengan notasi dt dan diperkirakan sebagai deformasi maksimum yang terjadi saat gedung terdampak gempa.

Untuk memperoleh perilaku struktur setelah keruntuhan, analisis *pushover* perlu dilakukan untuk membuat kurva hubungan antara gaya geser dasar dan deformasi lateral titik kontrol minimal 150% dari perpindahan target, dt .

Permintaan untuk membuat kurva *pushover* dengan target perpindahan setidaknya 150% adalah untuk melihat perilaku bangunan di luar kondisi

yang direncanakan. Perencana wajib memahami jika target perpindahan hanya rata-rata dari beban gempa rencana. Untuk bangunan dengan kekuatan di bawah spektrum desain elastis, perkiraan target perpindahan menjadi kurang akurat. 150% dari target perpindahan diharapkan menjadi rata-rata perkiraan ditambah 1 standar deviasi perpindahan bangunan untuk kekuatan lateral melebihi 25% dari kekuatan spektrum elastis.

Analisis *pushover* dilakukan dengan membuat pola beban lateral sebagai simulasi beban gempa dan harus diberikan bersamaan dengan efek gabungan dari beban sendiri dan tidak kurang dari 25% dari beban hidup yang dibutuhkan. Untuk setiap tingkat, beban lateral wajib diterapkan ke pusat gravitasi. Dibutuhkan setidaknya dua pola beban yang berbeda diberikan sebagai simulasi beban gempa yang bersifat acak, sehingga bisa memberikan ilustrasi pola mana yang memiliki pengaruh terburuk. Selanjutnya, beban wajib diberikan secara bertahap dalam satu arah (monotonik).

Kriteria untuk mengevaluasi tingkat kinerja kondisi bangunan berdasarkan pada gaya serta deformasi yang terjadi saat perpindahan titik kontrol seperti menggunakan perpindahan yang dimaksudkan. Maka parameter target perpindahan sangat krusial untuk perencanaan berbasis kinerja.

Terdapat beberapa cara untuk menentukan target perpindahan, dua diantaranya yaitu Metode Koefisien Perpindahan (FEMA 273/274, FEMA 356/440 dan ATC 40) dan Metode Spektrum Kapasitas (FEMA 274/440, ATC 40). Selain itu, ada persyaratan perpindahan dari SNI 1726-2019 yang bisa dijadikan kriteria kinerja.

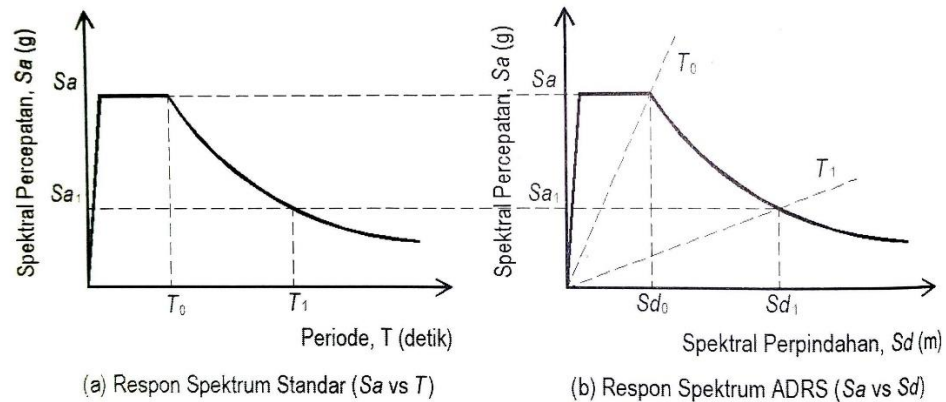
2.7.4. Metode *Capacity Spektrum* (*Applied Technology Council - 40*)

Metode *capacity Spektrum* adalah metode utama ATC-40, meskipun ditujukan untuk struktur beton bertulang, tetapi juga diterapkan secara luas untuk struktur lain seperti konstruksi gedung dengan struktur baja dan bangunan non gedung seperti fasilitas pembangkit listrik, jembatan, dermaga, dll.

Prosedur dalam metode spektrum kapasitas pertama-tama menampilkan kurva hubungan perpindahan dan gaya yang memperhitungkan kondisi inelastis struktur dan kemudian memplotnya dalam format ADRS (*acceleration displacement response spectrum*).

Format ini merupakan konversi sederhana dari kurva hubungan geser dasar ke perpindahan lateral titik kontrol menggunakan sistem propertis dinamis, yang hasilnya disebut kurva kapasitas. Gerakan tanah gempa juga dikonversi ke format ADRS. Hal ini memungkinkan kurva kapasitas diplot pada sumbu yang sama dengan gaya gempa yang dibutuhkan. Dalam format ini, waktu getaran ditampilkan sebagai garis radial dari pusat sumbu. Waktu getaran ekuivalen T_e dianggap sebagai sekan waktu getaran di mana titik gerakan seismik tanah harus dikurangi karena efek redaman ekuivalen yang menyatu pada kurva kapasitansi. Karena waktu getaran ekuivalen dan redaman adalah fungsi perpindahan, perpindahan untuk mendapatkan perpindahan inelastis maksimum (titik kinerja) adalah iteratif. Penetapan batas redaman yang setara

oleh ATC-40 untuk mengantisipasi pengurangan kekuatan dan kekakuan secara bertahap. (Gambar 2.12)



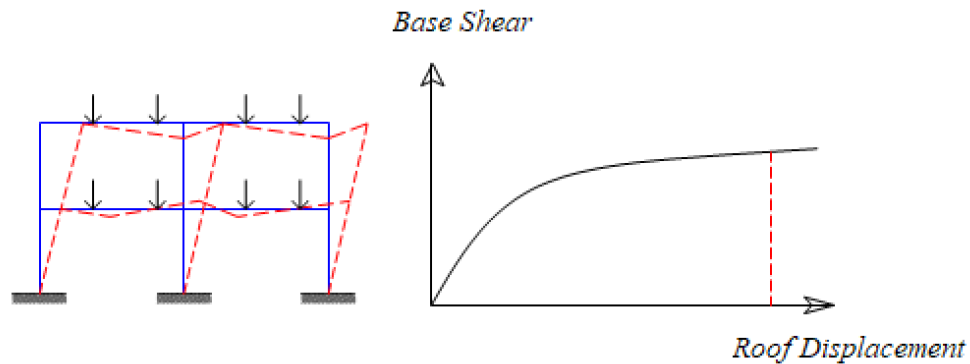
Gambar 2.12 (a) Respon Spektrum Standar (b) Respon Spektrum Format ADRS
Sumber: ATC-40, 1996

Capacity Spectrum Method (CSM) adalah cara untuk menentukan kinerja suatu struktur. Konsep dasar analisis static *pushover* nonlinier adalah memberikan pola beban statik tertentu dalam arah lateral yang dinaikkan secara bertahap (*incrementally*). Penambahan beban statis ini dihentikan sampai struktur mencapai simpangan yang diinginkan atau beban tertentu. Kurva kapasitas diperoleh dari analisis statik *pushover* nonlinier yang kemudian diproses lebih lanjut dengan metode tertentu, antara lain Metode Spektrum Kapasitas (CSM) [ATC-40, 1996; ATC-55, 2005].

A. Kurva kapasitas

Kurva kapasitas merupakan kurva yang menampilkan hubungan antara perpindahan atap dan gaya geser dasar, seperti yang ditunjukkan pada

Gambar 2.13. Hubungan tersebut selanjutnya ditampilkan menjadi kurva kapasitas struktur.



Gambar 2.13 Ilustrasi *Pushover* dan *Capacity Curve*

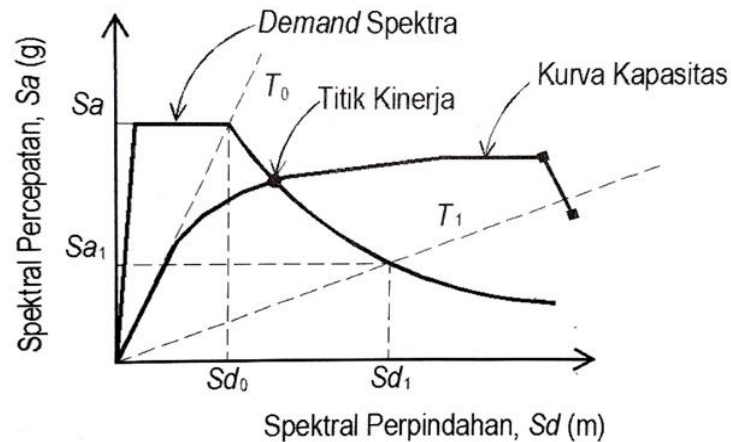
Metode ini terbilang sederhana, tetapi informasi yang diperoleh sangat berguna karena dapat menggambarkan respon inelastis struktur. Analisis ini bukan cara terbaik untuk memperoleh jawaban atas masalah analisis dan desain, tetapi relatif mudah untuk mendapatkan respons struktur nonlinier.

B. *Performance Point*

Performance point adalah titik di mana kurva kapasitas berpotongan dengan kurva respons spektrum seperti yang dipakai dalam metode spektrum kapasitas (ATC-40, 1996). Untuk mendapatkan gambaran yang lebih jelas, hal ini ditampilkan pada Gambar 2.14.

Informasi yang dapat diperoleh dari *performance point* ini mengenai redaman efektif dan periode bangunan akibat dari perubahan kekakuan struktur setelah terbentuknya sendi plastis. Berdasarkan informasi ini,

reaksi struktural seperti posisi sendi plastis dan nilai simpangan antar tingkat dapat diketahui.



Gambar 2.14 Penentuan Performance Point.
Sumber: ATC-40, 1996

C. Simpangan Antar Lantai Tingkat Ijin

Simpangan antar tingkat desain (Δ) tidak diperbolehkan melampaui simpangan antar tingkat ijin (Δ_a) seperti yang tertera pada Tabel 2.12 untuk semua tingkat.

Tabel 2.12. Simpangan antar lantai ijin, Δ_a

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

h_{sx} adalah tingkat dibawah tingkat X.

Sumber: ATC-40, 1996

D. Kriteria Bangunan Tahan Gempa Berbasis Kinerja

Kriteria dari struktur tahan gempa menurut ATC-40 adalah sebagai berikut:

1. *Immediate Occupancy (IO)*

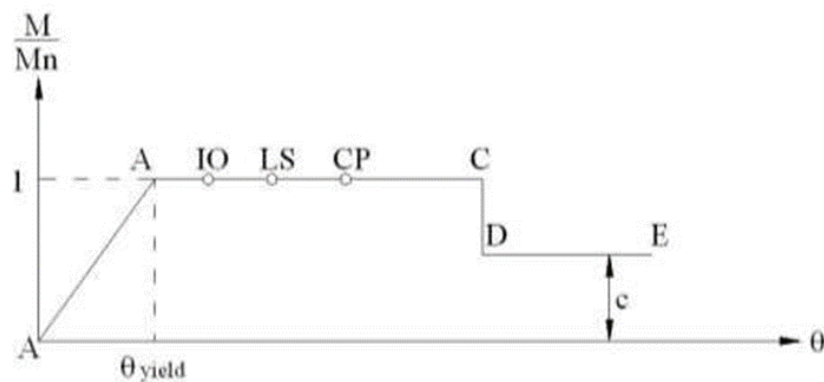
Ketika mengalami gempa bumi, struktur bangunan tahan terhadap gempa, tidak terdapat kerusakan pada bagian struktural maupun non struktural sehingga bangunan dapat segera difungsikan kembali.

2. *Life Safety (LS)*

Ketika terjadi gempa bumi, struktur bangunan kuat menahan gempa, dengan sedikit mengalami kerusakan pada bagian struktural.

3. *Collapse Prevention (CP)*

Ketika terjadi gempa bumi, struktur bangunan mengalami kerusakan pada bagian struktural yang sangat berat, tetapi belum runtuh.



Gambar 2.15 Kurva kriteria kinerja

Sumber: Jurnal tentang Evaluasi Kinerja Bangunan Baja Tahan Gempa dengan SAP 2000, Wiryanto Dewobroto.

Pada saat struktur gedung terkena gaya geser dasar (V_b), komponen struktur masih dalam keadaan elastis (A-B) pada kondisi magnitude seismik < seismik rencana (V_n). Kondisi leleh pertama diwakili oleh titik B. Ketika $V_b > V_y$, struktur bangunan pada kondisi plastis (B-C). Batas maksimum (V_b) dimana struktur dapat menahan gempa ditunjukkan oleh titik C. Ketika V_b terus meningkat, struktur mengalami degenerasi (C-D). Beban di titik D menunjukkan jika struktur sudah tidak mampu lagi menahan gaya seismik (V_b), tetapi masih mampu menahan beban gravitasi, dan jika terus bertambah struktur akan runtuh.

Menurut ATC-40, rumus yang dipakai untuk mengetahui batas rasio *drift*: sebagai berikut:

1. Maksimum total *drift*:

$$D_{max} = \frac{D_t}{H_{tot}} \dots\dots\dots (2-21)$$

2. Maksimum total *in-elastic drift*:

$$D_{imax} = \frac{(D_t - D_1)}{H_{tot}} \dots\dots\dots (2-22)$$

dengan:

D_t = Perpindahan atap total.

D_1 = Perpindahan pada kondisi sendi plastis pertama.

H_{tot} = Tinggi total struktur gedung.

Tabel 2.13. Batasan rasio *drift* atap menurut ATC-40

<i>Parameter</i>	<i>Performance Level</i>			
	<i>IO</i>	<i>Damage Control</i>	<i>LS</i>	<i>Structural Stability</i>
<i>Maksimum Total Drift</i>	0.01	0.01 s.d 0.02	0.02	$0,33 \frac{V_i}{P_i}$
<i>Maksimum Total Inelastik Drift</i>	0.005	0.005 s.d 0.015	No limit	No limit

Sumber: ATC-40, 1996

Tabel 2.14. Batasan Tipe bangunan pada *Capacity Spectrum Method*

<i>Shaking duration</i>	<i>Essentially new building</i>	<i>Average existing building</i>	<i>Poor existing building</i>
<i>Short</i>	A	B	C
<i>long</i>	B	C	C

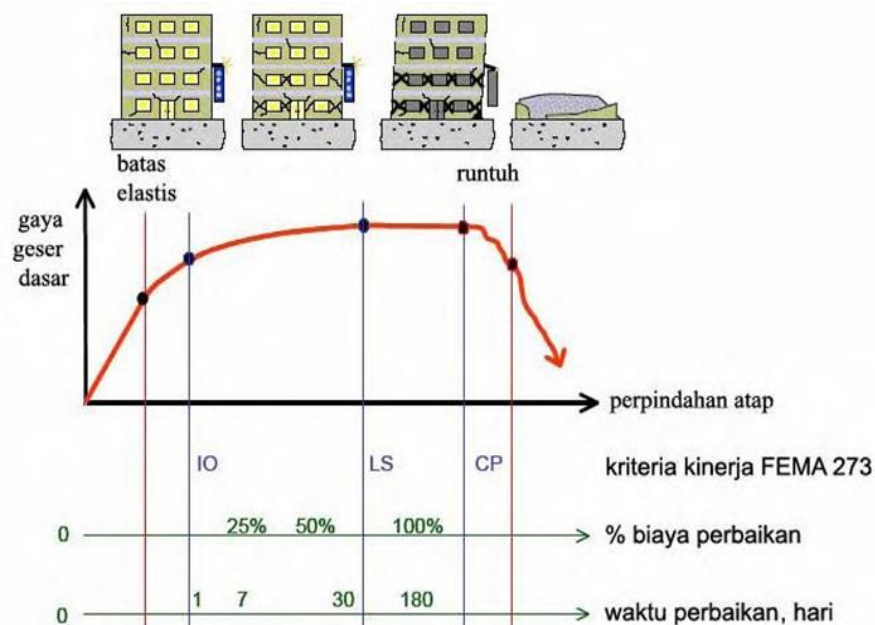
Sumber: ATC-40, 1996

2.7.5 Metode Koefisien Perpindahan (FEMA 356)

Displacement Coefficient Method (DCM) adalah metode yang dipakai untuk menentukan kinerja struktur bangunan. Konsep dasar analisis static *pushover* nonlinier yaitu memberikan pola beban statis tertentu pada arah lateral yang meningkat secara bertahap (*incremental*). Penghentian penambahan beban statis ini sampai struktur mencapai target atau beban tertentu. Hasil dari analisis ini, diperoleh kurva kapasitas yang kemudian diproses lebih lanjut dengan Metode Koefisien Perpindahan (DCM) [FEMA 356].

A. Kinerja Struktur Metode FEMA 356

Berdasarkan FEMA 356, struktur bangunan saat gempa dibagi menjadi beberapa kategori dan dapat dilihat pada Gambar 2.16.



Gambar 2.16: Tingkat Kinerja Struktur (FEMA 356).

Tabel 2.15: Kondisi bangunan pasca gempa dan kategori bangunan pada tingkat kinerja struktur (FEMA 356).

Tingkat Kinerja	Kondisi Bangunan Pasca Gempa	Kategori Bangunan
<i>Operational</i>	Bangunan tidak ada kerusakan yang berarti pada komponen struktural maupun non struktural. Secara spesifik ditandai dengan tidak ada pergeseran permanen pada bangunan, sebagian besar struktur dapat mempertahankan kekuatan dan kekakuannya, sedikit retak dan semua sistem penting pada gedung dapat beroperasi dengan normal	-

Tabel 2.15: Kondisi bangunan pasca gempa dan kategori bangunan pada tingkat kinerja struktur (FEMA 356), (Lanjutan).

Tingkat Kinerja	Kondisi Bangunan Pasca Gempa	Kategori Bangunan
<i>Life Safety</i>	Dalam kategori ini berarti bangunan pasca gempa terjadi beberapa kerusakan komponen struktur dan kekuatan serta kekakuannya berkurang. Struktur masih mempunyai kekuatan yang cukup untuk memikul beban-beban yang terjadi pada ambang keruntuhan. Komponen non structural masih ada tetapi tidak dapat berfungsi dan dapat digunakan kembali apabila telah dilakukan perbaikan.	Fasilitas-fasilitas umum, Gedung perkantoran, Perumahan, Gedung dll.
<i>Immediate Occupancy</i>	Bangunan tidak ada kerusakan yang berarti pada komponen struktural. Kekuatan dan kekakuan gedung masih hampir sama dengan kondisi sebelum struktur dilanda gempa. Pada komponen non struktural, peralatan, dan isi gedung umumnya masih aman, tetapi secara operasional tidak dapat bekerja karena kegagalan mekanik atau kurangnya utilitas.	Rumah sakit, Gudang bahan bakar/bahan berbahaya dll

B. Titik Kinerja Struktur Metode FEMA 356

Metode koefisien perpindahan FEMA 356 merupakan metode pendekatan yang menerapkan perhitungan langsung dari nilai global yang diterapkan pada struktur. Penyelesaian didapatkan dengan memodifikasi respon elastis sistem SDOF dengan koefisien C_0 , C_1 , C_2 , dan C_3 , sehingga

didapatkan target perpindahan atau perpindahan global maksimum (elastis dan inelastis).

Suatu prosedur di mana keadaan elastis bangunan diperhitungkan dengan menetapkan waktu getar efektif (T_e). Waktu getar efektif diperoleh dengan Persamaan.2-23.

$$T_e = T_1 \sqrt{\frac{K_i}{K_e}} \dots \dots \dots (2-23)$$

Dimana:

T_e = waktu getar efektif

T_1 = waktu getar elastik

K_i = kekakuan lateral elastik

K_e = kekakuan lateral efektif

Kekakuan lateral efektif ditentukan tergantung pada perilaku struktur, dari gambar kurva bilinear dan dari kurva kapasitas. Kekakuan lateral efektif dihitung dengan Persamaan 2-24.

$$K_e = \frac{0,6 \times V_y}{0,6 \times \Delta y} \dots \dots \dots (2-24)$$

Dimana:

V_y = gaya geser dasar pada saat leleh, dari idealisasi kurva *pushover* menjadi bilinear

Δy = jarak penggeseran dasar pada saat leleh, dari idealisasi kurva *pushover* menjadi bilinear

Selanjutnya, target perpindahan diperoleh dari modifikasi respon elastis linier dari sistem SDOF yang ekuivalen dengan berbagai faktor koefisien perpindahan dan dihitung dengan Persamaan.2-25.

$$\delta_T = C_0 C_1 C_2 C_3 S_a \frac{T_e^2}{4\pi^2} g \dots \dots \dots (2-25)$$

Dimana:

T_e = waktu getar efektif

δ_T = target perpindahan

C_0 = faktor modifikasi untuk perpindahan spektral menjadi perpindahan atap/puncak. Umumnya menggunakan faktor partisipasi ragam pertama atau berdasarkan Tabel 2.16

C_1 = faktor modifikasi untuk menghubungkan perpindahan inelastic maksimum dengan perpindahan dihitung dari respon elastik linier

$$C_1 = 1,0 \text{ untuk } T_e \geq T_s \dots \dots \dots (2-26)$$

$$C_1 = [1,0 + (R-1) T_s/T_e] / R, \text{ untuk } T_e < T_s \dots \dots \dots (2-27)$$

C_2 = faktor modifikasi yang mewakili efek dari bentuk histerestis pada perpindahan maksimum, diambil berdasarkan Tabel 2.17,

C_3 = koefisien untuk memperhitungkan pembesaran lateral akibat efek P-Delta. Jika gedung pada kondisi pasca leleh kekakuannya positif

(kurva meningkat) maka $C_3 = 1$, sedangkan jika perilaku pasca lelehnya negatif (kurva menurun) maka,

$$C_3 = 1,0 + \frac{|R-1|^{3/2}}{T_e} \dots\dots\dots (2-28)$$

S_a = akselerasi respon spektrum yang berhubungan dengan waktu getar alami efektif pada arah yang ditinjau

R = rasio kuat elastik perlu terhadap kuat leleh terhitung

$$R = \frac{S_a}{V_y/W} C_m \dots\dots\dots (2-29)$$

G = percepatan gravitasi 9,81 m/detik²

C_m = rasio kekakuan pasca leleh terhadap kekakuan elastik efektif, diambil berdasarkan Tabel 2.18

Tabel 2.16: Faktor modifikasi C_o FEMA 356.

Values for Modification Factor C_o			
Number of Stories	Shear Buildings ²		Other Buildings
	Triangular Load Pattern (1,1. 1,2. 1,3)	Uniform Load Pattern	Any Load Pattern
1	1,0	1,0	1,0
2	1,2	1,15	1,2
3	1,2	1,2	1,3
5	1,3	1,2	1,4
10+	1,3	1,2	1,5

Tabel 2.17: Faktor modifikasi C₂ FEMA 356.

Values for Modification Factor C ₂				
Structural Performance Level	T ≤ 0,1 second ³		T ≥ T _s second ³	
	Framing Type 1 ¹	Framing Type 2 ²	Framing Type 1 ¹	Framing Type 2 ²
Immediate Occupancy	1,0	1,0	1,0	1,0
Life Safety	1,3	1,0	1,1	1,0
Collapse Prevention	1,5	1,0	1,2	1,0

Tabel 2.18: Faktor modifikasi C_m FEMA 356.

No. Of Stories	Concrete Moment Frame	Concrete Shear Wall	Concrete Pier-Spandrel	Steel Moment Frame	Steel Concentric Braced Frame	Steel Eccentric Braced Frame	Other
Other	1,0	1,0	1,1	1,0	1,0	1,0	1,0
3 or more	0,9	0,8	0,8	0,9	0,9	0,9	1,0

Catatan: C_m akan diambil sebagai 1,0 jika periode fundamental (T) > 1,0 detik.

Tabel 2.19: Batasan *drift* untuk berbagai level kinerja struktur (FEMA 356, 2000).

Level Kinerja Struktur	Drift (%)	Keterangan
<i>Immediate Occupancy</i>	1,0	<i>Transient</i>
<i>Live Safety</i>	2,0	<i>Transient</i>
	1,0	<i>Permanent</i>
<i>Collapse Prevention</i>	4,0	<i>Transient</i> atau <i>permanent</i>

III. METODOLOGI PENELITIAN

3.1. Data Struktur Bangunan

3.1.1 Lokasi dan Deskripsi Gedung

Penelitian ini dilakukan pada gedung Bank Tabungan Negara Kantor Cabang Karawang yang terdiri dari 4 lantai (Lantai dasar, lantai 1, 2, 3, dan lantai dak atap) yang berlokasi di Jalan Galuh Mas Blok VIA No. 6, Desa Sukaharja, Kecamatan Teluk Jambe Timur, Kabupaten Karawang. Struktur bangunan ini menggunakan struktur rangka beton bertulang yang diperuntukkan sebagai gedung perkantoran.



Gambar 3.1. Lokasi Penelitian

3.1.2 Spesifikasi Bahan

a. Mutu Beton

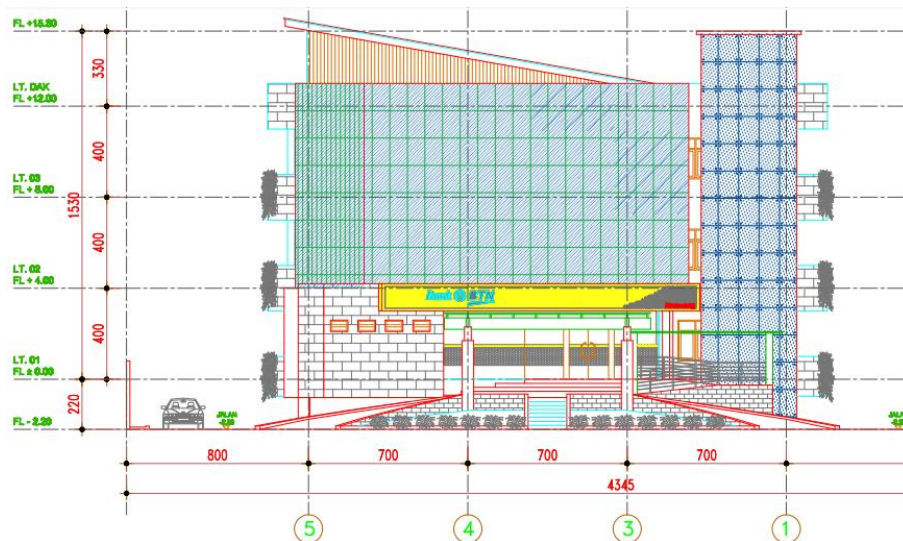
- Pondasi tiang pancang = 41,5 Mpa
- *Pile cap* tiang pancang = 25 Mpa
- Kolom = 25 Mpa
- Balok = 25 Mpa
- Pelat = 25 Mpa
- Dinding Beton = 25 Mpa

b. Mutu Baja Tulangan

- Baja ulir BJTP 40 = 400 Mpa

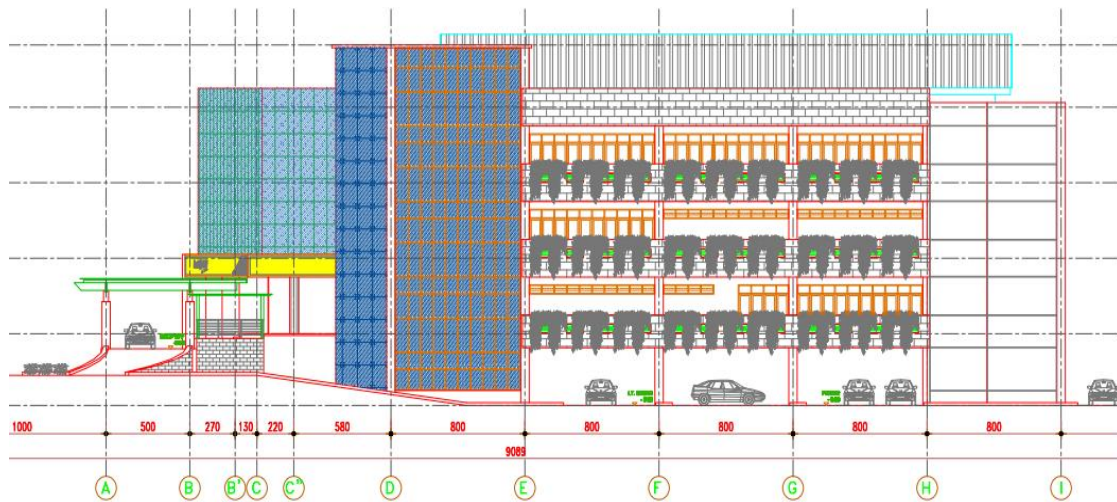
3.1.3 Gambar Kerja dan Desain Gedung

a. Tampak depan gedung



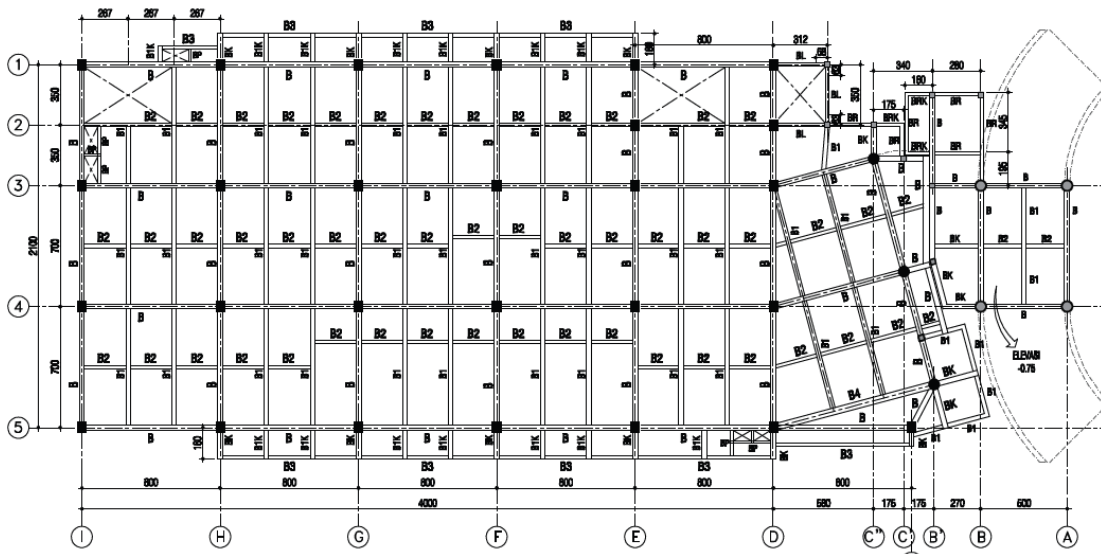
Gambar 3.2. Tampak depan gedung

b. Tampak samping gedung



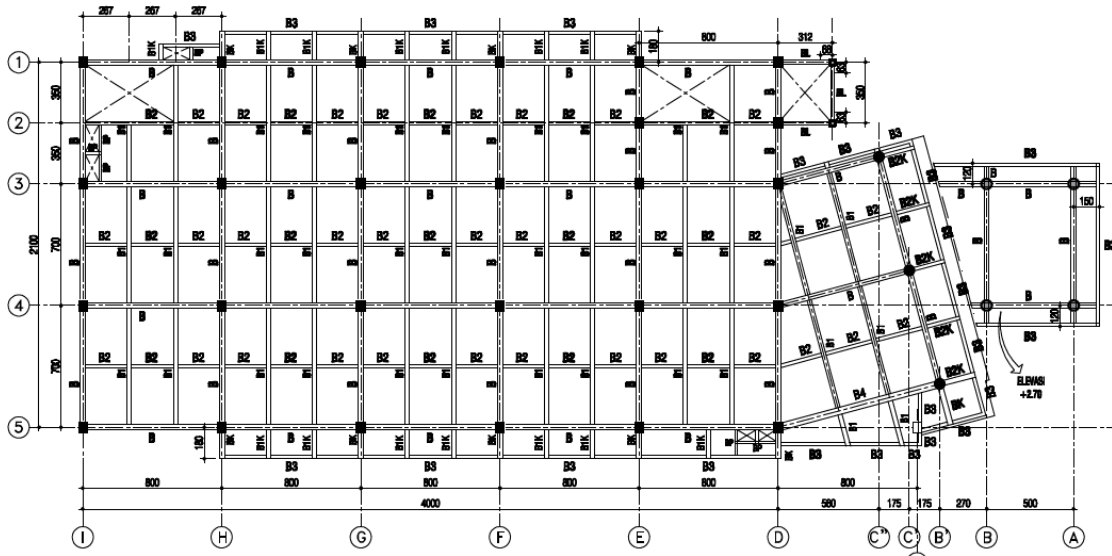
Gambar 3.3. Tampak samping gedung

c. Denah kolom dan balok lantai dasar



Gambar 3.4. Denah kolom dan balok lantai dasar

d. Denah kolom dan balok lantai 2 dan 3



Gambar 3.5. Denah kolom dan balok lantai 2 dan 3

e. Data penampang kolom dan balok

DIMENSI	50 x 60		DIMENSI	40 x 60		DIMENSI	30 x 30				
POSISI	TUMPUAN	LAPANGAN	POSISI	TUMPUAN	LAPANGAN	POSISI	TUMPUAN	LAPANGAN			
KOLOM K1			KOLOM K2			KOLOM K3					
	TUL. UTAMA	10D25		10D25	TUL. UTAMA		8D25	8D25	TUL. UTAMA	4D25	4D25
	SENGKANG	D10-100		D10-150	SENGKANG		D10-100	D10-150	SENGKANG	D10-100	D10-150
SENG. PENGIKAT	-	-	SENG. PENGIKAT	-	-	SENG. PENGIKAT	-	-			

DIMENSI	30 x 30		DIMENSI	Ø 50			
POSISI	TUMPUAN	LAPANGAN	POSISI	TUMPUAN	LAPANGAN		
KOLOM K3A			KOLOM KD50				
	TUL. UTAMA	8D13		8D13	TUL. UTAMA	7D25	7D25
	SENGKANG	D10-100		D10-150	SENGKANG	D10-100	D10-150
SENG. PENGIKAT	-	-	SENG. PENGIKAT	-	-		

Gambar 3.6. Data penampang kolom

DIMENSI	30 x 70	
POSISI	TUMPUAN	LAPANGAN
BALOK B		
TUL. ATAS	6D22	3D22
TUL. BAWAH	3D22	6D22
SENGKANG	D10-100	D10-150
TUL. PEMINGGANG	4D22	4D22

DIMENSI	25 x 60	
POSISI	TUMPUAN	LAPANGAN
BALOK B1		
TUL. ATAS	3D22	2D22
TUL. BAWAH	2D22	3D22
SENGKANG	D10-100	D10-150
TUL. PEMINGGANG	2D22	2D22

DIMENSI	20 x 40	
POSISI	TUMPUAN	LAPANGAN
BALOK B2		
TUL. ATAS	3D22	2D22
TUL. BAWAH	2D22	3D22
SENGKANG	D10-100	D10-150
TUL. PEMINGGANG	2D22	2D22

DIMENSI	20 x 70	
POSISI	TUMPUAN	LAPANGAN
BALOK B3		
TUL. ATAS	2D22	2D22
TUL. BAWAH	2D22	2D22
SENGKANG	D10-100	D10-150
TUL. PEMINGGANG	2D22	2D22

DIMENSI	40 x 90	
POSISI	TUMPUAN	LAPANGAN
BALOK B4		
TUL. ATAS	5D22	3D22
TUL. BAWAH	3D22	5D22
SENGKANG	D10-100	D10-150
TUL. PEMINGGANG	4D22	4D22

DIMENSI	20 x 40	
POSISI	TUMPUAN	LAPANGAN
BALOK BL		
TUL. ATAS	2D22	2D22
TUL. BAWAH	2D22	2D22
SENGKANG	D10-100	D10-150
TUL. PEMINGGANG	-	-

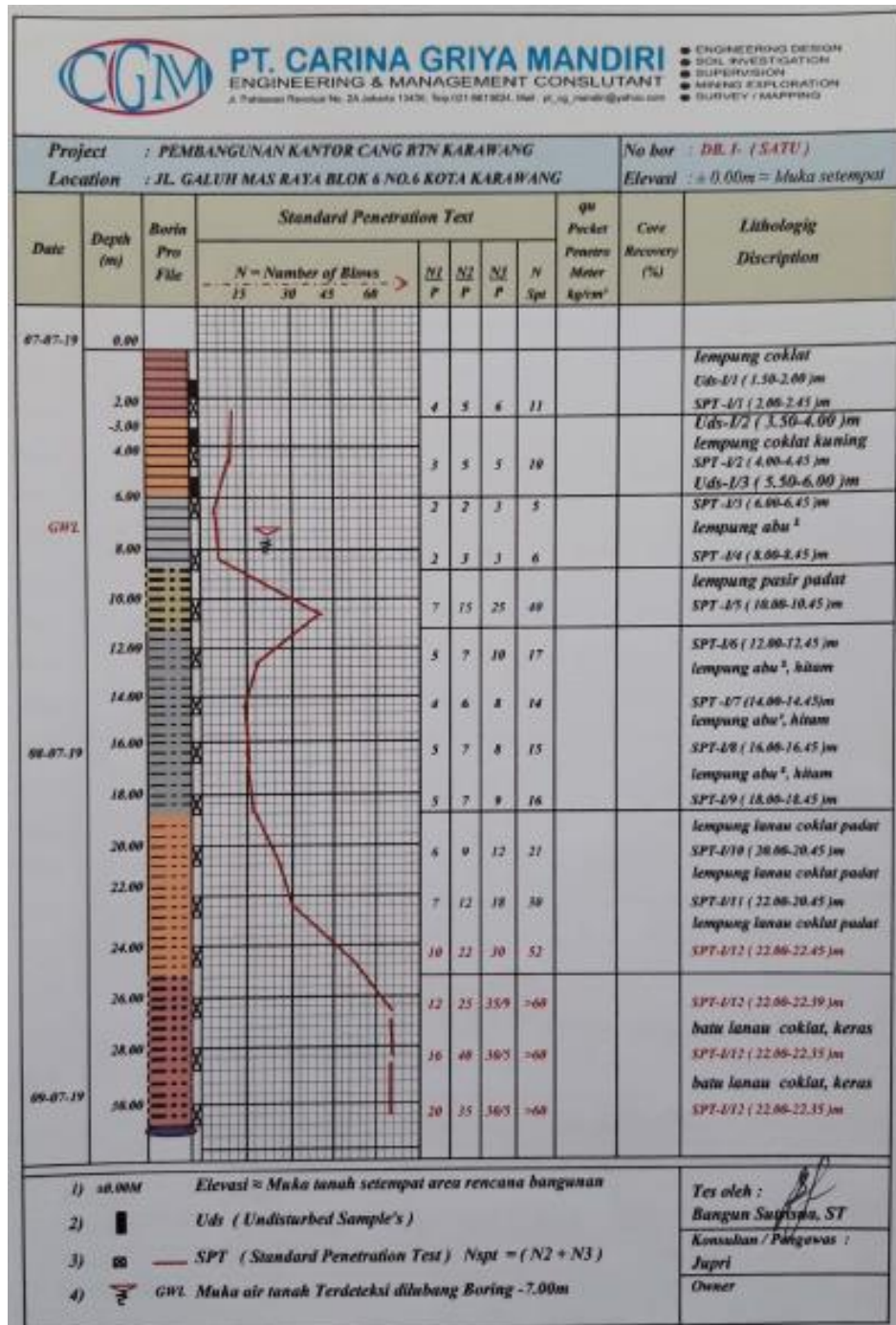
DIMENSI	30 x 70	
POSISI	TUMPUAN	UJUNG BEBAS
BALOK BK		
TUL. ATAS	6D22	6D22
TUL. BAWAH	3D22	3D22
SENGKANG	D10-100	D10-150
TUL. PEMINGGANG	4D22	4D22

DIMENSI	25 x 60	
POSISI	TUMPUAN	UJUNG BEBAS
BALOK B1K		
TUL. ATAS	3D22	3D22
TUL. BAWAH	2D22	2D22
SENGKANG	D10-100	D10-150
TUL. PEMINGGANG	2D22	2D22

DIMENSI	20 x 40	
POSISI	TUMPUAN	UJUNG BEBAS
BALOK B2K		
TUL. ATAS	3D22	3D22
TUL. BAWAH	2D22	2D22
SENGKANG	D10-100	D10-150
TUL. PEMINGGANG	2D22	2D22

Gambar 3.7. Data penampang balok

f. Data tanah



Gambar 3.8. Data tanah

Untuk menentukan kelas situs tanah dilakukan perhitungan rata-rata nilai N-spt yang diperoleh dari pengambilan sampel di lokasi (Gambar 3.8). Perhitungan N-spt sebagai berikut:

$$N\text{-spt} = \frac{11 + 10 + 5 + 6 + 48 + 17 + 14 + 15 + 16 + 21 + 38 + 52 + 68 + 68 + 68}{15} = 30,5$$

Dari hasil perhitungan diatas, sesuai dengan Tabel 2.3, maka dapat disimpulkan tanah di lokasi termasuk kedalam kelas situs SD (Tanah sedang).

3.2 Prosedur penelitian

Penelitian dilakukan pada gedung perkantoran dengan struktur rangka beton bertulang. Bangunan tersebut merupakan bangunan yang tergolong dalam *low rise building* dan direncanakan untuk ditambah 1 lantai sehingga menjadi bangunan *medium rise building* dengan 5 lantai dari keadaan eksisting nya yaitu 4 lantai. Untuk mengetahui apakah struktur yang semula direncanakan 4 lantai dapat menahan beban gedung 5 lantai maka perlu dilakukan analisis untuk mengetahui kinerja struktur tersebut. Analisis dilakukan dengan program ETABS V 16.

Tahapan penelitian yang akan dilakukan adalah sebagai berikut:

a) Studi literatur

Studi literatur dari jurnal dan buku terkait dalam analisis nonlinier *pushover*. Mempelajari semua yang terkait dengan analisis *pushover* nonlinier. Rujukan yang digunakan antara lain meliputi tata cara perencanaan ketahanan gempa untuk bangunan gedung dan non gedung SNI (03-1726-2019), Persyaratan

beton struktural untuk bangunan gedung (SNI 03-2847-2019), Peraturan Pembebanan Indonesia untuk Rumah dan Gedung (SNI 03-1727-2020), *Applied Technology Council for Seismic evaluation and retrofit of concrete buildings volume-1* (ATC-40), *Federal Emergency Management Agency for Prestandard And Commentary For The Seismic Rehabilitation Of Buildings* (FEMA-356), dan jurnal-jurnal yang berkaitan dengan analisis *pushover*.

b) Pengumpulan data

Pengumpulan data struktur gedung Bank Tabungan Negara Kantor Cabang Karawang didapatkan dari *Shop Drawing* struktur gedung Bank Tabungan Negara Kantor Cabang Karawang kemudian data ini digunakan untuk tahapan pemodelan struktur gedung 3D pada program ETABS. Adapun data-data struktur gedung yaitu denah, dimensi dan material.

c) Pengecekan *Strong column weak beam*

Dari data dimensi dan mutu material yang diperoleh, gedung Bank Tabungan Negara Kantor Cabang Karawang telah memenuhi konsep *Strong column weak beam*, terlihat dari perbedaan dimensi kolom yang lebih besar dari balok dengan mutu beton dan tulangan yang sama, kolom memiliki kekakuan dan kapasitas momen leleh yang lebih besar dari balok. Maka, sendi plastis yang terjadi akibat beban gempa maksimum direncanakan terdapat di dalam balok-balok dan tidak terjadi dalam kolom-kolom, kecuali pada kaki kolom yang paling bawah. Pembentukan sendi plastis pada kolom dasar yang memikul momen ini tidak dapat dihindarkan, akan tetapi harus tetap dapat diandalkan dalam rangka untuk memastikan stabilitas kapasitas kolom saat mengalami deformasi/simpangan

lateral yang besar tetap sebaik kapasitas kolom saat kolom mendukung beban vertikal (Bayrak dan Sheikh, 2004).

d) Analisis kekuatan tanah

Data hasil sondir dan boring digunakan dalam menentukan kondisi dan karakteristik tanah tempat berdirinya struktur gedung Bank Tabungan Negara Kantor Cabang Karawang, dimana data ini selanjutnya dapat digunakan untuk menentukan kelas situs tanah pada lokasi gedung.

e) Pemodelan struktur gedung

Pemodelan struktur gedung dibuat pada program ETABS dalam bentuk 3D dengan dua model gedung (4 lantai dan 5 lantai) dan untuk hasil dan pembahasan akan ditampilkan beberapa tipikal untuk mempermudah memahami pemodelan.

f) Perhitungan pembebanan

Beban-beban yang bekerja pada struktur berupa beban mati (*dead load*), beban mati tambahan (*super impulse dead load*), beban hidup (*live load*), dan beban gempa (*earthquake load*).

g) Analisis *Pushover*

Berikut langkah-langkah yang dilakukan dalam melakukan analisis *pushover* menggunakan *software* ETABS:

1) Menentukan titik yang akan ditinjau

Titik yang akan ditinjau adalah titik yang akan ditetapkan sebagai program dasar untuk menghitung deformasi yang terjadi pada bagian atas bangunan.

titik ini ditetapkan ke posisi pusat kuat massa bangunan.

2) Menentukan *Gravity Nonlinier Case*

Dalam hal ini persentase beban yang digunakan dalam analisa *pushover* yaitu 100% beban mati (beban mati dan beban mati tambahan) dan 25% beban hidup.

3) Menentukan *nonlinier pushover case* arah x-x

4) Menentukan *nonlinier pushover case* arah y-y

5) Memodelkan sendi plastis

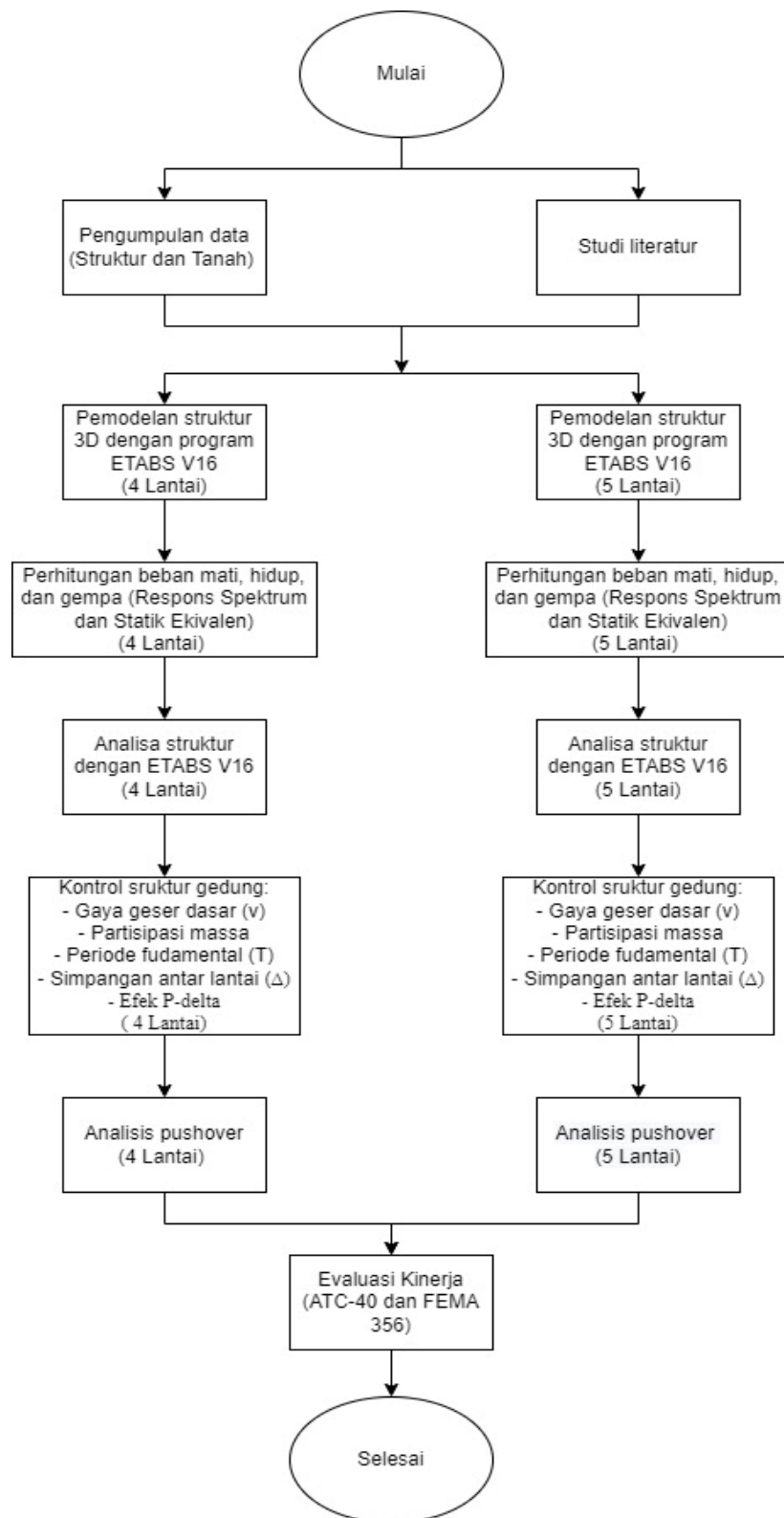
Analisis *pushover* harus mempertimbangkan pemodelan atau definisi sendi plastis pada elemen struktur yang dibuat. Definisi sendi plastis didasarkan pada perilaku struktur yang dirancang. Perilaku struktur memiliki pengaruh besar pada jenis struktur yang dimodelkan. Dalam hal ini struktur akan berperilaku seperti *Beam Sway Mechanism*, artinya ketika dikenai beban lateral, balok akan luluh terlebih dahulu pada ujung-ujung balok kemudian dilanjutkan ke kolom dan pangkal kolom.

6) *Running* program

7) Menampilkan *static nonlinier curve*

h) Evaluasi kinerja struktur

Dari hasil analisa *pushover* didapatkan kurva kapasitas dari struktur, selanjutnya dari kurva kapasitas tadi dievaluasi kinerjanya dengan menggunakan 2 metode yaitu ATC-40 dan FEMA 356.



Gambar 3.9. Diagram alir penelitian

V. KESIMPULAN DAN SARAN

5.1. Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisis dan perhitungan terhadap bangunan yang ditinjau yaitu bangunan 4 lantai (*low rise building*) dan 5 lantai (*medium rise building*) dengan bantuan program ETABS V.16, maka diperoleh kesimpulan sebagai berikut:

1. Berdasarkan hasil perhitungan analisis *pushover* didapatkan besarnya gaya lateral maksimum yang mampu ditahan oleh gedung 4 lantai (*low rise building*) sebesar 8840,96 kN dengan *displacement* 179,59 mm pada *push* x dan gaya lateral yang mampu ditahan untuk *push* y sebesar 9654,73 kN, dengan *displacement* 185,03 mm. Sedangkan untuk gedung 5 lantai (*medium rise building*) gaya lateral *push* x mampu ditahan sebesar 10648,09 kN dengan *displacement* 262,23 mm dan untuk gaya lateral *push* y mampu ditahan sebesar 9589,18 kN, dengan *displacement* 223,45 mm.
2. Pola keruntuhan terjadi pada struktur bangunan yang ditinjau, terletak pada kolom lantai 1 yang *collapse* terlebih dahulu ditandai dengan sendi plastis yang mencapai level CP (*collapse prevention*) yang terlihat dengan warna merah pada Gambar 4.28 dan 4.29. Sedangkan pada balok terjadi pola keruntuhan di balok hampir di tiap lantai yang ditandai *collapse* nya balok yang mencapai level IO (*immediate occupancy*) yang berwarna hijau.

3. Dari hasil pengecekan kontrol struktur pada gedung 4 lantai (*low rise building*) dan 5 lantai (*medium rise building*) sudah memenuhi dan dinyatakan aman sesuai dengan SNI 1726:2019, yaitu terhadap gaya geser dasar, partisipasi massa, periode fundamental (T), simpangan antar lantai (Δ) dan efek P-delta.
4. Hasil Titik Kinerja (*Performance Point*) ATC-40 pada gedung 4 lantai (*low rise building*) dengan nilai $S_a = 0,26$ g dan $S_d = 137,77$ mm untuk arah x dan nilai arah y diperoleh $S_a = 0,27$ g dan $S_d = 122,47$ mm. Sedangkan untuk gedung 5 lantai (*medium rise building*) diperoleh nilai $S_a = 0,23$ g dan $S_d = 175,55$ mm untuk arah x dan nilai arah y dengan $S_a = 0,21$ g dan $S_d = 153,97$ mm
5. Evaluasi kinerja struktur menggunakan metode ATC-40 mendapatkan hasil perhitungan nilai *drift ratio* arah x = 0,0088 m dan arah y = 0,0090 m untuk gedung 4 lantai (*low rise building*). Sedangkan untuk gedung 5 lantai (*medium rise building*) diperoleh nilai *drift ratio* arah x = 0,0091 m dan arah y = 0,0092 m. Berdasarkan hasil perhitungan dari kedua gedung yang ditinjau termasuk dalam level kinerja *Damage Control* yang merupakan transisi antara *Immediate Occupancy* (IO) dan *Life Safety* (LS), dimana hasil tersebut memenuhi asumsi awal bahwa gedung memasuki kategori *life safety* (LS).
6. Evaluasi kinerja struktur menggunakan metode FEMA 356 mendapatkan hasil perhitungan nilai target perpindahan arah x = 0,0078 (0,7835%) dan arah y = 0,0080 (0,8039%) untuk gedung 4 lantai (*low rise building*). Sedangkan untuk gedung 5 lantai (*medium rise building*) diperoleh nilai target perpindahan arah x = 0,0081 (0,8101%) dan arah y = 0,0083 (0,8318%). Berdasarkan hasil tersebut

kedua struktur gedung termasuk kedalam level kinerja *Immediate Occupancy* (IO) yaitu dengan nilai target perpindahan dibawah 1%.

7. Dari penggunaan kedua metode yaitu ATC-40 dan FEMA 356 pada gedung yang memasuki kriteria *low rise building* dan *medium rise building* dinyatakan “Aman” karena tidak melewati kategori *Life Safety* (LS) dan perbedaan yang terlihat tidak terlalu signifikan. Hasil pemeriksaan dari kedua gedung tersebut masih dalam satu kriteria yaitu *Damage Control* pada ATC 40 dan pada metode FEMA 356 kinerja gedung memasuki *Immediate Occupancy* yang artinya gedung masih aman dalam menerima beban gempa yang diberikan tanpa mengalami kerusakan pada bagian stuktur tetapi pada model gedung 5 lantai terjadi *collapse* pada 2 kolom lantai 1 bagian bawah yang memasuki kriteria *collapse prevention* tetapi secara keseluruhan gedung dalam kondisi aman.
8. Penelitian ini mengacu pada penelitian yang dilakukan oleh Fajar Nugroho pada tahun 2016, dari hasil penelitian tersebut berdasarkan perpindahan ultimit pada SNI bangunan eksisting dan bangunan yang telah mendapatkan penambahan lantai dapat dikatakan baik karena tidak melewati kondisi *Life Safety*, tetapi pada metode FEMA kinerja struktur dikatakan tidak baik karena telah mencapai kondisi *Collapse Prevention*. Sedangkan pada penelitian yang penulis lakukan terhadap gedung yang ditinjau pada kedua model dapat dikatakan baik menurut SNI dan FEMA 356 karena termasuk kedalam kinerja *Immediate Occupancy*.

5.2 Saran

Dalam penulisan tugas akhir ini, penulis menganalisis struktur gedung dengan menggunakan metode statik *non-linier* yaitu analisis *pushover*. Penulis

menyarankan beberapa hal yang nantinya dapat digunakan untuk memperbaiki dalam pengembangan penelitian selanjutnya, yaitu:

1. Analisis *pushover* perlu dicoba pada gedung-gedung yang lebih tinggi untuk mendalami perilaku seismik gedung bertingkat banyak.
2. Untuk penelitian lebih lanjut, dapat menggunakan metode analisis respon riwayat waktu (*non-linear time history analyst*) untuk mendapat hasil yang lebih akurat yang berdasarkan dengan konsep PBSD (*performance based seismic design*).
3. Perlunya ketelitian pada saat meng-*input* data *shop drawing* yang diperoleh pada program bantu ETABS V.16

DAFTAR PUSTAKA

- American Society of Civil Engineer*. 2000. FEMA 356. *Prestandard and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Building*. Virginia: ASCE.
- ATC-40. 1996. *Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings, Volume I*. California. Seismic Safety Commission State of California.
- Desain Spektral Indonesia. 2022. *Data Gempa Bumi*. [online] Available at: <http://rsa.ciptakarya.pu.go.id/2021>. [Accessed 22 Maret 2022].
- Dewobroto, W. 2006. *Evaluasi Kinerja Bangunan Baja Tahan Gempa dengan SAP2000*. Tangerang: Universitas Pelita Harapan. *Jurnal Teknik Sipil*, Vol. 3, No. 1, Januari 2006.
- Mufarida, B. 2021. *BMKG Mencatat 4.701 Kali Gempa Bumi Sepanjang 2021* <https://nasional.sindonews.com/read/477084/15/bmkg-mencatat-4701-kali-gempa-bumi-sepanjang-2021-1625702872>. 3 April 2022.
- Nugroho, F.2016. *Penerapan Analisis Pushover untuk Menentukan Kinerja Struktur Pada Bangunan Eksisting Gedung Beton Bertulang*. Padang: Institut Teknologi Padang. *Jurnal Momentum*, Volume 18 No.2, 19-25.
- Pranata Aji Yosafat. (2006).” *Evaluasi Kinerja Gedung Beton Bertulang Tahan Gempa Dengan Pushover Analysis (Sesuai Atc-40, Fema 356 Dan Fema 440)*”. *Jurnal Tugas Akhir*, Bandung: Universitas Kristen Maranatha.
- Prasetyo, H., dkk 2020. *Evaluasi Kinerja Struktur Bangunan Menggunakan Pushover Analysis dengan Metode Atc-40 dan Fema 356 (Studi Kasus: Gedung RSGM UGM Prof. Soedomo)* Yogyakarta: Universitas Teknologi Yogyakarta. *Jurnal Pendidikan Teknik Sipil (JPenSil)*, Volume 9 No. 1, 40-46.
- Realdy, M. G., dan Rika Nuraini. 2019. *Evaluasi Kinerja Struktur Bangunan Gedung Bertingkat menggunakan Pushover Analysis dengan Metode Fema 356 dan Fema 440 (Studi Kasus: Gedung Rawat Inap Rumah Sakit Umum Daerah Tidar, Kabupaten Magelang)*. Magelang: Universitas Teknologi Yogyakarta. *Jurnal Teknologi*, Volume 12 Nomor 1, 28-34.
- SNI 1726-2019. 2019. *Tata Cara Perencanaan Ketahanan Gempa untuk Struktur Bangunan Gedung dan Non Gedung*. Jakarta: Badan Standarisasi Nasional.
- SNI 1727-2020. 2020. *Beban Desain Minimum dan Kriteria Terkait untuk Bangunan Gedung dan Struktur Lain*. Jakarta: Badan Standarisasi Nasional.

SNI 2847-2019. 2019. *Persyaratan Beton Struktural untuk Bangunan Gedung*.
Jakarta: Badan Standarisasi Nasional.

Tavio & Wijaya, U., 2018. *Desain Rekayasa Gempa Berbasis Kinerja. II ed.*
Yogyakarta: Penerbit Andi.