

TUGAS AKHIR

**EVALUASI KINERJA STRUKTUR ATAS PADA
DESAIN GEDUNG PERKANTORAN
MENGUNAKAN ANALISIS *PUSHOVER*
BERDASARKAN ATC-40
(*PERFORMANCE EVALUATION OF AN UPPER
STRUCTURE OF OFFICE BUILDING DESIGN USING
PUSHOVER ANALYSIS BASED ON ATC-40*)**

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



**Maritza Syifa Syahira
18511251**

**PROGRAM STUDI TEKNIK SIPIL
FAKULTAS TEKNIK SIPIL DAN PERENCANAAN
UNIVERSITAS ISLAM INDONESIA
2023**

TUGAS AKHIR

**EVALUASI KINERJA STRUKTUR ATAS PADA
DESAIN GEDUNG PERKANTORAN
MENGUNAKAN ANALISIS *PUSHOVER*
BERDASARKAN ATC-40
(*PERFORMANCE EVALUATION OF AN UPPER
STRUCTURE OF OFFICE BUILDING DESIGN USING
PUSHOVER ANALYSIS BASED ON ATC-40*)**

Disusun oleh

Maritza Syifa Syahira
18511251

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

Diuji pada tanggal 31 Maret 2023
Oleh Dewan Penguji

Pembimbing

Atika Ulfah Jamal., S.T., M.Eng., M.T.
NIK: 125110101

Penguji I

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

Penguji II

Prof. Ir. H. Sarwidi, MSCE, Ph.D., IP-U.
NIK: 845110101

Mengesahkan,
Ketua Program Studi Teknik Sipil

Yunalia Muntafi, S.T., M.T., Ph.D.
NIK: 095110701



PERNYATAAN BEBAS PLAGIASI

Saya menyatakan dengan sesungguhnya bahwa Laporan Tugas Akhir yang saya susun sebagai syarat untuk penyelesaian program Sarjana di Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Islam Indonesia merupakan hasil karya saya sendiri. Adapun bagian-bagian tertentu dalam penulisan laporan Tugas Akhir yang saya kutip dari hasil karya orang lain telah dituliskan dalam sumbernya secara jelas sesuai dengan norma, kaidah, dan etika penulisan karya ilmiah. Apabila di kemudian hari ditemukan seluruh atau sebagian laporan Tugas Akhir ini bukan hasil karya saya sendiri atau adanya plagiasi dalam bagian-bagian tertentu, saya bersedia menerima sanksi, termasuk pencabutan gelar akademik yang saya sandang sesuai dengan perundang-undangan yang berlaku.

Yogyakarta, 04 April 2023
Yang membuat pernyataan,



Maritza Syifa Syahira
(18511251)

KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis kehadiran Allah SWT yang telah memberikan kesempatan, kemudahan, dan rahmat-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan tugas akhir yang berjudul “Evaluasi Kinerja Struktur Atas Pada Desain Gedung Perkantoran Menggunakan Analisis *Pushover* Berdasarkan ATC-40”, sebagai salah satu syarat untuk menyelesaikan program Sarjana (S1) di Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Islam Indonesia, Yogyakarta.

Dalam penyusunan tugas akhir ini, dengan penuh rasa hormat, penulis mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya atas semua dukungan, bimbingan, dan bantuan yang telah diberikan selama penyusunan tugas akhir kepada pihak-pihak sebagai berikut.

1. Ibu Atika Ulfah Jamal., S.T., M.Eng., M.T, selaku dosen pembimbing tugas akhir yang telah membimbing, memberikan arahan, dan masukan kepada penulis sehingga tugas akhir ini dapat diselesaikan dengan baik.
2. Ayah dan Bunda yang selalu memberikan kasih sayang, dukungan, serta mendoakan penulis sehingga dapat menempuh pendidikan hingga mencapai gelar S.T.
3. Ketiga adik tercinta penulis, Azkal, Fayyadh, dan Fadhil, terima kasih atas doa dan segala dukungan.
4. Seluruh keluarga besar yang selalu memberikan doa dan semangat.
5. Seluruh Dosen di Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Islam Indonesia, Yogyakarta.
6. Teman-teman selaku sahabat setia yang mendukung, Alvira, Mivta, Darin, Rizal, Rosyid, Naufal, Andra, Mas Dwi, Mita, Bella, Namira, dan Ratih terimakasih atas kesenangan, canda tawa yang membahagiakan dan menjadi keluarga baru bagi penulis selama kuliah hingga penyelesaian tugas akhir ini.
7. Semua pihak yang tidak dapat disebutkan satu per satu yang dengan tulus memberikan doa dan semangat kepada penulis dalam menyelesaikan tugas akhir ini.

Dalam penyelesaian tugas akhir ini masih banyak kekurangan dan kesalahan, karena itu segala kritik dan saran yang membangun akan menyempurnakan penulisan tugas akhir ini yang bermanfaat bagi penulis dan para pembaca.

Yogyakarta, 01 April 2023
Penulis,

Maritza Syifa Syahira
(18511251)



DAFTAR ISI

TUGAS AKHIR	i
LEMBAR PENGESAHAN TUGAS AKHIR	ii
PERNYATAAN BEBAS PLAGIASI	iii
KATA PENGANTAR	iv
DAFTAR ISI	vi
DAFTAR TABEL	x
DAFTAR GAMBAR	xii
DAFTAR LAMPIRAN	xvi
DAFTAR NOTASI DAN SINGKATAN	xvii
ABSTRAK	xix
<i>ABSTRACT</i>	xx
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	2
1.3 Tujuan Penelitian	3
1.4 Batasan Penelitian	4
1.5 Manfaat Penelitian	5
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	7
2.1 Ringkasan Penelitian	7
2.2 Penelitian Sejenis Terdahulu	7
2.3 Keaslian Penelitian	14
BAB III LANDASAN TEORI	15
3.1 Gempa Bumi	15

3.2	Konsep Perencanaan Bangunan Tahan Gempa	15
3.3	Perencanaan Bangunan Tahan Gempa Berbasis Kinerja	16
3.4	Mekanisme Keruntuhan	17
3.5	Pembebanan Struktur	19
3.6	Beban Mati	19
3.7	Beban Hidup	21
3.8	Beban Gempa	24
3.9	Kombinasi Pembebanan	24
3.10	Ketentuan Umum Perencanaan Struktur Bangunan Gedung Berdasarkan SNI 1726-2019	25
3.11	Analisis Statik Nonlinear <i>Pushover</i>	39
3.12	Sendi Plastis	40
3.12.1	Skema Sendi Plastis	42
3.13	Analisis <i>Pushover</i> Berdasarkan pada ATC-40	43
3.14	Kurva Kapasitas	43
3.15	Redaman Ekuivalen (β_{eq})	47
3.16	Titik Kinerja Struktur (<i>Performance Point</i>) Metode ATC-40	51
3.17	Batasan Deformasi (<i>Drift Ratio</i>) Berdasarkan ATC-40	52
3.18	Level Kinerja Struktur Berdasarkan ATC-40	53
BAB IV METODE PENELITIAN		59
4.1	Lokasi Objek Penelitian	59
4.2	Alur Penelitian	61
4.3	Tahapan Penelitian	64
BAB V ANALISIS DAN PEMBAHASAN		69
5.1	Pemodelan Struktur	69

5.2	Pemodelan pada <i>Section Designer</i>	70
5.3	Pembebanan Struktur	74
5.3.1	Perhitungan Beban Mati	74
5.3.2	Perhitungan Beban Hidup	75
5.3.3	Perhitungan Beban <i>Additional</i>	75
5.3.4	Kombinasi Beban	76
5.3.5	Perhitungan Beban Gempa	76
5.4	Analisis Beban Gempa	83
5.4.1	Pendefinisian <i>Mass Source</i>	83
5.4.2	Penginputan Data Respon Spektrum Gempa MCE_R dan Gempa <i>DBE</i>	84
5.4.3	Analisis Beban Gempa Statik	85
5.4.4	Analisis Beban Gempa Dinamik	85
5.4.5	Gaya Geser Dasar (<i>Base Shear Reaction</i>)	86
5.5	Analisis <i>Pushover</i>	87
5.5.1	Pendefinisian <i>Load Case Pushover Analysis</i>	87
5.5.2	Pendefinisian Sendi Plastis (<i>Hinges</i>)	93
5.5.3	<i>Running Pushover Analysis</i>	96
5.6	Hasil Analisis <i>Pushover</i>	97
5.6.1	Kurva Kapasitas	97
5.6.2	<i>Performance Point</i> Berdasarkan ATC-40	103
5.6.3	Tingkat Kinerja Struktur	106
5.6.4	Mekanisme Sendi Plastis	107
BAB VI KESIMPULAN DAN SARAN		112
6.1	Kesimpulan	112

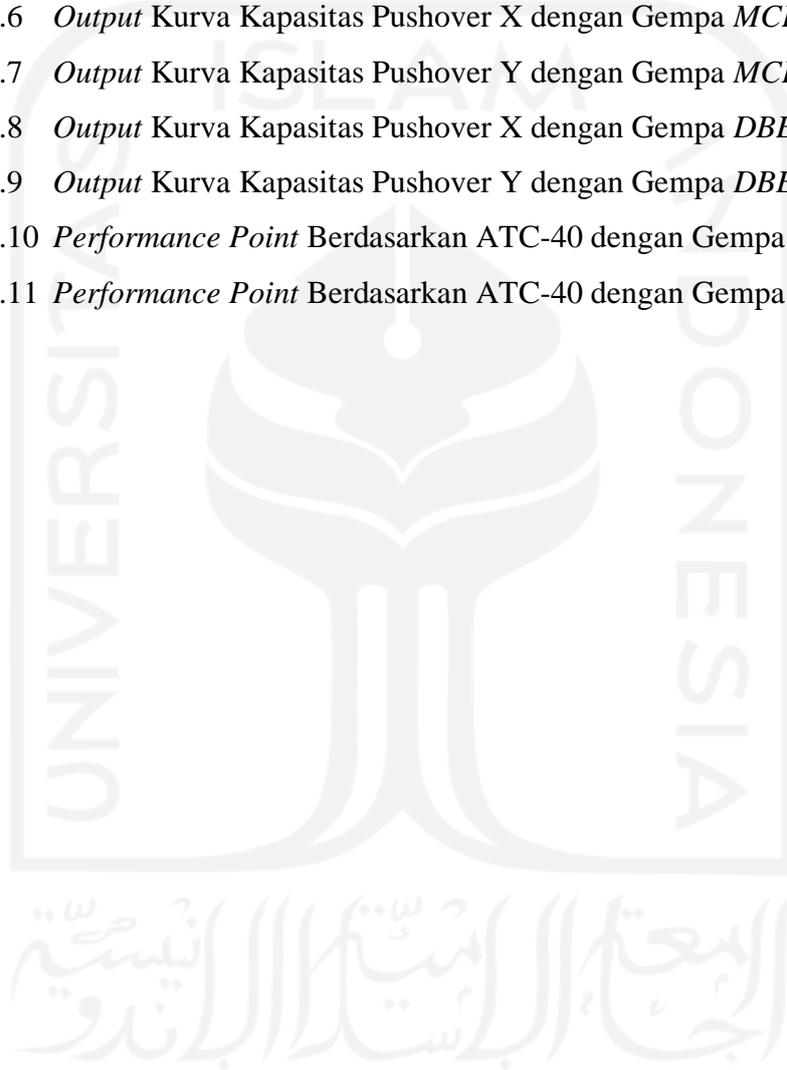
6.2 Saran	113
DAFTAR PUSTAKA	114
LAMPIRAN	114



DAFTAR TABEL

Tabel 2.1	Perbandingan Penelitian dengan Topik yang Sama	10
Tabel 3.1	Berat Sendiri Bahan Bangunan	19
Tabel 3.2	Berat Sendiri Komponen Gedung	20
Tabel 3.3	Beban Hidup pada Gedung	21
Tabel 3.4	Kombinasi Pembebanan	24
Tabel 3.5	Kategori Risiko Bangunan Gedung dan Non Gedung untuk Beban Gempa	25
Tabel 3.6	Faktor Keutamaan Gempa	27
Tabel 3.7	Klasifikasi Situs	29
Tabel 3.8	Koefesien Situs, F_a	30
Tabel 3.9	Koefesien Situs, F_v	30
Tabel 3.10	Kategori Desain Seismik berdasarkan Parameter Respons Percepatan pada Periode Pendek	34
Tabel 3.11	Kategori Desain Seismik berdasarkan Parameter Respons Percepatan pada Periode 1 Detik	34
Tabel 3.12	Faktor R , C_d , dan Ω_0 untuk Sistem Pemikul Gaya Seismik	34
Tabel 3.13	Koefesien untuk Batas Atas pada Periode yang Dihitung	37
Tabel 3.14	Nilai Parameter Periode Pendekatan C_t dan x	37
Tabel 3.15	Keterangan Warna Sendi Plastis	42
Tabel 3.16	<i>Values for Damping Modification Factor, k</i>	49
Tabel 3.17	<i>Minimum Allowable SR_A dan SR_v Values</i>	50
Tabel 3.18	Batasan <i>Drift Ratio</i> pada Tingkat Kinerja Struktur	52
Tabel 3.19	Batasan Tipe Bangunan untuk <i>Capacity Spectrum Method</i>	53
Tabel 3.20	Level Kinerja Struktur Berdasarkan ATC-40	55
Tabel 3.21	Kategori Bangunan pada Tingkat Kinerja Struktur	55
Tabel 3.22	Penjelasan Kurva Kriteria Kinerja	57
Tabel 4.1	Dimensi Pelat dan <i>Shearwall</i>	66
Tabel 4.2	Penulangan Kolom	66
Tabel 4.3	Penulangan Balok	67

Tabel 5.1	Kombinasi Beban	76
Tabel 5.2	Hasil Perhitungan Respon Spektrum Gempa MCE_R	79
Tabel 5.3	Periode Getar Alami Struktur	82
Tabel 5.4	Perhitungan Nilai Gaya Gempa Horizontal	83
Tabel 5.5	Gaya Geser Dasar (Base Shear)	87
Tabel 5.6	<i>Output</i> Kurva Kapasitas Pushover X dengan Gempa MCE_R	99
Tabel 5.7	<i>Output</i> Kurva Kapasitas Pushover Y dengan Gempa MCE_R	100
Tabel 5.8	<i>Output</i> Kurva Kapasitas Pushover X dengan Gempa DBE	100
Tabel 5.9	<i>Output</i> Kurva Kapasitas Pushover Y dengan Gempa DBE	100
Tabel 5.10	<i>Performance Point</i> Berdasarkan ATC-40 dengan Gempa MCE_R	106
Tabel 5.11	<i>Performance Point</i> Berdasarkan ATC-40 dengan Gempa DBE	106



DAFTAR GAMBAR

Gambar 3.1	Level Kinerja	17
Gambar 3.2	Mekanisme Keruntuhan <i>Beam Sway Mechanism</i>	18
Gambar 3.3	Mekanisme Keruntuhan <i>Column Sway Mechanism</i>	18
Gambar 3.4	<i>Web</i> Desain Spektra Indonesia	27
Gambar 3.5	Parameter Gerak Tanah Periode Pendek, S_s	28
Gambar 3.6	Parameter Gerak Tanah Periode 1 Detik, S_I	28
Gambar 3.7	Spektrum Respons Desain	32
Gambar 3.8	Peta Transisi Periode Panjang Wilayah Indonesia	33
Gambar 3.9	<i>Capacity Curve</i>	40
Gambar 3.10	Posisi Sumbu Lokal Balok Struktur	41
Gambar 3.11	Posisi Sumbu Lokal Kolom Struktur	41
Gambar 3.12	Kurva Kapasitas	44
Gambar 3.13	Faktor Partisipasi Modal dan Modal Koefisien Massa	44
Gambar 3.14	Perubahan Format Kurva Kapasitas	45
Gambar 3.15	Perubahan Format Respons Spektra	47
Gambar 3.16	Penentuan <i>Energy Dissipated by Damping, E_D</i>	48
Gambar 3.17	Reduksi Respon Spektrum Elastik menjadi Spektrum <i>Demand</i>	51
Gambar 3.18	Penentuan <i>Performance Point</i>	51
Gambar 3.19	Level Kinerja Struktur Berdasarkan ATC-40	54
Gambar 3.20	Kurva Kriteria Kinerja	57
Gambar 4.1	Lokasi Pembangunan Gedung Perkantoran	59
Gambar 4.2	Denah Lantai 2 Gedung Perkantoran	60
Gambar 4.3	Denah Lantai 3-4 Gedung Perkantoran	60
Gambar 4.4	Potongan Gedung Perkantoran	61
Gambar 4.5	Bagan Alur Pelaksanaan Penelitian	62
Gambar 5.1	Tampak 3D Gedung Perkantoran	69
Gambar 5.2	Tampak X-Y Gedung Perkantoran	69
Gambar 5.3	Tampak X-Z Gedung Perkantoran	70

Gambar 5.4	Tampak Y-Z Gedung Perkantoran	70
Gambar 5.5	<i>Add Frame Section Property</i>	71
Gambar 5.6	<i>Section Data</i>	71
Gambar 5.7	<i>Stiffness Modification Factor</i>	72
Gambar 5.8	Pemodelan Kolom Menggunakan <i>Section Designer</i>	72
Gambar 5.9	<i>Shape Properties</i>	73
Gambar 5.10	C Model Kolom	73
Gambar 5.11	Penentuan Respon Spektral Percepatan	77
Gambar 5.12	Grafik Respon Spektrum Gempa MCE_R	80
Gambar 5.13	Grafik Perbandingan Respon Spektrum Gempa MCE_R dan DBE	81
Gambar 5.14	<i>Mass Source</i>	84
Gambar 5.15	Menginput Parameter Respon Spektrum	85
Gambar 5.16	<i>Base Reaction</i> Akibat Beban Gempa Statik Ekuivalen	85
Gambar 5.17	<i>Base Reaction</i> Akibat Beban Gempa Dinamik	86
Gambar 5.18	<i>Load Case Gravity</i>	88
Gambar 5.19	<i>Load Application Gravity</i>	88
Gambar 5.20	<i>Results Saved Gravity</i>	89
Gambar 5.21	<i>Nonlinear Parameters Gravity</i>	89
Gambar 5.22	<i>Load Case Pushover X</i>	90
Gambar 5.23	<i>Load Application Pushover X</i>	90
Gambar 5.24	<i>Results Saved Pushover X</i>	91
Gambar 5.25	<i>Nonlinear Parameters Pushover</i>	91
Gambar 5.26	<i>Load Case Pushover Y</i>	92
Gambar 5.27	<i>Load Application Pushover Y</i>	92
Gambar 5.28	<i>Results Saved Pushover Y</i>	93
Gambar 5.29	<i>Nonlinear Parameters Pushover Y</i>	93
Gambar 5.30	<i>Select Frame Balok</i>	94
Gambar 5.31	<i>Input Frame Hinges</i>	94
Gambar 5.32	<i>Setting Hinge Balok</i>	95
Gambar 5.33	<i>Select Frame Kolom</i>	95
Gambar 5.34	<i>Input Frame Hinges</i>	96

Gambar 5.35	<i>Setting Hinge</i> Kolom	96
Gambar 5.36	<i>Set Load Cases to Run</i>	97
Gambar 5.37	Kurva Kapasitas <i>Pushover</i> X dengan Gempa MCE_R	98
Gambar 5.38	Kurva Kapasitas <i>Pushover</i> Y dengan Gempa MCE_R	98
Gambar 5.39	Kurva Kapasitas <i>Pushover</i> X dengan Gempa DBE	99
Gambar 5.40	Kurva Kapasitas <i>Pushover</i> Y dengan Gempa DBE	99
Gambar 5.41	Perbandingan Kurva Kapasitas <i>Pushover</i> pada Arah X dan Y dengan Gempa MCE_R	101
Gambar 5.42	Perbandingan Kurva Kapasitas <i>Pushover</i> pada Arah X dan Y dengan Gempa DBE	102
Gambar 5.43	Perbandingan Kurva Kapasitas <i>Pushover</i> Beban Gempa Level MCE_R dan Gempa Level DBE pada Arah X	102
Gambar 5.44	Perbandingan Kurva Kapasitas <i>Pushover</i> Beban Gempa Level MCE_R dan Gempa Level DBE pada Arah Y	103
Gambar 5.45	<i>Capacity Spectrum</i> Arah X dengan Gempa MCE_R	104
Gambar 5.46	<i>Capacity Spectrum</i> Arah Y dengan Gempa MCE_R	104
Gambar 5.47	<i>Capacity Spectrum</i> Arah X dengan Gempa DBE	105
Gambar 5.48	<i>Capacity Spectrum</i> Arah Y dengan Gempa DBE	105
Gambar 5.49	<i>Step-2</i> Terjadinya Sendi Plastis pada Arah X dengan Beban Gempa MCE_R	108
Gambar 5.50	<i>Step-5</i> Terjadinya Sendi Plastis pada Arah X dengan Beban Gempa MCE_R	108
Gambar 5.51	<i>Step-2</i> Terjadinya Sendi Plastis pada Arah Y dengan Beban Gempa MCE_R	109
Gambar 5.52	<i>Step-5</i> Terjadinya Sendi Plastis pada Arah Y dengan Beban Gempa MCE_R	109
Gambar 5.53	<i>Step-2</i> Terjadinya Sendi Plastis pada Arah X dengan Beban Gempa DBE	110
Gambar 5.54	<i>Step-8</i> Terjadinya Sendi Plastis pada Arah X dengan Beban Gempa DBE	110

- Gambar 5.55 *Step-2* Terjadinya Sendi Plastis pada Arah Y dengan Beban
Gempa *DBE* 111
- Gambar 5.56 *Step-6* Terjadinya Sendi Plastis pada Arah Y dengan Beban
Gempa *DBE* 111



DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1 Denah Lantai Dasar	117
Lampiran 2 Denah Lantai 2	118
Lampiran 3 Denah Lantai 3	119
Lampiran 4 Denah Lantai 4/Atap	120
Lampiran 5 Potongan Gedung Perkantoran	121
Lampiran 6 Pembesian Kolom Lantai 1 s/d Lantai 4	122
Lampiran 7 Pembesian Balok <i>Sloof</i>	123
Lampiran 8 Pembesian Balok Lantai 1 s/d Lantai 4	124



DAFTAR NOTASI DAN SINGKATAN

Ω_0	= Faktor kuat lebih sistem
ϕ_{i1}	= Perpindahan pada lantai i ragam ke 1
a_{pi}	= Percepatan pada titik maksimum
a_y	= Percepatan pada titik leleh
C_d	= Faktor pembesaran defleksi
C_s	= Koefisien respons seismik
C_t	= Nilai parameter periode pendekatan
C_u	= Koefisien
C_{vx}	= Faktor distribusi vertikal
D	= <i>Dead</i>
DED	= <i>Detail Engineering Design</i>
d_{pi}	= Perpindahan pada titik maksimum
d_y	= Perpindahan pada titik leleh
E	= <i>Earthquake</i>
E_D	= Energi yang disisipasi oleh damping
E_{SO}	= Energi regangan maksimum
$f'c$	= Mutu beton
F_a	= Faktor percepatan amplifikasi untuk periode pendek
F_v	= Faktor percepatan amplifikasi untuk periode 1 detik
F_x	= Gaya seismik lateral
F_y	= Mutu baja tulangan
h_i	= Tinggi dari dasar sampai tingkat i
h_n	= Ketinggian struktur
h_x	= Tinggi dari dasar sampai tingkat x
I_e	= Faktor keutamaan gempa
IO	= <i>Immediate Occupancy</i>
k	= eksponen yang terkait dengan periode struktur dengan nilai
k	= Faktor modifikasi redaman
L	= Bentang kolom

L	= <i>Live</i>
L_c	= Tinggi kolom
L_r	= <i>Live roof</i>
LS	= <i>Life Safety</i>
M	= Momen
MCE_R	= <i>Maximum Considered Earthquake, Risk Targeted</i>
N	= Jumlah tingkat
N	= Jumlah lantai
P	= Gaya aksial
PF_1	= Faktor partisipasi ragam untuk ragam ke 1
R	= Koefesien modifikasi respons
R	= <i>Rain</i>
S_1	= Parameter gerak tanah periode 1 detik
SA	= Batuan keras
S_a	= Spektrum percepatan
SB	= Batuan
SC	= Tanah keras, sangat padat dan batuan lunak
S_d	= Spektrum perpindahan
SD	= Tanah sedang
S_{D1}	= Percepatan respon spektral pada periode 1 detik
S_{DS}	= Percepatan respon spektral pada periode pendek
SE	= Tanah lunak
SF	= Tanah khusus, yang membutuhkan investigasi geoteknik spesifik dan analisis respons spesifik-situs yang mengikuti 0
S_{M1}	= Parameter respons spektral MCE pada periode 1 detik
S_{MS}	= Parameter respons spektral MCE pada periode pendek
SR_A	= <i>Spectral reduction factor</i>
SR_v	= <i>Spectral reduction factor</i>
S_s	= Parameter gerak tanah periode pendek
T	= Periode fundamental
T_0	= Periode getar fundamental struktur

- T_a = Periode fundamental pendekatan
 T_S = Periode getar fundamental struktur
 V = Gaya geser dasar seismik
 V = Gaya lateral desain total atau geser di dasar struktur
 W = Berat seismik efektif
 W = Berat struktur (akibat beban mati dan beban hidup tereduksi)
 W = *Wind*
 w_i = Bagian berat seismik efektif total struktur yang ditempatkan atau dikenakan pada tingkat i
 W_i/g = Massa lantai i
 w_x = Bagian berat seismik efektif total struktur yang ditempatkan atau dikenakan pada tingkat x
 x = Nilai parameter periode pendekatan
 α_1 = Koefesien massa ragam untuk ragam ke 1
 β_{eff} = Redaman viskous efektif
 β_o = Redaman histeristik yang digambarkan sebagai redaman *viscous* ekivalen
 Δ_{atap} = Perpindahan atap (yang digunakan pada kurva kapasitas)
 θ_b = Sudut geser balok
 θ_c = Sudut geser kolom

ABSTRAK

Analisis *pushover* digunakan untuk mengetahui perilaku struktur akibat gempa yang berbasis *performance based design* dengan konsep memberikan suatu pola beban lateral statik terhadap bangunan secara bertahap sampai memenuhi target perpindahan lateral (*displacement*) yang direncanakan. Hasil dari analisis ini adalah berupa kurva *base shear-roof displacement* yang selanjutnya digunakan untuk menentukan titik kinerja (*performance point*) dan tingkat kinerja struktur berdasarkan ATC-40,1996.

Pada penelitian ini dilakukan pemodelan dari Gedung Kantor yang berada di Kota Padang, gedung tersebut dianalisis menggunakan analisis *pushover* untuk mengetahui nilai *performance point*, mengetahui tingkat kinerja struktur, dan mekanisme sendi plastis yang terjadi jika ketiga tujuan tersebut diberi level beban gempa MCE_R dan beban gempa DBE . Analisis *pushover* ini dilakukan dengan menggunakan bantuan *software* SAP2000 v22 dengan menggunakan ketentuan ATC-40,1996.

Nilai *performance point* yang diperoleh dengan menggunakan level beban gempa MCE_R untuk arah x yaitu $V = 20149,839$ kN dan $\delta = 0,309$ m, untuk arah Y yaitu $V = 26643,810$ kN dan $\delta = 0,231$ m sedangkan apabila menggunakan level beban gempa DBE didapat nilai arah x yaitu $V = 16186,151$ kN dan $\delta = 0,175$ m, untuk arah Y yaitu $V = 20103,415$ kN dan $\delta = 0,131$ m. Hasil penelitian menunjukkan bahwa tingkat kinerja struktur dengan level beban gempa MCE_R adalah *Damage Control* sedangkan tingkat kinerja struktur dengan level beban gempa DBE adalah *Immediate Occupancy*. Mekanisme sendi plastis yang terjadi baik pada level beban gempa MCE_R dan DBE adalah *strong column weak beam*, dimana sendi plastis yang terjadi pada balok terlebih dahulu.

Kata kunci: *pushover*, gempa, *performance point*, sendi plastis

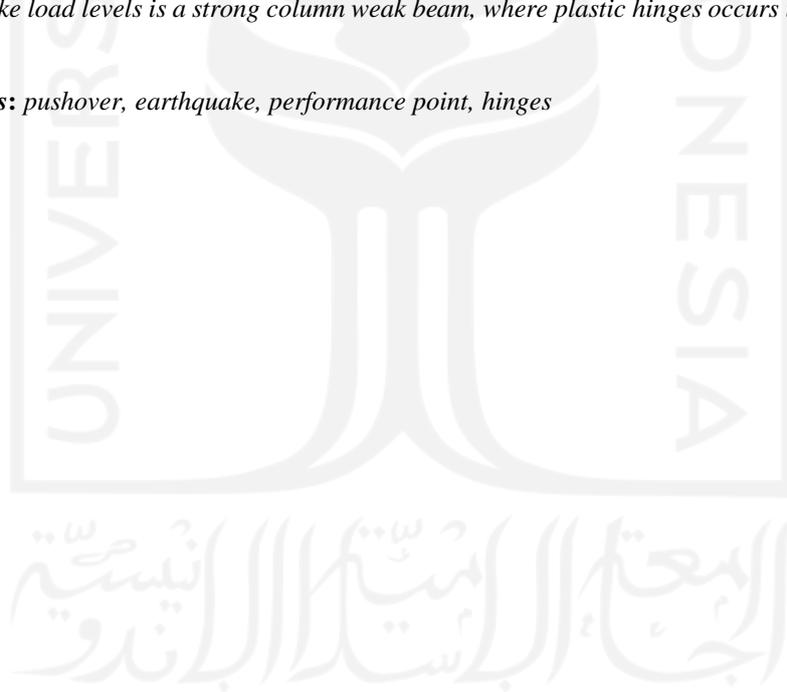
ABSTRACT

Pushover analysis is used to determine the behavior of structures due to earthquakes based on performance based design with the concept of providing a pattern of static lateral loads on buildings gradually until they meet the planned displacement targets. The result of this analysis is a base shear-roof displacement curve which is then used to determine the performance point and performance level of the structure based on ATC-40,1996.

In this research, modeling of office buildings located in Padang City was carried out, the building was analyzed using pushover analysis to determine the performance point value, determine the level of structural performance, and the plastic hinge mechanism that occurs if the three objectives are given MCE_R and DBE earthquake load levels. This pushover analysis was carried out using the help of SAP2000 v22 software using the provisions of ATC-40, 1996.

Performance point values obtained using the MCE_R earthquake load level for the x direction, namely $V = 20149.839$ kN and $\delta = 0.309$ m, for the Y direction, namely $V = 26643.810$ kN and $\delta = 0.231$ m while using the DBE earthquake load level obtained the x direction values are $V = 16186.151$ kN and $\delta = 0.175$ m, for the Y direction are $V = 20103.415$ kN and $\delta = 0.131$ m. The results showed that the performance level of the structure with the MCE_R earthquake load level was Damage Control while the performance level of the structure with the DBE earthquake load level was Immediate Occupancy. The plastic hinges mechanism that occurs both at the MCE_R and DBE earthquake load levels is a strong column weak beam, where plastic hinges occurs in the beam first.

Keywords: *pushover, earthquake, performance point, hinges*



BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Kondisi alam Indonesia berada pada jalur *Ring of Fire* atau daerah pertemuan antara empat lempeng tektonik utama yaitu lempeng Eurasia, Indo-Australia, Pasifik, dan Filipina yang telah menjadi tantangan tersendiri dalam konstruksi gedung bertingkat akibat adanya ancaman risiko bencana alam yaitu gempa bumi. Gempa yang diakibatkan oleh pergerakan lempeng bumi merupakan penyebab terbesar dari gempa yang akan menimbulkan kerusakan pada struktur gedung. Gempa bumi yang terjadi di Indonesia banyak menyebabkan bangunan rusak sehingga terjadinya keruntuhan pada bangunan dan mengakibatkan banyaknya korban jiwa. Oleh karena itu, yang menjadi permasalahan utama dalam perencanaan dan pelaksanaan struktur bangunan bertingkat adalah bagaimana supaya struktur gedung tersebut memiliki ketahanan dalam menerima beban lateral gempa. Berbagai sistem penahan beban lateral telah digunakan pada gedung-gedung tinggi, namun untuk penggunaan sistem penahan beban lateral secara tepat dan efektif perlu dilakukan perencanaan yang berbasis kinerja, sehingga akan diketahui kapasitas struktur dalam menerima beban lateral serta mengetahui perilaku inelastis dari struktur.

Dalam penelitian ini, digunakan metode analisis statik nonlinear beban dorong (*pushover*) untuk mengevaluasi kinerja struktur pada gedung kantor. Kebutuhan analisis nonlinear yang sederhana namun dapat meramalkan perilaku struktur terhadap gaya gempa secara tepat semakin meningkat. Analisis *pushover* adalah suatu analisis statik nonlinear dimana pengaruh beban gempa terhadap struktur bangunan gedung dianggap sebagai beban-beban statik yang menangkap pada pusat massa masing masing lantai, yang nilainya ditingkatkan secara berangsur-angsur sampai melampaui pembebanan yang menyebabkan terjadinya sendi plastis (pelelehan) pertama di dalam struktur bangunan gedung, kemudian dengan peningkatan beban lebih lanjut mengalami perubahan pasca elastik yang

besar sampai mencapai kondisi plastis dengan menggunakan *software* SAP2000 v22.

Evaluasi kinerja struktur bangunan perlu dilakukan untuk meminimalisasi risiko yang ditimbulkan oleh gempa bumi. Bangunan dievaluasi menggunakan analisis *pushover* berdasarkan ATC-40 yang merupakan salah satu metode evaluasi pada bangunan dengan berpedoman pada *performance based evaluation design*. Pada penelitian ini gedung yang digunakan sebagai studi kasus adalah gedung perkantoran yang berada di Kota Padang, Provinsi Sumatera Barat, daerah yang rawan terhadap gempa bumi. Gedung yang akan ditinjau merupakan gedung yang akan dibangun, termasuk dalam kategori risiko II, dan berdiri pada kondisi tanah lunak.

Oleh karena itu, perlu dilakukan penelitian untuk mengetahui apakah gedung tersebut memenuhi level kinerja yang dipersyaratkan untuk gedung yang termasuk kategori risiko II. Tingkat pembebanan level gempa menjadi batasan dalam penelitian level kinerja struktur. Pada umur layan bangunan 50 tahun terdapat tiga tingkatan gempa yaitu gempa ringan atau *Service Level Earthquake (SLE)*, gempa desain atau *Desain Basis Earthquake (DBE)*, dan gempa besar atau (*Maximum Considered Earthquake, Risk Targeted*). Gempa desain adalah gempa dengan periode 500 tahun dan keruntuhan struktur sebesar 10% untuk umur bangunan 50 tahun. Gempa besar adalah gempa dengan periode 2500 tahun dan keruntuhan struktur sebesar 2% untuk umur bangunan 50 tahun. Dalam penelitian ini akan dilakukan evaluasi kinerja struktur akibat gempa level desain (*DBE*) dan gempa level MCE_R . Struktur yang termasuk dalam kategori risiko II diharapkan memiliki level kinerja *Immediate Occupancy* saat diberi beban gempa *DBE* dan diharapkan memiliki level kinerja *Collapse Prevention* jika diberi beban gempa MCE_R .

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah diuraikan dihalaman sebelumnya terdapat empat rumusan masalah dalam penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Berapa nilai V dan δ pada saat *performance point* tercapai dari hasil analisis *pushover* dengan beban gempa MCE_R (*Maximum Considered Earthquake, Risk Targeted*)?
2. Berapa nilai V dan δ pada saat *performance point* tercapai dari hasil analisis *pushover* dengan beban gempa DBE (*Desain Basis Earthquake*)?
3. Bagaimana perbandingan level kinerja struktur pada gedung perkantoran yang ditinjau dengan menggunakan beban gempa MCE_R (*Maximum Considered Earthquake, Risk Targeted*) dan beban gempa DBE (*Desain Basis Earthquake*)?
4. Bagaimana mekanisme sendi plastis setelah dilakukan analisis *pushover* dengan beban gempa MCE_R (*Maximum Considered Earthquake, Risk Targeted*)?
5. Bagaimana mekanisme sendi plastis setelah dilakukan analisis *pushover* dengan beban gempa DBE (*Desain Basis Earthquake*)?

1.3 Tujuan Penelitian

Mengacu pada rumusan masalah diatas adapun tujuan dari penelitian ini adalah untuk :

1. mendapatkan nilai V dan δ pada saat *performance point* yang tercapai dari hasil analisis *pushover* dengan beban gempa MCE_R (*Maximum Considered Earthquake, Risk Targeted*),
2. mendapatkan nilai V dan δ pada saat *performance point* yang tercapai dari hasil analisis *pushover* dengan beban gempa DBE (*Desain Basis Earthquake*),
3. mendapatkan dan mengetahui perbandingan level kinerja struktur gedung perkantoran yang ditinjau berdasarkan ATC-40 dengan beban gempa MCE_R (*Maximum Considered Earthquake, Risk Targeted*) dan beban gempa DBE (*Desain Basis Earthquake*),
4. mengetahui mekanisme sendi plastis yang terjadi akibat beban gempa MCE_R (*Maximum Considered Earthquake, Risk Targeted*), dan

5. mengetahui mekanisme sendi plastis yang terjadi akibat beban gempa *DBE* (*Design Basis Earthquake*).

1.4 Batasan Penelitian

Batasan penelitian diperlukan dalam pembuatan penelitian agar tidak meluasnya topik permasalahan dan pembahasan, sehingga topik permasalahan dan pembahasan akan dibatasi sebagai berikut.

1. Bangunan yang diteliti adalah gedung perkantoran yang berada di Kota Padang, Provinsi Sumatera Barat.
2. Struktur gedung merupakan gedung beton bertulang yang berfungsi sebagai gedung kantor.
3. Bangunan yang ditinjau merupakan gedung yang akan dibangun, terdiri atas 4 lantai dengan ketinggian pada lantai 1 yaitu 5 meter dan sisanya 4 meter, dan tidak memiliki *basement*.
4. Gedung berada pada kondisi tanah lunak.
5. Metode analisis yang digunakan adalah analisis *pushover*.
6. Penelitian berfokus pada evaluasi kinerja struktur terhadap gempa bumi yaitu *drift ratio*, *level performance*, dan mekanisme keruntuhan.
7. Jenis beban gempa yang digunakan adalah gempa besar atau MCE_R (*Maximum Considered Earthquake, Risk Targeted*) dan gempa desain atau *DBE* (*Design Basis Earthquake*) yang hanya digunakan sebagai pembandingan terhadap gempa besar.
8. Pembebanan gedung meliputi :
 - a. beban mati (meliputi berat sendiri gedung),
 - b. beban hidup (beban dari fungsi bangunan tersebut), dan
 - c. beban lateral (meliputi beban gempa horizontal).
9. Pemodelan dan perilaku struktur dievaluasi dengan *open frame*, tidak memodelkan tangga, *lift* dan, atap, ketiga komponen struktur tersebut hanya diasumsikan sebagai beban.
10. *Shearwall* dimodelkan sebagai *shell-thick*.
11. Balok, kolom, dan *sloof* dimodelkan menggunakan *frame section designer*.

12. Pelat dimodelkan sebagai *shell-thin*.
13. Struktur bawah tidak dianalisis.
14. Didalam analisis struktur semua tumpuan diasumsikan jepit.
15. Untuk mempercepat perhitungan dengan tingkat yang lebih akurat, analisis struktur dilakukan dengan menggunakan program aplikasi analisis struktur yaitu *software* SAP2000 v22.
16. Input *hinge properties* dilakukan secara *default* dengan menggunakan *software* SAP2000 v22, penampang balok dimodelkan dengan pilihan model momen M3 yang artinya sendi plastis hanya terjadi karena momen searah sumbu lokal 3, sedangkan pada kolom adalah model P-M2-M3 yang mempunyai arti bahwa sendi plastis terjadi karena interaksi gaya aksial (P) dan momen (M) sumbu lokal 2 dan sumbu lokal 3.
17. Peraturan yang digunakan antara lain :
 - a. Beban Minimum untuk Perancangan Bangunan Gedung dan Struktur Lain (SNI 03-1727-2020) yang digunakan untuk mencari beban hidup bangunan.
 - b. Tata Cara Perencanaan Ketahanan Gempa untuk Struktur Bangunan Gedung dan Non Gedung (SNI 03-1726-2019).
 - c. Persyaratan Beton Struktural untuk Bangunan Gedung (SNI 03-2847-2019).
 - d. Peraturan Pembebanan Indonesia Untuk Gedung 1983 untuk mencari beban mati bangunan.
 - e. Kriteria level kinerja struktur gedung menggunakan peraturan *Applied Technology Council* (ATC-40, 1996).
18. Tidak meninjau segi ekonomis dan estetika bangunan.

1.5 Manfaat Penelitian

Manfaat penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Manfaat bagi penulis dapat menambah :
 - a. ilmu dan pemahaman mengenai analisis statik nonlinear (*pushover*), dan
 - b. pemahaman mengenai aplikasi dari *software* SAP2000 v22.

2. Manfaat bagi gedung yang menjadi bahan studi kasus yaitu dapat digunakan sebagai acuan dalam perencanaan gedung.
3. Manfaat bagi pembaca :
 - a. menambah wawasan dan ilmu pengetahuan mengenai perilaku struktur bangunan terhadap gempa dengan menggunakan analisis *pushover*, dan
 - b. menjadi referensi jika ada penelitian lanjutan mengenai analisis *pushover*.



BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

Pada BAB I sebelumnya telah dibahas mengenai latar belakang, rumusan masalah, tujuan penelitian, batasan-batasan penelitian, dan manfaat penelitian. Selanjutnya pada BAB II akan membahas mengenai kajian penelitian yang berkaitan dengan evaluasi kinerja struktur gedung menggunakan analisis *pushover*.

2.1 Ringkasan Penelitian

Ringkasan penelitian dari berbagai sumber yang terkait dibuat untuk memberikan gambaran maupun masukan terhadap penelitian yang akan dilakukan, serta membandingkan hasil penelitian yang dilakukan dengan penelitian yang telah dilakukan sebelumnya sehingga diperoleh kesimpulan yang berkesinambungan. Berikut merupakan rangkuman beberapa penelitian terdahulu dengan penelitian yang akan dilakukan.

2.2 Penelitian Sejenis Terdahulu

Dalam pelaksanaan tinjauan pustaka perlu dilakukan untuk mengetahui perkembangan penelitian yang telah dilakukan sebelumnya mengenai evaluasi kinerja struktur menggunakan analisis *pushover* untuk menghindari adanya plagiasi. Penelitian mengenai evaluasi kinerja struktur bangunan telah banyak dilakukan oleh beberapa peneliti sebelumnya. Dalam bab ini disajikan beberapa penelitian yang telah dilakukan untuk mengetahui kinerja struktur bangunan terhadap gaya gempa dan menggunakan analisis *pushover* untuk memprediksi kinerja struktur terhadap gempa. Adapun penelitian yang telah dilakukan sebelumnya.

Pemodelan dari Gedung Fakultas Ilmu Sosial dan Politik Universitas Brawijaya dianalisis untuk mengetahui simpangan antar lantainya, tingkat kinerja dari bangunan, dan titik performa yang dihasilkan dengan dua macam respon spektrum desain berdasarkan SNI-1726-2002 dan SNI-1726-2012. Analisis dilakukan dengan menggunakan bantuan program SAP2000 v19 dan berdasarkan

ketentuan yang ada pada ATC-40 1996. Tipe *hinge properties* yang dipakai untuk balok adalah momen M3 yang berarti sendi plastis terjadi hanya karena momen searah sumbu lokal 3 dan tipe *hinge properties* untuk kolom bawah adalah P-M-M yang artinya sendi plastis terjadi karena interaksi gaya aksial dan momen. Hasil yang diperoleh dari *pushover analysis* ini untuk prosedur A adalah dimana dihasilkan titik performa (0,315, 0,0602) untuk gempa desain respon spektrum SNI-1726-2002 dan (0,205, 0,0379) untuk gempa desain respon spektrum SNI 1726-2012. Sedangkan titik performa (*performance point*) untuk prosedur B dimana dihasilkan titik performa (0,277, 0,08) untuk gempa desain respon spektrum SNI-1726-2002 dan (0,184, 0,053) untuk gempa desain respon spektrum SNI-1726-2012. Mekanisme runtuh yang terjadi dimulai dari balok terlebih dahulu baru kemudian kolom sehingga bangunan masih relatif aman untuk dihuni (*beam sidesway mechanism*). Berdasarkan ATC-40 1997 semua hasil analisis baik prosedur A maupun prosedur B dengan dua peraturan berdasarkan SNI 2002 dan 2012 tingkat kinerja struktur adalah *Immediate Occupancy*. (Sandhi dkk, 2017).

The Venetian Tower merupakan salah satu apartemen dengan ketinggian 116,7 m yang termasuk dalam kategori risiko II. Untuk menjaga keselamatan penghuninya, bangunan harus memberikan kinerja yang optimal. Penelitian dilakukan pada bangunan ini bertujuan untuk mengetahui level kinerja struktur, pola keruntuhan, serta kapasitas balok dan kolom. Penelitian dimulai dari pengumpulan data kemudian dari data yang telah didapatkan dilakukan pembuatan model 3 dimensi menggunakan aplikasi pemodelan struktur. Selanjutnya memasukkan beban mati, beban hidup dan beban gempa. Kemudian pendefinisian analisis *pushover*, lalu menjalankan aplikasi yang akan menghasilkan kurva kapasitas, sendi plastis, dan *performance point*. Selanjutnya penentuan kinerja struktur sesuai ATC-40. Kemudian pengecekan kapasitas pada balok dan kolom yang dipilih mengacu pada SNI 2847 (2019). Berdasarkan hasil analisis *pushover*, didapatkan nilai simpangan atap 629,178 mm pada arah x dan 759,87 mm pada arah y. Level kinerja struktur *The Venetian Tower* berada pada level kinerja *Immediate Occupancy*, jika gempa yang terjadi berada pada skala MMI VIII atau 6 S.R. Tingkat daktilitas struktur bangunan adalah daktil parsial, dimana nilai rasio

daktilitas 1,0778 pada arah x dan 1,2131 pada arah y. Mekanisme keruntuhan struktur menunjukkan mekanisme *strong column weak beam*, dimana sendi plastis terjadi pada balok terlebih dahulu. (Asmara dkk, 2021).

Penelitian pada Gedung Politeknik Negeri Batam didesain menggunakan peraturan gempa SNI 1726:2012, maka perlu dilakukan *review* desain untuk mengetahui kinerja struktur atas dan kekuatan struktur terhadap pengaruh beban gempa berdasarkan SNI 1726-2019. Pada penelitian ini struktur dimodelkan menggunakan program ETABS V18 untuk menganalisis tulangan penampang seperti geser, lentur dan torsi pada balok dan kolom serta menganalisis perilaku struktur. Selanjutnya dilakukan analisis struktur terhadap gempa dengan metode *pushover analysis* untuk mengetahui perilaku keruntuhan struktur bangunan menggunakan peraturan FEMA 440. Hasil analisis ini menunjukkan penampang masih memenuhi syarat dengan hasil gaya dalam pada penampang SNI 2847-2019 terhadap SNI 2847-2013 mengalami peningkatan pada balok 0,14%-35% dan pada kolom 7%-24%. *Drift story* maksimum mendapatkan hasil lebih kecil dan kurang dari 0,01. Sehingga, hasil level kinerja gedung dengan metode *pushover analysis* berdasarkan FEMA 440 struktur dapat dikategorikan dalam kondisi IO (*Immediate Occupancy*). (Rulliananda dkk, 2021). Adapun perbedaan penelitian dengan topik yang sama tercantum dalam Tabel 2.1 berikut.

Tabel 2.1 Perbandingan Penelitian dengan Topik yang Sama

Peneliti	Sandhi, dkk	Asmara, dkk	Rulliananda dan Sutriyono
Tahun	2017	2021	2021
Lokasi	Gedung Fakultas Ilmu Sosial dan Politik (FISIP) Universitas Brawijaya	Apartemen Kingland Avenue Serpong Tower 3 (<i>The Venetian Tower</i>), Jalan Raya Serpong KM 08 Pakulona Serpong Utara, Tangerang Selatan, Banten	Gedung Politeknik Negeri Batam
Judul Penelitian	Kajian Analisis <i>Pushover</i> untuk <i>Perfomanced Based Design</i> pada Gedung Fakultas Ilmu Sosial dan Politik (FISIP) Universitas Brawijaya	Evaluasi Kinerja Struktur Bangunan Tinggi dengan Analisis <i>Pushover</i> Menggunakan Aplikasi Pemodelan Struktur (Studi Kasus: <i>The Venetian Tower</i>)	<i>Review</i> Desain Kinerja Struktur Atas Gedung Politeknik Negeri Batam Berdasarkan Peraturan SNI 1726-2019 Menggunakan Metode <i>Pushover Analysis</i>

Lanjutan Tabel 2.2 Perbandingan Penelitian dengan Topik yang Sama

Peneliti	Sandhi, dkk	Asmara,dkk	Rulliananda dan Sutriyono
Tahun	2017	2021	2021
Tujuan Penelitian	<ol style="list-style-type: none"> 1. Mengetahui <i>mode shape</i> (pola ragam getar) dari struktur bangunan. 2. Mengetahui waktu getar alami efektif struktur bangunan. 3. Mengetahui besarnya deformasi lateral pada struktur bangunan. 4. Mengetahui perbandingan antara analisis dinamik dan analisis statik non-linear <i>pushover analysis</i> dengan prosedur A dan prosedur B berdasarkan pada ketentuan SNI-1726 2002 dan SNI-1726-2012. 5. Mengetahui <i>performance point</i> berdasarkan ketentuan ATC-40. 6. Mengetahui tingkat pelayanan dari struktur gedung. 	Mengetahui level kinerja struktur, pola keruntuhan, serta kapasitas balok dan kolom.	Mengetahui hasil simpangan berdasarkan peraturan SNI 1726-2012 dan SNI 1726-2019 dan mengetahui keamanan penampang serta mengetahui kategori level kinerja pada struktur Politeknik Negeri Batam.

Lanjutan Tabel 2.3 Perbandingan Penelitian dengan Topik yang Sama

Peneliti	Sandhi, dkk	Asmara, dkk	Rulliananda dan Sutriyono
Tahun	2017	2021	2021
Metode	<ol style="list-style-type: none"> 1. Pengumpulan data teknis bangunan gedung. 2. Evaluasi struktur bangunan mengacu pada ATC-40. 3. Evaluasi yang digunakan yaitu analisis dinamik ragam spektrum respons dan analisis statik non-linear <i>pushover</i>. 4. Menggunakan perangkat lunak SAP 2000 v19. 5. Tipe <i>hinge properties</i> yang dipakai untuk balok adalah momen M3 dan untuk kolom bawah adalah P-M-M. 6. Menggunakan beban gempa desain. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Dilakukan dengan metode analisis data kuantitatif. 2. Mengacu pada SNI 1726-2019, SNI 2847-2019, dan ATC-40. 3. <i>Hinge properties</i> dimodelkan disetiap ujung balok dan kolom. 4. Menggunakan beban gempa rencana. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Pengumpulan data. 2. Mengacu pada SNI 1726-2019, SNI 2847-2019, dan FEMA 440. 3. Menggunakan software ETABS 18. 4. Analisis level kinerja menggunakan metode analisis <i>pushover</i>. 5. Menggunakan beban gempa (SNI 03-1726-2012 dan SNI 03-1726 2019).

Lanjutan Tabel 2.4 Perbandingan Penelitian dengan Topik yang Sama

Peneliti	Sandhi, dkk	Asmara,dkk	Rulliananda dan Sutriyono
Tahun	2017	2021	2021
Hasil Penelitian	<p>1. Untuk analisis <i>pushover</i> menggunakan hasil <i>output</i> dari SAP2000, nilai Sa-Sd yang mengacu pada SNI 1726-2002 lebih besar dibandingkan dengan SNI 1726-2012.</p> <p>2. Level kinerja bangunan adalah <i>Immediate Occupancy</i> dengan menggunakan respon spektrum dari SNI 1726-2002 dan SNI 1726-2012.</p>	<p>1. <i>Performance point</i> gedung menunjukkan gedung berperilaku daktail parsial.</p> <p>2. Berdasarkan ATC-40 struktur termasuk ke dalam kategori <i>Immediate Occupancy</i> (IO).</p> <p>3. Mekanisme sendi plastis terjadi pada balok terlebih dahulu.</p>	<p>1. Penampang seluruh struktur dikategorikan aman.</p> <p>2. Simpangan antar lantai (<i>drift story</i>) tingkat desain semua tingkat maksimum untuk arah x dan y telah memenuhi syarat</p> <p>3. Level kinerja gedung termasuk kedalam kategori <i>Immediate Occupancy</i> (IO).</p>

2.3 Keaslian Penelitian

Berdasarkan sumber pada sejumlah penelitian yang telah dicantumkan sebelumnya pada Tabel 2.1, penelitian yang akan dilakukan oleh penulis merupakan hasil karya asli dan bukan merupakan plagiasi. Adapun perbedaan penelitian yang dilakukan adalah sebagai berikut.

1. Lokasi yang akan digunakan dalam penelitian yang difungsikan sebagai gedung perkantoran berada pada Kota Padang, Provinsi Sumatera Barat dengan kondisi tanah lunak dan kategori risiko II.
2. Struktur gedung perkantoran berupa beton bertulang dengan jumlah 4 tingkat dengan tinggi tingkat pertama yaitu 5 meter dan sisanya 4 meter sehingga tinggi total bangunan yaitu 17 meter.
3. Gedung yang dievaluasi berlandaskan sistem ganda yaitu gabungan antara sistem antara portal dan dinding geser, berlandaskan pada peraturan SNI 1726-2019, SNI 1727-2020, SNI 2847-2019, PPIUG 1983, dan ATC-40 1996.
4. Pemodelan pada elemen struktur (balok, kolom, dan *sloof*) dimodelkan menggunakan *section designer* yang bertujuan untuk mengetahui momen kurvatur atau kelengkungan pada elemen struktur dikarenakan material gedung ini adalah beton bertulang.
5. Analisis *pushover* dilakukan dengan menggunakan beban gempa besar MCE_R (*Maximum Considered Earthquake, Risk Targeted*) yang hasilnya dibandingkan dengan hasil analisis *pushover* terhadap gempa desain atau *DBE* (*Design Basis Earthquake*).
6. Penelitian ini dimodelkan dengan menggunakan *software* SAP2000 v22.

BAB III LANDASAN TEORI

Pada BAB II sebelumnya telah dibahas mengenai kajian penelitian yang berkaitan dengan evaluasi kinerja struktur gedung dengan menggunakan analisis *pushover*. Selanjutnya BAB III ini akan membahas teori-teori yang mendukung penelitian ini. Dimana teori-teori yang digunakan mengacu pada SNI 1726-2019, SNI 1727-2020, SNI 2847-2019, PPIUG 1983, dan ATC-40 1996.

3.1 Gempa Bumi

Menurut Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika (BMKG, 2017) gempa bumi adalah peristiwa bergetarnya bumi akibat pelepasan energi di dalam bumi secara tiba-tiba yang ditandai dengan patahnya lapisan batuan pada kerak bumi. Akumulasi energi penyebab terjadinya gempa bumi dihasilkan dari pergerakan lempeng-lempeng tektonik. Energi yang dihasilkan dipancarkan ke segala arah berupa gelombang gempa bumi sehingga efeknya dapat dirasakan sampai ke permukaan bumi. Getaran kerak bumi dapat terjadi akibat pergerakan lempeng bumi, akibat aktivitas gunung berapi dan akibat kelongsoran tanah. Gempa yang diakibatkan gerakan lempeng bumi disebut dengan gempa tektonik. Gempa yang diakibatkan aktivitas gunung berapi disebut gempa vulkanis. Gempa yang diakibatkan longsor atau ledakan disebut gempa terban.

Diantara beberapa jenis gempa, gempa tektonik adalah gempa yang paling luas dan besar pengaruhnya. Gempa ini terjadi akibat letupan atau pelepasan energi regangan akibat gesekan antara lempeng bumi. Besar energi yang dilepaskan mempengaruhi besarnya magnitude gempa yang ditimbulkan (Dewi dan Sudrajat, 2007).

3.2 Konsep Perencanaan Bangunan Tahan Gempa

Bangunan yang didesain tahan gempa harus mempunyai beberapa kriteria berikut yaitu kekuatan, kekakuan, dan stabilitas yang cukup untuk mencegah

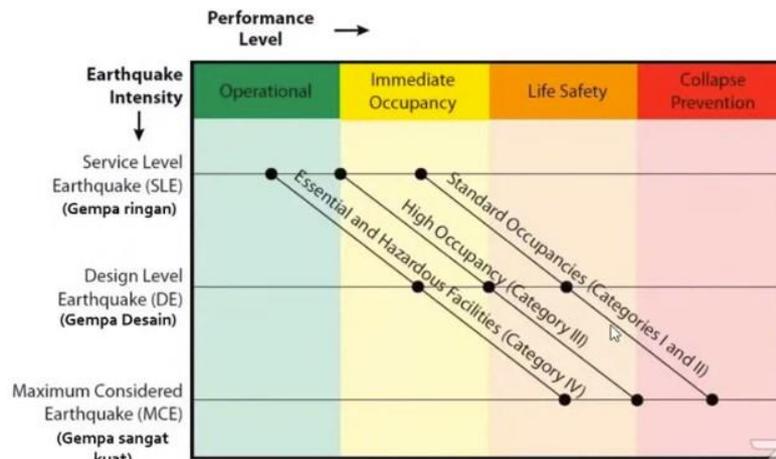
terjadinya kegagalan pada struktur. Berikut ini adalah konsep dasar perencanaan bangunan menurut Widodo (2012) :

1. ketika diterpa gempa kecil, struktur bangunan dan fungsi bangunan harus dapat tetap berjalan sehingga struktur harus kuat dan tidak ada kerusakan baik pada elemen struktural dan nonstruktural bangunan,
2. ketika diterpa gempa menengah, struktur diperbolehkan mengalami kerusakan pada elemen nonstruktural, tetapi tidak pada elemen struktural, dan
3. ketika diterpa gempa besar, diperbolehkan terjadi kerusakan pada elemen struktural dan nonstruktural, namun tidak boleh sampai menyebabkan bangunan runtuh total sehingga tidak ada korban jiwa.

3.3 Perencanaan Bangunan Tahan Gempa Berbasis Kinerja

Perancangan bangunan tahan gempa dilakukan untuk mempertahankan setiap pelayanan vital dari fungsi bangunan, membatasi ketidaknyamanan penghunian, dan kerusakan bangunan hingga masih dapat diperbaiki ketika terjadi gempa ringan sampai besar dan menghindari terjadinya korban jiwa oleh runtuhnya bangunan akibat gempa kuat (SNI 03-1726-2019). Kecenderungan perancangan saat ini memanfaatkan teknik analisis nonlinear berbasis komputer (analisis *pushover*) untuk mengetahui respon inelastis struktur saat terjadi gempa dan mengukur level kinerja suatu struktur.

Secara singkat proses perencanaan dimulai dengan membuat desain awal bangunan kemudian disimulasikan kinerjanya terhadap beberapa beban gempa. Setelah itu apabila hasil simulasi masih dibawah parameter minimum yang ditentukan diawal, akan dilakukan *re-design* sehingga kinerja bangunan dapat sesuai target. *Performance based seismic design* juga dapat diterapkan untuk memperkuat (*upgrading*) bangunan yang sudah ada. Berikut ini merupakan level kinerja berdasarkan ASCE 41 dengan faktor keutamaan yang disesuaikan dengan SNI 03-1726-2019 yang ditampilkan dalam Gambar 3.1.



Gambar 3.1 Level Kinerja

(Sumber : ASCE 41, Sosialisasi SNI 03-1726-2019, 2021)

Beban gempa yang diperhitungkan dalam SNI 03-1726-2019 didasarkan pada umur layan bangunan 50 tahun yang terbagi dalam tiga tingkatan seperti yang telah ditampilkan pada Gambar 3.1 dimana tingkat pembebanan gempa ini juga menjadi batasan dari tingkat kinerja bangunan yang diharapkan. Berikut adalah tiga tingkatan beban gempa tersebut :

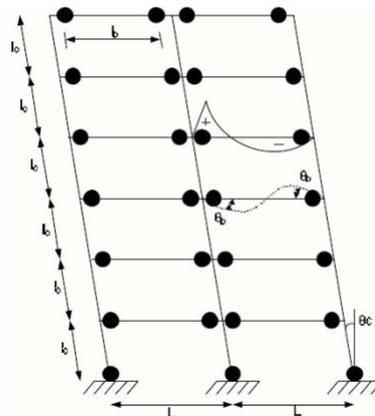
1. gempa ringan (*frequent*, perioda ulang 72 tahun),
2. gempa desain (besarnya diambil $\frac{2}{3} \times MCE_R$), dan
3. gempa sangat kuat (MCE_R perioda ulang 2500 tahun).

3.4 Mekanisme Keruntuhan

Ada dua tipe mekanisme keruntuhan yang biasa terjadi pada analisis statik sebagai batas analisis berdasarkan ATC-40, yaitu *beam sway mechanism* dan *column sway mechanism*. *Beam sway mechanism* merupakan pembentukan sendi plastis pada ujung-ujung balok, sedangkan *column sway mechanism* merupakan pembentukan sendi plastis pada kedua ujung baik atas maupun bawah dari elemen struktur vertikal. Dalam perencanaannya, mekanisme keruntuhan yang diharapkan adalah *beam sway mechanism*, hal ini disebabkan beberapa alasan yaitu sebagai berikut :

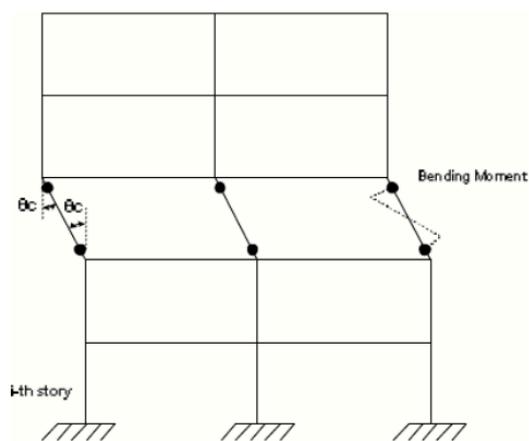
1. pada *beam sway mechanism*, jumlah sendi plastis terbentuk dalam banyak elemen sehingga energi yang dipancarkan semakin banyak pula,

2. pada *column sway mechanism*, sendi plastis hanya akan terbentuk pada ujung-ujung kolom pada satu lantai saja, sehingga pemancaran energi hanya terjadi pada sejumlah kecil elemen, dan
3. daktilitas kurvatur yang harus dipenuhi oleh balok pada umumnya jauh lebih mudah dipenuhi daripada kolom yang sering kali memiliki daktilitas yang terbatas akibat besarnya gaya aksial tekan yang bekerja.



Gambar 3.2 Mekanisme Keruntuhan *Beam Sway Mechanism*

(Sumber : ATC-40 Volume 1, 1996)



Gambar 3.3 Mekanisme Keruntuhan *Column Sway Mechanism*

(Sumber : ATC-40 Volume 1, 1996)

Dengan keterangan :

- L_c = Tinggi kolom
- L = Bentang kolom
- θ_b = Sudut geser balok
- θ_c = Sudut geser kolom

3.5 Pembebanan Struktur

Berikut peraturan-peraturan yang digunakan dalam menentukan beban-beban yang bekerja pada struktur.

1. SNI 1726-2019 tentang Tata Cara Perencanaan Ketahanan Gempa untuk Struktur Bangunan Gedung dan Non Gedung.
2. Peraturan Pembebanan Indonesia untuk Gedung Tahun 1983.
3. Penentuan level kinerja struktur berdasarkan ATC-40 1996.

Perhitungan besar beban yang bekerja pada struktur terdiri dari beban tetap (beban mati dan beban hidup) dan beban sementara (beban gempa), dimana nilai bebannya ditentukan berdasarkan jenis dan fungsi bangunan yang akan dikerjakan. Pada penelitian ini yang akan dianalisis hanya 3 jenis beban yang paling berpengaruh terhadap struktur yaitu beban mati, beban hidup, dan beban gempa.

3.6 Beban Mati

Beban mati adalah beban dari semua bagian suatu gedung yang bersifat tetap, termasuk segala berat tambahan dan peralatan atau mesin-mesin yang tidak dapat dipisahkan dari gedung tersebut atau intensitasnya tetap dan posisinya tidak berubah selama usia bangunan, yang termasuk kedalam beban mati yaitu balok, kolom, pelat, berat dinding, *plafond*, dan sebagainya. Beban mati dari bangunan dapat dihitung secara akurat berdasarkan bentuk, ukuran, dan jenis materialnya. Untuk beban mati diambil berdasarkan Peraturan Pembebanan Indonesia untuk Gedung (PPIUG 1983). Berikut beban mati yang dapat dilihat pada Tabel 3.1 dan Tabel 3.2.

Tabel 3.1 Berat Sendiri Bahan Bangunan

No	Bahan Bangunan	Beban	Satuan
1	Baja	7850	kg/m ³
2	Batu alam	2600	kg/m ³
3	Batu belah, batu bulat, batu gunung (berat tumpuk)	1500	kg/m ³
4	Batu karang (berat tumpuk)	700	kg/m ³
5	Batu pecah	1450	kg/m ³
6	Besi tuang	7250	kg/m ³
7	Beton	2200	kg/m ³
8	Beton bertulang	2400	kg/m ³

(Sumber : PPIUG 1983, halaman 11)

Lanjutan Tabel 3.1 Berat Sendiri Bahan Bangunan

No	Bahan Bangunan	Beban	Satuan
9	Kayu (Kelas I)	1000	kg/m ³
10	Kerikil, koral (kering udara sampai lembab, tanpa diayak)	1650	kg/m ³
11	Pasangan bata merah	1700	kg/m ³
12	Pasangan batu belah, batu bulat, batu gunung	2200	kg/m ³
13	Pasangan batu cetak	2200	kg/m ³
14	Pasangan batu karang	1450	kg/m ³
15	Pasir (kering udara sampai lembab)	1600	kg/m ³
16	Pasir (jenuh air)	1800	kg/m ³
17	Pasir kerikil, koral (kering udara sampai lembab)	1850	kg/m ³
18	Tanah, lempung dan lanau (kering udara sampai lembab)	1700	kg/m ³
19	Tanah, lempung dan lanau (basah)	2000	kg/m ³
20	Timah hitam (timbel)	11400	kg/m ³

(Sumber : PPIUG 1983, halaman 11)

Tabel 3.2 Berat Sendiri Komponen Gedung

No	Komponen Gedung	Beban	Satuan
1	Adukan, per cm tebal :		
	- dari semen	21	kg/m ²
	- dari kapur, semen merah atau tras	17	kg/m ²
2	Aspal, termasuk bahan-bahan mineral penambah, per cm tebal	14	kg/m ²
3	Dinding pasangan bata merah :		
	- satu batu	450	kg/m ²
	- setengah batu	250	kg/m ²
4	Dinding pasangan batako :		
	Berlubang :		
	- tebal dinding 20 cm (HB 20)	200	kg/m ²
	- tebal dinding 10 cm (HB 10)	120	kg/m ²
	Tanpa lubang :		
	- tebal dinding 15 cm	300	kg/m ²
	- tebal dinding 10 cm	200	kg/m ²
5	Langit-langit dan dinding (termasuk rusuk-rusuknya, tanpa penggantung langit-langit atau pengaku), terdiri dari :		
	- semen asbes (eternit dan bahan lain sejenis), dengan tebal maksimum 4 mm	11	kg/m ²
	- kaca, dengan tebal 3 – 4 mm	10	kg/m ²
6	Lantai kayu sederhana dengan balok kayu, tanpa langit-langit dengan bentang maksimum 5 m dan untuk beban hidup maksimum 200 kg/m ²	40	kg/m ²

(Sumber : PPIUG 1983, halaman 11)

Lanjutan Tabel 3.2 Berat Sendiri Komponen Gedung

No	Komponen Gedung	Beban	Satuan
7	Penggantung langit-langit (dari kayu), dengan bentang maksimum 5 m dan jarak s.k.s minimum 0,80 m	7	kg/m ²
8	Penutup atap genting dengan reng dan usuk/kaso per m ² bidang atap	50	kg/m ²
9	Penutup atap sirap dengan reng dan usuk/kaso per m ² bidang atap	40	kg/m ²
10	Penutup atap seng gelombang (BWG 24) tanpa gordeng	10	kg/m ²
11	Penutup lantai dari ubin semen portland, teraso dan beton, tanpa adukan, per cm tebal	24	kg/m ²
12	Semen asbes gelombang (tebal 5 mm)	11	kg/m ²

(Sumber : PPIUG 1983, halaman 11)

3.7 Beban Hidup

Beban hidup adalah semua beban yang terjadi akibat penghunian atau penggunaan suatu gedung, dan ke dalamnya termasuk beban-beban pada lantai yang berasal dari barang-barang yang dapat berpindah, mesin-mesin serta peralatan yang tidak merupakan bagian yang tak terpisahkan dari gedung dan dapat diganti selama masa hidup gedung itu, sehingga mengakibatkan perubahan dalam pembebanan lantai dan atap. Beban hidup bangunan diambil berdasarkan SNI 1727-2020 tentang Beban Desain Minimum dan Kriteria Terkait untuk Bangunan Gedung dan Struktur Lain. Berikut beban hidup yang dapat dilihat pada Tabel 3.3.

Tabel 3.3 Beban Hidup pada Gedung

Hunian atau penggunaan	Merata, <i>Lo</i> psf (kN/m ²)	Reduksi beban hidup diizinkan ? (No. Pasal)	Reduksi beban hidup berlantai banyak diizinkan ? (No. Pasal)	Terpusat lb (kN)
Jalur Penyelamatan saat Kebakaran	100 (4,79)	Ya (4.7.2)	Ya (4.7.2)	
Hunian satu keluarga saja	40 (1,92)	Ya (4.7.2)	Ya (4.7.2)	
Tangga permanen		-	-	Lihat Pasal 4.5.4

(Sumber : SNI 1727-2020, halaman 27)

Lanjutan Tabel 3.3 Beban Hidup pada Gedung

Hunian atau penggunaan	Merata, <i>L_o</i> psf (kN/m ²)	Reduksi beban hidup diizinkan? (No. Pasal)	Reduksi beban hidup berlanta i banyak diizinkan? (No. Pasal)	Terpusat lb (kN)
Garasi/Parkir (Lihat Pasal 4.10)				
Mobil penumpang saja	40 (1,92)	Tidak (4.7.4)	Ya (4.7.4)	Lihat Pasal 4.10.1
Truk dan bus	Lihat Pasal 4.10.2	-	-	Lihat Pasal 4.10.2
Pegangan tangga dan pagar pengaman				
Batang pegangan	Lihat 4.5.1	-	-	Lihat 4.5.1 Lihat 4.5.1
Helipad (Lihat Pasal 4.11)				
Helikopter dengan berat lepas landas sebesar 3000 lb (13,35 kN) atau kurang	40 (1,92)	Tidak (4.11.1)	-	Lihat Pasal 4.11.2
Helikopter dengan berat lepas landas Lebih dari 3000 lb (13,35 kN)	60 (2,87)	Tidak (4.11.1)	-	Lihat Pasal 4.11.2
Rumah sakit				
Ruang operasi, laboratorium	60 (2,87)	Ya (4.7.2)	Ya (4.7.2)	1.000 (4,45)
Ruang pasien	40 (1,92)	Ya (4.7.2)	Ya (4.7.2)	1.000 (4,45)
Koridor diatas lantai pertama	80 (3,83)	Ya (4.7.2)	Ya (4.7.2)	1.000 (4,45)
Hotel (lihat rumah tinggal)				

(Sumber : SNI 1727-2020, halaman 27)

Lanjutan Tabel 3.3 Beban Hidup pada Gedung

Hunian atau penggunaan	Merata, <i>Lo</i> psf (kN/m ²)	Reduksi beban hidup diizinkan? (No. Pasal)	Reduksi beban hidup berlantai banyak diizinkan? (No. Pasal)	Terpusat lb (kN)
Perpustakaan				
Ruang baca	60 (2,87)	Ya (4.7.2)	Ya (4.7.2)	1.000 (4,45)
Ruang penyimpanan	150 (7,18)	Tidak (4.7.3)	Ya (4.7.3)	1.000 (4,45)
Koridor diatas lantai pertama	80 (3,83)	Ya (4.7.2)	Ya (4.7.2)	1.000 (4,45)
Pabrik				
Ringan	125 (6,00)	Tidak (4.7.3)	Ya (4.7.3)	2.000 (8,90)
Berat	250 (11,97)	Tidak (4.7.3)	Ya (4.7.3)	3.000 (13,35)
Gedung perkantoran				
Ruang arsip dan komputer harus dirancang untuk beban yang lebih berat berdasarkan pada perkiraan hunian				
Lobi dan koridor lantai pertama	100 (4,79)	Ya (4.7.2)	Ya (4.7.2)	2.000 (8,90)
Kantor	50 (2,40)	Ya (4.7.2)	Ya (4.7.2)	2.000 (8,90)
Koridor di atas lantai pertama	80 (3,83)	Ya (4.7.2)	Ya (4.7.2)	2.000 (8,90)
Atap				
Atap datar, berbubung, dan lengkung	20 (0,96)	Ya (4.8.2)	-	4.8.1
Atap yang digunakan penghuni	Sama dengan penggunaan yang dilayani	Ya (4.8.3)	-	

(Sumber : SNI 1727-2020, halaman 27)

Lanjutan Tabel 3.3 Beban Hidup pada Gedung

Hunian atau penggunaan	Merata, L_o psf (kN/m ²)	Reduksi beban hidup diizinkan? (No. Pasal)	Reduksi beban hidup berlantai banyak diizinkan? (No. Pasal)	Terpusat lb (kN)
Atap untuk tempat berkumpul	100 (4,70)	Ya (4.8.3)	-	
Atap vegetatif dan atap lansekap	20 (0,96)	Ya (4.8.2)	-	
Atap bukan hunian	100 (4,79)	Ya (4.8.3)	-	
Atap untuk tempat berkumpul	Sama dengan	Ya (4.8.3)	-	
Atap untuk penggunaan lainnya	penggunaan yang dilayani			

(Sumber : SNI 1727-2020, halaman 28)

3.8 Beban Gempa

Beban gempa adalah semua beban statik ekuivalen yang bekerja pada gedung atau bagian gedung yang menirukan pengaruh dari gerakan tanah akibat gempa itu.

3.9 Kombinasi Pembebanan

Kombinasi beban yang digunakan pada analisis penelitian diambil berdasarkan SNI 2847-2019 tentang Persyaratan Beton Struktural untuk Bangunan Gedung. Berikut macam-macam kombinasi beban yang digunakan pada Tabel 3.4.

Tabel 3.4 Kombinasi Pembebanan

Kombinasi Beban	Beban Utama
$U = 1,4D$	D
$U = 1,2D + 1,6L + 0,5 (L_r \text{ atau } R)$	L
$U = 1,2D + 1,6 (L_r \text{ atau } R) + (1,0L \text{ atau } 0,5W)$	$L_r \text{ atau } R$
$U = 1,2D + 1,0W + 1,0L + 0,5 (L_r \text{ atau } R)$	W
$U = 1,2D + 1,0E + 1,0L$	E
$U = 0,9D + 1,0W$	W
$U = 0,9D + 1,0E$	E

(Sumber: SNI 2847-2019, halaman 84)

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

Berikut ini merupakan ketentuan-ketentuan dalam penentuan perencanaan ketahanan gempa untuk struktur bangunan gedung berdasarkan SNI 1726-2019.

1. Menentukan Kategori Risiko Bangunan Gedung

Didalam SNI 1726-2019, struktur bangunan gedung dibedakan berdasarkan kategori risiko yang ditentukan berdasarkan jenis pemanfaatan struktur tersebut. Kategori risiko ini digunakan untuk mengamplifikasi beban gempa rencana, sehingga beberapa struktur dengan pemanfaatan khusus tetap dapat beroperasi setelah terjadinya gempa bumi sehingga kerusakan yang timbul dapat terminimalisir. Berikut ini penjelasan mengenai kategori risiko bangunan yang dapat dilihat pada Tabel 3.5.

Tabel 3.5 Kategori Risiko Bangunan Gedung dan Non Gedung untuk Beban Gempa

Jenis Pemanfaatan	Kategori Risiko
Gedung dan nongedung yang memiliki risiko rendah terhadap jiwa manusia pada saat terjadi kegagalan, termasuk, tapi tidak dibatasi untuk, antara lain : <ul style="list-style-type: none"> - Fasilitas pertanian, perkebunan, perternakan, dan perikanan - Fasilitas sementara - Gudang penyimpanan - Rumah jaga dan struktur kecil lainnya 	I
Semua gedung dan struktur lain, kecuali yang termasuk dalam kategori risiko I,III,IV, termasuk, tapi tidak dibatasi untuk : <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
Gedung dan nongedung yang memiliki risiko tinggi terhadap jiwa manusia pada saat terjadi kegagalan, termasuk, tapi tidak dibatasi untuk : <ul style="list-style-type: none"> - Bioskop - Gedung pertemuan - Stadion 	III

(Sumber: SNI 1726-2019, halaman 24)

Lanjutan Tabel 3.5 Kategori Risiko Bangunan Gedung dan Non Gedung untuk Beban Gempa

Jenis Pemanfaatan	Kategori Risiko
<ul style="list-style-type: none"> - 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
<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

(Sumber: SNI 1726-2019, halaman 24)

2. Menentukan Faktor Keutamaan Bangunan

Faktor keutamaan bangunan dipakai untuk memperbesar beban gempa rencana agar struktur mampu memikul beban gempa dengan periode ulang yang lebih panjang dengan kata lain tingkat kerusakan yang kecil. Terkait dengan kategori risiko adalah faktor keutamaan gempa, nilai I_e dapat dilihat pada Tabel 3.6 berikut.

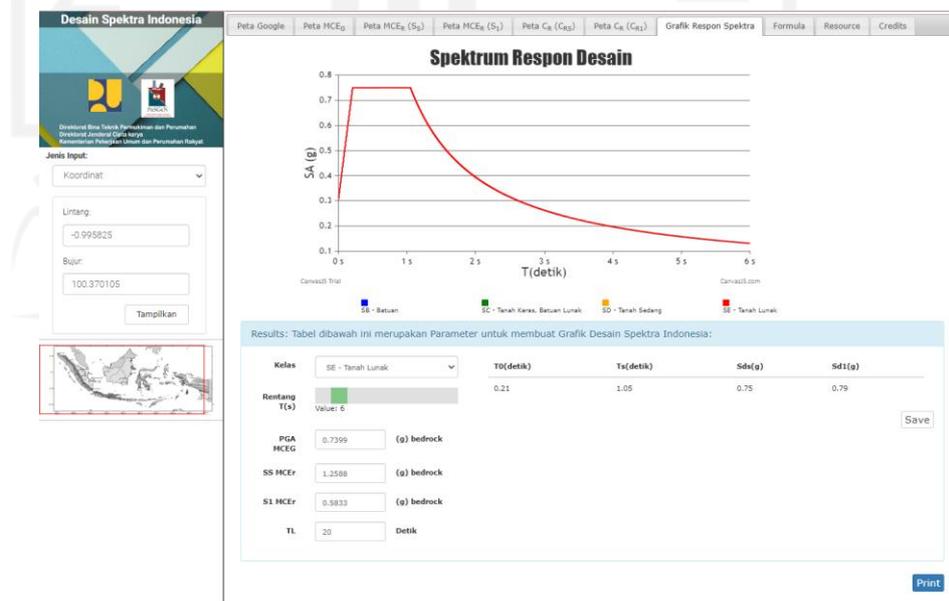
Tabel 3.6 Faktor Keutamaan Gempa

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

(Sumber: SNI 1726-2019, halaman 25)

3. Menentukan Respons Spektral Percepatan

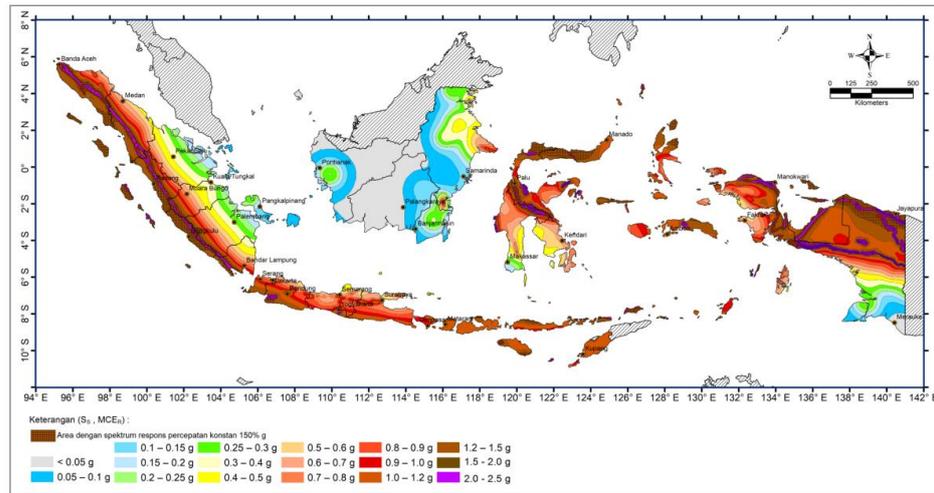
Respons spektral percepatan baik untuk perioda pendek (pada 0,20 detik, 2% dalam 50 tahun (redaman 5%)) – S_s maupun pada perioda panjang (pada 1,0 detik, 2% dalam 50 tahun (redaman 5%)) – S_1 untuk daerah dimana gedung atau struktur yang akan dibangun dapat diperoleh melalui *web* <http://rsa.ciptakarya.pu.go.id/> dengan memasukkan titik koordinat lokasi bangunan yang akan ditinjau atau dapat dilihat pada Gambar 15 dan Gambar 16 pada SNI 1726-2019 halaman 234 dan 235.



Gambar 3.4 Web Desain Spektra Indonesia

(Sumber : <http://rsa.ciptakarya.pu.go.id/>)

SNI 1726:2019

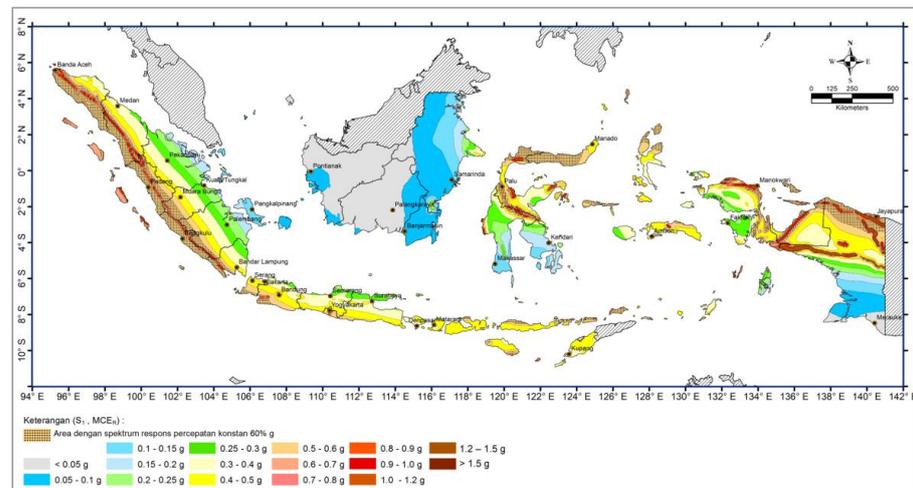


Gambar 15 – Parameter gerak tanah $S_{0.2}$, gempa maksimum yang dipertimbangkan risiko-tertarget (MCEs) wilayah Indonesia untuk spektrum respons 0,2-detik (redaman kritis 5%)

Gambar 3.5 Parameter Gerak Tanah Periode Pendek, S_s

(Sumber: SNI 1726-2019, halaman 234)

SNI 1726:2019



Gambar 16 – Parameter gerak tanah, S_1 , gempa maksimum yang dipertimbangkan risiko-tertarget (MCEs) wilayah Indonesia untuk spektrum respons 0,2- detik (redaman kritis 5%)

Gambar 3.6 Parameter Gerak Tanah Periode 1 Detik, S_1

(Sumber: SNI 1726-2019, halaman 235)

Vibrasi yang disebabkan oleh gempa cenderung membesar pada tanah lunak dibandingkan tanah keras atau batuan. Rambatan vibrasi melalui suatu material dibawah suatu struktur akan menimbulkan amplikasi atau antenuasi bergantung pada fundamental periode dari material tersebut. Untuk memperhitungkan potensi amplifikasi tersebut, pada SNI 1726-2019 dibagi menjadi enam jenis tanah. Penentuan jenis tanah ini dilakukan melalui penentuan *shear wave velocity* rata-rata dari tanah untuk kedalaman 30 m

atau dengan mengukur standar penetration resistance (uji SPT) atau *undrained shear strenght* khususnya untuk klasifikasi tipe SC, SD, atau SE. Untuk jenis batuan (tipe SB) dan batuan keras (tipe SA) *shear wave velocity* dapat diestimasi dengan cara membandingkan hasil pengukuran pada batuan dengan komposisi sejenis. Pada umumnya batuan yang termasuk dalam klasifikasi tipe SA dapat mereduksi koefisien respons tanah sampai 20%. Sedangkan untuk tanah lunak (*soft soil*) yang termasuk dalam klasifikasi SE dapat meningkatkan lama periode respons tanah sampai 350%. Keenam *site classification* tersebut dapat dilihat pada Tabel 3.7 di bawah ini

Tabel 3.7 Klasifikasi Situs

Kelas Situs	V_s (m/detik)	N atau N_{ch}	S_u (kPa)
SA (batuan keras)	>1500	N/A	N/A
SB (batuan)	750 sampai 1500	N/A	N/A
SC (tanah keras, sangat padat dan batuan lunak)	350 sampai 750	>50	≥ 100
SD (tanah sedang)	175 sampai 350	15 sampai 50	50 sampai 100
SE (tanah lunak)	<175	<15	<50
	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, $S_u < 25$ kPa		
SF (tanah khusus, yang membutuhkan investigasi geoteknik spesifik dan analisis respons spesifik-situs yang mengikuti 0)	Lapisan lempung lunak/setengah teguh dengan ketebalan $H > 35$ m dengan $S_u < 50$ kPa		

(Sumber: SNI 1726-2019, halaman 29)

4. Menentukan Koefesien Situs

Koefesien situs merupakan faktor amplifikasi terhadap parameter respons tanah dan merupakan fungsi dari karakteristik koefesien situs. F_a merupakan faktor percepatan amplifikasi untuk periode pendek (*short period*) dan F_v merupakan faktor percepatan amplifikasi untuk periode 1 detik. Berikut ditampilkan nilai koefesien situs untuk berbagai kelas situs yang ada pada Tabel 3.8 dan Tabel 3.9.

Tabel 3.8 Koefesien Situs, F_a

Kelas Situs	Parameter Respons Spektral Percepatan Gempa Maksimum yang Dipertimbangkan Risiko-Tertarget (MCE_R) terpetakan pada Periode Pendek, $T = 0,2$ detik, S_s					
	$S_s \leq 0,25$	$S_s = 0,5$	$S_s = 0,75$	$S_s = 1,0$	$S_s = 1,25$	$S_s \geq 1,5$
SA	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
SB	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9
SC	1,3	1,3	1,2	1,2	1,2	1,2
SD	1,6	1,4	1,2	1,1	1,0	1,0
SE	2,4	1,7	1,3	1,1	0,9	0,8
SF	SS ^(a)					

(Sumber: SNI 1726-2019, halaman 34)

Keterangan :

SS^(a) = Situs yang memerlukan investigasi geoteknik spesifik dan analisis respons situs-spesifik.

Tabel 3.9 Koefesien Situs, F_v

Kelas Situs	Parameter Respons Spektral Percepatan Gempa Maksimum yang Dipertimbangkan Risiko-Tertarget (MCE_R) terpetakan pada Periode 1 detik, S_I					
	$S_I \leq 0,1$	$S_I = 0,2$	$S_I = 0,3$	$S_I = 0,4$	$S_I = 0,5$	$S_I \geq 0,6$
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)					

(Sumber: SNI 1726-2019, halaman 34)

Keterangan :

SS^(a) = Situs yang memerlukan investigasi geoteknik spesifik dan analisis respons situs-spesifik.

5. Menentukan Parameter Percepatan Gempa

Untuk penentuan respons spektral percepatan gempa MCE_R di permukaan tanah, diperlukan suatu faktor amplifikasi getaran terkait percepatan pada getaran periode pendek (F_a) dan faktor amplifikasi terkait percepatan yang mewakili getaran perioda 1 detik (F_v). Parameter spektrum respons percepatan pada periode pendek (S_{MS}) dan periode 1 detik (S_{M1}) yang di sesuaikan dengan pengaruh klasifikasi situs harus di tentukan dengan perumusan berikut ini.

$$S_{MS} = F_a S_s \quad (3.1)$$

$$S_{MI} = F_v S_I \quad (3.2)$$

Keterangan :

S_{MS} = Parameter respons spektral MCE pada periode pendek

S_{MI} = Parameter respons spektral MCE pada periode 1 detik

F_a = Percepatan pada getaran periode pendek

F_v = Percepatan pada getaran periode 1 detik

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

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

Parameter percepatan gempa besar untuk periode pendek, S_{DS} dan periode 1,0 detik, S_{DI} , harus ditentukan melalui perumusan berikut ini.

$$S_{DS} = S_{MS} \quad (3.3)$$

$$S_{DI} = S_{MI} \quad (3.4)$$

Keterangan :

S_{DS} = Percepatan respon spektral pada periode pendek

S_{DI} = Percepatan respon spektral pada periode 1 detik

S_{MS} = Parameter respons spektral MCE pada periode pendek

S_{MI} = Parameter respons spektral MCE pada periode 1 detik

Untuk menentukan periode respon spektra dapat ditentukan dengan rumus berikut.

$$T_s = \frac{SD1}{SDS} \quad (3.5)$$

$$T_0 = 0,2 \frac{SD1}{SDS} \quad (3.6)$$

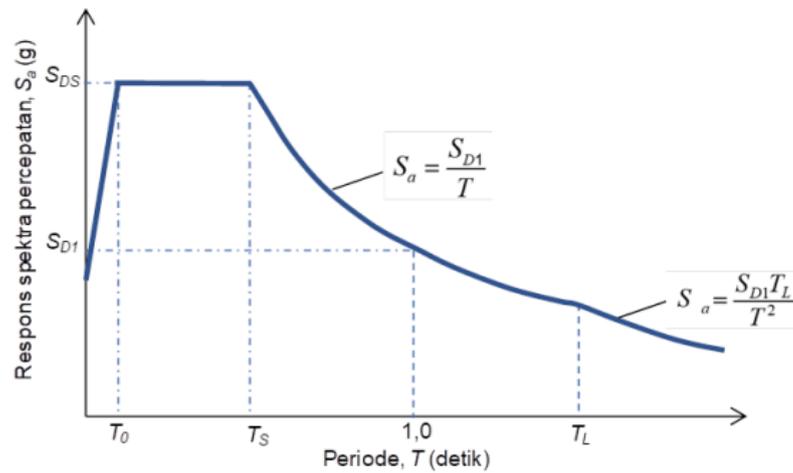
Keterangan :

T_s = Periode getar fundamental struktur

T_0 = Periode getar fundamental struktur

S_{DS} = Percepatan respon spektral pada periode pendek

S_{DI} = Percepatan respon spektral pada periode 1 detik



Gambar 3.7 Spektrum Respons Desain

(Sumber: SNI 1726-2019, halaman 36)

Untuk periode yang lebih kecil dari T_0 , respons spektra percepatan, S_a , harus diambil persamaan berikut.

$$S_a = 0,4 \times S_{DS} \quad (3.7)$$

Keterangan :

S_a = Respons spektra percepatan

S_{DS} = Percepatan respon spektral pada periode pendek

Untuk periode lebih besar dari atau sama dengan T_0 dan lebih kecil dari atau sama dengan T_s , respons spektra percepatan menjadi berikut.

$$S_a = S_{DS} \quad (3.8)$$

Keterangan :

S_a = Respons spektra percepatan

S_{DS} = Percepatan respon spektral pada periode pendek

Untuk periode lebih besar dari T_s tetapi lebih kecil dari atau sama dengan T_L , respons spektra percepatan menjadi berikut.

$$S_a = \frac{SD1}{T} \quad (3.9)$$

Keterangan :

S_a = Respons spektra percepatan

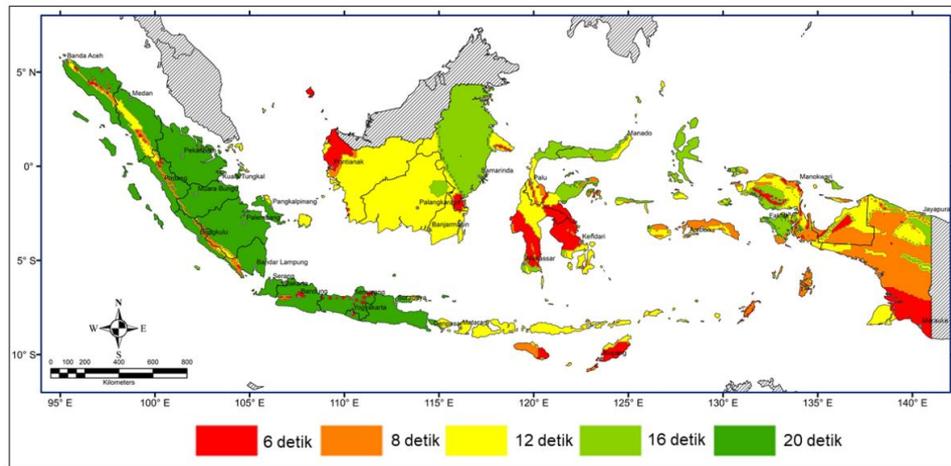
$SD1$ = Percepatan respon spektral pada periode 1 detik

T = Periode fundamental

6. Menentukan Transisi Periode Panjang (T_L)

Transisi periode panjang (T_L) dapat ditentukan berdasarkan lokasi daerah bangunan yang akan dibangun dengan melihat Gambar 20 pada SNI 1726-2019 halaman 238 berikut.

SNI 1726:2019



Gambar 20 – Peta transisi periode panjang, T_L , wilayah Indonesia

Gambar 3.8 Peta Transisi Periode Panjang Wilayah Indonesia

(Sumber: SNI 1726-2019, halaman 238)

7. Menentukan Kategori Desain Seismik

Struktur dengan kategori risiko I, II, atau III yang berlokasi di mana parameter respons spektral percepatan terpetakan pada periode 1 detik, S_I , lebih besar dari atau sama dengan 0,75 harus ditetapkan sebagai struktur dengan kategori desain seismik E. Struktur yang berkategori risiko IV yang berlokasi di mana parameter respons spektral percepatan terpetakan pada periode 1 detik, S_I , lebih besar dari atau sama dengan 0,75, harus ditetapkan sebagai struktur dengan kategori desain seismik F. Semua struktur lainnya harus ditetapkan kategori desain seismiknya berdasarkan kategorinya dan parameter respons spektral percepatan desainnya, S_{DS} dan S_{D1} , sesuai 0. Masing-masing bangunan dan struktur harus ditetapkan ke dalam kategori desain seismik yang lebih parah, dengan mengacu pada Tabel 3.10 dan Tabel 3.11, terlepas dari nilai periode fundamental getaran struktur, T .

Tabel 3.10 Kategori Desain Seismik berdasarkan Parameter Respons Percepatan pada Periode Pendek

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

(Sumber: SNI 1726-2019, halaman 37)

Tabel 3.11 Kategori Desain Seismik berdasarkan Parameter Respons Percepatan pada Periode 1 Detik

Nilai S_{DI}	Kategori Risiko	
	I atau II atau III	IV
$S_{DI} < 0,167$	A	A
$0,067 \leq S_{DI} < 0,133$	B	C
$0,133 \leq S_{DI} < 0,20$	C	D
$0,20 \leq S_{DS}$	D	D

(Sumber: SNI 1726-2019, halaman 37)

8. Sistem dan Parameter Struktur

Sistem pemikul gaya seismik yang berbeda diizinkan untuk digunakan menahan gaya seismik di masing-masing arah kedua sumbu ortogonal struktur. Bila sistem yang berbeda digunakan, masing-masing nilai R , C_d , dan Ω_0 harus diterapkan pada setiap sistem, termasuk batasan sistem struktur yang termuat dalam Tabel 3.12.

Tabel 3.12 Faktor R , C_d , dan Ω_0 untuk Sistem Pemikul Gaya Seismik

Sistem Pemikul Gaya Seismik	Koefesien Modifikasi Respons, R^a	Faktor Kuat Lebih Sistem, Ω_0^b	Faktor Pembesaran Defleksi, C_d^c	Batasan Sistem Struktur dan Batasan Tinggi Struktur, h_n (m) ^d				
				Kategori Desain Seismik				
				B	C	D ^e	E ^e	F ^f
D. Sistem ganda dengan rangka pemikul momen khusus yang mampu menahan paling sedikit 25% gaya seismik yang ditetapkan								
1. Rangka baja dengan bresing eksentris	8	2½	4	TB	TB	TB	TB	TB
2. Rangka baja dengan bresing konsentris khusus	7	2½	5½	TB	TB	TB	TB	TB
3. Dinding geser beton	7	2½	5½	TB	TB	TB	TB	TB

(Sumber: SNI 1726-2019, halaman 50)

Lanjutan Tabel 3.12 Faktor R , C_d , dan Ω_0 untuk Sistem Pemikul Gaya Seismik

Sistem Pemikul Gaya Seismik	Koefisien Modifikasi Respons, R^a	Faktor Kuat Lebih Sistem, Ω^b	Faktor Pembesaran Defleksi, C_d^c	Batasan Sistem Struktur dan Batasan Tinggi Struktur, h_n (m) ^d				
				Kategori Desain Seismik				
				B	C	D ^e	E ^e	F ^f
D. Sistem ganda dengan rangka pemikul momen khusus yang mampu menahan paling sedikit 25% gaya seismik yang ditetapkan								
bertulang khusus	7	2½	5½	TB	TB	TB	TB	TB
4. Dinding geser beton bertulang biasa	6	2½	5	TB	TB	TI	TI	TI
5. Rangka baja dan beton komposit dengan bresing eksentris	8	2½	4	TB	TB	TB	TB	TB
6. Rangka baja dan beton komposit dengan bresing konsentris khusus	6	2½	5	TB	TB	TB	TB	TB
7. Dinding geser pelat baja dan beton komposit	7½	2½	6	TB	TB	TB	TB	TB
8. Dinding geser baja dan beton komposit khusus	7	2½	6	TB	TB	TB	TB	TB
9. Dinding geser baja dan beton komposit biasa	6	2½	5	TB	TB	TI	TI	TI
10. Dinding geser bata bata bertulang khusus	5½	3	5	TB	TB	TB	TB	TB
11. Dinding geser bata bertulang menengah	4	3	3½	TB	TB	TI	TI	TI

(Sumber: SNI 1726-2019, halaman 50)

Lanjutan Tabel 3.12 Faktor R , C_d , dan Ω_0 untuk Sistem Pemikul Gaya Seismik

Sistem Pemikul Gaya Seismik	Koefesien Modifikasi Respons, R^a	Faktor Kuat Lebih Sistem, Ω_0^b	Faktor Pembesaran Defleksi, C_d^c	Batasan Sistem Struktur dan Batasan Tinggi Struktur, h_n (m) ^d				
				Kategori Desain Seismik				
				B	C	D ^e	E ^e	F ^f
D. Sistem ganda dengan rangka pemikul momen khusus yang mampu menahan paling sedikit 25% gaya seismik yang ditetapkan								
12. Rangka baja dengan bresing terkekang terhadap tekuk	8	2½	5	TB	TB	TB	TB	TB
13. Dinding geser pelat baja khusus	8	2½	6½	TB	TB	TB	TB	TB

(Sumber: SNI 1726-2019, halaman 50)

Keterangan :

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

^b = Jika nilai pada tabel faktor kuat lebih, Ω_0 lebih besar atau sama dengan 2,5, maka Ω_0 diizinkan untuk direduksi setengah untuk struktur dengan diafragma fleksibel.

^c = Faktor pembesaran simpangan lateral, C_d , untuk penggunaan dalam 0, 0, dan 0.

^d = TB = Tidak Dibatasi dan TI = Tidak Diizinkan.

9. Periode Fundamental Pendekatan

Pada SNI 1726-2019, periode fundamental struktur, T , dalam arah yang ditinjau harus diperoleh menggunakan sifat struktur dan karakteristik deformasi elemen pemikul dalam analisis yang teruji. Periode fundamental struktur, T , tidak boleh melebihi hasil perkalian koefisien untuk batasan atas pada periode yang dihitung (C_u) dari Tabel 3.13 dengan periode fundamental pendekatan, T_a . Sebagai alternatif dalam melakukan analisis untuk menentukan periode fundamental struktur, T , diizinkan secara langsung menggunakan periode bangunan pendekatan, T_a .

Periode pendekatan ditentukan dari persamaan berikut.

$$T_a = C_t h^x \quad (3.10)$$

Keterangan :

C_t = Nilai parameter periode pendekatan

x = Nilai parameter periode pendekatan

h_n = Ketinggian struktur (m), diatas dasar sampai tingkat tertinggi struktur, dan koefisien C_t dan x ditentukan dari Tabel 3.14.

Tabel 3.13 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

(Sumber: SNI 1726-2019, halaman 72)

Tabel 3.14 Nilai Parameter Periode Pendekatan C_t dan x

Tipe Struktur	C_t	x
Sistem rangka pemikul momen dimana rangka pemikul 100% gaya seismik yang diisyaratkan 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

(Sumber: SNI 1726-2019, halaman 72)

Sebagai alternatif diizinkan untuk menentukan periode fundamental pendekatan (T_a), dalam detik, dari persamaan berikut untuk struktur dengan ketinggian tidak melebihi 12 tingkat di mana sistem pemikul gaya seismik terdiri dari rangka pemikul momen yang seluruhnya beton atau seluruhnya baja dan rata-rata tinggi tingkat sekurang-kurangnya 3 m.

$$T_a = 0,1 N \quad (3.11)$$

Keterangan :

T_a = Periode fundamental pendekatan

N = Jumlah tingkat

10. Gaya Geser Dasar Seismik

Dalam SNI 1726-2019 gaya geser dasar seismik, V dalam arah yang ditetapkan harus ditentukan sesuai dengan persamaan berikut

$$V = C_s \times W \quad (3.12)$$

Keterangan :

V = Gaya geser dasar seismik

C_s = Koefisien respons seismik

W = Berat seismik efektif

Untuk nilai koefisien respons seismik (C_s) dapat ditentukan dengan persamaan yang nilainya tidak boleh melebihi nilai yang dihasilkan oleh persamaan untuk $T \leq T_L$ dan persamaan untuk $T > T_L$ juga nilai koefisien respons seismik (C_s) tidak boleh kurang dari nilai yang dihasilkan oleh Persamaan 3.16. Sebagai tambahan, untuk struktur yang berlokasi di daerah di mana S_I sama dengan atau lebih besar dari 0,6g, maka C_s harus tidak kurang dari Persamaan 3.17.

$$C_s = \frac{S_{DS}}{\left(\frac{R}{I_e}\right)} \quad (3.13)$$

Untuk $T \leq T_L$

$$C_s = \frac{S_{DS}}{T \left(\frac{R}{I_e}\right)} \quad (3.14)$$

Untuk $T > T_L$

$$C_s = \frac{S_{DS}}{T^2 \left(\frac{R}{I_e}\right)} \quad (3.15)$$

C_s harus tidak kurang dari :

$$C_s = 0,044 S_{DS} I_e \geq 0,001 \quad (3.16)$$

$$C_s = \frac{0,5 S_{DS}}{\left(\frac{R}{I_e}\right)} \quad (3.17)$$

Keterangan :

C_s = Koefisien respons seismik

S_{DS} = Percepatan respon spektral pada periode pendek

R = Koefisien modifikasi respons

I_e = Faktor keutamaan gempa

T = Periode fundamental

T_L = Transisi periode panjang

11. Distribusi Vertikal Gaya Seismik

Pendistribusian gaya seismik lateral (F_x) disetiap tingkat lantai dapat ditentukan dengan persamaan dengan menggunakan koefisien faktor distribusi vertikal (C_{vx}) dengan persamaan sebagai berikut.

$$F_x = C_{vx} \cdot V \quad (3.18)$$

$$C_{vx} = \frac{w_x h_x^k}{\sum_{i=1}^n w_i h_i^k} \quad (3.19)$$

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 (meter)

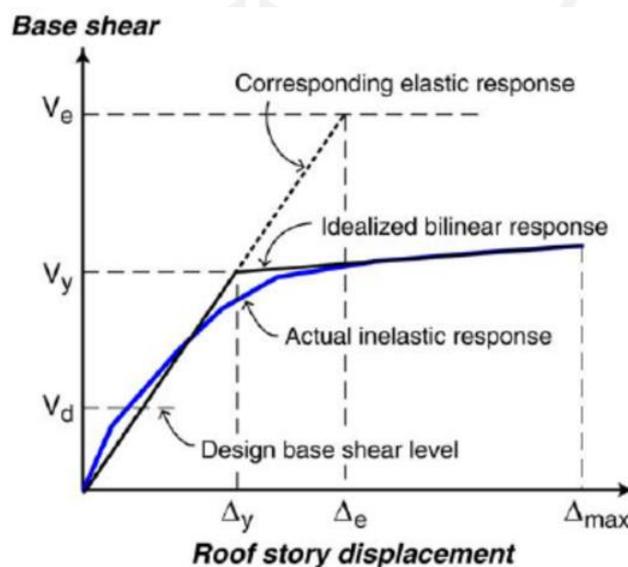
k = eksponen yang terkait dengan periode struktur dengan nilai sebagai berikut :

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

3.11 Analisis Statik Nonlinear *Pushover*

Analisis statik nonlinier *pushover* merupakan suatu *performance based design* yang bertujuan untuk mencari kapasitas suatu struktur. Pada dasarnya, analisis dilakukan dengan memberikan beban dalam arah lateral yang nilainya ditingkatkan berangsur-angsur (*incremental*) secara proposional pada struktur hingga mencapai target *displacement* atau mencapai mekanisme diambang keruntuhan karena terjadinya sendi plastis pada elemen balok maupun kolom. Prosedur analisisnya menjelaskan bagaimana mengidentifikasi elemen-elemen struktur yang akan mengalami kegagalan terlebih dahulu. Seiring dengan peningkatan beban akan ada elemen-elemen lain yang mengalami leleh dan deformasi *inelastic*. (Sandhi, 2017)

Pada program SAP2000 v22 terdapat kemampuan otomatis dalam melakukan analisis *pushover*. Selama pembebanan diberikan, dilakukan pencatatan *base shear* dan deformasi horizontal pada titik kontrol (pusat massa pada lantai atap bangunan). Pencatatan ini kemudian disajikan dalam bentuk kurva dengan sumbu y menunjukkan besarnya *base shear* yang bekerja dan sumbu x menunjukkan besarnya deformasi horizontal di lantai atap bangunan. Kurva ini dikenal dengan sebutan *capacity curve*, yang dapat dilihat pada Gambar 3.5 dibawah ini. Secara garis besar kurva ini menunjukkan kemampuan atau kapasitas deformasi inelastik struktur sebelum mengalami keruntuhan.



Gambar 3.9 Capacity Curve

(Sumber : ATC-40, 1996)

Tujuan analisis *pushover* adalah untuk memperkirakan gaya maksimum dan deformasi yang terjadi serta untuk memperoleh informasi bagian mana saja yang kritis. Selanjutnya dapat diidentifikasi bagian-bagian yang memerlukan perhatian khusus untuk pendetailan atau stabilitasnya.

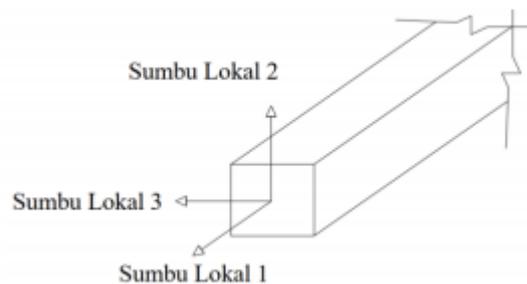
3.12 Sendi Plastis

Sendi plastis merupakan bentuk ketidakmampuan elemen struktur (balok dan kolom) dalam menahan gaya dalam. Perencanaan suatu bangunan harus sesuai dengan konsep desain kolom kuat balok lemah (*strong column weak beam*). Apabila terjadi suatu keruntuhan struktur, maka yang runtuh adalah baloknya

dahulu. Apabila kolomnya runtuh dahulu, maka struktur langsung hancur. Berikut merupakan langkah-langkah dalam mendapatkan sendi plastis.

1. *Hinge properties* balok

Data *hinge properties* dimasukkan pada penampang daerah tumpuan balok yaitu lokasi dimana sendi plastis diharapkan terjadi. Masing-masing penampang balok dimodelkan dengan pilihan model momen M3, yang artinya sendi plastis hanya terjadi karena momen searah sumbu lokal 3.

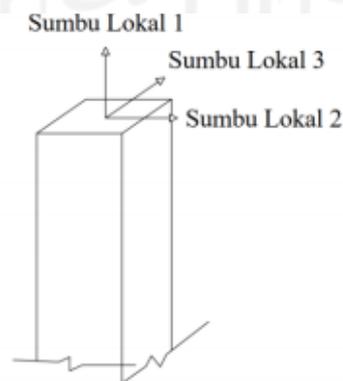


Gambar 3.10 Posisi Sumbu Lokal Balok Struktur

(Sumber : Dewobroto, 2006)

2. *Hinge properties* kolom

Data *hinge properties* untuk kolom adalah model P-M2-M3 yang mempunyai arti bahwa sendi plastis terjadi karena interaksi gaya aksial (P) dan momen (M) sumbu lokal 2 dan sumbu lokal 3. Dalam penelitian ini, setiap kolom bangunan yang ditinjau memiliki momen sumbu lokal 2 dimana sama dengan kapasitas momen sumbu lokal 3, hal ini disebabkan karena dimensi kolom berbentuk persegi dan tulangan kolom yang ada tersebar pada keempat sisinya secara merata.



Gambar 3.11 Posisi Sumbu Lokal Kolom Struktur

(Sumber : Dewobroto, 2006)

3. Penentuan sendi plastis

Setelah mendefinisikan data *hinges* properties balok dan kolom adalah penentuan letak terjadinya sendi plastis yang diinginkan. Posisi 0 menyatakan posisi awal dari panjang bersih balok, sedangkan posisi 1 menyatakan posisi akhir dari panjang bersih balok, kedua ini terletak dimuka kolom. Sama halnya dengan kolom, posisi 0 menyatakan posisi awal dari panjang bersih kolom, sedangkan posisi 1 menyatakan posisi akhir dari panjang bersih kolom.

3.12.1 Skema Sendi Plastis

Sendi plastis pada suatu struktur dapat dilihat dari hasil analisis *pushover*. Elemen-elemen pada struktur yang dibebani beban statik secara bertahap akan mengalami pelelehan (sendi plastis) hingga dapat menyebabkan elemen tidak mampu dalam menerima gaya tersebut sehingga struktur dapat mengalami keruntuhan. Pada *software* SAP2000 v22, perilaku sendi plastis pada elemen ditunjukkan dengan berbagai warna, berikut ini penjelasan mengenai warna sendi plastis berdasarkan kondisinya.

Tabel 3.15 Keterangan Warna Sendi Plastis

Keterangan	Simbol	Penjelasan
B		Menunjukkan batas linier yang kemudian diikuti terjadinya pelelehan pertama pada struktur.
IO		Terjadi kerusakan kecil (tidak berarti) pada struktur dan kekakuan struktur hampir sama saat sebelum terjadinya gempa.
LS		Terjadi kerusakan mulai dari kecil hingga sedang pada struktur dan kekakuan struktur berkurang tetapi masih mempunyai ambang yang cukup besar terhadap keruntuhan.
CP		Terjadi kerusakan yang parah pada struktur sehingga kekuatan dan kekakuan berkurang banyak.
C		Batas maksimum gaya geser masih mampu ditahan gedung.
D		Terjadi degradasi kekuatan struktur besar sehingga kondisi struktur tidak stabil dan hampir runtuh.
E		Kondisi struktur sudah tidak mampu menahan gaya geser dan runtuh.

3.13 Analisis *Pushover* Berdasarkan pada ATC-40

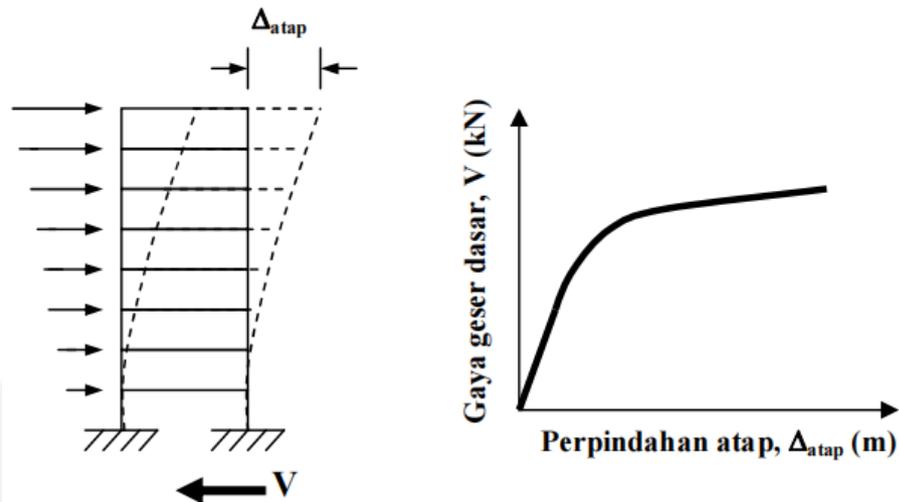
Analisis *pushover* merupakan analisis untuk mengetahui perilaku keruntuhan suatu bangunan terhadap gempa. Analisis *pushover* sangat tepat digunakan karena ketika terjadi gempa yang cukup besar pada struktur terjadi plastifikasi di beberapa tempat, sehingga bangunan tidak lagi berperilaku linear, akan tetapi berperilaku nonlinear. Analisis ini digunakan sebagai metode alternatif dalam melaksanakan *performance based evaluation design*.

Kebutuhan (*demand*) dan kapasitas (*capacity*) adalah dua hal yang perlu dipahami untuk dapat menggunakan prosedur berbasis kinerja (*performance*) dengan baik. Kebutuhan (*demand*) adalah representasi dari pergerakan tanah dasar akibat gempa bumi sedangkan kapasitas adalah mewakili kemampuan struktur dalam memikul beban gempa. Kinerja (*performance*) adalah kemampuan kapasitas struktur untuk memikul kebutuhan (*demand*). Dengan kata lain, struktur bangunan harus memikul kapasitas yang cukup sehingga kinerjanya sebanding dengan tujuan desain yang salah satunya adalah mampu memikul beban gempa.

Metode spektrum kapasitas (ATC-40) menggunakan kurva kapasitas (*capacity curve*) dengan kurva kebutuhan (*demand spectrum*). Hasil dari analisis *pushover* ini adalah kurva kapasitas yang menunjukkan hubungan antara gaya geser dasar (*base shear*) dan simpangan atap (*roof displacement*).

3.14 Kurva Kapasitas

Kurva kapasitas yang didapatkan dari analisis *pushover* menggambarkan kekuatan struktur yang besarnya tergantung dari kemampuan momen-deformasi dari masing-masing komponen struktur. Cara termudah untuk membuat kurva ini adalah dengan mendorong struktur secara bertahap (analisis *pushover*) dan mencatat hubungan antara gaya geser dasar (*base shear*) dan perpindahan atap akibat beban lateral yang dikerjakan pada struktur dengan pola pembebanan tertentu. Pola pembebanan umumnya berupa beban statik ekuivalen, hal ini berlaku untuk bangunan yang memiliki periode fundamental struktur yang relatif kecil.



Gambar 3.12 Kurva Kapasitas

(Sumber : ATC-40 Volume 1, 1996)

1. Kurva kapasitas diubah menjadi spektrum kapasitas (*capacity spectrum*) dalam format *Acceleration Displacement Response Spectra (ADRS)*

Untuk mengubah kurva kapasitas ke dalam format *ADRS* (spektrum kapasitas) perlu dipahami hubungan faktor partisipasi modal, modal koefisien massa, dan perpindahan bangunan. Hubungan tersebut dapat dilihat pada Gambar 3.9 berikut.

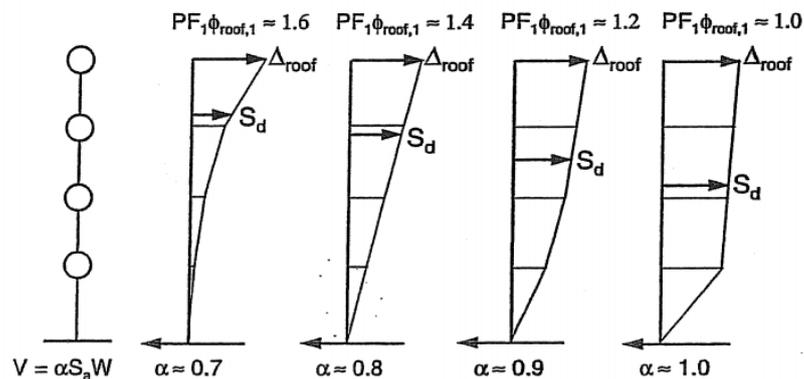


Figure 8-5. Example Modal Participation Factors and Modal Mass Coefficients

Gambar 3.13 Faktor Partisipasi Modal dan Modal Koefisien Massa

(Sumber : ATC-40 Volume 1, 1996)

Pada Gambar 3.13 terlihat hubungan antara faktor partisipasi modal dan modal koefisien massa untuk nilai simpangan antar lantai yang berbeda di setiap bangunan. Proses pertama untuk merubah kurva kapasitas ke format *ADRS* adalah menghitung nilai faktor partisipasi massa (*PF1*) dan modal

koefisien massa (α_1), untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada Persamaan 3.20 dan Persamaan 3.21 Berikut.

$$PF_1 = \left[\frac{\sum_{i=1}^N (W_i \phi_{i1}) / g}{\sum_{i=1}^N (W_i \phi_{i1}^2) / g} \right] \quad (3.20)$$

$$\alpha_1 = \frac{[\sum_{i=1}^N (W_i \phi_{i1}) / g]^2}{[\sum_{i=1}^N W_i / g][\sum_{i=1}^N (W_i \phi_{i1}^2) / g]} \quad (3.21)$$

Keterangan :

PF_1 = Faktor partisipasi ragam untuk ragam ke 1

α_1 = Koefisien massa ragam untuk ragam ke 1

W_i/g = Massa lantai i

ϕ_{i1} = Perpindahan pada lantai i ragam ke 1

N = Jumlah lantai

Kemudian setiap poin pada kurva kapasitas (V) dan (Δ_{atap}) dikonversi ke poin (S_a) dan (S_d). Berikut ini persamaannya.

$$S_a = \frac{V/W}{\alpha_1} \quad (3.22)$$

$$S_d = \frac{\Delta_{atap}}{PF_1 \phi_{atap,1}} \quad (3.23)$$

Keterangan :

S_a = Spektrum percepatan

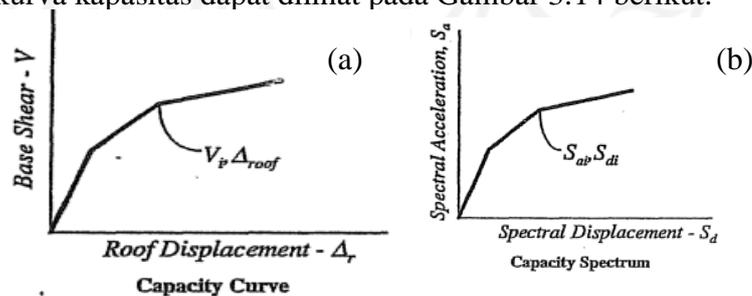
S_d = Spektrum perpindahan

V = Gaya geser dasar

W = Berat struktur (akibat beban mati dan beban hidup tereduksi)

Δ_{atap} = Perpindahan atap (yang digunakan pada kurva kapasitas)

Dari Persamaan 3.23 maka didapatkan spektrum kapasitas, perubahan format kurva kapasitas dapat dilihat pada Gambar 3.14 berikut.



Gambar 3.14 Perubahan Format Kurva Kapasitas
(a) Kurva Kapasitas Format Standar (b) Kurva Kapasitas Format ADRS

(Sumber : ATC-40 Volume 1, 1996)

Demand spektrum didapatkan dengan merubah respon spektrum yang biasanya dinyatakan dalam spektra percepatan (S_a) dan periode (T) menjadi format *ADRS* (S_a, S_d).

2. Konversi kurva respons spektrum (*demand spectrum*) ke format *ADRS*

Spektrum *demand* didapatkan dengan mengubah spektrum respons yang biasanya dinyatakan dalam spektral kecepatan (S_a) dan periode (T) menjadi format spektral kecepatan (S_a) dan spektral perpindahan (S_d). Format baru ini disebut sebagai *Acceleration Displacement Response Spectra* (*ADRS*). Pada format *ADRS*, periode struktur yang sama merupakan garis lurus radial dari titik nol. Hubungan S_a , S_d , dan T dapat dihitung dengan menggunakan persamaan berikut.

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{S_d}{S_a}} \quad (3.24)$$

$$S_d = \left(\frac{T}{2\pi}\right)^2 S_a \quad (3.25)$$

Keterangan :

S_a = Spektrum percepatan

S_d = Spektrum perpindahan

T = Periode, waktu getar alami (detik)

Sehingga, hasil kurva *demand spectrum* dapat dilihat pada Gambar 3.15 berikut.

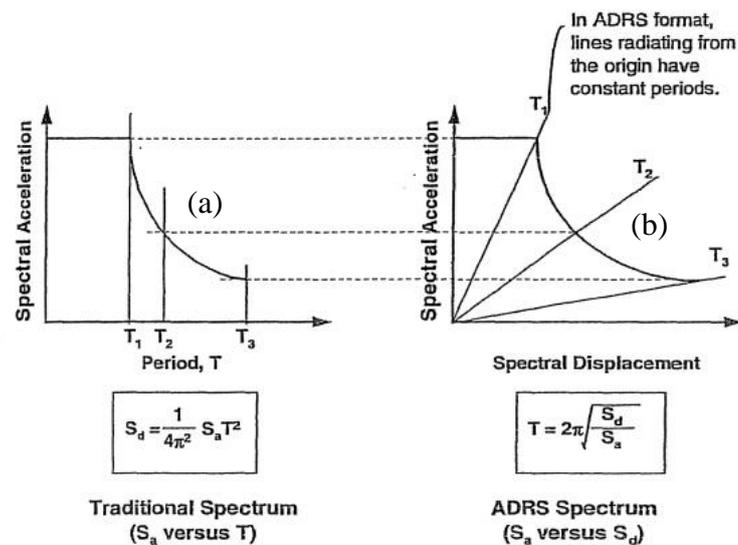


Figure 8-6. Response Spectra in Traditional and ADRS Formats

Gambar 3.15 Perubahan Format Respons Spektra

(a) Respons Spektra Format Standar

(b) Respons Spektra Format ADRS

(Sumber : ATC-40 Volume 1, 1996)

3.15 Redaman Ekivalen (β_{eq})

Redaman ekivalen adalah kombinasi dari redaman elastis (*viscous damping*) yang menyatu dengan struktur bangunan yang besarnya tergantung pada redaman histeristik dan material yang digunakan.

1. Perhitungan Redaman Viskous Efektif (β_{eff})

Redaman *viscous* merupakan kombinasi redaman yang terjadi pada redaman histeristik dan struktur dalam batas inelastik. Redaman *viscous* ekivalen (β_{eq}) yang berhubungan dengan perpindahan d_{pi} (perpindahan pada titik maksimum) yang ditunjukkan pada Gambar 3.16 dan dapat dilihat pada Persamaan 3.26.

$$\beta_{eq} = \beta_o + 0,05 \quad (3.26)$$

Keterangan :

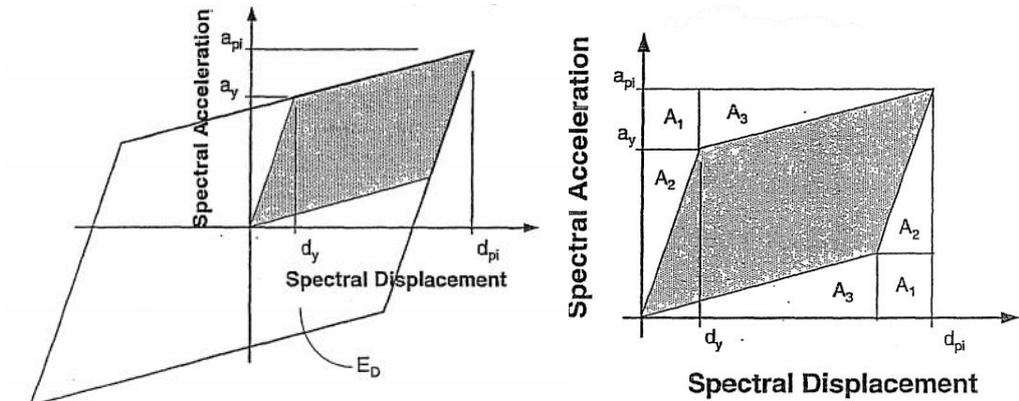
β_o = Redaman histeristik yang digambarkan sebagai redaman *viscous* ekivalen

0,05 = 5% redaman *viscous* yang terdapat dalam struktur

$$\beta_0 = \frac{1}{4\pi} \frac{E_D}{E_{SO}}$$

E_D = Energi yang disisipasi oleh damping

E_{SO} = Energi regangan maksimum



Gambar 3.16 Penentuan *Energy Dissipated by Damping, E_D*

(Sumber : ATC-40 Volume 1, 1996)

Energi disipasi :

$$\begin{aligned} E_D &= 4 (a_{pi} d_{pi} - 2A_1 - 2A_2 - 2A_3) \\ &= 4 [a_{pi} d_{pi} - a_y d_y - (d_{pi} - d_y)(a_{pi} - a_y) - 2d_y(a_{pi} - a_y)] \\ &= 4 (a_y d_{pi} - d_y a_{pi}) \end{aligned} \quad (3.27)$$

Energi regangan :

$$E_{SO} = \frac{a_{pi} d_{pi}}{2} \quad (3.28)$$

Kemudian, β_0 dituliskan sebagai persen redaman kritis yang dapat dilihat pada persamaan berikut.

$$\begin{aligned} \beta_0 &= \frac{1}{4\pi} \frac{E_D}{E_{SO}} \\ &= \frac{1}{4\pi} \frac{4 (a_y d_{pi} - d_y a_{pi})}{\frac{a_{pi} d_{pi}}{2}} \\ &= \frac{2}{\pi} \frac{a_y d_{pi} - d_y a_{pi}}{a_{pi} d_{pi}} \\ &= \frac{0,637 (a_y d_{pi} - d_y a_{pi})}{a_{pi} d_{pi}} \end{aligned} \quad (3.29)$$

Sehingga :

$$\beta_{eq} = \beta_0 + 5 = \frac{63,7 (a_y d_{pi} - d_y a_{pi})}{a_{pi} d_{pi}} + 5 \quad (3.30)$$

Maka, redaman viskous efektif (β_{eff}) kemudian dirumuskan sebagai berikut.

$$\beta_{\text{eff}} = k\beta_o + 5 = \frac{63,7k(a_y d_{pi} - d_y a_{pi})}{a_{pi} d_{pi}} + 5 \quad (3.31)$$

Keterangan :

a_y = Percepatan pada titik leleh

a_{pi} = Percepatan pada titik maksimum

d_y = Perpindahan pada titik leleh

d_{pi} = Perpindahan pada titik maksimum

k = Faktor modifikasi redaman

β_o = Rasio redaman efektif akibat perubahan kekakuan struktur setelah terjadi sendi plastis (dalam %)

Tabel 3.16 Values for Damping Modification Factor, k

<i>Structural Behaviour Type</i>	β_o (%)	k
Type A	$\leq 16,25$	1
	$> 16,25$	$1,13 - \frac{0,51(a_y d_{pi} - d_y a_{pi})}{a_{pi} d_{pi}}$
Type B	≤ 25	0,67
	> 25	$0,845 - \frac{0,446(a_y d_{pi} - d_y a_{pi})}{a_{pi} d_{pi}}$
Type C	<i>Any Value</i>	0,33

(Sumber : ATC-40 Volume 1, 1996)

Pada penelitian dengan menggunakan *software* SAP2000 v22 pada metode spektrum respon kapasitas nilai β_{eff} akan diperoleh secara otomatis dari struktur yang ditinjau.

2. *Reduce of Spectrum Demand*

Reduce of spectrum demand bertujuan untuk mendapatkan spektrum inelastik, pada periode pendek (percepatan yang konstan) direduksi dengan nilai SR_A dan pada periode panjang (kecepatan yang konstan) direduksi dengan nilai SR_v . Nilai tersebut dapat dilihat pada Tabel 3.15, nilai SR_A dan SR_v dipengaruhi oleh redaman viskous efektif (β_{eff}) yang dapat dilihat pada Persamaan 3.32 dan Persamaan 3.33. Nilai SR_A dan SR_v dihitung untuk mempertimbangkan tingkat redaman (*damping*) sebesar 5% setelah struktur leleh.

$$SR_A = \frac{3,21 - 0,68 \ln \left[\frac{63,7k(a_y d_{pi} - d_y a_{pi})}{a_{pi} d_{pi}} + 5 \right]}{2,12} \quad (3.32)$$

$$SR_v = \frac{2,31 - 0,41 \ln \left[\frac{63,7k(a_y d_{pi} - d_y a_{pi})}{a_{pi} d_{pi}} + 5 \right]}{1,65} \quad (3.33)$$

Berikut bentuk yang lebih sederhana dari kedua persamaan diatas.

$$SR_A = \frac{3,21 - 0,68 \ln \beta_{eff}}{2,12} \quad (3.34)$$

$$SR_v = \frac{2,31 - 0,41 \ln \beta_{eff}}{1,65} \quad (3.35)$$

Keterangan :

SR_A = Spectral reduction factor

SR_v = Spectral reduction factor

a_y = Percepatan pada titik leleh

a_{pi} = Percepatan pada titik maksimum

d_y = Perpindahan pada titik leleh

d_{pi} = Perpindahan pada titik maksimum

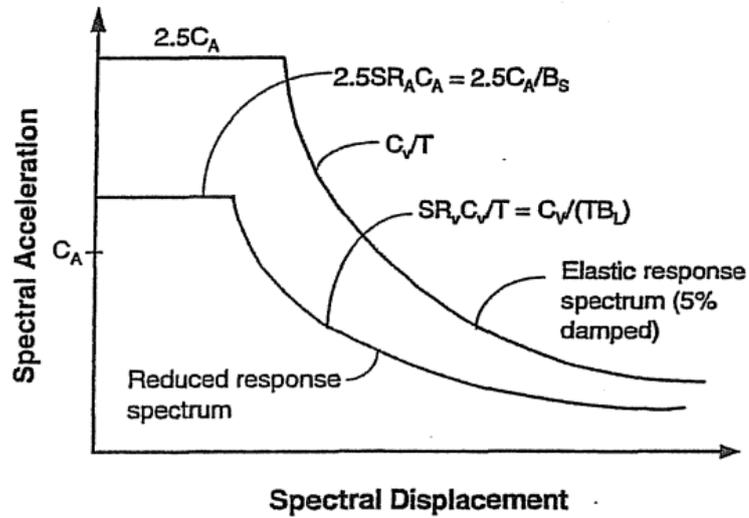
β_{eff} = Redaman viscous efektif

Berikut nilai minimum SR_A dan SR_v yang diizinkan untuk beberapa tipe struktur.

Tabel 3.17 Minimum Allowable SR_A dan SR_v Values

<i>Structural Behaviour Type</i>	SR_A	SR_v
Type A	0,33	0,5
Type B	0,44	0,56
Type C	0,56	0,67

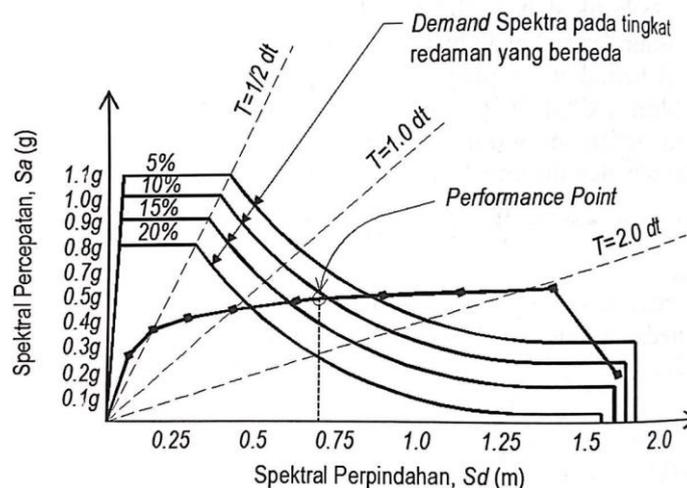
(Sumber : ATC-40 Volume 1, 1996)



Gambar 3.17 Reduksi Respon Spektrum Elastik menjadi Spektrum *Demand*
(Sumber : ATC-40 Volume 1, 1996)

3.16 Titik Kinerja Struktur (*Performance Point*) Metode ATC-40

Performance point merupakan titik perpotongan antara *capacity curve* dengan *response spectrum curve* seperti yang digunakan dalam *capacity spectrum method* (ATC-40, 1996). Pada *performance point* diperoleh informasi mengenai periode bangunan dan redaman efektif akibat perubahan sendi plastis. Berdasarkan informasi tersebut respons-respons struktur lainnya seperti nilai simpangan tingkat dan posisi sendi plastis dapat diketahui. Untuk memperoleh gambaran lebih jelas, dapat dilihat pada Gambar 3.18 berikut.



Gambar 3.18 Penentuan *Performance Point*
(Sumber : ATC-40 Volume 1, 1996)

3.17 Batasan Deformasi (*Drift Ratio*) Berdasarkan ATC-40

Deformasi lateral pada saat *performance point* harus dicek terhadap deformasi limit yang ditetapkan dalam ATC-40 (1996) bab 11.3.3. Berdasarkan ATC-40 (1996), *drift ratio* pada *performance point* yang digunakan untuk mengevaluasi kinerja struktur dapat dilihat pada Tabel 3.18 berikut.

Tabel 3.18 Batasan *Drift Ratio* pada Tingkat Kinerja Struktur

Parameter	Performance Level			
	Immediate Occupancy	Damage Control	Life Safety	Structural Ability
Simpangan Total Maksimum	0,01	0,01 s/d 0,02	0,02	$0,33 V_i/P_i$
Simpangan Inelastis Maksimum	0,005	0,005 s/d 0,015	Tidak ada batasan	Tidak ada batasan

(Sumber : ATC-40 Volume 1, 1996)

Pada Tabel 3.18, simpangan total maksimum (*maximum total drift*) adalah simpangan antar tingkat (*interstory drift*) pada titik kinerja (*performance point displacement*) atau nilai simpangan maksimum pada atap pada saat *performance point* dibagi dengan total tinggi bangunan hingga atap. Simpangan inelastik maksimum adalah proporsi simpangan total maksimum diluar titik leleh efektif. Untuk *structural ability level*, simpangan total maksimum pada lantai ke-I saat titik kinerja harus tidak melebihi $0,33 V_i/P_i$, dimana V_i adalah total gaya geser pada lantai ke-i dan P_i adalah total gaya gravitasi (seperti *dead load*, *live load*) pada lantai ke-i.

Pada desain bangunan baru, level kinerja yang direkomendasikan adalah *Live Safety Level*, saat simpangan total maksimum 0,02, hal ini dikarenakan pada berbagai eksperimen yang dilakukan menghasilkan respon dengan deformasi yang besar sehingga proporsional untuk *detailing* pada bangunan baru (ATC-40, 1996 : 11-5). Batasan tipe bangunan untuk *capacity spectrum method* dapat dilihat pada Tabel 3.19 berikut.

Tabel 3.19 Batasan Tipe Bangunan untuk Capacity Spectrum Method

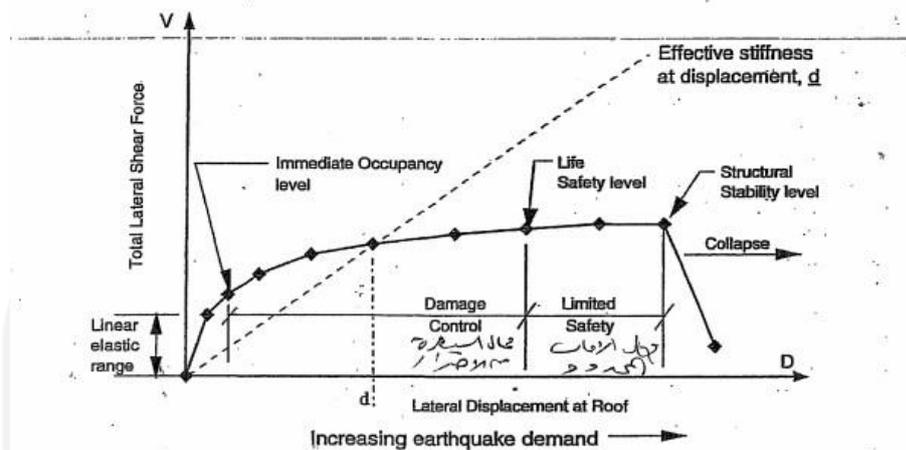
<i>Shaking Duration</i>	<i>Essentially New Building</i>	<i>Average Existing Building</i>	<i>Poor Existing Building</i>
<i>Short</i>	Type A	Type B	Type C
<i>Long</i>	Type B	Type C	Type C

(Sumber : ATC-40 Volume 1, 1996)

3.18 Level Kinerja Struktur Berdasarkan ATC-40

Respon bangunan terhadap gerakan tanah akibat gempa menyebabkan perpindahan lateral dan deformasi pada setiap elemen struktur. Pada level respon rendah, deformasi elemen akan dalam rentang elastis (linier) dan tidak akan ada kerusakan yang timbul. Pada level respon tinggi, deformasi elemen akan melebihi kapasitas linier elastis dan bangunan akan mengalami kerusakan. Untuk memberikan kinerja seismik yang andal bangunan harus memiliki sistem penahan gaya lateral yang lengkap, yang mampu membatasi perpindahan lateral akibat gempa pada level kerusakan yang berkelanjutan dan untuk tujuan kinerja yang diinginkan. Faktor-faktor dasar yang memengaruhi kemampuan sistem penahan gaya lateral untuk melakukan hal tersebut meliputi massa bangunan, kekakuan, redaman, dan konfigurasi : kapasitas deformasi pada elemen, kekuatan, dan karakter gerakan tanah (ATC-40,1996).

Tujuan perencanaan berdasarkan kinerja struktur adalah pencapaian level kinerja struktur yang ditentukan oleh deformasi struktur dibawah beban gempa yang ditentukan oleh maksimum perpindahan struktur dan elemen struktur yang dapat diterima dengan besaran gempa kuat yang ditinjau. Ada beberapa tingkatan kinerja berdasarkan ATC-40, dimana tingkatan kinerja digambarkan melalui kurva hubungan antara perpindahan lateral dan besar gaya yang bekerja atau kurva kapasitas. Kurva kapasitas menggambarkan plot dari total gaya geser dasar akibat gempa, "V" pada struktur, untuk berbagai kenaikan pembebanan dan perpindahan lateral gedung pada atap pada tingkat gaya lateral tertentu. Pembagian level kinerja bangunan ditampilkan dalam Gambar 3.19 dan Tabel 3.20 sebagai berikut.



Gambar 3.19 Level Kinerja Struktur Berdasarkan ATC-40

(Sumber : ATC-40 Volume 1, 1996)

Kurva kapasitas diatas akan menjadi garis lurus dengan kemiringan yang sama apabila berperilaku elastis linier dengan kekakuan struktur secara keseluruhan. Karena bangunan sebenarnya tidak memiliki kapasitas elastis linier di atas, maka kurva kapasitas biasanya terdiri dari serangkaian segmen garis lurus dengan penurunan kemiringan yang merupakan degradasi progresif dalam kekakuan struktural yang terjadi akibat bangunan mengalami perpindahan lateral, pelelehan, dan kerusakan.

Penurunan dari garis lurus ditarik garis dari asal plot ke *point* dalam kurva pada tingkat perpindahan lateral, " d " yang mewakili kekakuan sebagian atau kekakuan efektif pada struktur ketika dibebani secara lateral pada tingkat perpindahan tertentu. Pada Gambar 3.19, simbol " \blacklozenge " mewakili kejadian-kejadian penting selama respon lateral terhadap struktur. Kejadian-kejadian penting tersebut seperti pelelehan pertama pada salah satu elemen struktur atau kerusakan tertentu misalnya pecahnya atau terkelupasnya selimut beton pada kolom atau kegagalan geser pada spandek hingga keruntuhan total pada sistem.

Tabel 3.20 Level Kinerja Struktur Berdasarkan ATC-40

<i>Building Performance Levels</i>						
<i>Nonstructural Performance Levels</i>	<i>Structure Performance Levels</i>					
	<i>SP-1 Immediate Occupancy</i>	<i>SP-2 Damage Control</i>	<i>SP-3 Life Safety</i>	<i>SP-4 Limited Safety</i>	<i>SP-5 Structural Stability</i>	<i>SP-6 Not Considered</i>
NP-A <i>Operational</i>	1-A <i>Operational</i>	2-A	NR	NR	NR	NR
NP-B <i>Immediate Occupancy</i>	1-B <i>Immediate Occupancy</i>	2-B	3-B	NR	NR	NR
NP-C <i>Life Safety</i>	1-C	2-C	3-C <i>Life Safety</i>	4-C	5-C	6-C
NP-D <i>Hazards Reduced</i>	NR	2-D	3-D	4-D	5-D	6-D
NP-E <i>Not Considered</i>	NR	NR	3-E	4-E	5-E <i>Structural Stability</i>	<i>Not Applicable</i>

(Sumber : ATC-40 Volume 1, 1996)

Kategori kondisi untuk perencanaan struktur berbasis kinerja berdasarkan ATC-40 (1996) dapat dijelaskan pada Tabel 3.21 berikut.

Tabel 3.21 Kategori Bangunan pada Tingkat Kinerja Struktur

Tingkat Kinerja	Kategori Bangunan	Kondisi Bangunan Pasca Gempa
<i>SP-1 Immediate Occupancy (IO)</i>	Struktur bangunan yang mutlak difungsikan sebagai sarana penyelamatan, penyimpanan barang berbahaya,	<ul style="list-style-type: none"> - Bangunan aman saat terjadi gempa. - Risiko korban jiwa dan kegagalan struktur tidak terlalu berarti.

(Sumber : ATC-40 chap 3.2, 1996)

Lanjutan Tabel 3.21 Kategori Bangunan pada Tingkat Kinerja Struktur

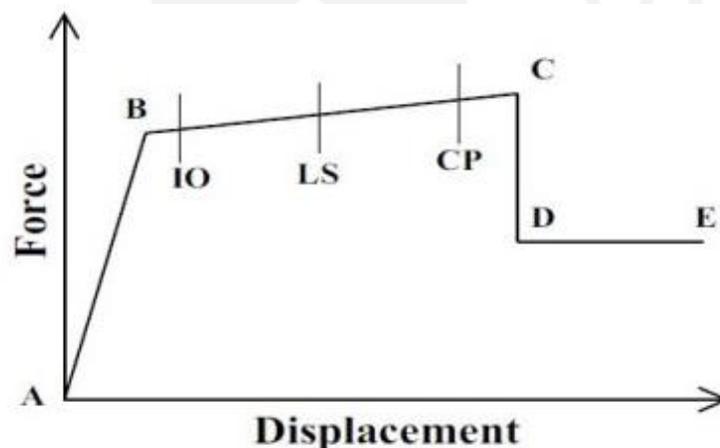
Tingkat Kinerja	Kategori Bangunan	Kondisi Bangunan Pasca Gempa
<i>SP-1</i> <i>Immediate Occupancy (IO)</i>	atau struktur bangunan yang mempengaruhi ekonomi nasional, seperti rumah sakit, gudang bahan bakar/bahan berbahaya, dll.	<ul style="list-style-type: none"> - Gedung tidak mengalami kerusakan berarti. - Dapat segera difungsikan kembali
<i>SP-2</i> <i>Damage Control (DO)</i>	Struktur bangunan bersejarah, bangunan yang menjadi tempat penyimpanan barang-barang berharga.	<ul style="list-style-type: none"> - Transisi antara <i>IO</i> dan <i>LS</i>. - Bangunan masih mampu menahan gempa yang terjadi. - Risiko korban jiwa manusia sangat kecil.
<i>SP-3</i> <i>Life Safety (LS)</i>	Fasilitas-fasilitas umum, gedung perkantoran, gudang, dll.	<ul style="list-style-type: none"> - Bangunan mengalami kerusakan tetapi tidak diperkenankan mengalami keruntuhan yang menyebabkan korban jiwa manusia. - Risiko korban jiwa sangat rendah. - Bangunan dapat berfungsi kembali setelah dilakukan perbaikan komponen struktural dan non struktural.
<i>SP-4</i> <i>Limited Safety</i>	-	<ul style="list-style-type: none"> - Transisi antara <i>LS</i> dan <i>Limited Safety</i>. - Bukan tingkatan serta tidak memperhitungkan aspek ekonomis dalam melakukan perbaikan pasca gempa.
<i>SP-5</i> <i>Structural Stability (SS)</i>	-	<ul style="list-style-type: none"> - Mengalami kerusakan hingga diambang keruntuhan total maupun parsial.

(Sumber : ATC-40 chap 3.2, 1996)

Lanjutan Tabel 3.21 Kategori Bangunan pada Tingkat Kinerja Struktur

Tingkat Kinerja	Kategori Bangunan	Kondisi Bangunan Pasca Gempa
SP-5 <i>Structural Stability (SS)</i>	-	- Komponen struktur penahan beban gravitasi masih bekerja meskipun keseluruhan kestabilan sudah diambang keruntuhan.
SP-6 <i>Not Considered</i>	-	- Bukan tingkatan kinerja struktur. - Hanya untuk evaluasi seismik non struktural atau <i>retrofit</i> .

(Sumber : ATC-40 chap 3.2, 1996)



Gambar 3.20 Kurva Kriteria Kinerja

(Sumber: ATC-40, 1996)

Berikut adalah penjelasan detail mengenai Gambar 3.20 pada tabel dibawah ini.

Tabel 3.22 Penjelasan Kurva Kriteria Kinerja

Kriteria Kinerja	Penjelasan
B	Menunjukkan batas linier yang kemudian diikuti terjadinya pelepasan pertama pada struktur
IO	Terjadinya kerusakan yang kecil atau tidak berarti pada struktur, kekakuan struktur hampir sama pada saat sebelum gempa terjadi

(Sumber: ATC-40, 1996)

Lanjutan Tabel 3.22 Penjelasan Kurva Kriteria Kinerja

Kriteria Kinerja	Penjelasan
LS	Terjadi kerusakan mulai dari kecil sampai dengan tingkat sedang. Kekakuan struktur berkurang, tetapi masih mempunyai ambang yang cukup besar terhadap keruntuhan
CP	Terjadi kerusakan yang parah pada struktur sehingga kekuatan dan kekakuannya berkurang banyak. Kecelakaan akibat kejatuhan material mungkin terjadi.
C	Batas maksimum gaya geser yang masih ditahan gedung
D	Terjadinya degradasi kekuatan struktur yang besar, sehingga kondisi struktur tidak stabil dan hampir <i>collapse</i>
E	Struktur sudah tidak mampu menahan gaya geser dan hancur

(Sumber: ATC-40, 1996)

BAB IV METODE PENELITIAN

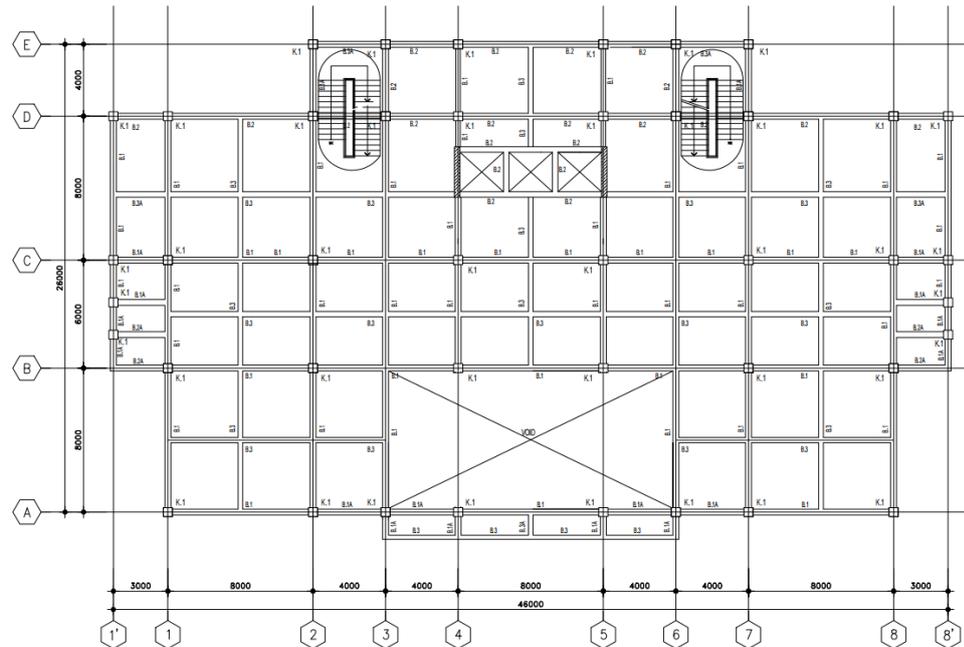
Pada Bab III telah dibahas mengenai landasan teori yang digunakan dalam penelitian ini sebagai acuan dalam pelaksanaan penelitian evaluasi kinerja gedung. Pada bab ini menjelaskan mengenai metode penelitian yang akan dilakukan untuk mencapai tujuan dari penelitian ini berlandaskan peraturan SNI 1726-2019, SNI 1727-2020, SNI 2847-2019, PPIUG 1983, dan ATC-40 1996.

4.1 Lokasi Objek Penelitian

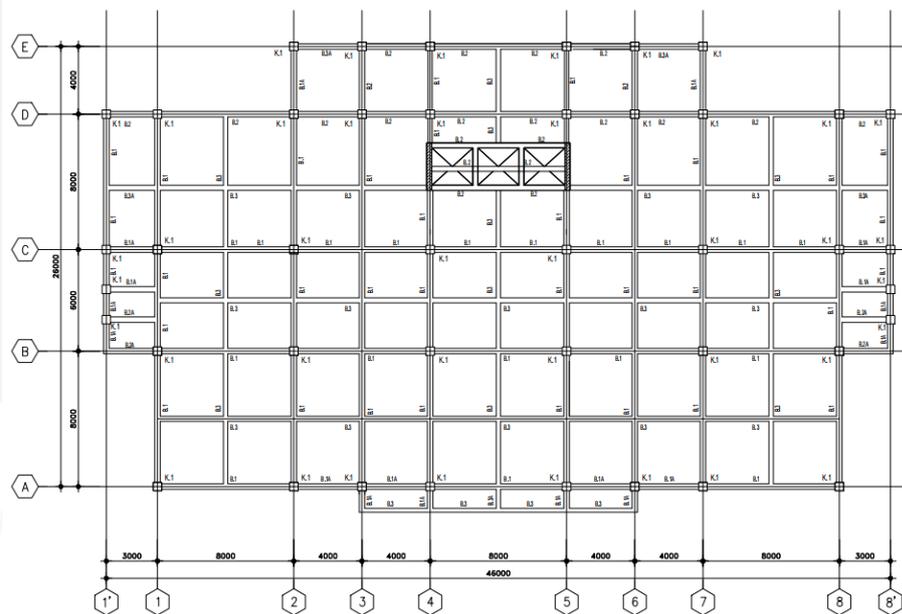
Objek penelitian adalah gedung perkantoran yang berada di Kota Padang, Provinsi Sumatera Barat seperti pada Gambar 4.1 dan denah gedung ini dapat dilihat pada Gambar 4.2 dan Gambar 4.3 berikut.



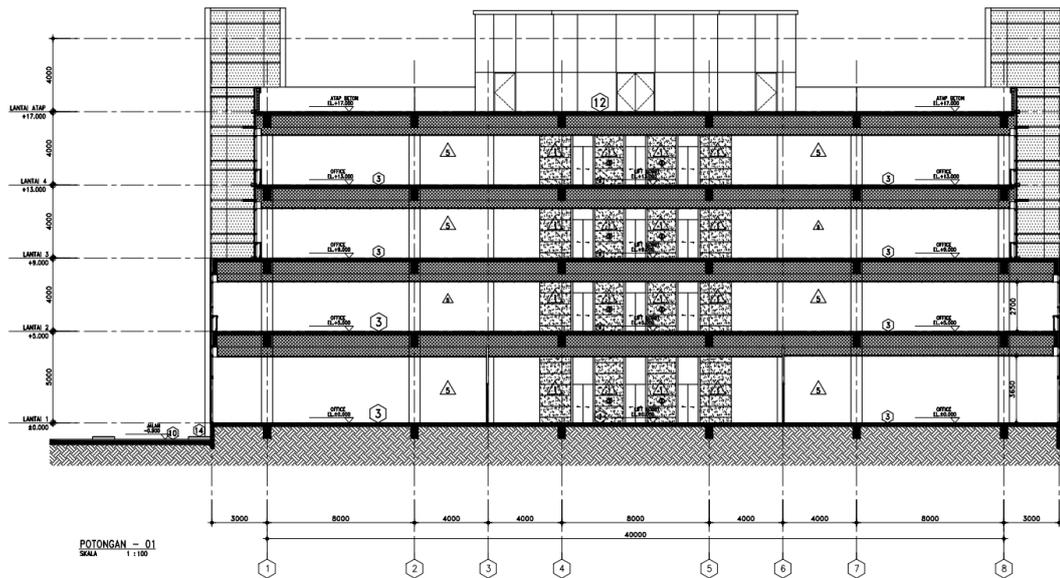
Gambar 4.1 Lokasi Pembangunan Gedung Perkantoran
(Sumber: *Google Earth*)



Gambar 4.2 Denah Lantai 2 Gedung Perkantoran
(Sumber: *Detail Engineering Design*)



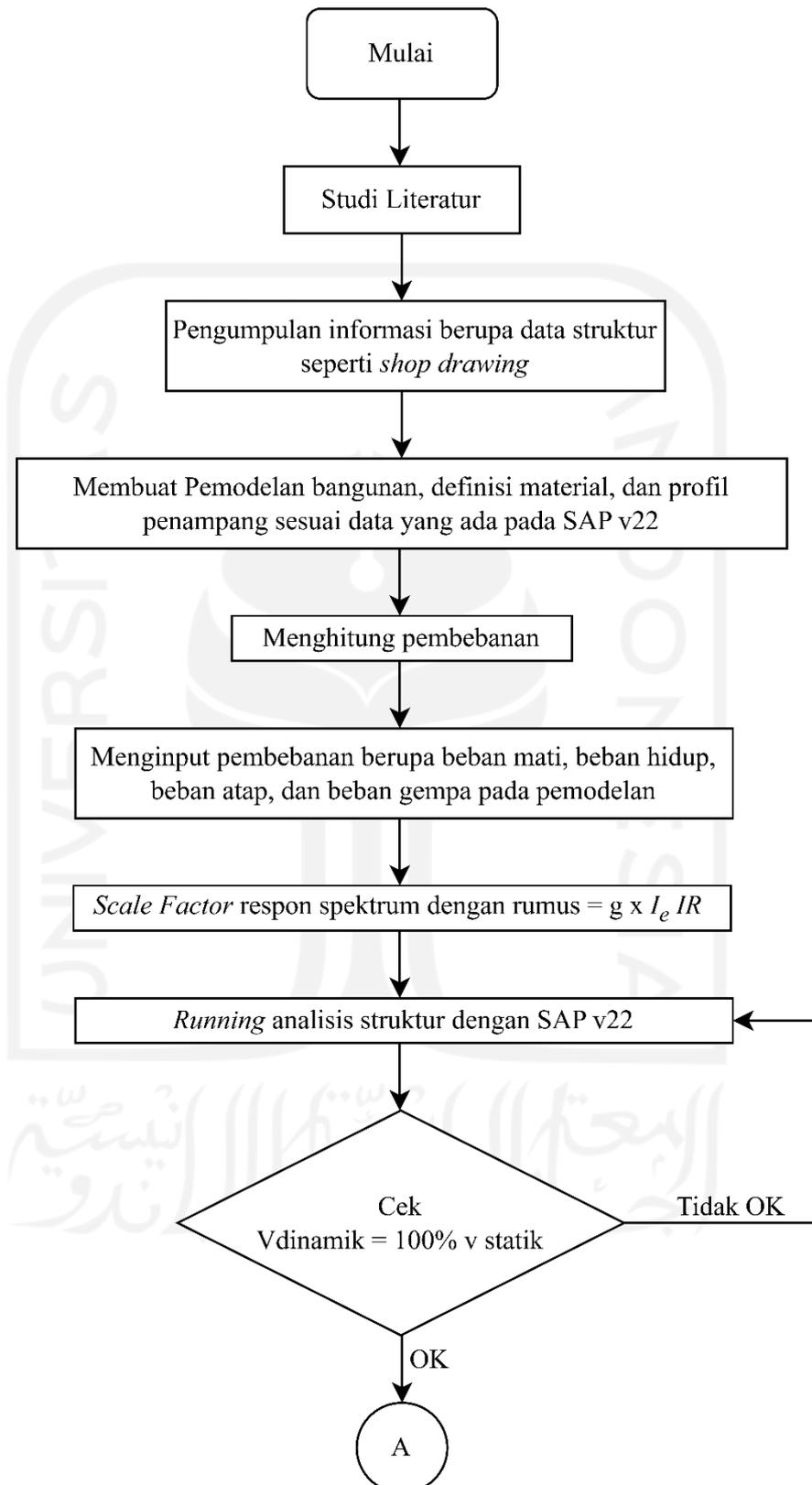
Gambar 4.3 Denah Lantai 3-4 Gedung Perkantoran
(Sumber: *Detail Engineering Design*)



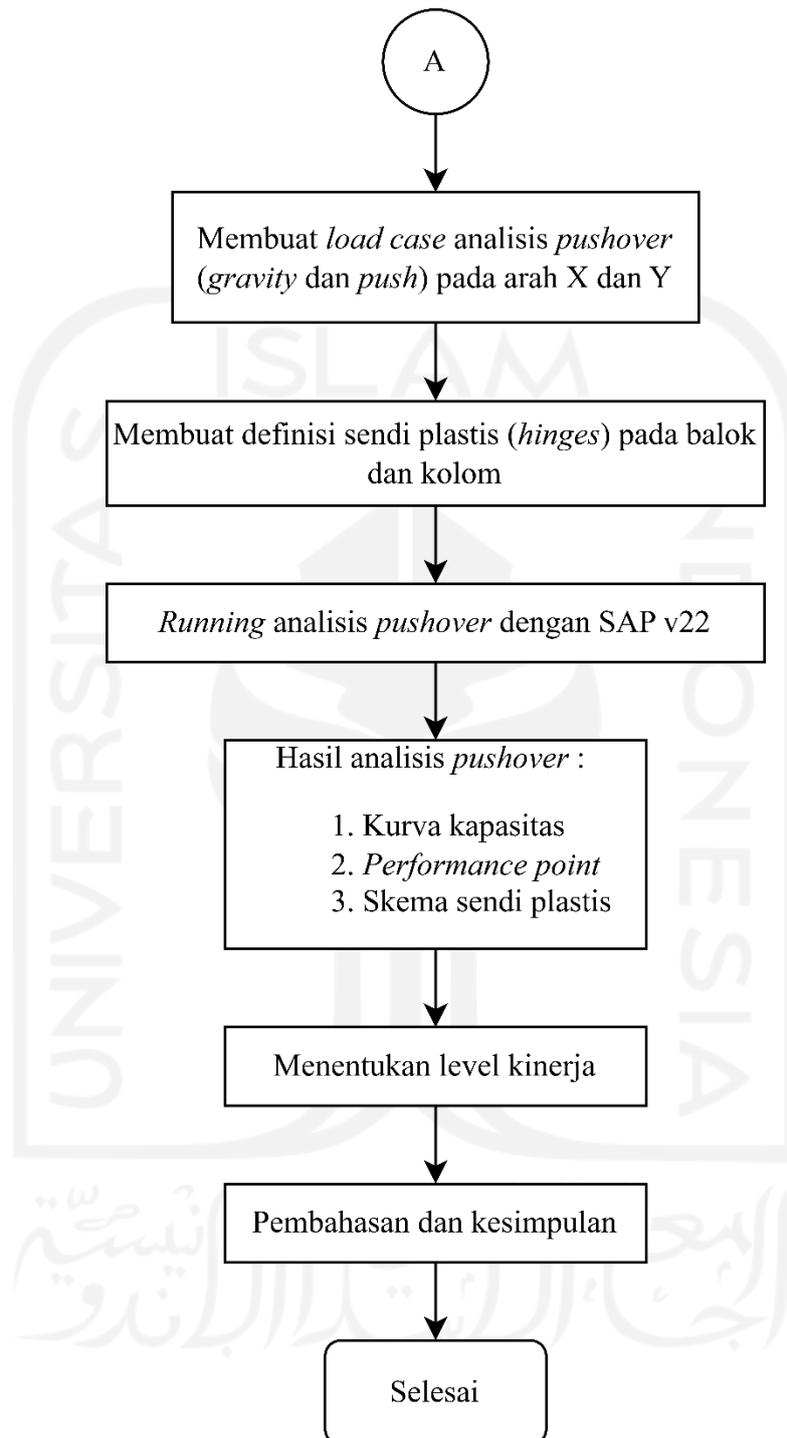
Gambar 4.4 Potongan Gedung Perkantoran
(Sumber: *Detail Engineering Design*)

4.2 Alur Penelitian

Evaluasi kinerja struktur gedung perkantoran yang akan dibuat pada tugas akhir ini, terdapat prosedur atau tahapan dalam menganalisis gedung tersebut menggunakan analisis *pushover*. Prosedur atau tahapan untuk menganalisis gedung tersebut dapat dilihat pada bagan alir (*flowchart*) yang dapat dilihat pada Gambar 4.5.



Gambar 4.5 Bagan Alur Pelaksanaan Penelitian



Gambar 4.5 Lanjutan Bagan Alur Pelaksanaan Penelitian

4.3 Tahapan Penelitian

Metode penelitian ini menggunakan analisis statik non linear *pushover* dengan menggunakan bantuan *software* SAP2000 v22. Berikut ini adalah tahapan analisisnya.

1. Studi Literatur

Studi literatur yang digunakan berasal dari jurnal-jurnal maupun tugas yang berkaitan dengan analisis *pushover*. Acuan yang digunakan dalam analisis adalah SNI 1726-2019 tentang Tata Cara Perencanaan Ketahanan Gempa untuk Struktur Bangunan Gedung dan Non Gedung yang digunakan untuk perencanaan bangunan tahan gempa, SNI 1727-2020 tentang Beban Minimum untuk Perencanaan Gedung dan Struktur Lain dan PPIUG 1983 yang digunakan untuk pembebanan yang akan digunakan, SNI 2847-2019 tentang Persyaratan Beton Struktural untuk Bangunan Gedung, dan *Applied Technology Council for Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings Volume-1* (ATC-40).

2. Pengumpulan Data

Data-data beserta informasi pada gedung perkantoran dikumpulkan untuk diteliti yang terbagi atas data primer dan sekunder.

Data primer yang diperlukan untuk penelitian ini adalah berupa :

- kegiatan observasi, dan
- wawancara dengan pihak perencana.

Data sekunder yang diperlukan untuk penelitian ini adalah berupa :

- laporan perencana, dan
- *Detail Engineering Design (DED)* dari struktur gedung perkantoran.

3. Program dan *Software* yang Digunakan

Pada penelitian ini digunakan sebuah program untuk membantu dalam proses pelaksanaan penelitian yang tujuannya untuk mempermudah menyelesaikan masalah. *Software* yang digunakan dalam penelitian ini sebagai berikut.

- 1) SAP2000 v22, program ini akan digunakan untuk :

- a. pembuatan model struktur bangunan dilakukan sesuai dengan data dan informasi dari *Detail Engineering Design (DED)* gedung perkantoran,
 - b. kolom, balok, dan *sloof* dimodelkan sebagai *Frame* pada *Section Designer*,
 - c. pelat dimodelkan sebagai *Shell-Thin*,
 - d. *shear wall* dimodelkan sebagai *Shell-Thick*.
- 2) Microsoft Excel 2019, program ini akan digunakan untuk menghitung dan menganalisis data hasil *output* dari program SAP2000 v22.
 - 3) Autocad 2021, program ini akan digunakan untuk melihat denah, potongan, dan detail bangunan.
4. Pembebanan Struktur
- Perhitungan pembebanan yang bekerja pada struktur dibantu dengan *software* SAP2000 v22. Beban-beban yang bekerja pada struktur berupa beban mati, beban hidup, dan beban gempa diinput satu persatu ke dalam program SAP2000 v22 untuk seterusnya dilakukan analisis terhadap struktur gedung tersebut. Perencanaan pembebanan dalam penelitian ini direncanakan berdasarkan Peraturan Pembebanan Indonesia untuk Gedung PPIUG tahun 1983 dan SNI 1727-2020 Beban Minimum untuk Perencanaan Gedung dan Struktur Lain.
5. Data Teknis
- 1) Lokasi bangunan : Padang
 - 2) Fungsi bangunan : Gedung Kantor
 - 3) Konstruksi bangunan : Beton bertulang
 - 4) Tinggi total gedung : 17 meter
 - 5) Jumlah lantai : 4 (empat)
 - 6) Tinggi tipikal lantai : Lantai 1 (5 meter), Lantai 2-4 (4 meter)
 - 7) Jenis tanah : Tanah lunak
 - 8) Mutu beton ($f'c$) : 24,9 MPa
 - 9) Mutu baja tulangan (F_y)

- a. Tulangan polos : 280 MPa
 - b. Tulangan ulir : 420A MPa
- 4) Modulus elastisitas
- a. Beton : $4700 \times \sqrt{f'c} = 4700 \times \sqrt{24,9} = 23453 \text{ Mpa}$
 - b. Baja tulangan : 200000 MPa
- 5) Berat volume
- a. Beton : 2400 kg/m^3
 - b. Baja tulangan : 7850 kg/m^3
- 6) Dimensi elemen struktur
- Dimensi pelat, kolom, dan balok dapat dilihat pada Tabel 4.1, 4.2, dan 4.3.
- a. Pelat dan *shearwall*

Tabel 4.1 Dimensi Pelat dan *Shearwall*

No	Elemen Struktur	Thickness (mm)
Pelat		
1	Pelat Lantai	120
2	Pelat Atap	120
Dinding Beton		
3	<i>Shearwall</i>	300

(Sumber: *Detail Engineering Design*)

- b. Kolom

Tabel 4.2 Penulangan Kolom

No	Elemen Kolom	Dimensi		Pembesian					
				Tumpuan		Lapangan		Sengkang	
		b (mm)	h (mm)	Atas	Bawah	Atas	Bawah	Tumpuan	Lapangan
1	Lantai 1								
	K 60x60	600	600	20 D 22				4P10-100	4P10-200
2	Lantai 2								
	K 60x60	600	600	12 D 22				3P10-100	3P10-200
3	Lantai 3								
	K 60x60	600	600	12 D 22				3P10-100	3P10-200
4	Lantai 4								
	K 60x60	600	600	12 D 22				3P10-100	3P10-200

(Sumber: *Detail Engineering Design*)

3. Menghitung Nilai T_0 , T_s , dan S_a

$$\begin{aligned} T_0 &= 0,2 \frac{SD1}{SDS} \\ &= 0,2 \frac{1,186}{1,128} \\ &= 0,210 \text{ detik} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} T_s &= \frac{SD1}{SDS} \\ &= \frac{1,186}{1,128} \\ &= 1,051 \text{ detik} \end{aligned}$$

Untuk $T < T_0$

$$\begin{aligned} S_a &= 0,4 \times SDS \\ &= 0,4 \times 1,128 \\ &= 0,451 \end{aligned}$$

Untuk $T_0 \leq T \leq T_s$

$$\begin{aligned} S_a &= SDS \\ &= 1,128 \end{aligned}$$

Untuk $T \geq T_s$

$$\begin{aligned} S_a &= \frac{SD1}{T} \\ &= \frac{1,186}{1,5} \\ &= 0,791 \end{aligned}$$

Dari hasil perhitungan dengan parameter-parameter diatas didapat grafik respon spektrum menurut SNI 1726-2019 yang dapat dilihat pada Tabel 5.2 dan Gambar 5.12 berikut.

Tabel 5.2 Hasil Perhitungan Respon Spektrum Gempa MCE_R

T (detik)	S_a (g)
0	0,451
0,210	1,128
1,051	1,128
1	1,128
1,5	0,791
2	0,593
2,5	0,475
3	0,395
3,5	0,339

c. Balok (Lantai 1-4)

Tabel 4.3 Penulangan Balok

No	Elemen Balok	Dimensi		Pembesian					
				Tumpuan		Lapangan		Sengkang	
		b (mm)	h (mm)	Atas	Bawah	Atas	Bawah	Tumpuan	Lapangan
	Lantai 1								
1	B1	350	700	6D22	4D22	4D22	6D22	4Ø13-100	3Ø13-150
2	B1A	350	700	6D22	4D22	4D22	6D22	2Ø13-100	2Ø13-100
3	B2	300	600	8D19	4D19	4D19	8D19	2Ø13-100	2Ø13-150
4	B2A	300	600	8D19	4D19	4D19	8D19	2Ø13-100	2Ø13-150
5	B3	250	500	5D19	3D19	3D19	5D19	3Ø10-100	2Ø10-150
6	B3A	250	500	5D19	3D19	3D19	5D19	3Ø10-100	2Ø10-150
	Lantai 2								
7	B1	350	700	6D22	4D22	4D22	6D22	4Ø13-100	3Ø13-150
8	B1A	350	700	6D22	4D22	4D22	6D22	2Ø13-100	2Ø13-100
9	B2	300	600	8D19	4D19	4D19	8D19	2Ø13-100	2Ø13-150
10	B2A	300	600	8D19	4D19	4D19	8D19	2Ø13-100	2Ø13-150
11	B3	250	500	5D19	3D19	3D19	5D19	3Ø10-100	2Ø10-150
12	B3A	250	500	5D19	3D19	3D19	5D19	3Ø10-100	2Ø10-150
	Lantai 3								
13	B1	350	700	6D22	4D22	4D22	6D22	4Ø13-100	3Ø13-150
14	B1A	350	700	6D22	4D22	4D22	6D22	2Ø13-100	2Ø13-100
15	B2	300	600	8D19	4D19	4D19	8D19	2Ø13-100	2Ø13-150
16	B2A	300	600	8D19	4D19	4D19	8D19	2Ø13-100	2Ø13-150
17	B3	250	500	5D19	3D19	3D19	5D19	3Ø10-100	2Ø10-150
18	B3A	250	500	5D19	3D19	3D19	5D19	3Ø10-100	2Ø10-150
	Lantai 4								
19	B1	350	700	6D22	4D22	4D22	6D22	4Ø13-100	3Ø13-150
20	B1A	350	700	6D22	4D22	4D22	6D22	2Ø13-100	2Ø13-100
21	B2	300	600	8D19	4D19	4D19	8D19	2Ø13-100	2Ø13-150
22	B2A	300	600	8D19	4D19	4D19	8D19	2Ø13-100	2Ø13-150
23	B3	250	500	5D19	3D19	3D19	5D19	3Ø10-100	2Ø10-150
24	B3A	250	500	5D19	3D19	3D19	5D19	3Ø10-100	2Ø10-150

(Sumber: *Detail Engineering Design*)6. Analisis *Pushover*

Analisis dilakukan dengan langkah-langkah yang berpedoman pada *Applied Technology Council for Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings Volume-1* (ATC-40). Analisis *pushover* dilakukan dengan bantuan program SAP2000 V22, hasil analisis statik *pushover* yaitu berupa nilai *drift*, *displacement*, dan kurva kapasitas yang nantinya akan

digunakan untuk menentukan *performance point* dan level kinerja dari bangunan yang ditinjau.

7. Membuat Kesimpulan dari Analisis yang Dilakukan

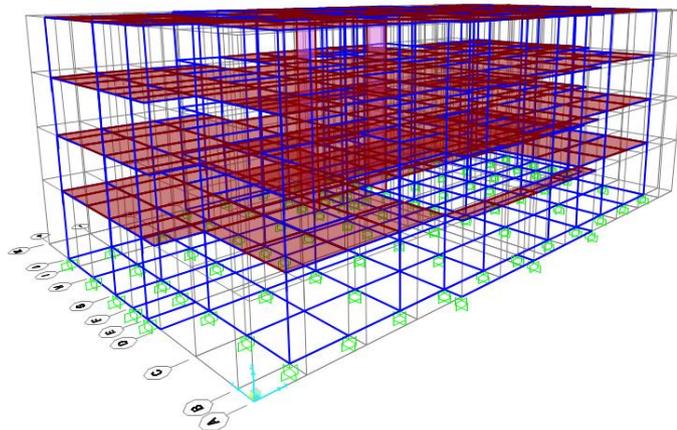


BAB V ANALISIS DAN PEMBAHASAN

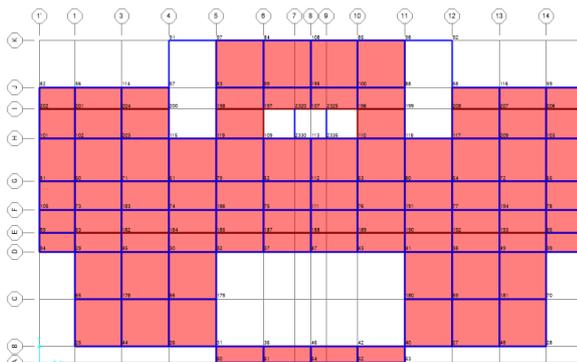
Pada BAB IV telah dibahas metode penelitian yang akan dilakukan untuk mencapai tujuan-tujuan dari penelitian ini. Pada BAB V akan menjelaskan pemodelan struktur, pembebanan struktur, tahapan analisis *pushover* dan hasil analisis *pushover* dengan berlandaskan peraturan-peraturan yang telah ditentukan.

5.1 Pemodelan Struktur

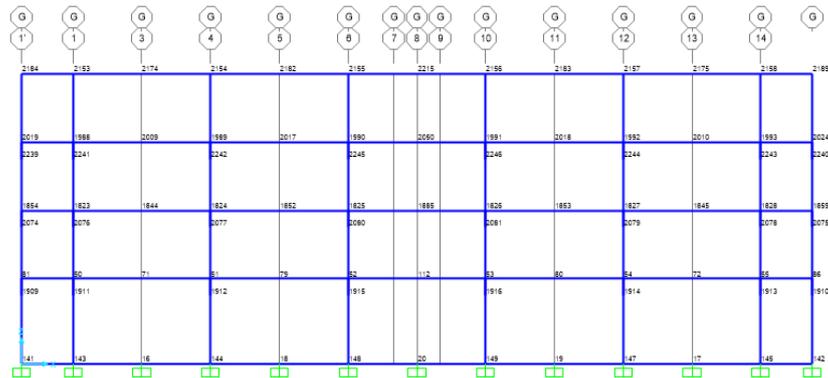
Pemodelan struktur dilakukan menggunakan *software* SAP2000 v22 dengan menggambar semua elemen kolom, *sloof*, balok, pelat, dan dinding geser. Gambar pemodelan gedung perkantoran dapat dilihat pada Gambar 5.1-5.4 berikut.



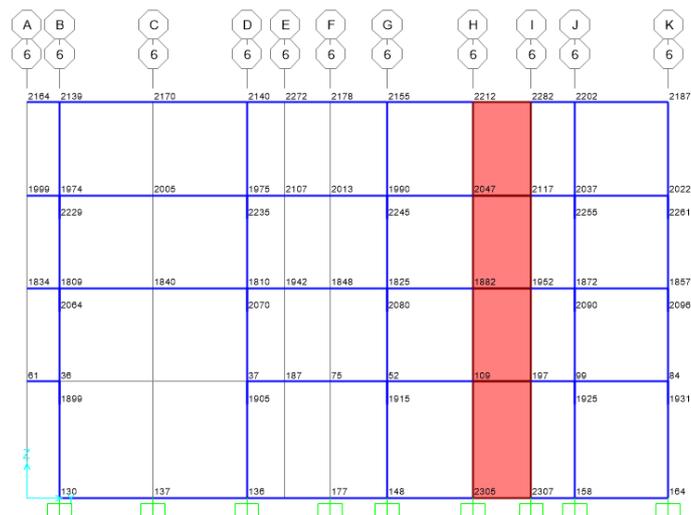
Gambar 5.1 Tampak 3D Gedung Perkantoran
(Sumber: SAP 2000 v22)



Gambar 5.2 Tampak X-Y Gedung Perkantoran
(Sumber: SAP 2000 v22)



Gambar 5.3 Tampak X-Z Gedung Perkantoran
(Sumber: SAP 2000 v22)

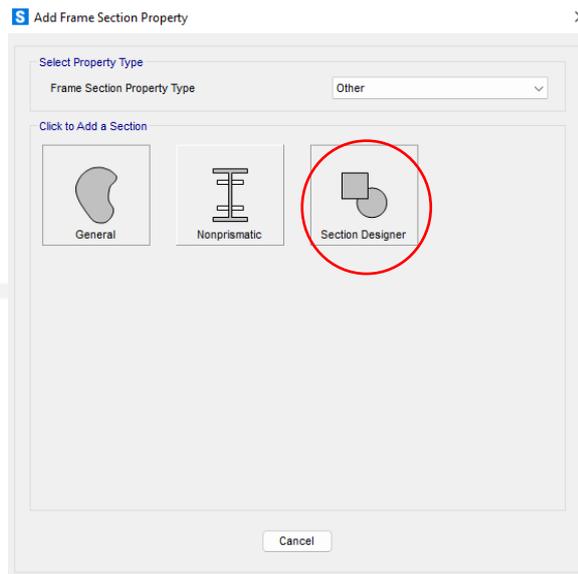


Gambar 5.4 Tampak Y-Z Gedung Perkantoran
(Sumber: SAP 2000 v22)

Pemodelan elemen kolom, balok, dan *sloof* dimodelkan pada SAP2000 v22 menggunakan *section designer*, dengan tahapan sebagai berikut.

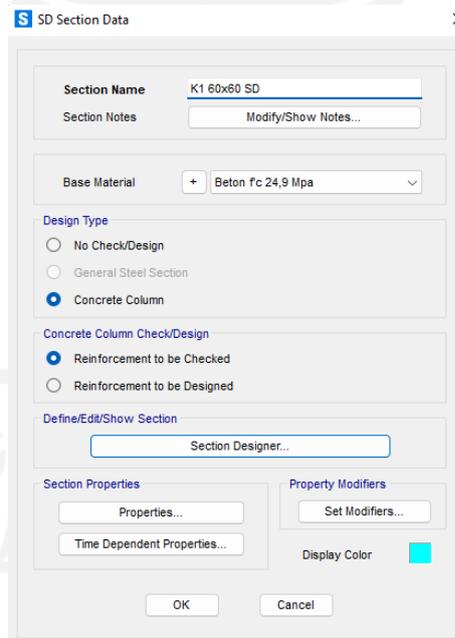
5.2 Pemodelan pada *Section Designer*

Pemodelan elemen kolom dilakukan dengan tahapan klik *Define – Section Properties – Frame Sections – Add New Property – Other* untuk *Frame Section Property Type – Section Designer*.

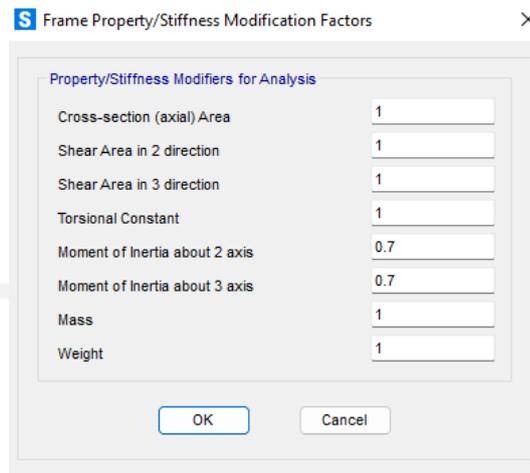


Gambar 5.5 Add Frame Section Property
(Sumber: SAP 2000 v22)

Kemudian dilanjutkan dengan pengisian data kolom dan menginput nilai inersia kolom yang dapat dilihat pada gambar berikut.

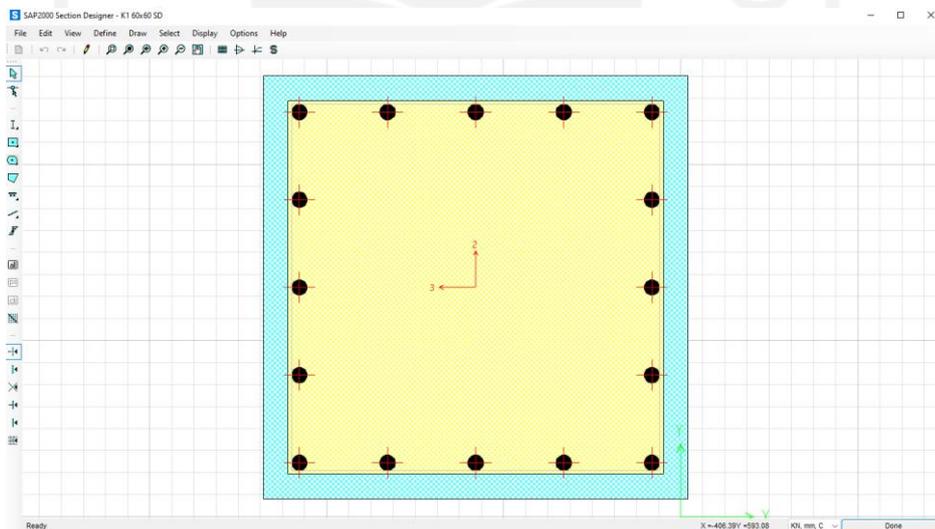


Gambar 5.6 Section Data
(Sumber: SAP 2000 v22)



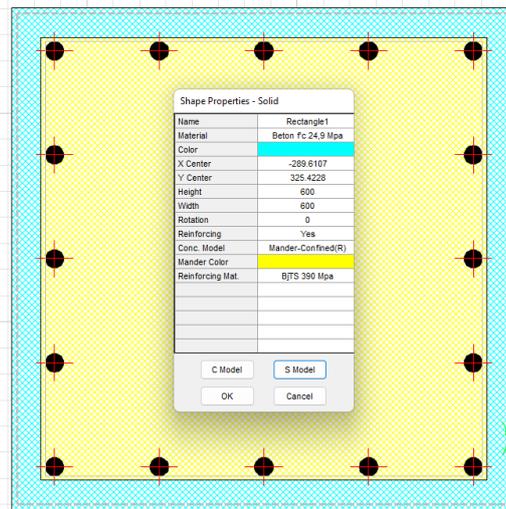
Gambar 5.7 Stiffness Modification Factor
(Sumber: SAP 2000 v22)

Penggambaran kolom dibuat berdasarkan *DED* dengan menginput nilai dimensi, jumlah tulangan, ukuran tulangan, dan jarak antar tulangan sehingga menghasilkan bentuk seperti Gambar 5.8 berikut.

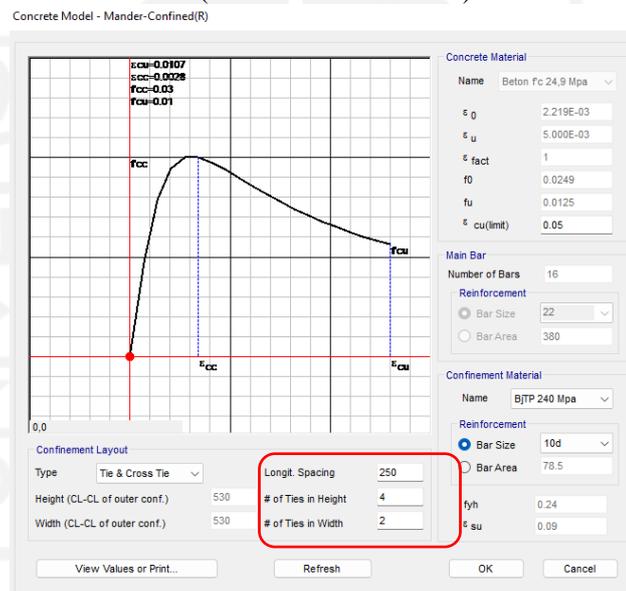


Gambar 5.8 Pemodelan Kolom Menggunakan Section Designer
(Sumber: SAP 2000 v22)

Jumlah kaki sengkang dapat dimodelkan dengan mengklik kanan pada gambar kolom yang telah dibuat setelah itu klik C Model dan menginput jumlah kaki sengkang pada bagian *Confinement Layout* seperti Gambar 5.9 dan Gambar 5.10 berikut.



Gambar 5.9 Shape Properties
(Sumber: SAP 2000 v22)



Gambar 5.10 C Model Kolom
(Sumber: SAP 2000 v22)

Tahapan yang sama juga dilakukan untuk memodelkan balok dan *sloof* dengan dimensi dan ketentuan lainnya yang mengacu pada *DED*. Tujuan dari memodelkan kolom, balok, dan *sloof* dengan menggunakan *section designer* yaitu mengetahui dan melihat grafik momen kurvatur atau momen kelengkungan pada elemen struktur dikarenakan material gedung ini adalah beton bertulang. Momen kurvatur adalah besarnya rotasi yang terjadi pada elemen struktur ketika menerima momen lentur. Grafik momen kurvatur ini menampilkan besarnya momen lentur dan rotasi yang terjadi.

5.3 Pembebanan Struktur

Pembebanan struktur meliputi perhitungan beban mati tambahan, beban hidup, dan beban gempa berdasarkan SNI 1726-2019, berikut penjelasannya.

5.3.1 Perhitungan Beban Mati

1. Pelat Lantai

a. Beban pada lantai 1-3

BV Spesi (tebal 2 cm)	$= 0,20601 + 0,20601$	$= 0,41202 \text{ kN/m}^2$
BV Plafon (tebal 1 cm)		$= 0,19620 \text{ kN/m}^2$
BV MEP		$= 0,24525 \text{ kN/m}^2$
BV Keramik (tebal 1 cm)		$= 0,23544 \text{ kN/m}^2$
	q_{SIDL}	$= 1,08891 \text{ kN/m}^2$

b. Beban dinding

Berat jenis bata = $250 \text{ kg/m}^2 = 2,4525 \text{ kN/m}^2$

Berat jenis kaca = $30,84 \text{ kg/m}^2 = 0,3025 \text{ kN/m}^2$

Beban dinding pada lantai dasar

B1 bata = $2,4525 \times 4,3 = 10,54575 \text{ kN/m}^2$

B2 bata = $2,4525 \times 4,4 = 10,791 \text{ kN/m}^2$

B3 bata = $2,4525 \times 4,5 = 11,03625 \text{ kN/m}^2$

B1 kaca = $0,3025 \times 4,3 = 1,30092 \text{ kN/m}^2$

B2 kaca = $0,3025 \times 4,4 = 1,33118 \text{ kN/m}^2$

B3 kaca = $0,3025 \times 4,5 = 1,36143 \text{ kN/m}^2$

Beban dinding pada lantai 2, 3, dan 4

B1 bata = $2,4525 \times 3,3 = 8,09325 \text{ kN/m}^2$

B2 bata = $2,4525 \times 3,4 = 8,3385 \text{ kN/m}^2$

B3 bata = $2,4525 \times 3,5 = 8,58375 \text{ kN/m}^2$

B1 kaca = $0,3025 \times 3,3 = 0,99838 \text{ kN/m}^2$

B2 kaca = $0,3025 \times 3,4 = 1,02864 \text{ kN/m}^2$

B3 kaca = $0,3025 \times 3,5 = 1,05889 \text{ kN/m}^2$

2. Pelat Atap

a. Beban pada lantai 4 (atap)

BV Spesi (tebal 2 cm) $= 0,20601 \text{ kN/m}^2$

$$\begin{aligned}
 \text{BV Plafon (tebal 1 cm)} &= 0,19620 \text{ kN/m}^2 \\
 \text{BV MEP} &= 0,24525 \text{ kN/m}^2 \\
 qSIDL &= 0,85347 \text{ KN/m}^2 +
 \end{aligned}$$

5.3.2 Perhitungan Beban Hidup

Fungsi bangunan adalah gedung kantor, berikut berat beban hidup minimal berdasarkan SNI 1727-2020.

1. Lantai 1-3
 qLL (beban hidup fungsi ruang kantor) = 2,40 KN/m²
2. Lantai 4 (Atap)
 Beban hidup pelat atap kantor (L_r) = 0,96 KN/m²
 Beban hujan (ditafsir 5 cm genangan) (R) = 0,50 KN/m²

5.3.3 Perhitungan Beban *Additional*

1. Tangga

Beban reaksi pada tangga didapatkan dari reaksi pada tumpuan balok akibat tangga yang dihitung menggunakan *software* SAP2000 v22, berikut ini adalah hasil perhitungan beban tangga.

Beban reaksi pada tumpuan balok akibat tangga no 1 = 66,137 kN

Beban reaksi pada tumpuan balok akibat tangga no 2 = 16,075 kN

Beban reaksi pada tumpuan balok akibat tangga no 3 = 8,355 kN

Beban reaksi pada tumpuan balok akibat tangga no 4 = 22,817 kN

Beban reaksi pada tumpuan balok akibat tangga no 5 = 8,013 kN

Beban reaksi pada tumpuan balok akibat tangga no 6 = 22,817 kN

Beban reaksi pada tumpuan balok akibat tangga no 7 = 8,355 kN

Beban reaksi pada tumpuan balok akibat tangga no 8 = 16,075 kN

Beban reaksi pada tumpuan balok akibat tangga no 9 = 66,137 kN

2. *Lift*

Beban lift didapatkan dari

Beban mati pada balok penggantung *lift* = 2,942 kN/m

Beban hidup pada balok penggantung *lift* = 1,9613 kN/m

5.3.4 Kombinasi Beban

Kombinasi beban yang digunakan pada analisis penelitian berdasarkan SNI 2847-2019 tentang Persyaratan Beton Struktural untuk Bangunan Gedung. Berikut macam-macam kombinasi beban yang digunakan untuk pada Tabel 5.1.

Tabel 5.1 Kombinasi Beban

Nomor		<i>DL</i>	<i>SIDL</i>	<i>LL</i>	<i>L_r</i>	<i>R</i>	<i>E_x</i>	<i>E_y</i>
1	1.1	1,4	1,4					
2	2.1	1,2	1,2	1,6	0,5			
	2.2	1,2	1,2	1,6		0,5		
3	3.1	1,2	1,2	1	1,6			
	3.2	1,2	1,2	1		1,6		
5	5.1	$1,2+0,2S_{DS}$	$1,2+0,2S_{DS}$	1			0,39	1,3
	5.2	$1,2+0,2S_{DS}$	$1,2+0,2S_{DS}$	1			0,39	-1,3
	5.3	$1,2+0,2S_{DS}$	$1,2+0,2S_{DS}$	1			-0,39	1,3
	5.4	$1,2+0,2S_{DS}$	$1,2+0,2S_{DS}$	1			-0,39	-1,3
	5.5	$1,2+0,2S_{DS}$	$1,2+0,2S_{DS}$	1			1,3	0,39
	5.6	$1,2+0,2S_{DS}$	$1,2+0,2S_{DS}$	1			-1,3	0,39
	5.7	$1,2+0,2S_{DS}$	$1,2+0,2S_{DS}$	1			1,3	-0,39
	5.8	$1,2+0,2S_{DS}$	$1,2+0,2S_{DS}$	1			-1,3	-0,39
7	7.1	$0,9-0,2S_{DS}$	$0,9-0,2S_{DS}$				0,39	1,3
	7.2	$0,9-0,2S_{DS}$	$0,9-0,2S_{DS}$				0,39	-1,3
	7.3	$0,9-0,2S_{DS}$	$0,9-0,2S_{DS}$				-0,39	1,3
	7.4	$0,9-0,2S_{DS}$	$0,9-0,2S_{DS}$				-0,39	-1,3
	7.5	$0,9-0,2S_{DS}$	$0,9-0,2S_{DS}$				1,3	0,39
	7.6	$0,9-0,2S_{DS}$	$0,9-0,2S_{DS}$				-1,3	0,39
	7.7	$0,9-0,2S_{DS}$	$0,9-0,2S_{DS}$				1,3	-0,39
	7.8	$0,9-0,2S_{DS}$	$0,9-0,2S_{DS}$				-1,3	-0,39

5.3.5 Perhitungan Beban Gempa

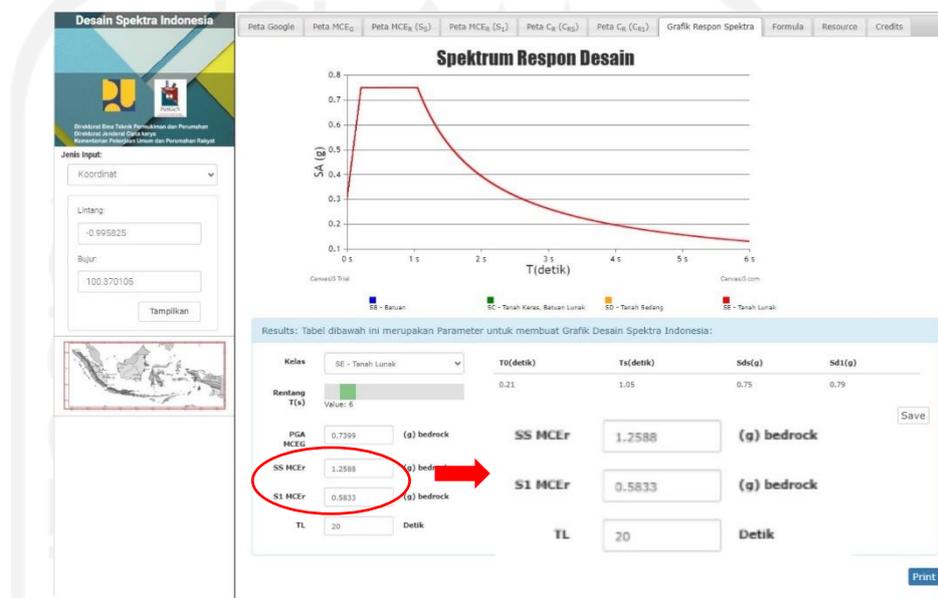
Lokasi bangunan berada di Kota Padang, Sumatera Barat dengan jenis tanah lunak (SE). Bangunan memiliki jumlah tingkat 4 lantai dengan tinggi bangunan 17 meter.

1. Parameter Percepatan Gempa

- a. Menentukan Faktor Keutamaan dan Kategori Risiko Struktur Bangunan Berdasarkan SNI 1726-2019 sesuai dengan pemanfaatan fungsi gedung yaitu kantor diperoleh kategori risiko II dimana faktor keutamaan gempa (*I_e*) bernilai 1,00.

b. Menentukan Respon Spektral Percepatan

Respon spektral percepatan diakses melalui web <http://rsa.ciptakarya.pu.go.id/> dengan memasukkan nilai koordinat lintang dan bujur sesuai lokasi studi kasus. Studi kasus pada penelitian ini berada pada Kawasan Pelabuhan Teluk Bayur Kota Padang yang berada pada lintang $-0,995825$ dan bujur $100,370105$.



Gambar 5.11 Penentuan Respon Spektral Percepatan

(Sumber : web <http://rsa.ciptakarya.pu.go.id/>)

Sehingga diperoleh nilai berikut.

$$S_s = 1,2588$$

$$S_l = 0,5833$$

c. Menentukan Klasifikasi Situs

Klasifikasi situs dilakukan untuk menentukan jenis tanah berdasarkan data pengukuran *standar penetration resistance* (uji penetrasi standar SPT), dari hasil pengujian yang telah dilakukan didapatkan jenis tanah termasuk kategori SE (tanah lunak).

d. Menentukan Koefisien Situs

Berdasarkan spektral percepatan periode pendek (S_s) dan periode panjang (S_l) dengan kondisi tanah lunak, diperoleh koefisien situs yaitu :

$$F_a = 0,8965 \text{ (hasil interpolasi pada Tabel 3.8 halaman 26)}$$

$$F_v = 2,0340 \text{ (hasil interpolasi pada Tabel 3.9 halaman 26)}$$

e. Menentukan Parameter Respon Spektrum

- 1) Menentukan *Maximum Considered Earthquake (MCE) Spectral Respon Acceleration* pada periode pendek S_{DS}

$$\begin{aligned} S_{MS} &= F_a \times S_s \\ &= 0,8965 \times 1,2588 \\ &= 1,128 \end{aligned}$$

- 2) Menentukan *Maximum Considered Earthquake (MCE) Spectral Respon Acceleration* pada periode 1,0 detik S_{D1}

$$\begin{aligned} S_{MI} &= F_v \times S_I \\ &= 2,0340 \times 0,583 \\ &= 1,186 \end{aligned}$$

f. Menentukan Sistem dan Parameter Struktur

Sesuai dengan hasil yang didapatkan untuk Kategori Desain Seismik D dan tergolong ke dalam tingkat risiko kegempaan tinggi, maka berpedoman pada SNI 1726-2019 atau pada Tabel 3.11, dimana sistem struktur gedung kantor yaitu sistem struktur gabungan antara sistem rangka dengan dinding geser (dinding geser beton bertulang khusus) berikut parameter strukturnya.

- 1) Koefisien modifikasi respon, $R = 7$
- 2) Faktor kuat lebih sistem, $\Omega_0 = 2,5$
- 3) Faktor pembesaran defleksi, $C_d = 5,5$

2. Parameter Percepatan Spektral Gempa Besar atau MCE_R

a. Spektral Gempa Besar untuk Periode Pendek (S_{DS})

$$\begin{aligned} S_{DS} &= S_{MS} \\ &= 1,128 \end{aligned}$$

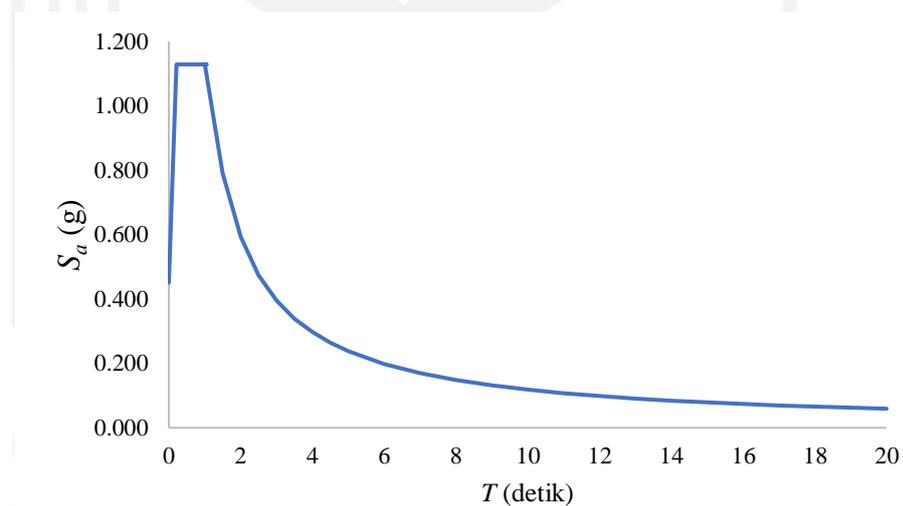
b. Spektral Gempa Besar untuk Periode 1 Detik (S_{D1})

$$\begin{aligned} S_{D1} &= S_{MI} \\ &= 1,186 \end{aligned}$$

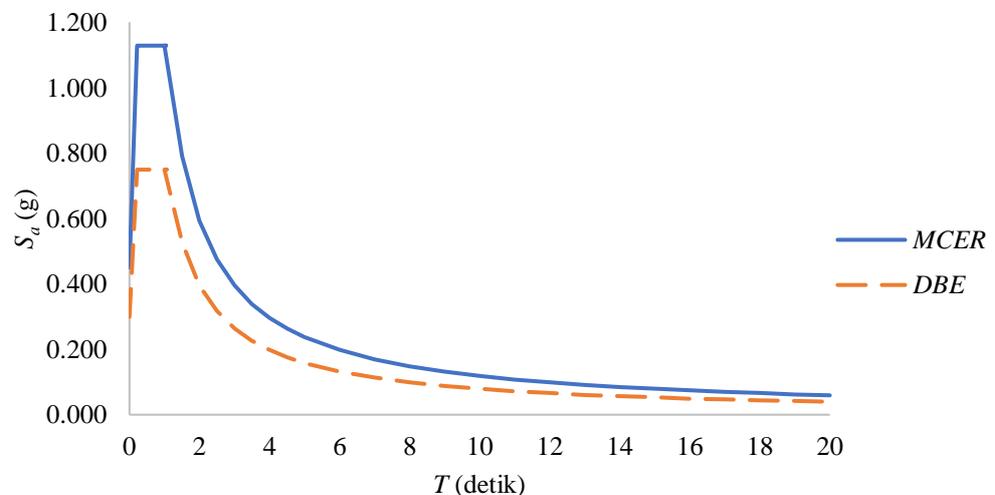
Berdasarkan Tabel 3.9 dan Tabel 3.10, dengan kelas situs SE dimana $S_{DS} = 1,128$ untuk periode pendek dan $S_{D1} = 1,186$ untuk periode 1,0 detik diperoleh kategori desain seismik adalah D (risiko gempa tinggi).

Lanjutan Tabel 5.2 Hasil Perhitungan Respon Spektrum Gempa MCE_R

T (detik)	S_a (g)
4	0,297
4,5	0,264
5	0,237
6	0,198
7	0,169
8	0,148
9	0,132
10	0,119
11	0,108
12	0,099
13	0,091
14	0,085
15	0,079
16	0,074
17	0,070
18	0,066
19	0,062
20	0,451

Gambar 5.12 Grafik Respon Spektrum Gempa MCE_R

Berikut ini adalah grafik perbandingan respon spektrum gempa *MCER* dengan gempa *DBE* yang dapat dilihat pada Gambar 5.13.



Gambar 5.13 Grafik Perbandingan Respon Spektrum Gempa *MCER* dan *DBE*

4. Perhitungan Periode Pendekatan Fundamental

$$\begin{aligned} \text{a. } T_a &= C_t h_n^x \\ &= 0,0466 \times 17^{0,9} \\ &= 0,597 \text{ detik} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{b. } T_{max} &= C_u \times T_a \\ &= 1,4 \times 0,597 \\ &= 0,835 \text{ detik} \end{aligned}$$

c. Menentukan Periode Getar Alami Struktur

Periode getar alami struktur adalah suatu waktu yang dibutuhkan struktur bangunan untuk menempuh satu putaran lengkap dari suatu getaran yang mengalami perpindahan posisi keseimbangan statis dan kembali ke posisi awal. Hal ini merupakan komposisi penting dalam perencanaan bangunan tahan gempa, untuk mendapatkan nilai periode pada SAP2000 v22, perlu dilakukan *running* pada MODAL sehingga hasil periode dan pola goyongannya dapat diketahui. Hasil periode dan

pola goyangan yang didapat pada penelitian ini dapat dilihat pada Tabel 5.3.

Tabel 5.3 Periode Getar Alami Struktur

Mode	Periode (detik)	Pola Goyangan
1	0,912895	Translasi arah x
2	0,830522	Rotasi
3	0,777985	Translasi arah y

Dari Tabel 5.3 didapatkan nilai T_c atau T_{SAP} sebesar 0,912895 detik.

- d. Menentukan Periode Struktur Pakai

Dari hasil output SAP2000 v22 atau pada Tabel 5.3, didapat nilai $T_c = 0,912895$ detik, maka T yang digunakan adalah 0,835 detik.

5. Perhitungan Koefisien Respon Seismik

- Tingkat Daktilitas Struktur, $R = 7$
- Faktor Keutamaan Struktur, $I_e = 1,0$ (fungsi bangunan untuk kantor)
- $T_L = 20$ detik (berdasarkan ketentuan pada Gambar 3.8 halaman 31)
- Nilai C_s

$$\begin{aligned}
 C_{s \text{ hitung}} &= \frac{S_{DS}}{\left(\frac{R}{I_e}\right)} \\
 &= \frac{1,124}{\left(\frac{7}{1}\right)} \\
 &= 0,161
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 C_{s \text{ max}} &= \frac{S_{D1}}{T\left(\frac{R}{I_e}\right)} \\
 &= \frac{1,860}{0,835\left(\frac{7}{1}\right)} \\
 &= 0,203
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 C_{s \text{ min}} &= 0,044 S_{DS} I_e \geq 0,001 \\
 &= 0,044 \times 1,128 \times 1 \geq 0,001 \\
 &= 0,050 \geq 0,001
 \end{aligned}$$

Maka nilai C_s yang digunakan adalah $C_{s \text{ hitung}} = 0,161$.

6. Gaya Geser Dasar Seismik

Gaya geser dasar seismik berdasarkan SNI 1726-2019 dapat ditentukan dengan persamaan berikut.

$$V = C_s \times W$$

$$= 0,161 \times 41107,510$$

$$= 6627,053 \text{ kN}$$

7. Distribusi Beban Gempa Statik Ekuivalen

Gaya seismik lateral (F_x) yang terjadi pada setiap tingkat dapat ditentukan dengan persamaan berikut.

$$F_x = C_{vx} \cdot V$$

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

Nilai k untuk $T = 0,835$ detik, dicari dengan interpolasi sebagai berikut.

$$k = \frac{(2-1) \times (0,835-0,5)}{(2,5-0,5)+1}$$

$$= 0,112$$

Untuk hasil distribusi gaya seismik lateral berdasarkan beban gempa SNI 1726-2019 setiap lantai dapat dilihat pada Tabel 5.4 berikut.

Tabel 5.4 Perhitungan Nilai Gaya Gempa Horizontal

Lantai	h (m)	w_i (kN)	$w_i \times h^k$	C_{vx} dan C_{vy}	F_x dan F_y (kN)
Lantai 4	17	629,756	864,480	0,017	115,417
Lantai 3	12	1221,717	1627,520	0,033	217,291
Lantai 2	8	1830,937	2340,842	0,047	312,527
Lantai 1	4	37425,100	44804,161	0,903	5981,819
Total		41107,510	49637,003	1,000	6627,053

5.4 Analisis Beban Gempa

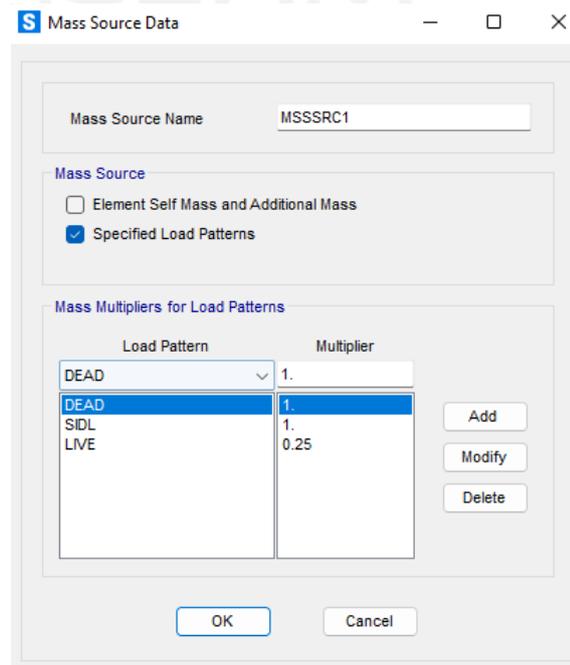
Sebelum dilakukannya tahapan analisis *pushover* yang harus dilakukan terlebih dahulu adalah mengecek syarat beban gempa yang telah dianalisis sebelumnya. Berdasarkan SNI-1726-2019, ada syarat atau ketentuan yang harus dipenuhi untuk gaya geser dasar (*base shear reaction*). Berikut tahapan dalam menganalisis beban gempa yang dilakukan secara otomatis pada *software* SAP2000 v22.

5.4.1 Pendefinisian *Mass Source*

Pendefinisian massa struktur sangat penting dilakukan dalam analisis dinamik respon spektrum karena secara garis besar beban berasal dari percepatan dikali dengan massa struktur. Jika pendefinisian tidak tepat dilakukan maka gaya atau beban gempa yang dihasilkan akan terlalu besar atau terlalu kecil. Penentuan

massa struktur dalam analisis mempengaruhi waktu getar struktur (T_c), sehingga dapat mempengaruhi besar kecilnya gaya gempa baik statik maupun dinamik.

Tahapan melakukan pendefinisian struktur dapat dilakukan dengan cara klik *Define – Mass Source – Add New Mass Source* – pada kotak *Mass Source* centang *Specified Load Patterns* – pada kotak *Mass Multipliers for Load Patterns* input *Load Pattern Dead = 1, SIDL = 1, dan Live = 0,25*. Untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada Gambar 5.14 berikut.

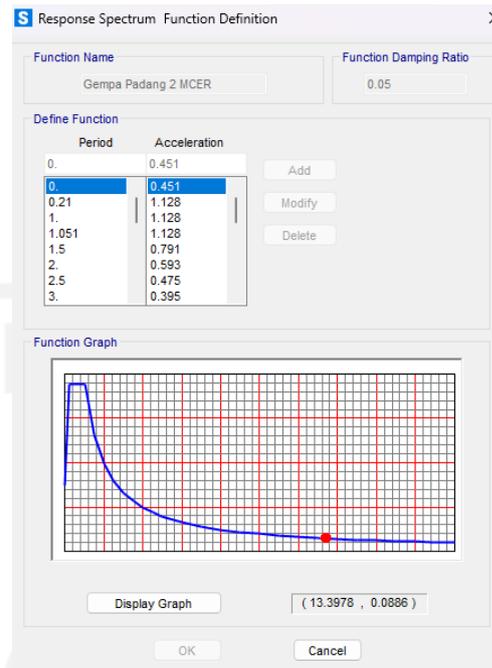


Gambar 5.14 Mass Source

(Sumber: SAP 2000 v22)

5.4.2 Penginputan Data Respon Spektrum Gempa MCE_R dan Gempa DBE

Tahapan input data respon spektrum pada SAP2000 v22 dapat dilakukan dengan cara klik *Define – Function – Respons Spectrum* – pada kotak *Choose Function Type to Add* pilih ASCE7-16 – klik *Convert to User Defined* – input *Function Name* menjadi Gempa Padang – input data respon spektrum (*Period* dan *Acceleration*) sesuai data yang telah dihitung – OK. Untuk lebih jelas bisa dilihat pada Gambar 5.14 berikut.



Gambar 5.15 Menginput Parameter Respon Spektrum
(Sumber: SAP 2000 v22)

5.4.3 Analisis Beban Gempa Statik

Dalam analisis beban gempa statik ekuivalen hasil analisis berupa gaya geser dasar (*base shear*) dilakukan otomatis melalui SAP2000 v22 dengan tahapan *display – show table – base reaction* – pilih *output case* Ex Static dan Ey Static. *Output base reaction* (V_{statik}) dapat dilihat pada Gambar 5.16 berikut.

	OutputCase	CaseType Text	GlobalFX KN	GlobalFY KN	GlobalFZ KN	GlobalMX KN-m	GlobalMY KN-m	GlobalMZ KN-m	GlobalX m	GlobalY m	GlobalZ m	XCd
	Ex Static	LinStatic	-6627.053	6.164E-08	-5.07E-11	-2.459E-10	-37508.704	6.56E-05	0	0	0	
	Ey Static	LinStatic	1.539E-06	-6627.053	8.235E-10	37508.704	1.564E-05	-0.0002083	0	0	0	-2

Gambar 5.16 Base Reaction Akibat Beban Gempa Statik Ekuivalen
(Sumber: SAP 2000 v22)

Dari hasil analisis diketahui bahwa gaya geser yang diakibatkan beban gempa untuk arah x, $V_{sx} = 6627,053$ kN dan arah y, $V_{sy} = 6627,053$ kN.

5.4.4 Analisis Beban Gempa Dinamik

Dalam analisis beban gempa statik ekuivalen hasil analisis berupa gaya geser dasar (*base shear*) dilakukan otomatis melalui SAP2000 v22 dengan tahapan *display – show table – base reaction* – pilih *output case* Ex Spec dan Ey Spec. *Output base reaction* (V_{dinamik}) dapat dilihat pada Gambar 5.17 berikut.



	OutputCase	CaseType Text	StepType Text	GlobalFX KN	GlobalFY KN	GlobalFZ KN	GlobalMX KN-m	GlobalMY KN-m	GlobalMZ KN-m	GlobalX m	GlobalY m	GlobalZ m
	Ex Spec	LinRespSpec	Max	5331.59	0.037	0.007282	0.2862	64571.3913	74810.5812	0	0	0
	Ey Spec	LinRespSpec	Max	0.037	5307.797	37.926	64544.9028	872.2424	130016.1859	0	0	0

Gambar 5.17 Base Reaction Akibat Beban Gempa Dinamik

(Sumber: SAP 2000 v22)

Dari hasil analisis diketahui bahwa gaya geser yang diakibatkan beban gempa respon spektrum untuk arah x, $V_{dx} = 5331,59$ kN dan arah y, $V_{dy} = 5307,797$ kN.

5.4.5 Gaya Geser Dasar (*Base Shear Reaction*)

Gaya geser dasar merupakan kombinasi respons untuk gaya geser dasar yang didapat dari analisis pada SAP2000. Jika hasil gaya geser dasar dinamik kurang dari 100% gaya geser statik pada struktur maka perlu skala baru untuk memenuhi syarat yang mengacu kepada SNI 1726-2019. Perhitungan gaya geser dasar adalah sebagai berikut.

Untuk arah x :

$$V_{sx} (\text{trial 1}) = 6627,053 \text{ kN}$$

$$\begin{aligned} 100\% V_{sx} &= 100\% \times 6627,053 \\ &= 6627,053 \text{ kN} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Syarat : } V_{dx} &= 100\% V_{sx} \\ 5331,59 &\neq 6627,053 \text{ (Tidak OK)} \end{aligned}$$

Sehingga, diperlukan skala baru.

$$\begin{aligned} \text{Skala baru} &= 100\% V_{sx} / V_{dx} \\ &= 6627,053 / 5331,59 \\ &= 1,2429788 \end{aligned}$$

Kemudian dilakukan *trial* ke-2 dengan menggunakan skala baru untuk memenuhi syarat yang ditentukan.

$$V_{sx} (\text{trial 1}) = 6627,053 \text{ kN}$$

$$\begin{aligned} 100\% V_{sx} &= 100\% \times 6627,053 \\ &= 6627,053 \text{ kN} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Syarat : } V_{dx} &= 100\% V_{sx} \\ 6627,053 &= 6627,053 \text{ (OK)} \end{aligned}$$

Untuk arah y dilakukan hal yang sama. Dari hasil diatas maka syarat gaya geser dasar struktur memenuhi syarat. Gaya geser yang dihasilkan untuk tiap model dapat dilihat pada Tabel 5.5 sebagai berikut.

Tabel 5.5 Gaya Geser Dasar (*Base Shear*)

Perhitungan		Gaya Geser Dasar	
		Arah X	Arah Y
Trial 1	100% V statik	6627,053	6627,053
	V dinamik	5331,59	5307,797
	Keterangan	Tidak Ok	Tidak Ok
Trial 2	100% V statik	6627,053	6627,053
	V dinamik	6627,053	6627,053
	Keterangan	Ok	Ok

5.5 Analisis Pushover

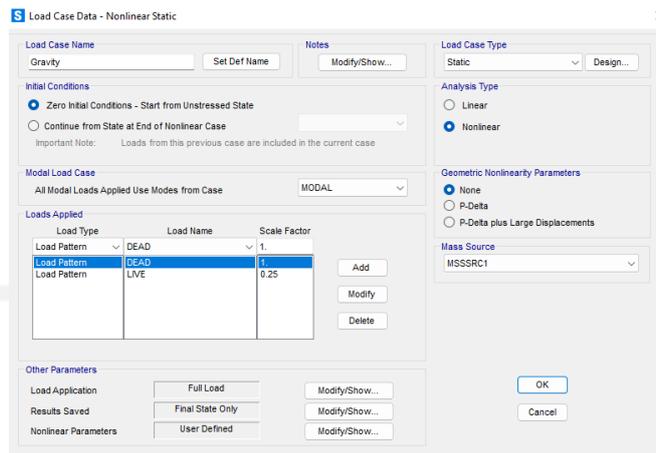
5.5.1 Pendefinisian *Load Case Pushover Analysis*

Load case pada analisis *pushover* dilakukan melalui dua tahapan. Tahapan pertama analisis struktur bangunan diberi beban mati dan beban hidup tetapi belum mempertimbangkan kondisi non linear. Tahapan kedua dilanjutkan dengan memberikan pola beban lateral secara bertahap.

1. Pendefinisian beban gravitasi *pushover (Gravity)*

Pendefinisian beban gravitasi pada SAP2000 v22 dilakukan dengan tahapan klik *Define – Load Case – Add New Load Case*. Kemudian dilanjut dengan pengisian data *Load Case* dan modifikasi nilai untuk *Gravity* yang dapat dilihat pada tahapan berikut.

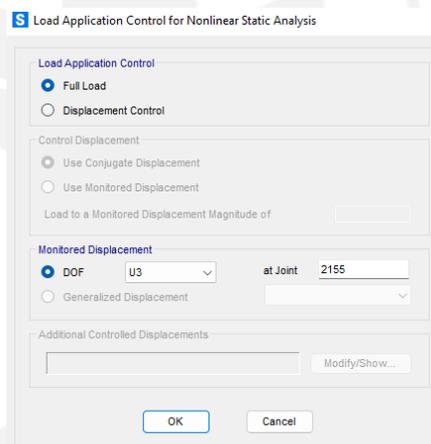
- a. *Load Case Name* = *Gravity*
- b. *Load Case Type* = *Static*
- c. *Analysis Type* = *Nonlinear*
- d. *Initial Conditions* = *Zero Initial Conditions – Start from Unstressed State*
- e. *Loads Applied* = *Load Pattern – Dead – 1 dan Live – 0,25*



Gambar 5.18 Load Case Gravity

(Sumber: SAP 2000 v22)

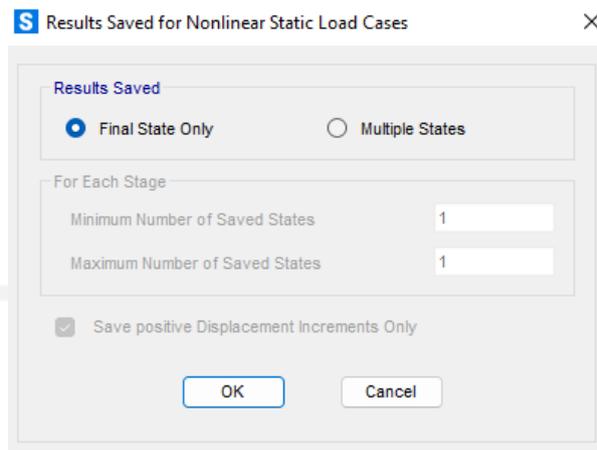
- f. *Load Application* = klik *Modify/Show* pada *Load Application Control* – klik *Full Load* – pilih DOF U3 at joint 2155 pada *Monitored Displacement* – OK



Gambar 5.19 Load Application Gravity

(Sumber: SAP 2000 v22)

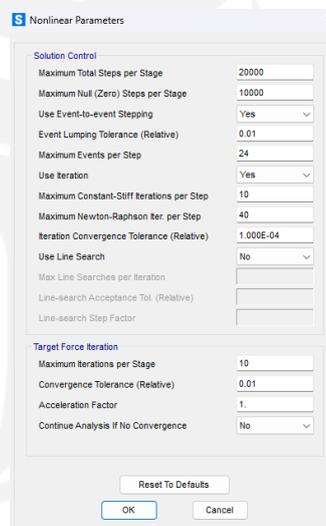
- g. *Results Saved* = klik *Modify/Show* – pilih *Final State Only* pada *Results Saved* – OK



Gambar 5.20 Results Saved Gravity

(Sumber: SAP 2000 v22)

- h. *Nonlinear Parameters* = klik *Modify/Show* – isi *Solution Control* sesuai kebutuhan penelitian

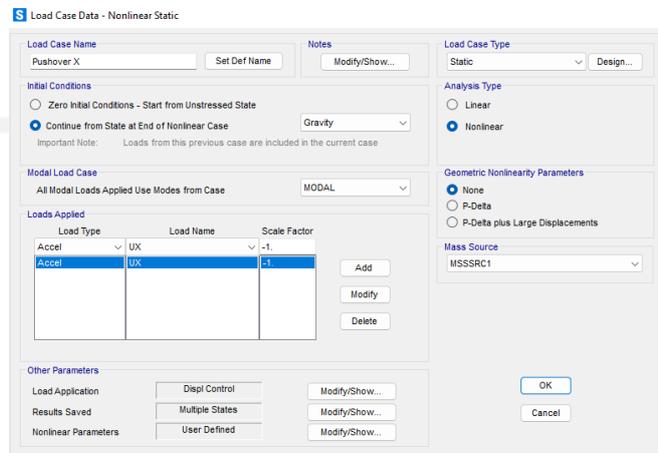


Gambar 5.21 Nonlinear Parameters Gravity

(Sumber: SAP 2000 v22)

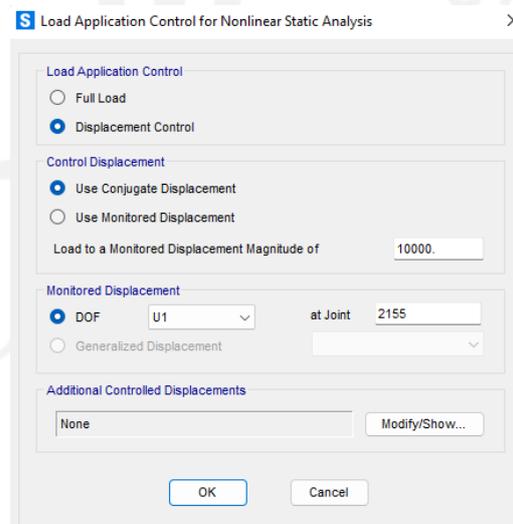
2. Pendefinisian beban lateral *pushover* (*Pushover X* dan *Pushover Y*)
 Pendefinisian beban gravitasi pada SAP2000 v22 dilakukan dengan tahapan klik *Define* – *Load Case* – *Add New Load Case*. Kemudian dilanjutkan dengan pengisian data *Load Case* dan modifikasi nilai untuk *Pushover X* yang dapat dilihat pada tahapan berikut.
 - a. *Load Case Name* = *Pushover X*
 - b. *Load Case Type* = *Static*
 - c. *Analysis Type* = *Nonlinear*

- d. *Initial Conditions* = *Continue from State at End of Nonlinear Case – Gravity*
- e. *Loads Applied* = *Load Pattern – UX – (-1)*



Gambar 5.22 Load Case Pushover X
(Sumber: SAP 2000 v22)

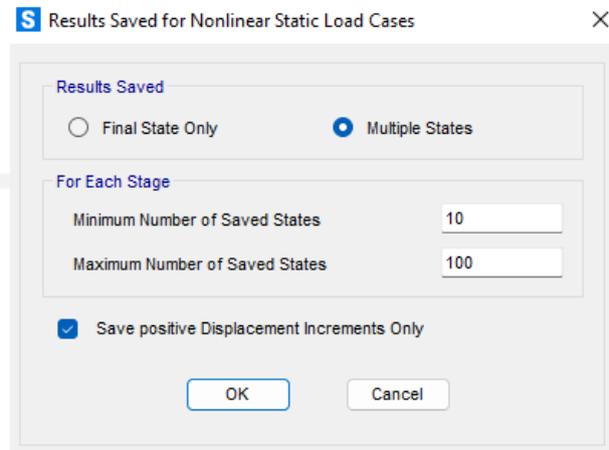
- f. *Load Application* = klik *Modify/Show* – pilih *Displacement Control* pada *Load Application Control* – pilih *Used Monitored Displacement* dengan *Monitored Displacement* sebesar 10000 mm pada *Control Displacement* – Pilih DOF U1 at joint 2155 pada *Monitored Displacement*



Gambar 5.23 Load Application Pushover X
(Sumber: SAP 2000 v22)

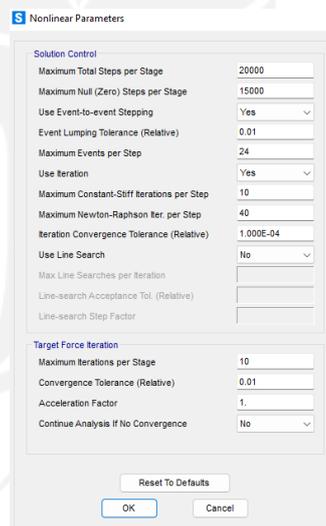
- g. *Results Saved* = klik *Modify/Show* – pilih *Multiple States* pada *Results Saved* – isi 10 untuk *Minimum Number of Saved Stages* dan

isi 100 untuk *Maximum Number of Saved States* pada kolom *For Each Stage*



Gambar 5.24 Results Saved Pushover X
(Sumber: SAP 2000 v22)

- h. *Nonlinear Parameters* = klik *Modify/Show* – isi *Solution Control* sesuai kebutuhan penelitian

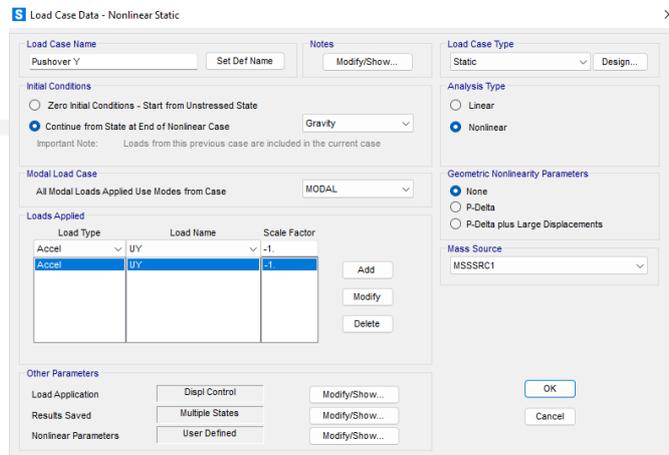


Gambar 5.25 Nonlinear Parameters Pushover
(Sumber: SAP 2000 v22)

Selanjutnya pengisian data *Load Case* dan modifikasi nilai untuk *Pushover Y* yang dapat dilihat pada tahapan berikut.

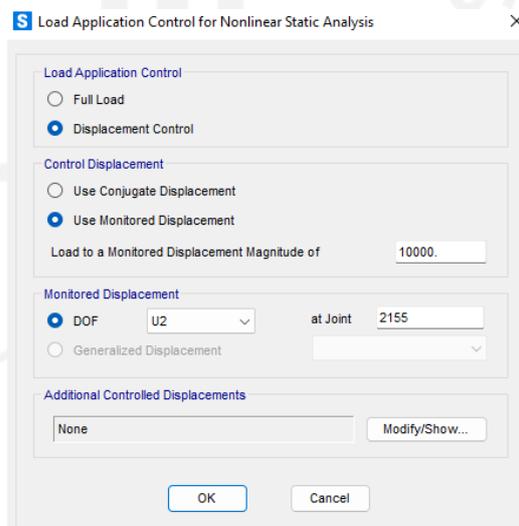
- a. *Load Case Name* = *Pushover Y*
- b. *Load Case Type* = *Static*
- c. *Analysis Type* = *Nonlinear*

- d. *Initial Conditions* = *Continue from State at End of Nonlinear Case – Gravity*
- e. *Loads Applied* = *Load Pattern – UY – (-1)*



Gambar 5.26 Load Case Pushover Y
(Sumber: SAP 2000 v22)

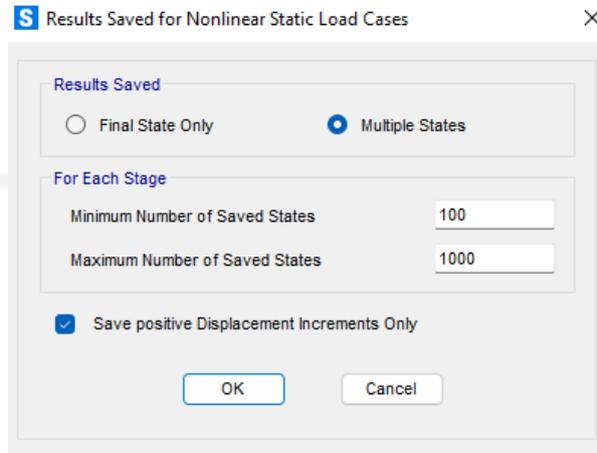
- f. *Load Application* = klik *Modify/Show* – pilih *Displacement Control* pada *Load Application Control* – pilih *Used Monitored Displacement* dengan *Monitored Displacement* sebesar 10000 mm pada *Control Displacement* – Pilih *DOF U2 at joint 2155* pada *Monitored Displacement*



Gambar 5.27 Load Application Pushover Y
(Sumber: SAP 2000 v22)

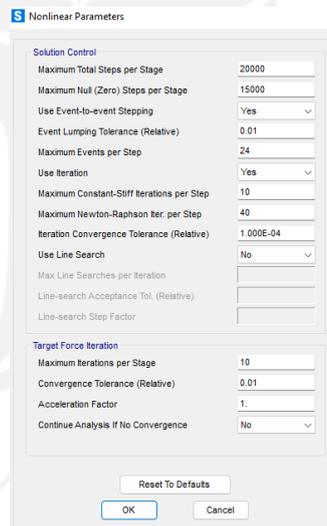
- g. *Results Saved* = klik *Modify/Show* – pilih *Multiple States* pada *Results Saved* – isi 100 untuk *Minimum Number of Saved Stages*

dan isi 1000 untuk *Maximum Number of Saved States* pada kolom *For Each Stage*



Gambar 5.28 Results Saved Pushover Y
(Sumber: SAP 2000 v22)

- h. *Nonlinear Parameters* = klik *Modify/Show* – isi *Solution Control* sesuai kebutuhan penelitian



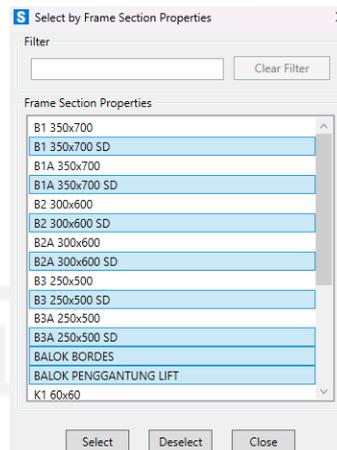
Gambar 5.29 Nonlinear Parameters Pushover Y
(Sumber: SAP 2000 v22)

5.5.2 Pendefinisian Sendi Plastis (*Hinges*)

1. Pendefinisian sendi plastis pada balok

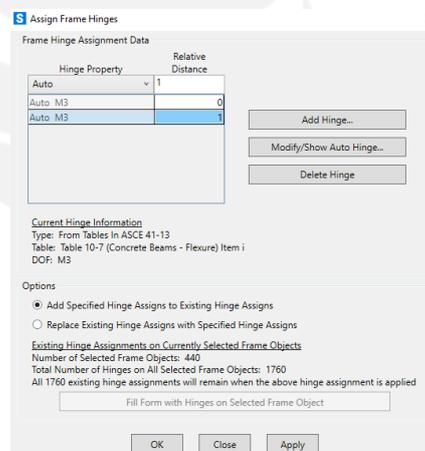
Berikut tahapan dalam melakukan pendefinisian sendi plastis balok pada SAP2000 v22.

- a. Klik *Select – Select – Properties – Frame Sections* – pilih semua balok yang telah dimodelkan sebelumnya.



Gambar 5.30 Select Frame Balok
(Sumber: SAP 2000 v22)

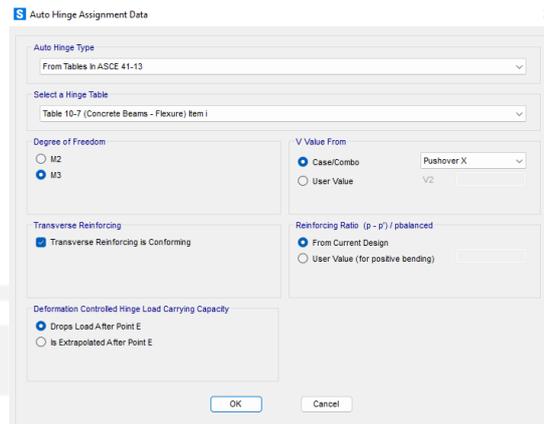
- b. Klik *Assign – Frame – Hinges* – isi *Frame Hinge Assignment Data* sesuai gambar berikut.



Gambar 5.31 Input Frame Hinges
(Sumber: SAP 2000 v22)

Penginputan dua sendi plastis dengan *Relative Distance* 0 dan 1 pada *Frame Hinge Data* menunjukkan bahwa sendi plastis pada balok di letakkan di ujung balok.

- c. Pada kolom *Auto Hinge Type* pilih *From Table in ASCE 41-13* – pada kolom *Select a Hinge* pilih *Table 10-7 (Concrete Beams – Flexure) item I* – pada kolom *Degree of Freedom* pilih *M3* – klik *Case/Combo* pada *Value From* pilih *Pushover X* untuk sumbu x dan *Pushover Y* untuk sumbu y seperti pada Gambar 5.31 berikut.

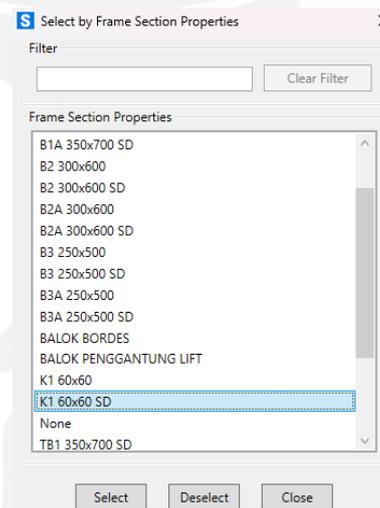


Gambar 5.32 Setting Hinge Balok
(Sumber: SAP 2000 v22)

2. Pendefinisian sendi plastis pada kolom

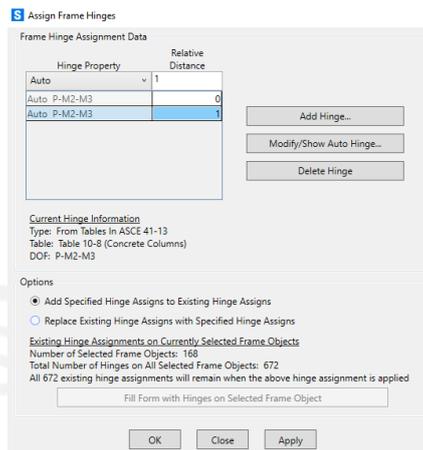
Berikut tahapan dalam melakukan pendefinisian sendi plastis kolom pada SAP2000 v22.

- a. Klik *Select – Select – Properties – Frame Sections* – pilih semua kolom yang telah dimodelkan sebelumnya.



Gambar 5.33 Select Frame Kolom
(Sumber: SAP 2000 v22)

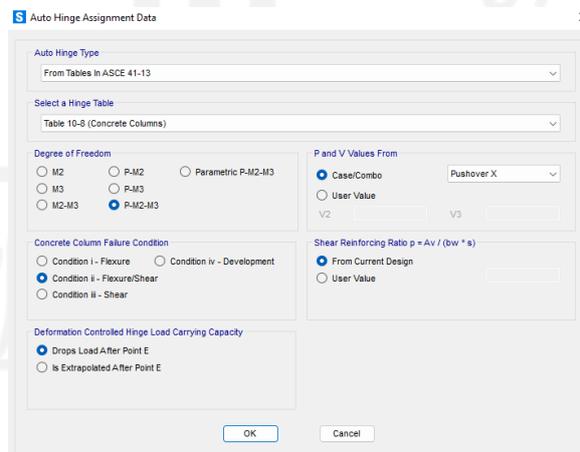
- b. Klik *Assign – Frame – Hinges* – isi *Frame Hinge Assignment Data* sesuai gambar berikut.



Gambar 5.34 Input Frame Hinges
(Sumber: SAP 2000 v22)

Penginputan dua sendi plastis dengan *Relative Distance* 0 dan 1 pada *Frame Hinge Data* menunjukkan bahwa sendi plastis pada kolom di letakkan di ujung kolom.

- c. Pada kolom *Auto Hinge Type* pilih *From Table in ASCE 41-13* – pada kolom *Select a Hinge Table* pilih *Table 10-8 (Concrete Columns)*– pada kolom *Degree of Freedom* pilih P-M2-M3 – klik *Case/Combo*, pada kolom *P and V Value From Pushover X* untuk arah x dan *Pushover Y* untuk arah y seperti pada Gambar 5.34 berikut.

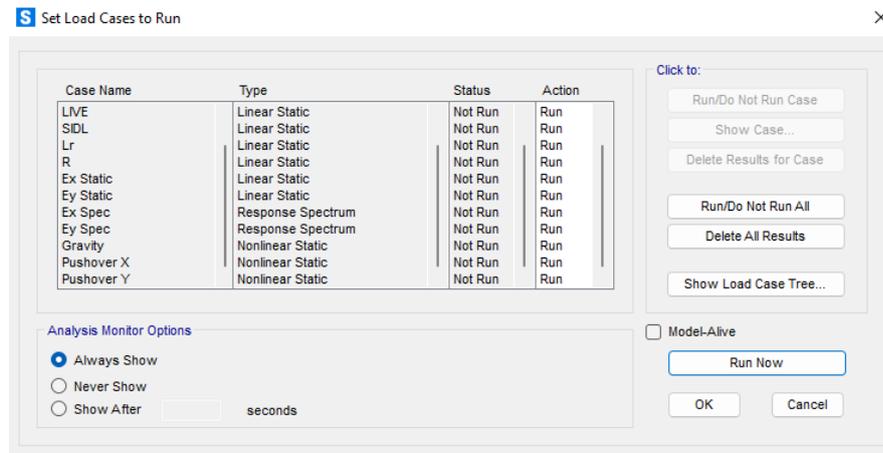


Gambar 5.35 Setting Hinge Kolom
(Sumber: SAP 2000 v22)

5.5.3 Running Pushover Analysis

Setelah memasukkan *Load Pattern*, *Load Case* untuk analisis *pushover* dan mendefinisikan *hinge* pada kolom dan balok. Selanjutnya dilakukan *running*

pushover analysis dengan tahapan klik *Analyze – Run Analyze – Run Now*. Proses *running* pada pemodelan ini memakan waktu yang cukup lama.



Gambar 5.36 Set Load Cases to Run

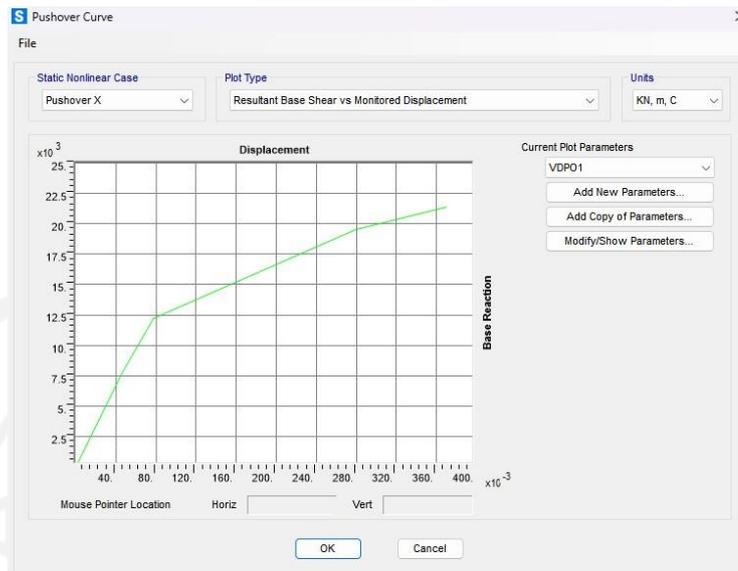
(Sumber: SAP 2000 v22)

5.6 Hasil Analisis *Pushover*

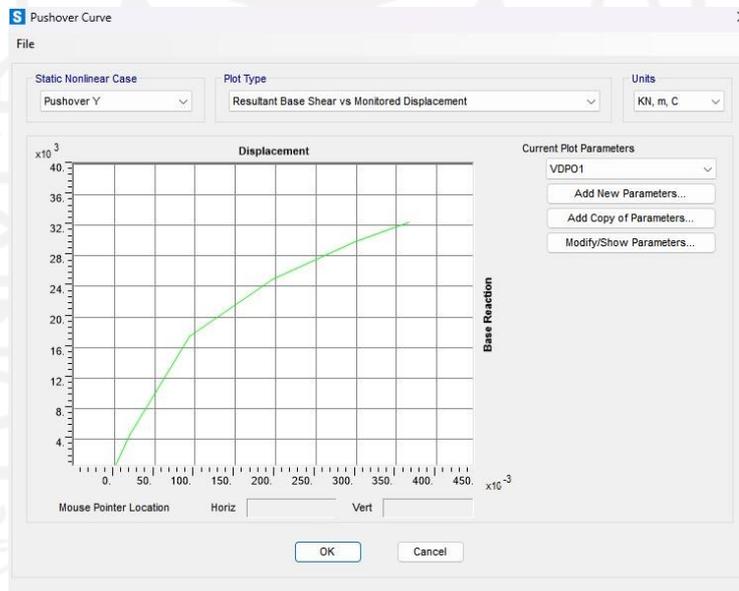
Analisis *pushover* yang telah selesai di *running* akan menghasilkan *output* berupa kurva kapasitas dan *performance point*, selain itu hasil akhir dari analisis *pushover* ini akan menunjukkan skema sendi plastis yang terjadi pada pemodelan ini. Nilai pada *performance point* nantinya digunakan untuk menentukan dan mengetahui tingkat kinerja struktur berdasarkan ATC-40.

5.6.1 Kurva Kapasitas

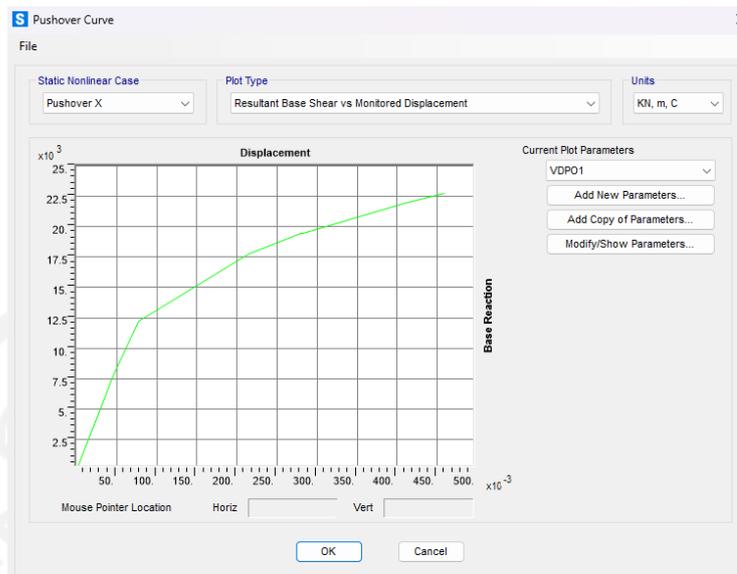
Kurva kapasitas menunjukkan hubungan antara gaya geser dasar (*base force*) dengan perpindahan lateral (*displacement*) pada semua lantai. Kurva ini menunjukkan bahwa besar kekuatan struktur tergantung pada kemampuan momen deformasi dari setiap komponen struktur. Berikut bentuk kurva kapasitas pada *pushover* arah x dan arah y untuk beban gempa MCE_R dan DBE dari hasil analisis pada pemodelan ini yang dapat dilihat pada Gambar 5.37, Gambar 5.38, Gambar 5.39, dan Gambar 5.40.



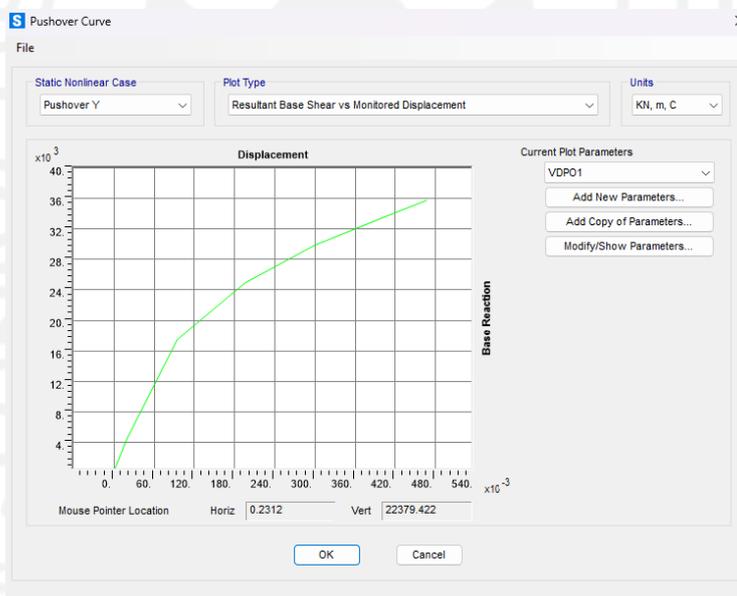
Gambar 5.37 Kurva Kapasitas *Pushover X* dengan Gempa MCE_R
(Sumber: SAP 2000 v22)



Gambar 5.38 Kurva Kapasitas *Pushover Y* dengan Gempa MCE_R
(Sumber: SAP 2000 v22)



Gambar 5.39 Kurva Kapasitas *Pushover* X dengan Gempa DBE
(Sumber: SAP 2000 v22)



Gambar 5.40 Kurva Kapasitas *Pushover* Y dengan Gempa DBE
(Sumber: SAP 2000 v22)

Berikut data *output* dari keempat kurva diatas yang dapat dilihat pada Tabel 5.6, Tabel 5.7, Tabel 5.8, dan Tabel 5.9.

Tabel 5.6 Output Kurva Kapasitas *Pushover* X dengan Gempa MCE_R

<i>Step</i>	<i>Displacement (m)</i>	<i>Base Force (kN)</i>
0	$5,393 \times 10^{-16}$	0
1	0,045741	7679,841

(Sumber: SAP 2000 v22)

Lanjutan Tabel 5.6 *Output Kurva Kapasitas Pushover X dengan Gempa MCE_R*

<i>Step</i>	<i>Displacement (m)</i>	<i>Base Force (kN)</i>
2	0,077756	12224,341
3	0,279679	19567,519
4	0,283633	19619,359
5	0,369742	21392,101

(Sumber: SAP 2000 v22)

Tabel 5.7 *Output Kurva Kapasitas Pushover Y dengan Gempa MCE_R*

<i>Step</i>	<i>Displacement (m)</i>	<i>Base Force (kN)</i>
0	-0,000888	0
1	0,018974	4501,532
2	0,093964	17440,355
3	0,196487	24955,295
4	0,29818	29884,549
5	0,365115	32408,387

(Sumber: SAP 2000 v22)

Tabel 5.8 *Output Kurva Kapasitas Pushover X dengan Gempa DBE*

<i>Step</i>	<i>Displacement (m)</i>	<i>Base Force (kN)</i>
0	$5,393 \times 10^{-16}$	0
1	0,045741	7679,841
2	0,077732	12218,882
3	0,214625	17774,48
4	0,279091	19432,223
5	0,281596	19448,201
6	0,408947	21938,236
7	0,409321	21942,112
8	0,458478	22747,568

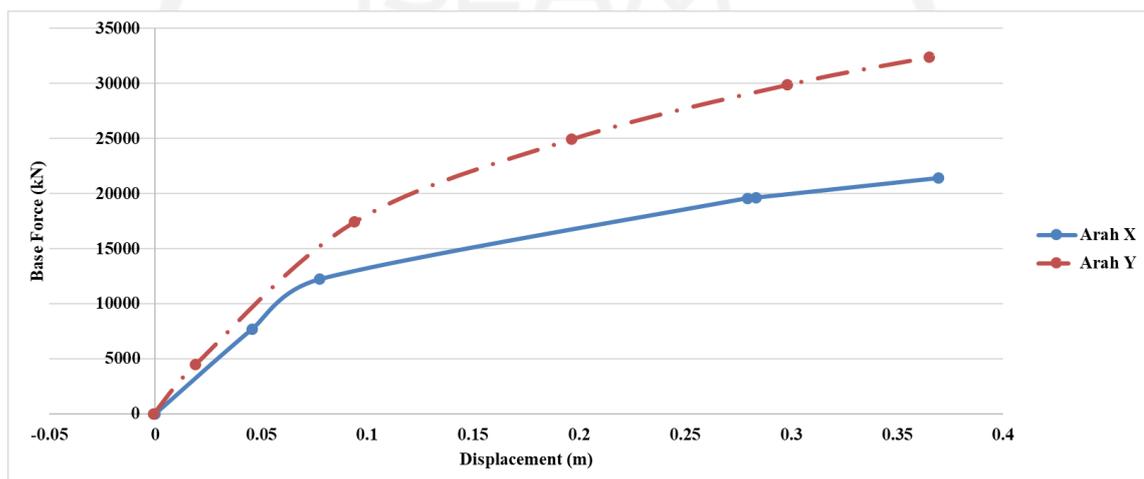
(Sumber: SAP 2000 v22)

Tabel 5.9 *Output Kurva Kapasitas Pushover Y dengan Gempa DBE*

<i>Step</i>	<i>Displacement (m)</i>	<i>Base Force (kN)</i>
0	-0,000888	0
1	0,018974	4501,532
2	0,093966	17431,836
3	0,196609	24911,17
4	0,298395	29802,638
5	0,402982	33600,588
6	0,467142	35703,573

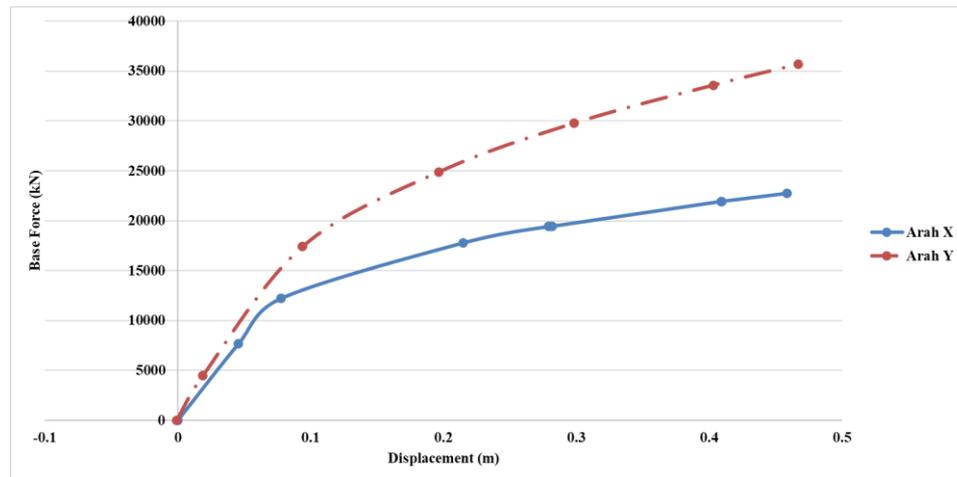
(Sumber: SAP 2000 v22)

Dari Tabel 5.6 dan Tabel 5.7 dapat dilihat analisis *pushover* arah X dengan gempa MCE_R berhenti pada *step* 5 yaitu pada saat *displacement* sebesar 0,369742 m dan *base force* sebesar 21392,101 kN. Sedangkan pada analisis *pushover* arah Y dengan gempa MCE_R berhenti pada *step* 5 yaitu pada saat *displacement* sebesar 0,365115 m dan *base force* sebesar 32408,387 kN. Berikut ini merupakan perbandingan kurva kapasitas *pushover* pada arah x dan y dengan gempa MCE_R yang dapat dilihat pada Gambar 5.41.



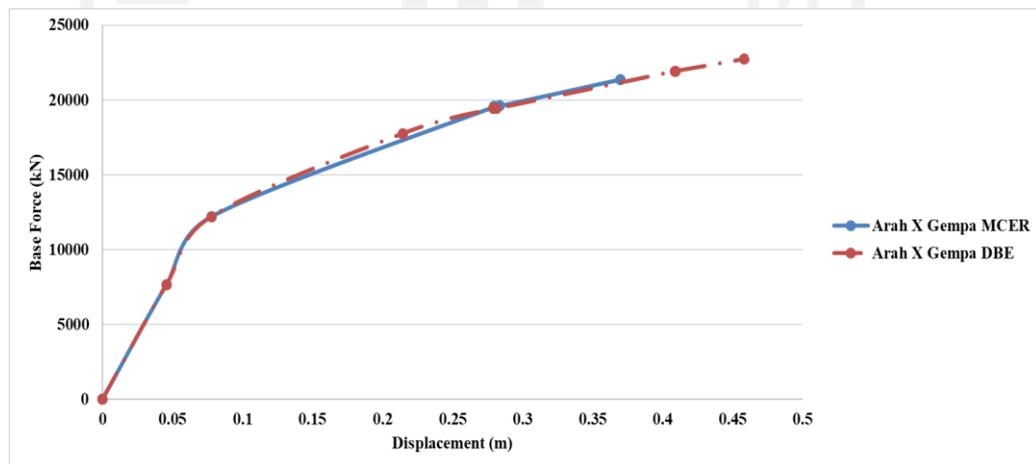
Gambar 5.41 Perbandingan Kurva Kapasitas Pushover pada Arah X dan Y dengan Gempa MCE_R

Dari Tabel 5.8 dan Tabel 5.9 dapat dilihat analisis *pushover* arah X dengan gempa DBE berhenti pada *step* 8 yaitu pada saat *displacement* sebesar 0,458478 m dan *base force* sebesar 22747,568 kN. Sedangkan pada analisis *pushover* arah Y dengan gempa DBE berhenti pada *step* 6 yaitu pada saat *displacement* sebesar 0,467142 m dan *base force* sebesar 35703,573 kN. Berikut ini merupakan perbandingan kurva kapasitas *pushover* pada arah x dan y dengan gempa DBE yang dapat dilihat pada Gambar 5.42.

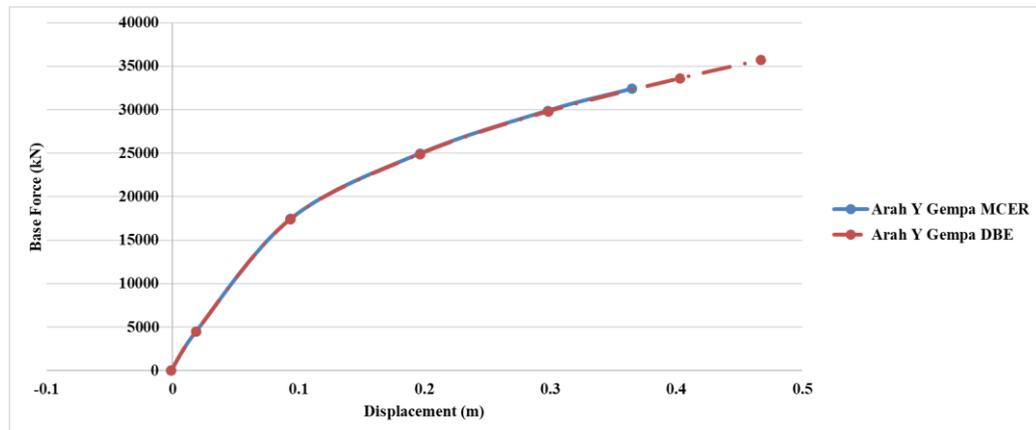


Gambar 5.42 Perbandingan Kurva Kapasitas *Pushover* pada Arah X dan Y dengan Gempa *DBE*

Dari Gambar 5.41 dan Gambar 5.42 dapat dilihat bahwa kurva kapasitas arah y memiliki bentuk yang lebih kaku jika dibandingkan dengan kurva kapasitas arah x, karena nilai *displacement* pada arah y lebih kecil daripada nilai *displacement* pada arah x dan adanya *shearwall* yang berada pada arah y juga memengaruhi hal tersebut. Berikut ini merupakan perbandingan kurva kapasitas *pushover* pada arah x dan y dengan menggunakan beban gempa MCE_R dan gempa *DBE*.



Gambar 5.43 Perbandingan Kurva Kapasitas *Pushover* Beban Gempa Level MCE_R dan Gempa Level *DBE* pada Arah X

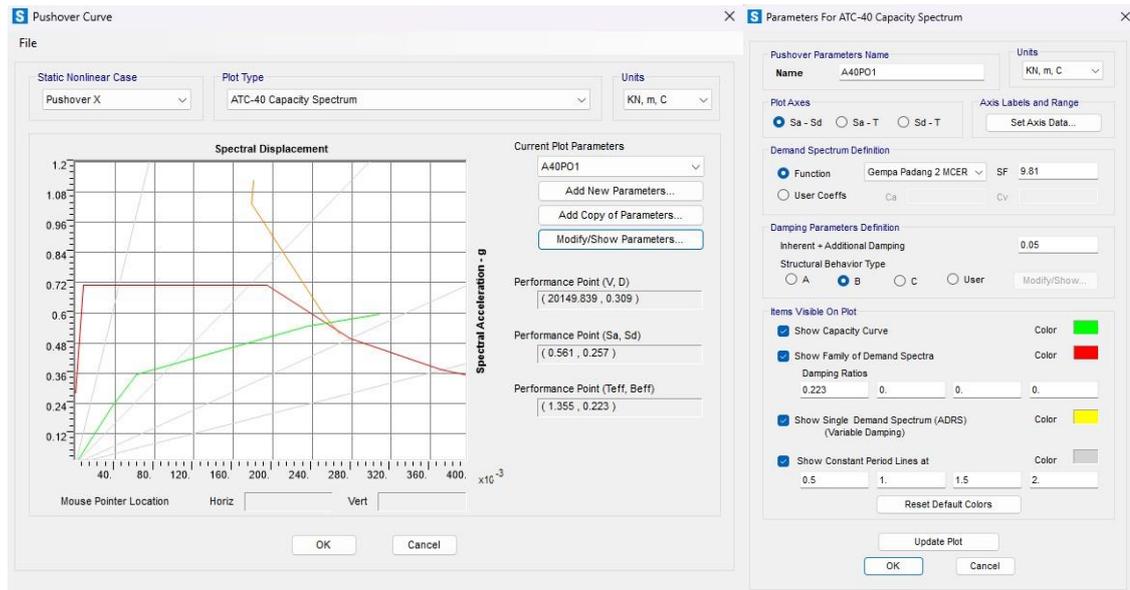


Gambar 5.44 Perbandingan Kurva Kapasitas *Pushover* Beban Gempa Level MCE_R dan Gempa Level DBE pada Arah Y

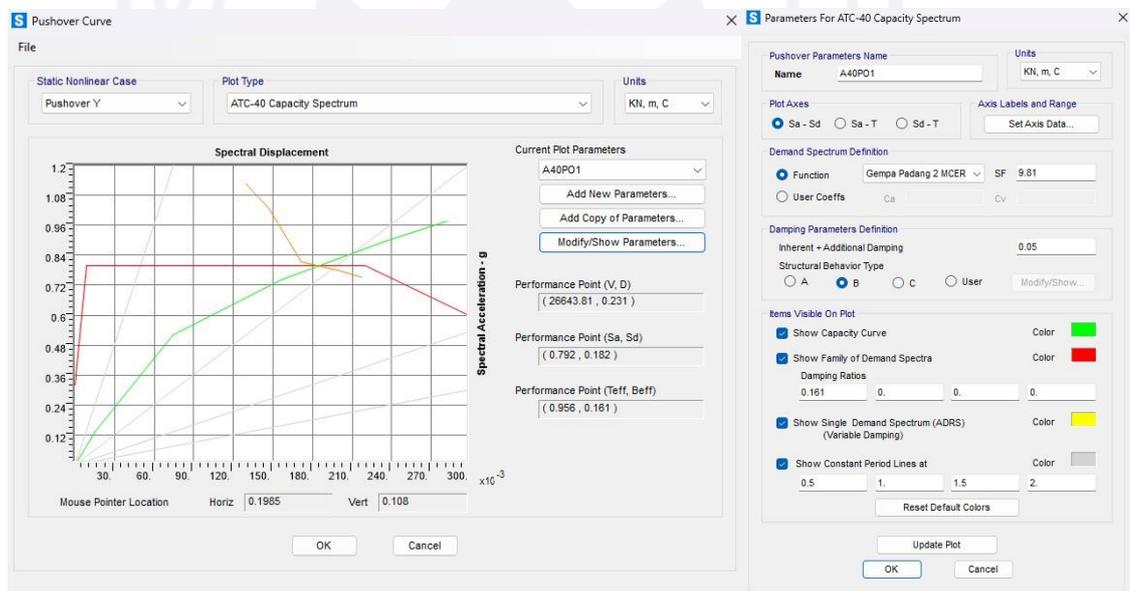
Dari Gambar 5.43 dan Gambar 5.43 dapat dilihat bahwa kurva kapasitas baik pada arah x dan y untuk beban gempa level DBE memiliki nilai *displacement* dan *base force* yang lebih besar dibandingkan dengan kurva kapasitas pada arah x dan y untuk beban gempa level MCE_R . Hal ini dikarenakan pada beban gempa level DBE memiliki jumlah *step* yang lebih banyak dibandingkan dengan beban gempa level MCE_R .

5.6.2 *Performance Point* Berdasarkan ATC-40

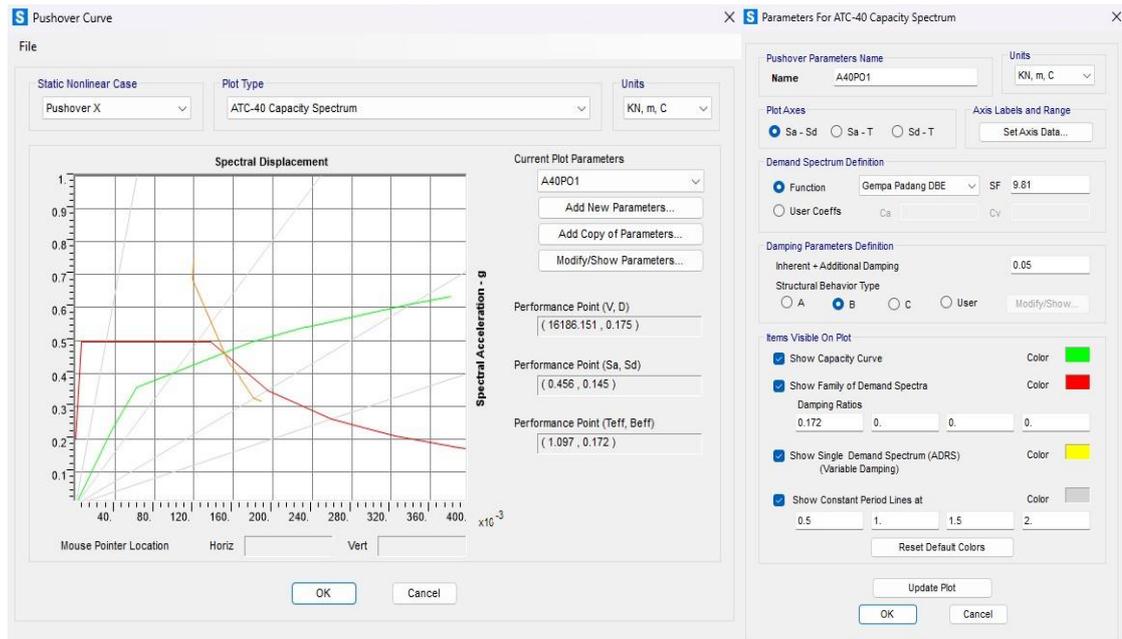
Dalam menentukan *performance point* pada suatu bangunan metode yang digunakan yaitu kurva kapasitas berdasarkan ATC-40. Kurva kapasitas yang dihasilkan setelah analisis *pushover* adalah kurva hubungan antara gaya geser dasar dan perpindahan yang di konversi ke dalam bentuk spektrum kapasitas dengan format *ADRS (Acceleration Displacement Respon Spectrum)* yaitu S_a dan S_d (sebagai *spektrum capacity*). Berikut hasil *capacity spectrum* baik dengan menggunakan gempa MCE_R dan DBE pada arah x dan y berdasarkan ATC-40 yang ditunjukkan pada Gambar 5.45, Gambar 5.46, Gambar 5.47, dan Gambar 5.48.



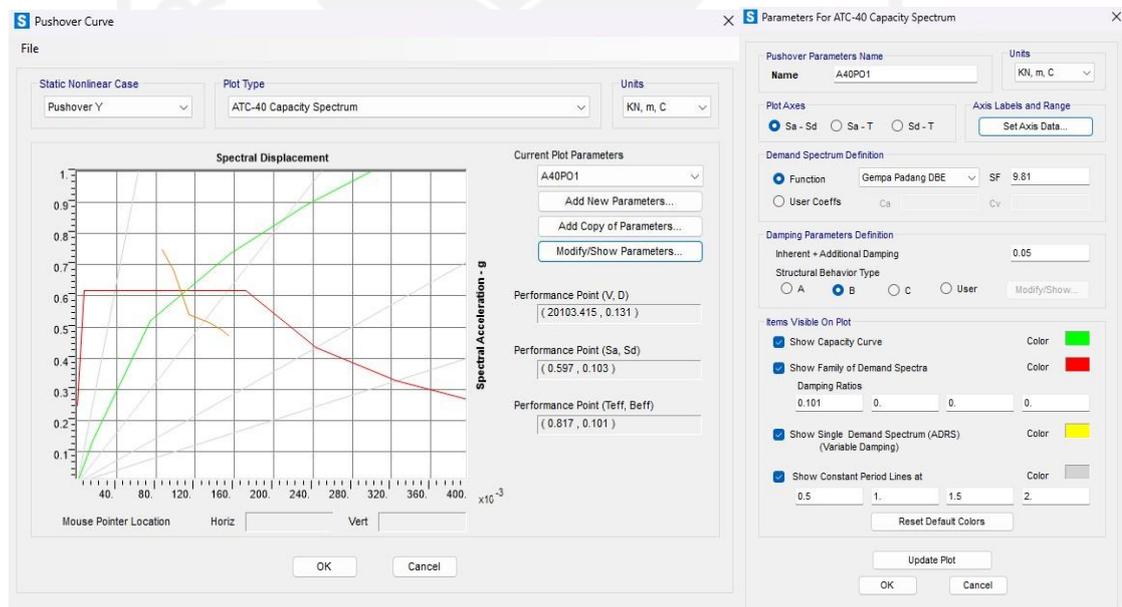
Gambar 5.45 Capacity Spectrum Arah X dengan Gempa MCE_R
(Sumber: SAP 2000 v22)



Gambar 5.46 Capacity Spectrum Arah Y dengan Gempa MCE_R
(Sumber: SAP 2000 v22)



Gambar 5.47 Capacity Spectrum Arah X dengan Gempa DBE
(Sumber: SAP 2000 v22)



Gambar 5.48 Capacity Spectrum Arah Y dengan Gempa DBE
(Sumber: SAP 2000 v22)

Performance point pada Gambar 5.45, Gambar 5.46, Gambar 5.47, dan Gambar 5.48 menunjukkan besarnya kapasitas struktur dalam memenuhi *demand* yang berupa beban gempa sesuai dengan SNI 1726-2019. *Structural Behavior Type* baik untuk gempa MCE_R dan DBE bangunan ini berada dalam kategori B sesuai dengan Tabel 3.19 halaman 51 yaitu *long shaking duration* dan termasuk dalam

essentially new building karena bangunan ini berada pada kondisi tanah lunak, dimana tanah lunak bergetar dengan frekuensi rendah atau periode tinggi atau panjang pada saat terjadinya gempa (Widodo, 2012). Nilai gaya geser dasar, *displacement*, S_a , S_d , waktu getar alami efektif, dan redaman viskous efektif yang terjadi pada saat titik kinerja tercapai untuk gempa MCE_R dan DBE ditunjukkan pada Tabel 5.10 dan Tabel 5.11 berikut.

Tabel 5.10 Performance Point Berdasarkan ATC-40 dengan Gempa MCE_R

Arah Beban <i>Pushover</i>	Base Shear (kN)	Performance Point					
		V (kN)	δ (m)	S_a	S_d	T_{eff}	β_{eff}
Arah X	6627,053	20149,839	0,309	0,561	0,257	1,355	0,223
Arah Y	6627,053	26643,81	0,231	0,792	0,182	0,956	0,161

(Sumber: SAP 2000 v22)

Tabel 5.11 Performance Point Berdasarkan ATC-40 dengan Gempa DBE

Arah Beban <i>Pushover</i>	Base Shear (kN)	Performance Point					
		V (kN)	δ (m)	S_a	S_d	T_{eff}	β_{eff}
Arah X	4400,688	16186,151	0,175	0,456	0,145	1,097	0,172
Arah Y	4400,688	20103,415	0,131	0,597	0,103	0,817	0,101

(Sumber: SAP 2000 v22)

Tabel 5.10 dan Tabel 5.11 menunjukkan bahwa nilai periode efektif arah x untuk kedua beban gempa memiliki nilai yang lebih besar dibandingkan dengan nilai periode efektif arah y untuk kedua beban gempa. Kekakuan berbanding terbalik dengan T_{eff} (periode efektif), oleh karena itu struktur gedung pada arah y memiliki kekakuan yang lebih besar dibandingkan dengan kekakuan pada arah x. Hal ini didukung juga dengan kurva perbandingan kurva kapasitas yang ditunjukkan pada Gambar 5.41 dan Gambar 5.42.

5.6.3 Tingkat Kinerja Struktur

Tingkat kinerja struktur bangunan dapat ditentukan berdasarkan kriteria *drift* yang didapat saat titik kinerja tercapai. Berdasarkan ATC-40 nilai *drift ratio* dapat ditentukan dengan cara berikut.

1. *Pushover* arah x dengan gempa MCE_R

$$\text{Simpangan total maksimum} = \frac{\delta}{H} = \frac{0,309}{17} = 0,01818$$

2. *Pushover* arah y dengan gempa MCE_R
 Simpangan total maksimum = $\frac{\delta}{H} = \frac{0,231}{17} = 0,01359$
3. *Pushover* arah x dengan gempa DBE
 Simpangan total maksimum = $\frac{\delta}{H} = \frac{0,175}{17} = 0,01029$
4. *Pushover* arah y dengan gempa DBE
 Simpangan total maksimum = $\frac{\delta}{H} = \frac{0,131}{17} = 0,00771$

Berdasarkan hasil diatas dapat disimpulkan tingkat kinerja struktur gedung perkantoran dengan menggunakan gempa MCE_R berdasarkan ATC-40 atau pada Tabel 3.18 adalah *Damage Control*, yaitu merupakan transisi antara tingkat kinerja *Immediate Occupancy (IO)* dan *Life Safety (LS)*, dimana bangunan masih mampu menahan gempa yang terjadi dan risiko korban jiwa manusia sangat kecil.

Sedangkan tingkat kinerja struktur gedung perkantoran dengan menggunakan gempa DBE adalah *Immediate Occupancy (IO)* yang merupakan tingkat kinerja terbawah pada ATC-40 dimana bangunan aman saat terjadi gempa, risiko korban jiwa dan kegagalan struktur tidak terlalu berarti, dan segera dapat difungsikan kembali. Tingkat kinerja gedung perkantoran dengan menggunakan beban gempa DBE telah memenuhi persyaratan ASCE-41 yang disesuaikan dengan SNI 1726-2019 bahwa gedung dengan kategori risiko II apabila diberi beban gempa DBE tingkat kinerja gedung yang diharapkan adalah *Immediate Occupancy (IO)*.

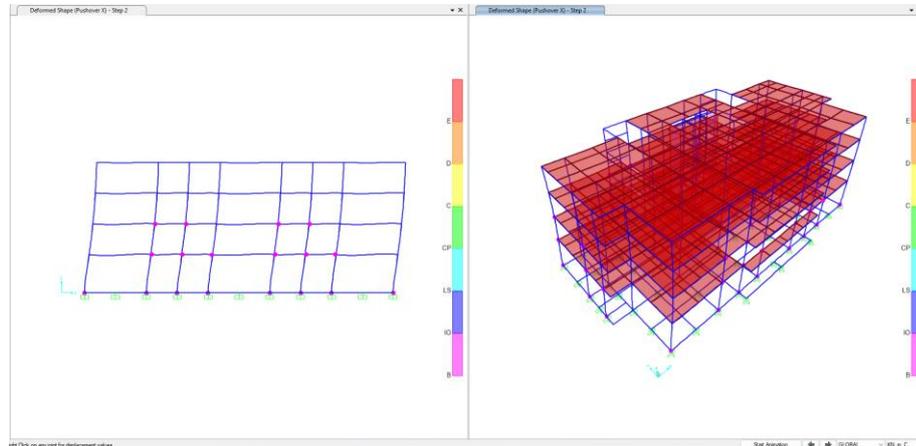
5.6.4 Mekanisme Sendi Plastis

Terbentuknya sendi plastis pada saat analisis *pushover* ditunjukkan dari munculnya tanda titik warna pada komponen struktur bangunan. Semakin bertambahnya langkah (*step*) pada saat analisis *pushover* maka akan terjadi perubahan kondisi sendi plastis pada komponen struktur. Berikut penjelasan mekanisme terjadinya sendi plastis pada arah x dan y baik dengan gempa MCE_R dan DBE .

1. Mekanisme sendi plastis arah x dengan beban gempa MCE_R

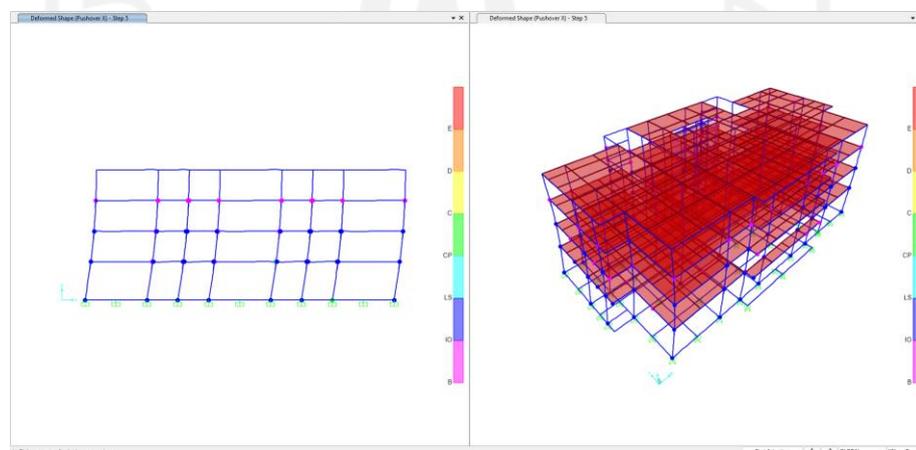
Sendi plastis untuk arah x dengan beban gempa MCE_R sudah terjadi pada balok dan kolom pada *step* ke-2 dimana telah muncul titik-titik sendi plastis

berwarna ungu yang berarti berada pada level kinerja B yang dapat dilihat pada Gambar 5.47 berikut.



Gambar 5.49 Step-2 Terjadinya Sendi Plastis pada Arah X dengan Beban Gempa MCE_R
(Sumber: SAP 2000 v22)

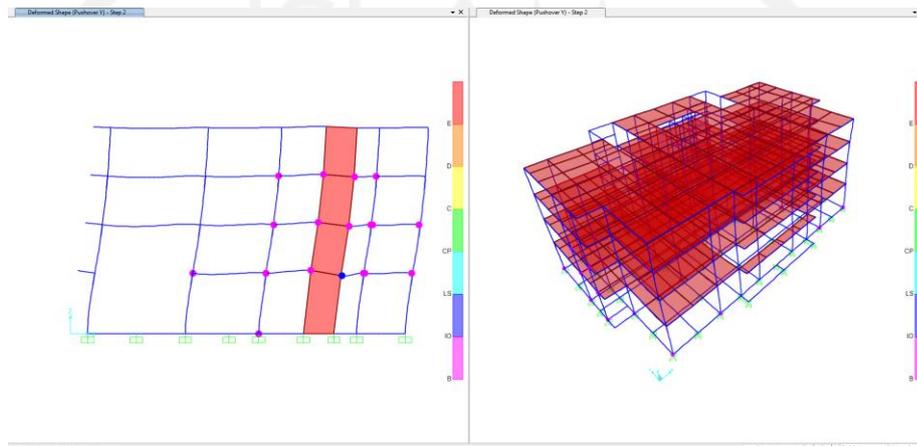
Sendi plastis untuk arah x dengan beban gempa MCE_R berhenti pada *step* ke-5 dimana telah muncul titik-titik sendi plastis berwarna biru tua yang berarti berada pada level kinerja IO (*Immediate Occupancy*) dan pada kolom lantai pertama muncul titik-titik sendi plastis berwarna hijau yang berarti berada pada level kinerja CP (*Collapse Prevention*) yaitu terjadi kerusakan yang parah pada struktur sehingga kekuatan dan kekakuan berkurang banyak, untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada Gambar 5.48 berikut.



Gambar 5.50 Step-5 Terjadinya Sendi Plastis pada Arah X dengan Beban Gempa MCE_R
(Sumber: SAP 2000 v22)

2. Mekanisme sendi plastis arah y dengan beban gempa MCE_R

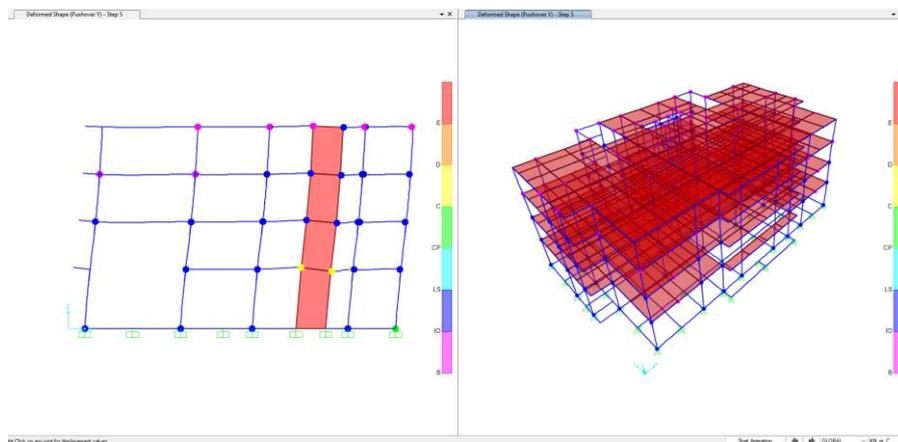
Sendi plastis untuk arah y dengan beban gempa MCE_R sudah terjadi pada balok dan kolom pada *step* ke-2 dimana telah muncul titik-titik sendi plastis berwarna ungu yang berarti berada pada level kinerja B dan titik sendi plastis berwarna biru tua yang berarti berada pada level kinerja IO (*Immediate Occupancy*) yang dapat dilihat pada Gambar 5.49 berikut.



Gambar 5.51 Step-2 Terjadinya Sendi Plastis pada Arah Y dengan Beban Gempa MCE_R

(Sumber: SAP 2000 v22)

Sendi plastis pada arah y dengan beban gempa MCE_R berhenti pada *step* ke-5 dimana muncul titik-titik warna biru tua yang berarti berada pada level kinerja IO (*Immediate Occupancy*), warna hijau yang berarti berada pada level kinerja CP (*Collapse Prevention*), dan warna kuning yang berarti berada pada level kinerja C untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada Gambar 5.50 berikut.

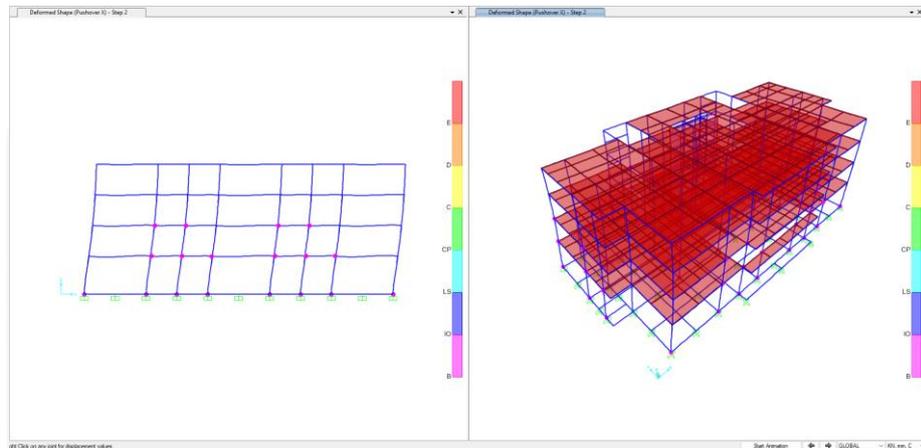


Gambar 5.52 Step-5 Terjadinya Sendi Plastis pada Arah Y dengan Beban Gempa MCE_R

(Sumber: SAP 2000 v22)

3. Mekanisme sendi plastis arah x dengan beban gempa *DBE*

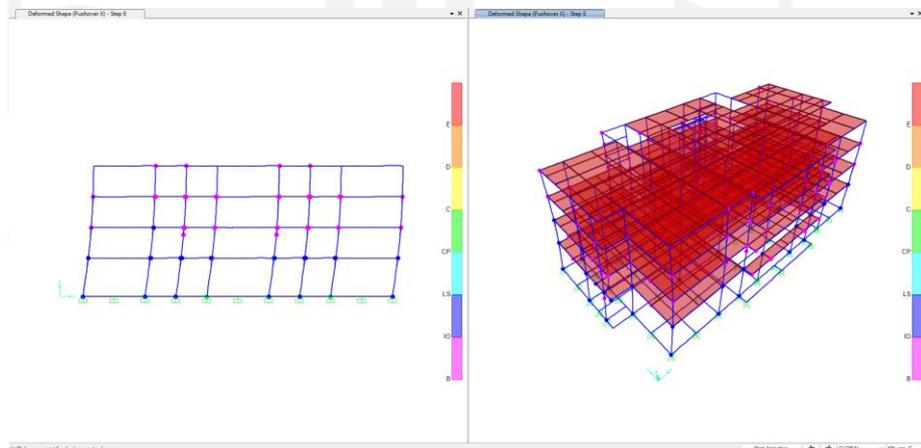
Sendi plastis untuk arah x dengan beban gempa *DBE* sudah terjadi pada balok dan kolom pada *step* ke-2 dimana telah muncul titik-titik sendi plastis berwarna ungu yang berarti berada pada level kinerja B yang dapat dilihat pada Gambar 5.51 berikut.



Gambar 5.53 Step-2 Terjadinya Sendi Plastis pada Arah X dengan Beban Gempa *DBE*

(Sumber: SAP 2000 v22)

Sendi plastis untuk arah x dengan beban gempa *DBE* berhenti pada *step* ke-8 dimana telah muncul titik-titik sendi plastis berwarna biru tua yang berarti berada pada level kinerja IO (*Immediate Occupancy*) yang dapat dilihat pada Gambar 5.52 berikut.

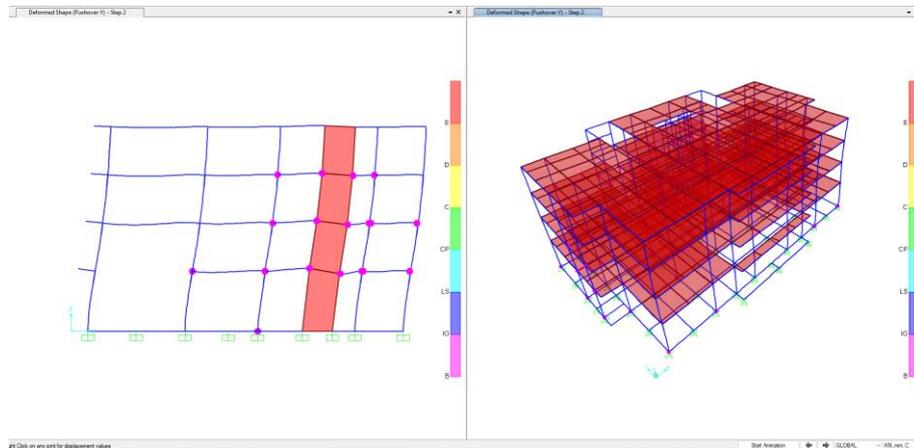


Gambar 5.54 Step-8 Terjadinya Sendi Plastis pada Arah X dengan Beban Gempa *DBE*

(Sumber: SAP 2000 v22)

4. Mekanisme sendi plastis arah y dengan beban gempa *DBE*

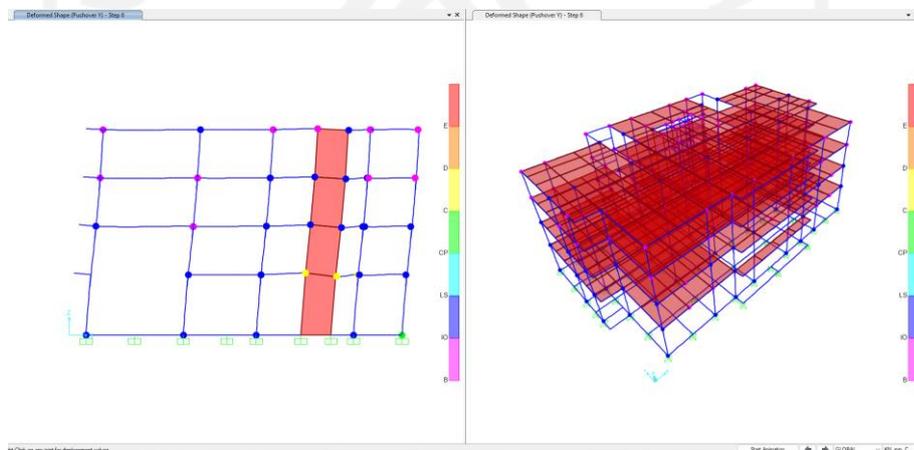
Sendi plastis untuk arah y dengan beban gempa *DBE* sudah terjadi pada balok dan kolom pada *step* ke-2 dimana telah muncul titik-titik sendi plastis berwarna ungu yang berarti berada pada level kinerja B yang dapat dilihat pada Gambar 5.53 berikut.



Gambar 5.55 Step-2 Terjadinya Sendi Plastis pada Arah Y dengan Beban Gempa *DBE*

(Sumber: SAP 2000 v22)

Sendi plastis pada arah y dengan beban gempa *DBE* berhenti pada *step* ke-6 dimana muncul titik-titik warna biru tua yang berarti berada pada level kinerja IO (*Immediate Occupancy*), warna hijau yang berarti berada pada level kinerja CP (*Collapse Prevention*), dan warna kuning yang berarti berada pada level kinerja C untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada Gambar 5.54 berikut.



Gambar 5.56 Step-6 Terjadinya Sendi Plastis pada Arah Y dengan Beban Gempa *DBE*

(Sumber: SAP 2000 v22)

BAB VI KESIMPULAN DAN SARAN

6.1 Kesimpulan

Dari analisis yang telah dilakukan terhadap kinerja gedung perkantoran di Kota Padang, maka dapat disimpulkan sebagai berikut ini.

1. Nilai *performance point* yang diperoleh dari hasil analisis *pushover* dengan menggunakan beban gempa MCE_R (*Maximum Considered Earthquake, Risk Targeted*) pada arah x yaitu $V = 20149,839$ kN dan $\delta = 0,309$ m. Kemudian untuk arah Y yaitu $V = 26643,81$ kN dan $\delta = 0,231$ m.
2. Nilai *performance point* yang diperoleh dari hasil analisis *pushover* dengan menggunakan beban gempa DBE (*Design Basis Earthquake*) pada arah x yaitu $V = 16186,151$ kN dan $\delta = 0,175$ m. Kemudian untuk arah Y yaitu $V = 20103,415$ kN dan $\delta = 0,131$ m.
3. Tingkat kinerja struktur dari gedung perkantoran di Kota Padang pada level gempa MCE_R adalah *Damage Control* sedangkan tingkat kinerja struktur pada level gempa DBE adalah *Immediate Occupancy*.
4. Awal mula terjadinya sendi plastis dengan menggunakan beban gempa MCE_R (*Maximum Considered Earthquake, Risk Targeted*) pada arah x dan y ada pada *step* ke-2 yang ditandai dengan munculnya titik sendi plastis pada balok dan kolom berwarna ungu yang artinya berada pada level kinerja B. Sendi plastis berakhir untuk arah x pada *step* ke-5, dimana ada beberapa kolom ditandai dengan berwarna hijau yang berarti berada pada level kinerja CP (*Collapse Prevention*) yaitu terjadi kerusakan yang parah pada struktur sehingga kekuatan dan kekakuan berkurang banyak. Kemudian untuk arah y berakhir pada *step* ke-5, dimana ada beberapa kolom yang juga ditandai dengan titik berwarna hijau yang berarti berada pada level kinerja CP (*Collapse Prevention*) dan warna kuning yang berarti berada pada level kinerja C.

5. Awal mula terjadinya sendi plastis dengan menggunakan beban gempa *DBE* (*Design Basis Earthquake*) pada arah x dan y ada pada *step* ke-2 yang ditandai dengan munculnya titik sendi plastis pada balok dan kolom berwarna ungu yang artinya berada pada level kinerja B. Sendi plastis berakhir pada *step* ke-8 dimana telah muncul titik-titik sendi plastis berwarna biru tua yang berarti berada pada level kinerja IO (*Immediate Occupancy*). Kemudian untuk arah y berakhir pada *step* ke-6 dimana muncul titik-titik warna biru tua yang berarti berada pada level kinerja IO (*Immediate Occupancy*), warna hijau yang berarti berada pada level kinerja CP (*Collapse Prevention*), dan warna kuning yang berarti berada pada level kinerja C.

6.2 Saran

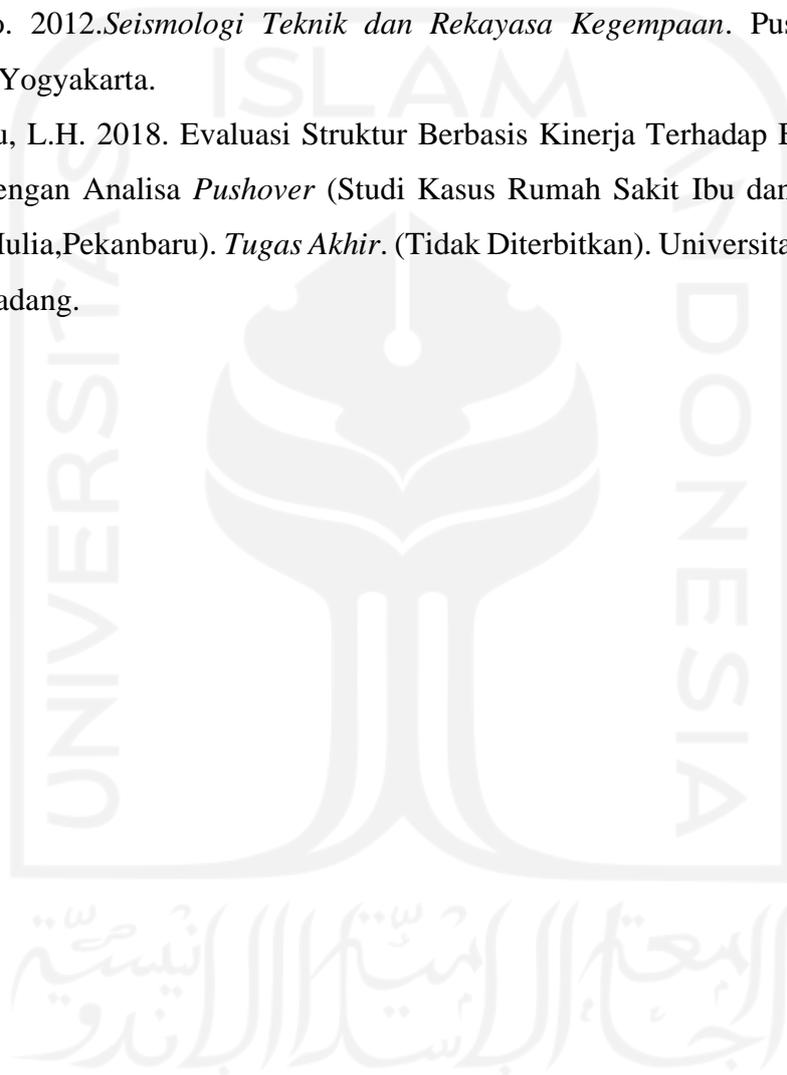
Sebagai pengembangan untuk penelitian lebih lanjut mengenai analisis *pushover* sebagai salah satu cara untuk mengevaluasi kinerja suatu struktur, maka diberikan beberapa saran sebagai berikut.

1. Dalam analisis *pushover* perlu menggunakan komputer dengan spesifikasi tinggi karena proses *running* untuk analisis ini membutuhkan waktu yang lama.
2. Selain menggunakan metode ATC-40, dapat digunakan juga metode FEMA 356 dan FEMA 440 dengan tingkat gempa yang berbeda sebagai pembandingan dalam melakukan analisis ini.
3. Saran kepada pemilik dan perencana bangunan agar sebelum merencanakan suatu struktur bangunan hendaknya didahului dengan studi kelayakan agar pada perhitungan struktur nantinya dapat diperoleh hasil perencanaan yang memuaskan baik dari segi mutu, biaya, dan waktu.

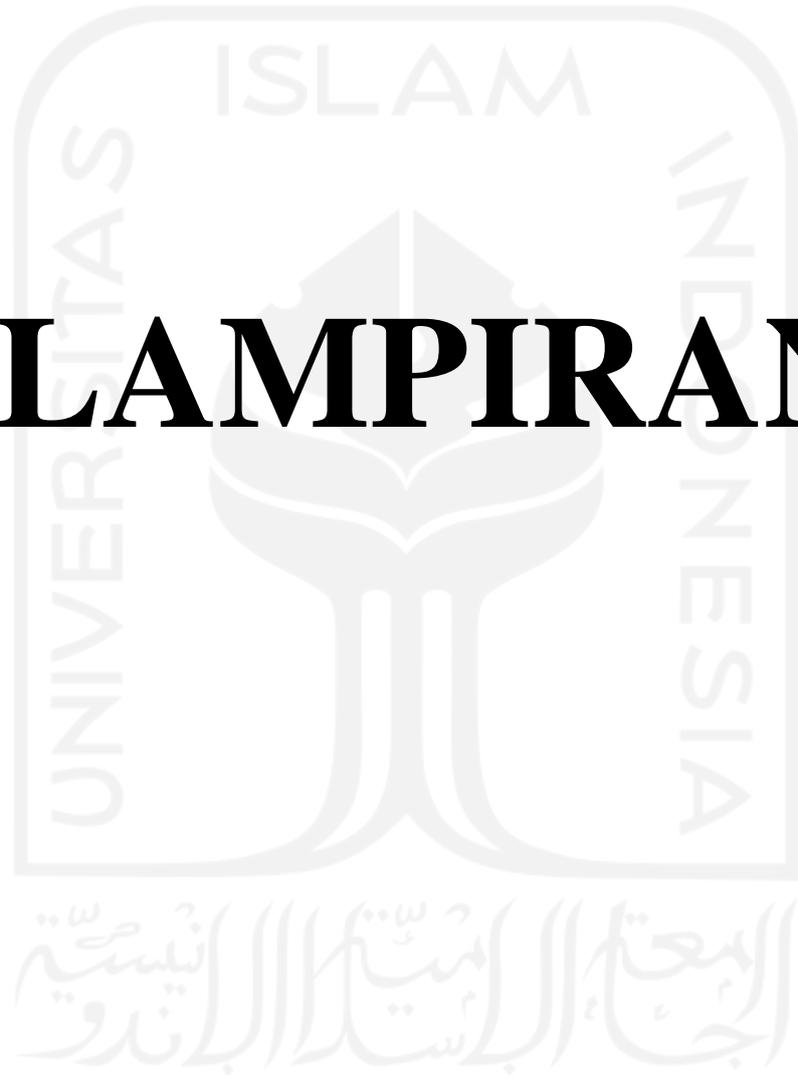
DAFTAR PUSTAKA

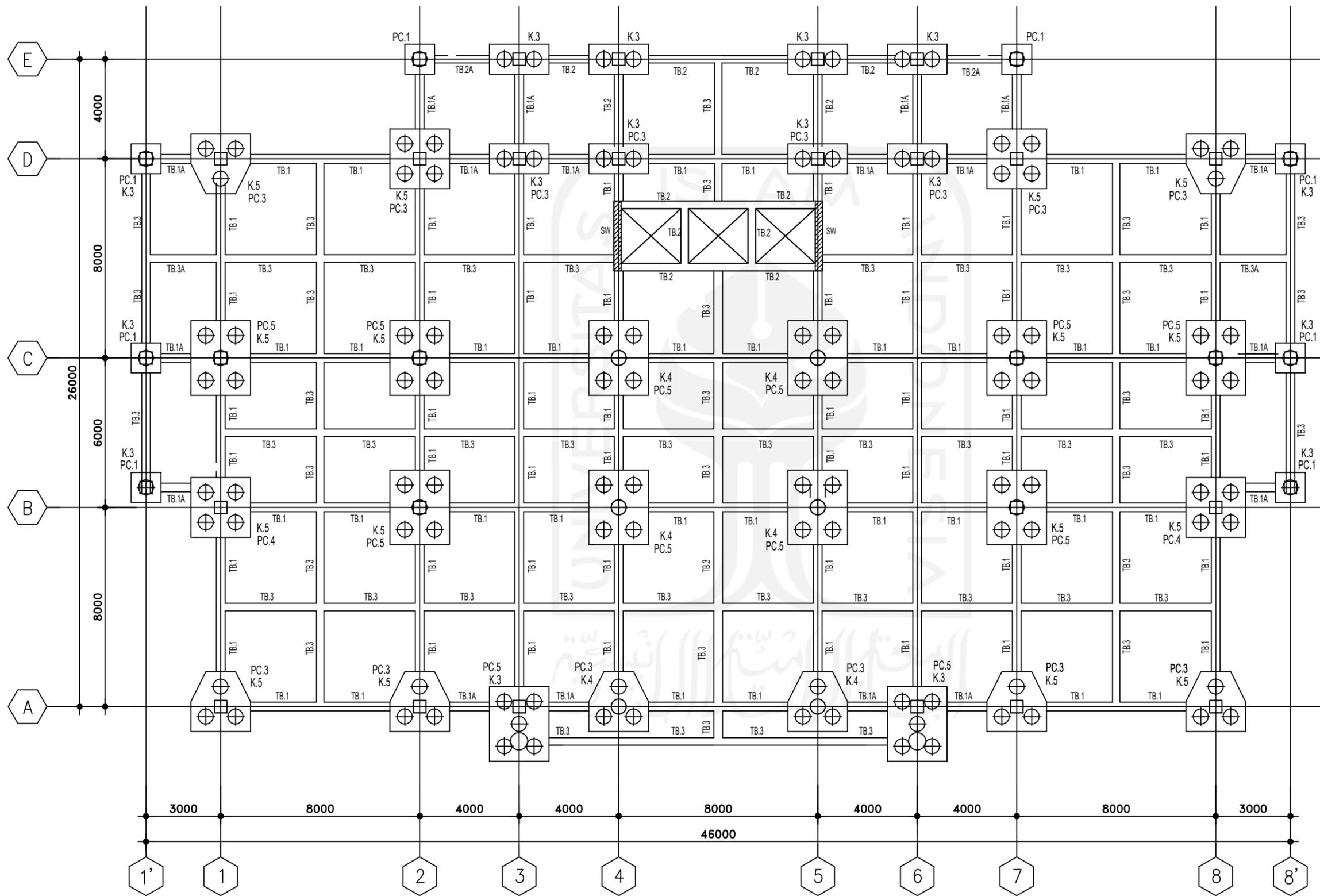
- Applied Technology Council, ATC-40. 1996. Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Building: Volume 1. California.*
- Asmara dkk. 2021. Evaluasi Kinerja Struktur Bangunan Tinggi dengan Analisis *Pushover* Menggunakan Aplikasi Pemodelan Struktur (Studi Kasus: *The Venetian Tower*). *Jurnal Teknik Sipil*. Universitas Lampung.
- Badan Standarisasi Nasional. 2019. *Persyaratan Beton Struktural untuk Bangunan Gedung*. Badan Standarisasi Nasional. SNI-2847-2019. Jakarta.
- Badan Standarisasi Nasional. 2019. *Tata Cara Perencanaan Ketahanan Gempa untuk Struktur Bangunan Gedung dan Non Gedung*. SNI-1726-2019. Jakarta.
- Badan Standarisasi Nasional. 2020. *Beban Minimum untuk Perancangan Bangunan Gedung dan Struktural Lain*. SNI-1727-2020. Jakarta.
- Dewi, R. Y. dan Sudrajat A. V. 2007. Analisis Kinerja Struktur Betom Bertulang dengan Sistem Balok Kolom dan Flat Slab terhadap Beban Gempa Kuat. *Jurnal Teknik Sipil*. Institut Teknologi Bandung.
- Dewobroto, Wiryanto. 2006. Evaluasi Kinerja Struktur Baja Tahan Gempa dengan Analisa *Pushover*. Jurusan Teknik Sipil. Universitas Pelita Harapan.
- Direktorat Penyelidikan Masalah Bangunan. 1983. *Peraturan Pembebanan Indonesia untuk Gedung 1983*. Yayasan Lembaga Penyelidikan Masalah Bangunan. Bandung.
- Marianda, Dhani. 2016. Evaluasi Kinerja Struktur Gedung “Asrama Mahasiwi UGM” Yogyakarta Menggunakan Analisa *Pushover* Sesuai Pedoman ATC-40. *Tugas Akhir*. (Tidak Diterbitkan). Universitas Islam Indonesia. Yogyakarta.
- Rulliananda dkk. 2021. *Review* Desain Kinerja Struktur Atas Gedung Politeknik Negeri Batam Berdasarkan Peraturan SNI 1726-2019 Menggunakan Metode *Pushover Analysis*. *Jurnal Teknik Sipil*. Universitas 17 Agustus 1945-Surabaya

- Sandhi dkk. 2017. Kajian Analisis *Pushover* untuk *Performance Based Design* pada Gedung Fakultas Ilmu Sosial dan Politik (FISIP) Universitas Brawijaya. *Jurnal Teknik Sipil*. Universitas Brawijaya.
- Tavio, & Wijaya, U. 2018. *Desain Rekayasa Gempa Berbasis Kinerja (Performance Based Design)*. Andi Offset. Yogyakarta.
- Widodo. 2012. *Seismologi Teknik dan Rekayasa Kegempaan*. Pustaka Pelajar. Yogyakarta.
- Zalukhu, L.H. 2018. Evaluasi Struktur Berbasis Kinerja Terhadap Beban Gempa dengan Analisa *Pushover* (Studi Kasus Rumah Sakit Ibu dan Anak Budhi Mulia, Pekanbaru). *Tugas Akhir*. (Tidak Diterbitkan). Universitas Bung Hatta. Padang.



LAMPIRAN





CATATAN/KETERANGAN

REVISI			
NO	TANGGAL	KETERANGAN	PARAF

PEMBERI TUGAS



PT Pelabuhan Indonesia II (Persero)
 Energizing Trade, Energizing Indonesia
PT. PELABUHAN INDONESIA II
 (PERSERO)

NAMA PROYEK

REVIEW DISAIN
 GEDUNG KANTOR KESYAHBANDARAN
 DAN OTORITAS PELABUHAN
 TELUK BAYUR

KONSULTAN PERENCANA



CV. ARCE
 Jl. Asrarak Jl. Pekan Baru, Ulak Karang Sel.
 Kec. Padang Utara, Kota Padang, Sumatera Barat
 PENANGGUNG JAWAB PERENCANA

Ir. TAUFIK, MT
 Direktur

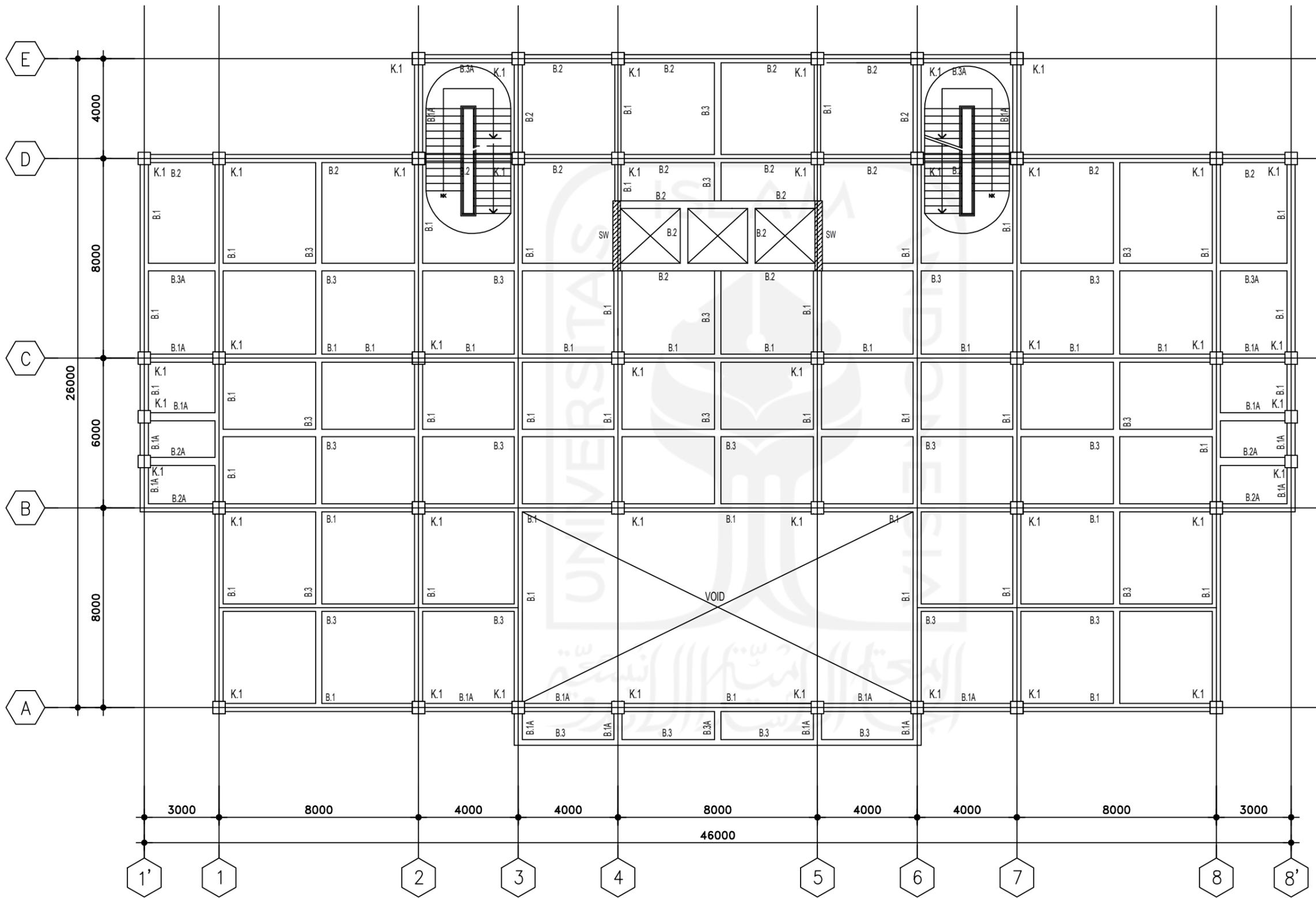
DISETUJUI :

IRWAN, ST
 NIPP. 27206446

JUDUL GAMBAR

DENAH
LANTAI DASAR

SKALA	Tgl.
DIGAMBAR : WENDI K.	DIPERIKSA : Ir. TAUFIK, MT
No. PROYEK : Gedung KsOP	
No. GAMBAR	
GEDUNG KANTOR KESYAHBANDARAN DAN OTORITAS PELABUHAN Jl. Belawan, Teluk bayur, Sumatera Barat GAMBAR ARSITEK	



CATATAN/KETERANGAN

REVISI			
NO	TANGGAL	KETERANGAN	PARAF

PEMBERI TUGAS



PT. PELABUHAN INDONESIA II (PERSERO)

NAMA PROYEK

REVIEW DISAIN
GEDUNG KANTOR KESYAHBANDARAN
DAN OTORITAS PELABUHAN
TELUK BAYUR

KONSULTAN PERENCANA



CV. ARCE
Jl. Asratek Jl. Pekan Baru, Ulak Karang Sel.
Kec. Padang Utara, Kota Padang, Sumatera Barat

PENANGGUNG JAWAB PERENCANA

Ir. TAUFIK, MT
Direktur

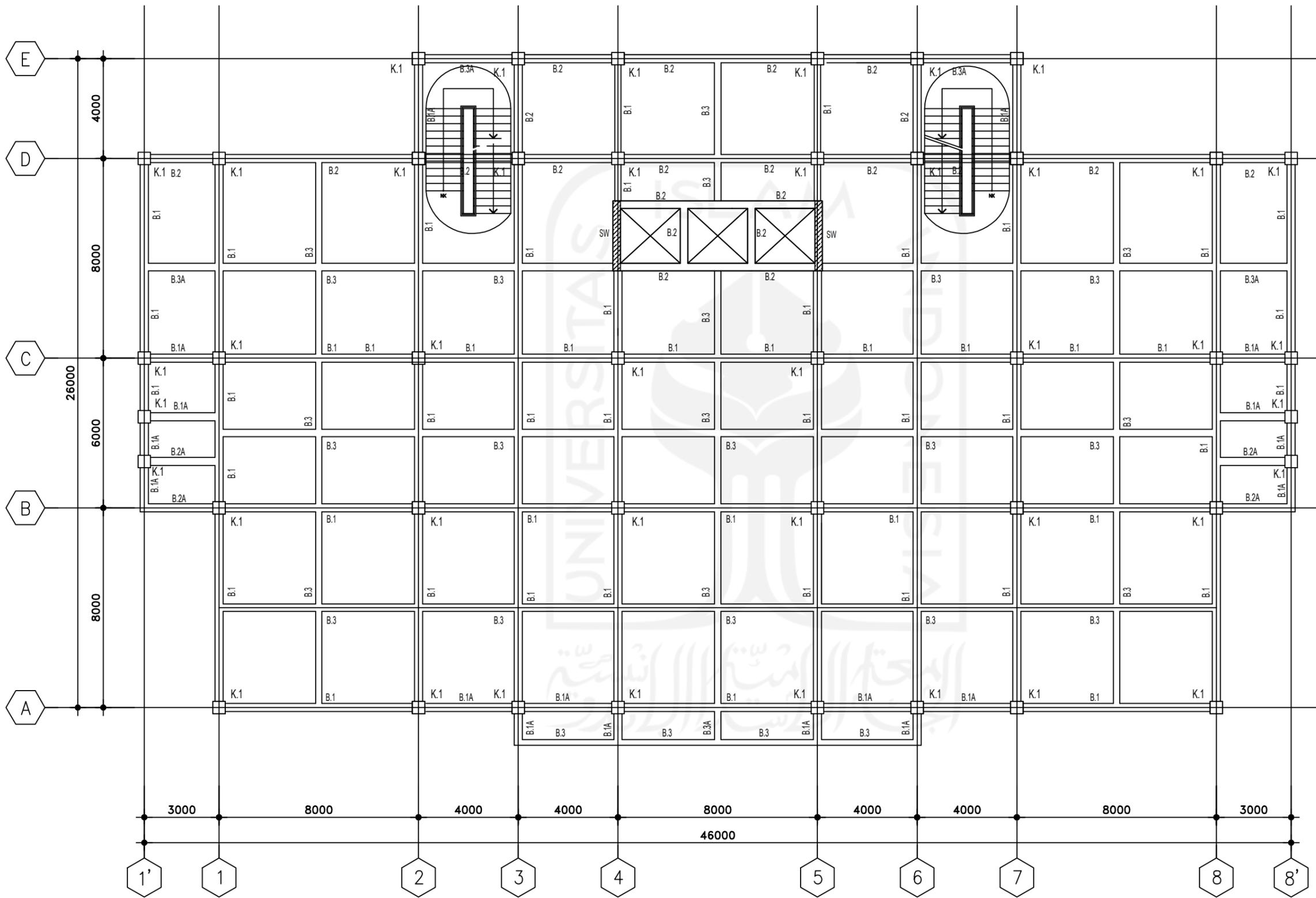
DISETUJUI :

IRWAN, ST
NIPP. 272066446

JUDUL GAMBAR

DENAH
LANTAI 2

SKALA	Tgl.
DIGAMBAR : WENDI K.	DIPERIKSA : Ir. TAUFIK, MT
No. PROYEK : Gedung KsOP	
No. GAMBAR	
GEDUNG KANTOR KESYAHBANDARAN DAN OTORITAS PELABUHAN Jl. Belawan, Teluk bayur, Sumatera Barat GAMBAR ARSITEK	



CATATAN/KETERANGAN

REVISI			
NO	TANGGAL	KETERANGAN	PARAF

PEMBERI TUGAS



PT Pelabuhan Indonesia II (Persero)
 Energizing Trade, Energizing Indonesia
PT. PELABUHAN INDONESIA II (PERSERO)

NAMA PROYEK

REVIEW DISAIN
 GEDUNG KANTOR KESYAHBANDARAN
 DAN OTORITAS PELABUHAN
 TELUK BAYUR

KONSULTAN PERENCANA



C.V. ARCE
 Jl. Asratek Jl. Pekan Baru, Ulak Karang Sel.
 Kec. Padang Utara, Kota Padang, Sumatera Barat
PENANGGUNG JAWAB PERENCANA

Ir. TAUFIK, MT
 Direktur

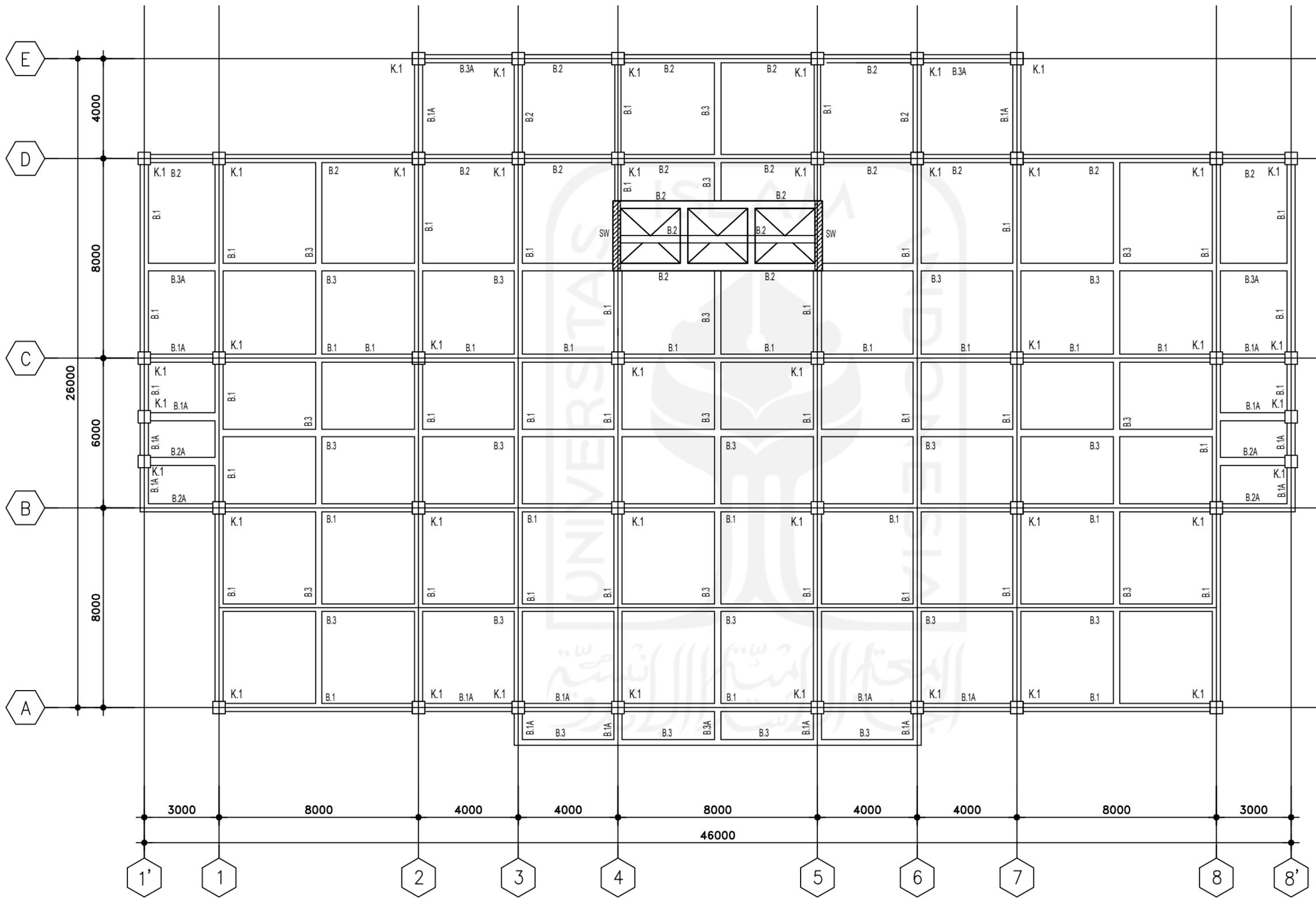
DISETUJUI :

IRWAN, ST
 NIPP. 272066446

JUDUL GAMBAR

DENAH LANTAI 3

SKALA	Tgl.
DIGAMBAR : WENDI K.	DIPERIKSA : Ir.TAUFIK, MT
No. PROYEK : Gedung KsOP	
No. GAMBAR	
GEDUNG KANTOR KESYAHBANDARAN DAN OTORITAS PELABUHAN Jl. Belawan, Teluk bayur, Sumatera Barat GAMBAR ARSITEK	



CATATAN/KETERANGAN

REVISI			
NO	TANGGAL	KETERANGAN	PARAF

PEMBERI TUGAS

PT. PELABUHAN INDONESIA II (PERSERO)

NAMA PROYEK

REVIEW DISAIN
 GEDUNG KANTOR KESYAHBANDARAN
 DAN OTORITAS PELABUHAN
 TELUK BAYUR

KONSULTAN PERENCANA

CV. ARCE
 Jl. Asrarak JI, Pekan Baru, Uluak Karang Sel,
 Kec. Padang Utara, Kota Padang, Sumatera Barat
 PENANGGUNG JAWAB PERENCANA

Ir. TAUFIK, MT
 Direktur

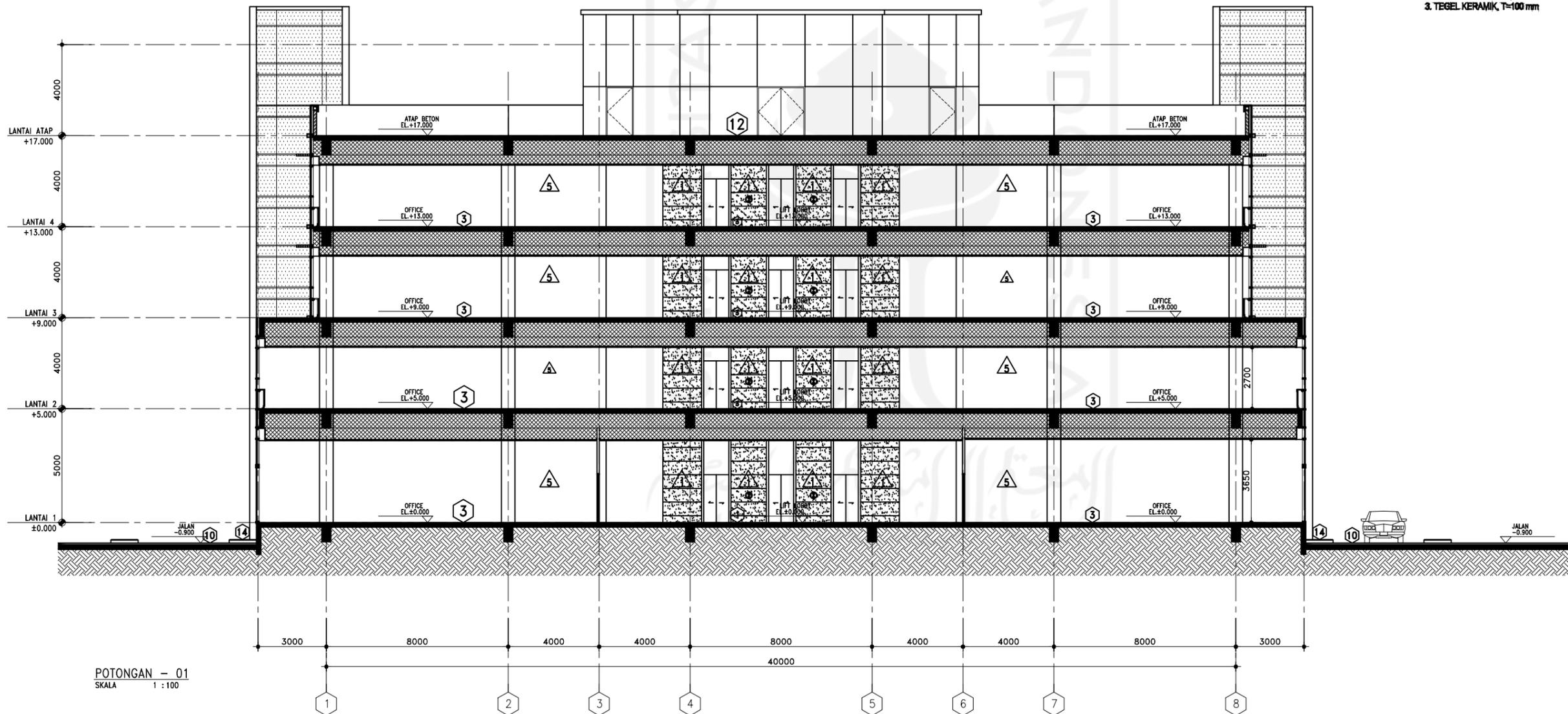
DISETUJUI :

IRWAN, ST
 NIPP. 272066446

JUDUL GAMBAR

DENAH
 LANTAI 4/ATAP

SKALA	Tgl.
DIGAMBAR : WENDI K.	DIPERIKSA : Ir. TAUFIK, MT
No. PROYEK : Gedung KsOP	
No. GAMBAR	
GEDUNG KANTOR KESYAHBANDARAN DAN OTORITAS PELABUHAN Jl. Belawan, Teluk bayur, Sumatera Barat GAMBAR ARSITEK	



POTONGAN - 01
SKALA 1 : 100

LEGEND :

LANTAI

1. GRANIT
2. HOMOGENEUS TILE 800X800 mm
3. HOMOGENEUS TILE 600X600 mm
4. HOMOGENEUS TILE 300X300 mm
5. TEGLER KERAMIK 300X300 mm
6. TEGLER KERAMIK 200X200 mm
7. KARPET TILE
8. SCREED, DIBERI FLOOR HARDENER 3kg/m2 DI TROWELED
9. BATU ALAM
10. ASPAL
11. RUMPUT
12. PLAT BETON + WATER PROOFING
13. PARQUET
14. PAVING BLOCK

DINDING

1. GRANIT
2. PLESTER ACI DICAT EPOXY, PERMUKAAN RATA
3. PLESTER + WATER PROOFING + CAT WATERSHIELD
4. KERAMIK 300X300 mm
5. PLESTER ACI DICAT EMULSI, PERMUKAAN RATA
6. ACOUSTIK TILE KHUSUS
7. GYPSUM BOARD, T=12mm DI CAT EMULSI
8. GYPSUM BOARD, T=12mm DIDALAM DIBERI GLASSWOOL, DICAT EMULSI
9. KACA FRAME POWDER COATING 3"

SKIRTING

1. GRANIT
2. HOMOGENEUS TILE, T=100 mm
3. TEGLER KERAMIK, T=100 mm

CATATAN/KETERANGAN

REVISI		
NO	TANGGAL	KETERANGAN

PEMBERI TUGAS



PT. PELABUHAN INDONESIA II
(PERSERO)

NAMA PROYEK

REVIEW DISAIN
GEDUNG KANTOR KESYAHBANDARAN
DAN OTORITAS PELABUHAN
TELUK BAYUR

KONSULTAN PERENCANA



C.V. ARCE

Jl. Asratok, Jl. Pekan Baru, Ulak Karang Sel.
Kec. Padang Utara, Kota Padang, Sumatera Barat

PENANGGUNG JAWAB PERENCANA

Ir. TAUFIK, MT
Direktur

DISETUJUI :

IRWAN, ST
NIPP. 272066446

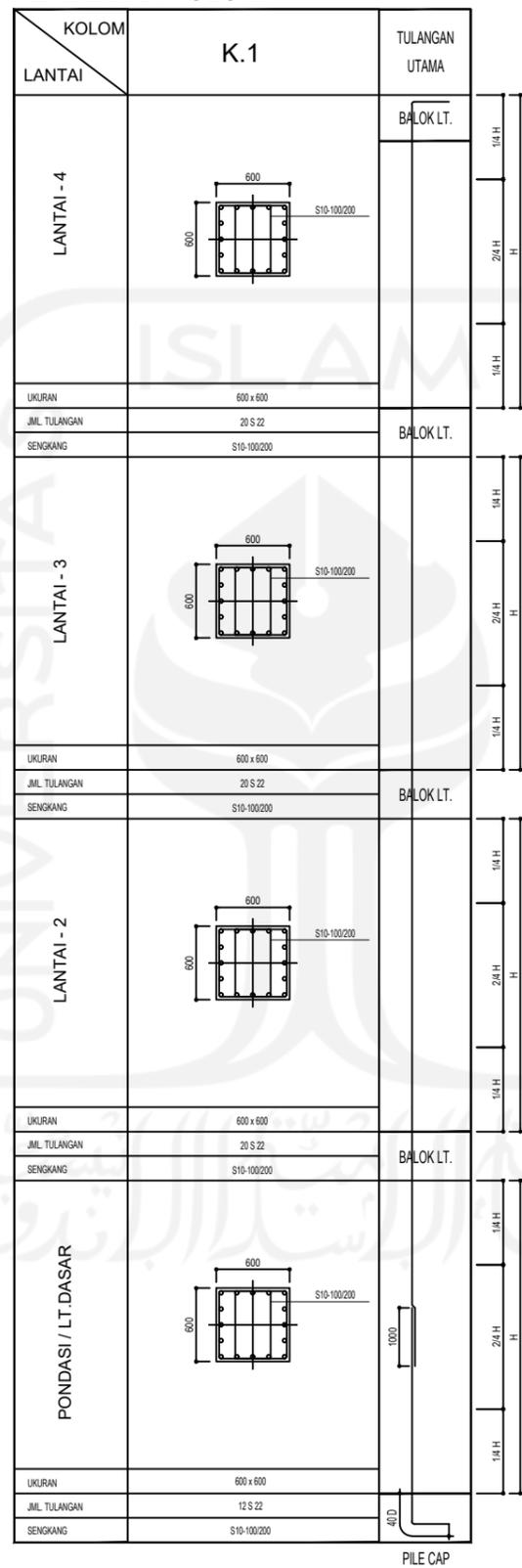
JUDUL GAMBAR

POTONGAN - 01

SKALA 1 : 100	Tgl.
DIGAMBAR : WENDI K.	DIPERIKSA : Ir. TAUFIK, MT
No. PROYEK : Gedung KsOP	
No. GAMBAR	AR-1301

GEDUNG KANTOR KESYAHBANDARAN DAN OTORITAS PELABUHAN
Jl. Belawan, Teluk bayur, Sumatera Barat
GAMBAR ARSITEK

PEMBESIAN KOLOM



CATATAN/KETERANGAN

REVISI

NO	TANGGAL	KETERANGAN	PARAF

PEMBERI TUGAS



PT Pelabuhan Indonesia II (Persero)
Energizing Trade, Energizing Indonesia
PT. PELABUHAN INDONESIA II
(PERSERO)

NAMA PROYEK

REVIEW DISAIN
GEDUNG KANTOR KESYAHBANDARAN
DAN OTORITAS PELABUHAN
TELUK BAYUR

KONSULTAN PERENCANA



CV. ARCE
Jl. Asrateg Jl. Pekan Baru, Ujak Karang Sel.
Kec. Padang Utara, Kota Padang, Sumatera Barat

PENANGGUNG JAWAB PERENCANA

Ir. TAUFIK, MT
Direktur

DISETUJUI :

IRWAN, ST
NIPP. 272066446

JUDUL GAMBAR

PEMBESIAN KOLOM
LANTAI 1 S/D LANTAI 4

SKALA : Tgl.

DIGAMBAR : WENDI K. DIPERIKSA : Ir. TAUFIK, MT

No. PROYEK : Gedung KsOP

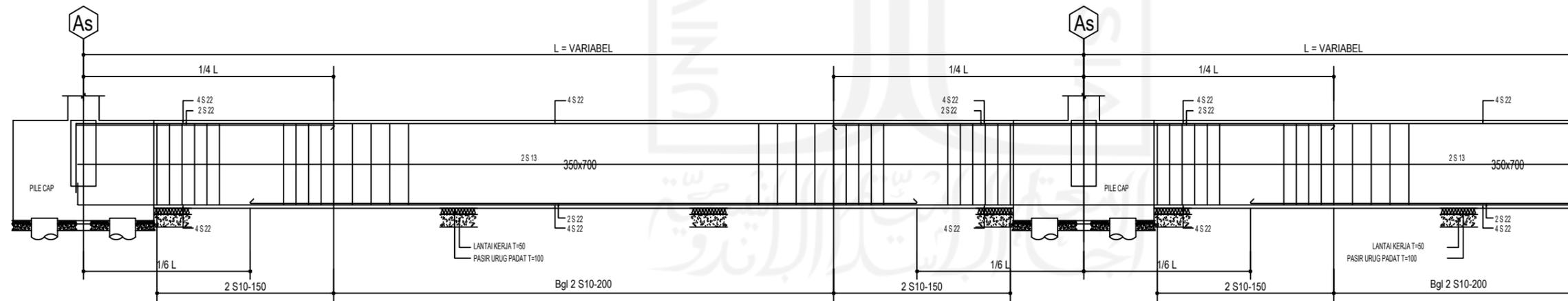
No. GAMBAR

GEDUNG KANTOR KESYAHBANDARAN DAN OTORITAS PELABUHAN
Jl. Belawan, Teluk bayur, Sumatera Barat
GAMBAR ARSITEK

PEMBESIAN BALOK SLOOF (TB)

SKALA 1:20

TYPE BALOK	TB.1		TB.1A	TB.2		TB.2A	TB.3		TB.3A
POT. AREA	LAPANGAN	TUMPUAN	TUMP. / LAP.	LAPANGAN	TUMPUAN	TUMP. / LAP.	LAPANGAN	TUMPUAN	TUMP. / LAP.
POT. PENAMPANG									
	350 X 700	350 X 700	350 X 700	300 X 600	300 X 600	300 X 600	250 X 500	250 X 500	250 X 500
	6 S 22	4 S 22	6 S 22	7 S 19	4 S 19	7 S 19	5 S 19	3 S 19	5 S 19
	4 S 22	6 S 22	4 S 22	4 S 19	7 S 19	4 S 19	3 S 19	5 S 19	3 S 19
	2 S 13	2 S 13	2 S 13	2 S 13	2 S 13	2 S 13	2 S 13	2 S 13	2 S 13
SENGKANG	2 S13 - 100	2 S13 - 150	2 S13 - 100	S13 - 100	S13 - 150	S13 - 100	S10 - 100	S10 - 150	S10 - 100



SKEMATIK PEMBESIAN BALOK SLOOF

SKALA 1:25

CATATAN/KETERANGAN

REVISI			
NO	TANGGAL	KETERANGAN	PARAF

PEMBERI TUGAS



PT Pelabuhan Indonesia II (Persero)
Energizing Trade, Energizing Indonesia.
PT. PELABUHAN INDONESIA II
(PERSERO)

NAMA PROYEK

REVIEW DISAIN
GEDUNG KANTOR KESYAHBANDARAN
DAN OTORITAS PELABUHAN
TELUK BAYUR

KONSULTAN PERENCANA



C.V. ARCE
Jl. Asratek Jl. Pekan Baru, Ulak Karang Sel.
Kec. Padang Utara, Kota Padang, Sumatera Barat
PENANGGUNG JAWAB PERENCANA

Ir. TAUFIK, MT
Direktur

DISETUJUI :

IRWAN, ST
NIPP. 272066446

JUDUL GAMBAR

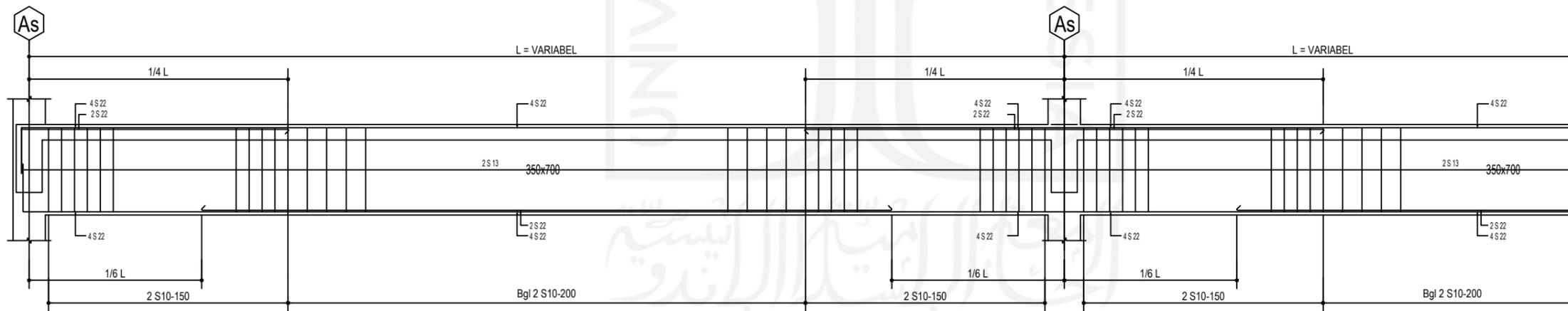
PEMBESIAN BALOK
SLOOF

SKALA	Tgl.
DIGAMBAR : WENDI K.	DIPERIKSA : Ir. TAUFIK, MT
No. PROYEK : Gedung KsOP	
No. GAMBAR	
GEDUNG KANTOR KESYAHBANDARAN DAN OTORITAS PELABUHAN Jl. Belawan, Teluk bayur, Sumatera Barat GAMBAR ARSITEK	

PEMBESIAN BALOK LT.1 s/d LT. ATAP

SKALA 1:20

TYPE BALOK	B.1		B.1A	B.2		B.2A	B.3		B.3A
	TUMPUAN	LAPANGAN	TUMP. / LAP.	TUMPUAN	LAPANGAN	TUMP. / LAP.	TUMPUAN	LAPANGAN	TUMP. / LAP.
POT. PENAMPANG									
	350 X 700	350 X 700	350 X 700	300 X 600	300 X 600	300 X 600	250 X 500	250 X 500	250 X 500
	6 S 22	4 S 22	6 S 22	8 S 19	4 S 19	8 S 19	5 S 19	3 S 19	5 S 19
	4 S 22	6 S 22	4 S 22	4 S 19	8 S 19	4 S 19	3 S 19	5 S 19	3 S 19
	2 S 13	2 S 13	2 S 13	2 S 13	2 S 13	2 S 13	2 S 13	2 S 13	2 S 13
SENGKANG	2 S13 - 100	2 S13 - 150	2 S13 - 100	2S13 - 100	2S13 - 150	2S13 - 100	S10 - 100	S10 - 150	S10 - 100



SKEMATIK PEMBESIAN BALOK

SKALA 1:25

CATATAN/KETERANGAN

REVISI			
NO	TANGGAL	KETERANGAN	PARAF

PEMBERI TUGAS

IPC
 PT Pelabuhan Indonesia II (Persero)
 Energizing Trade, Energizing Indonesia.
PT. PELABUHAN INDONESIA II (PERSERO)

NAMA PROYEK

REVIEW DISAIN
 GEDUNG KANTOR KESYAHBANDARAN
 DAN OTORITAS PELABUHAN
 TELUK BAYUR

KONSULTAN PERENCANA

CV. ARCE PERENCANA
 Jl. Asratek Jl. Pekan Baru, Ulak Karang Sel.
 Kec. Padang Utara, Kota Padang, Sumatera Barat

PENANGGUNG JAWAB PERENCANA

Ir. TAUFIK, MT
 Direktur

DISETUJUI :

IRWAN, ST
 NIPP. 272066446

JUDUL GAMBAR

**PEMBESIAN BALOK
 LANTAI 1 S/D LANTAI 4**

SKALA	Tgl.
DIGAMBAR : WENDI K.	DIPERIKSA : Ir. TAUFIK, MT
No. PROYEK : Gedung KsOP	
No. GAMBAR	
GEDUNG KANTOR KESYAHBANDARAN DAN OTORITAS PELABUHAN Jl. Belawan, Teluk bayur, Sumatera Barat GAMBAR ARSITEK	