

TUGAS AKHIR

**EVALUASI KINERJA DAN PROBABILITAS
KERUSAKAN SEISMIC GEDUNG LABORATORIUM
DENGAN ANALISIS PUSHOVER DAN METODE
HAZUS**

***(EVALUATION OF PERFORMANCE AND SEISMIC
DAMAGE PROBABILITY OF LABORATORY
BUILDING USING PUSHOVER ANALYSIS AND
HAZUS METHOD)***

**Diajukan Kepada Universitas Islam Indonesia Yogyakarta Untuk Memenuhi
Persyaratan Memperoleh Derajat S1 Teknik Sipil**



**Ardha Aga Saputra
13511246**

**PROGRAM STUDI SARJANA TEKNIK SIPIL
FAKULTAS TEKNIK SIPIL DAN PERENCANAAN
UNIVERSITAS ISLAM INDONESIA
2019**

TUGAS AKHIR

EVALUASI KINERJA DAN PROBABILITAS KERUSAKAN SEISMIK GEDUNG LABORATORIUM DENGAN ANALISIS PUSHOVER DAN METODE HAZUS (*EVALUATION OF PERFORMANCE AND SEISMIC DAMAGE PROBABILITY OF LABORATORY BUILDING USING PUSHOVER ANALYSIS AND HAZUS METHOD*)

Disusun oleh

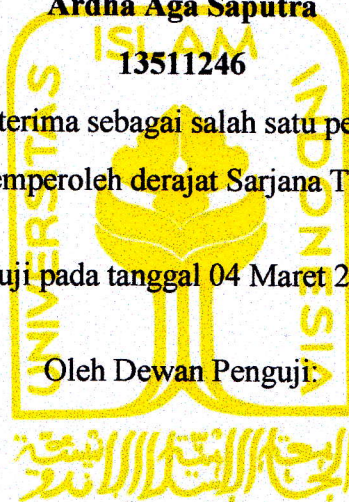
Ardha Aga Saputra

13511246

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

Diuji pada tanggal 04 Maret 2019

Oleh Dewan Penguji



Pembimbing

Yunalia Muntafi, S.T., M.T.
NIK: 095110101

Penguji I

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

Penguji II

Harsovo, Dr., Ir., M.Sc.
NIK: 835110202

Mengesahkan,

Ketua Program Studi Sarjana Teknik Sipil



Dr. Ir. Sri Amini Yuni Astuti, M.T.
NIK: 855110201

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 Maret 2019

Yang membuat pernyataan,



Ardha Aga Saputra

(13511246)

DEDIKASI

KATA PENGANTAR

Assalamu'alaikum Wr. Wb.

Puji syukur kehadirat ALLAH SWT yang telah melimpahkan Rahmat dan Hidayah-Nya serta shalawat dan salam kepada Nabi Besar Muhammad SAW, sehingga Tugas Akhir yang berjudul “*Evaluasi Kinerja Dan Probabilitas Kerusakan Seismik Gedung Laboratorium Dengan Analisis Pushover Dan Metode Hazus*” dapat diselesaikan dengan baik.

Tugas Akhir ini merupakan salah satu syarat akademik dalam menyelesaikan studi tingkat strata satu di Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Islam Indonesia, Yogyakarta. Dalam penyusunan Tugas Akhir ini banyak hambatan yang dihadapi dan disadari bahwa penyelesaian Tugas Akhir ini berkat saran, kritik, serta dorongan semangat dari berbagai pihak.

Berkaitan dengan ini, ucapan terima kasih diucapkan oleh penulis yang sedalam-dalamnya kepada:

1. Fathul Wahid, S.T., M.Sc., Ph.D., selaku Rektor Universitas Islam Indonesia,
2. Miftahul Fauziah, S.T., M.T., Ph.D., selaku Dekan Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan UII Yogyakarta,
3. Dr. Ir. Sri Amini Yuni Astuti, M.T., selaku Ketua Program Studi Sarjana Teknik Sipil FTSP UII Yogyakarta,
4. Ibu Yunalia Muntafi, S.T., M.T., selaku Dosen Pembimbing,
5. Ibu Atika Ulfah Jamal, S.T., M.Eng., M.T. selaku Dosen Penguji I,
6. Bapak Harsoyo, Dr., Ir., M.Sc. selaku Dosen Penguji II,
7. Orang tua tercinta, Bapak Sri Dadi dan Ibu Sri Sutari serta Adik Rizky Agung Prakoso atas doa, motivasi, dukungan hingga tekanan sehingga penulis dapat menyelesaikan studi,
8. Seluruh keluarga besar yang selalu memberikan doa dan semangat,
9. Semua rekan dan teman-teman Jurusan Teknik Sipil Universitas Islam Indonesia, yang sudah membantu hingga selesainya Tugas Akhir ini,

10. Adhitya Vishnu Pradana, S.P.,M.Si., Dian Ayu Aristina, S.Pd., Dimas Firmansyah, S.T., dan Nindyan Agna Ramadhan, S.T.,M.T., selaku sahabat sejati yang senantiasa mendukung dan mendorong penulis agar dapat menyelesaikan tugas akhir ini.

Akhirnya, Tugas Akhir ini diharapkan dapat bermanfaat bagi berbagai pihak yang membacanya.

Wassalamu'alaikum Wr. Wb.

Yogyakarta,04 Maret 2019

Penulis,

Ardha Aga Saputra

(13511246)

DAFTAR ISI

Halaman Judul	i
Halaman Pengesahan	ii
PERNYATAAN BEBAS PLAGIASI	iii
DEDIKASI	iv
KATA PENGANTAR	v
DAFTAR ISI	vii
DAFTAR TABEL	x
DAFTAR GAMBAR	xii
DAFTAR LAMPIRAN	xvi
DAFTAR NOTASI	xvii
ABSTRAK	xx
<i>ABSTRACT</i>	xxi
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	4
1.3 Tujuan Penelitian	4
1.4 Manfaat Penelitian	5
1.5 Batasan Penelitian	5
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	8
2.1 Ringkasan Penelitian	8
2.1.1 Penelitian – Penelitian Terdahulu	8
2.1.2 Penelitian yang akan Dilakukan dan Perbandingan dengan Penelitian Sebelumnya	11
2.2 Keaslian Penelitian	14
BAB III LANDASAN TEORI	15
3.1 Gempa Bumi	15
3.2 Perkembangan Teknologi Bangunan Tahan Gempa	15
3.3 Analisis Pembebanan	16
3.3.1 Beban Mati	16
	vii

3.3.2	Beban Hidup	17
3.3.3	Beban Gempa	18
3.4	Struktur Bangunan Gedung Beraturan dan Tidak Beraturan	28
3.5	Konsep <i>Performance Based Earthquake Engineering</i> (PBEE)	28
3.6	Analisis Statik Nonlinier (<i>Pushover Analysis</i>)	28
3.7	Sendi Plastis (<i>Hinge</i>)	29
3.8	Analisis Statik Nonlinier (<i>Pushover Analysis</i>) dengan <i>Metode Capacity Spectrum</i>	31
3.8.1	Analisis Pushover Menggunakan ATC-40 Prosedur B	31
3.8.2	Kurva Kapasitas	32
3.8.3	<i>Performance Point</i> (titik kinerja)	35
3.8.4	Batasan Deformasi (<i>Drift Ratio</i>) Menurut ATC-40	36
3.8.5	Kinerja Struktur Metode ATC-40	37
3.9	Kekakuan Struktur	38
3.10	Analisis Probabilitas Kerusakan dengan Metode HAZUS	39
3.10.1	Deskripsi Model Tipe Bangunan	40
3.10.2	<i>Building Structural Fragility Parameters</i>	41
3.11	Persamaan Atenuasi	43
3.11.1	Menghitung <i>Spectral Displacement</i> (S_d) Dari Data <i>Spectral Acceleration</i> (S_a)	45
BAB IV	METODE PENELITIAN	46
4.1	Obyek Penelitian	46
4.2	Pengambilan Data	47
4.3	Program atau <i>Software</i> yang Digunakan	49
4.4	Tahapan Tugas Akhir	50
4.5	Bagan Alir Penelitian	54
BAB V	ANALISIS DAN PEMBAHASAN	55
5.1	Pembebanan Struktur	55
5.1.1	Pembebanan Struktur Pada Bangunan Utama	55
5.1.2	Pembebanan Struktur Pada Bangunan Atap	64
5.1.3	Beban Gempa Statik Ekuivalen	69

5.2 Analisis Beban Gempa Respon Spektrum	75
5.2.1 <i>Input</i> Data Respon Spektrum	75
5.2.2 Definisi Tipe Analisis Respon Spektrum	76
5.2.3 Penentuan Massa Struktur (<i>Mass Source</i>)	77
5.2.4 Partisipasi Massa	78
5.2.5 Cek Syarat V dinamik $\geq 0.85 V$ Statik	79
5.3 <i>Pushover Analysis</i>	81
5.3.1 Pendefinisian Sendi Plastis	81
5.3.2 Gaya Lateral <i>Pushover Analysis</i>	84
5.3.3 Pendefinisian <i>Pushover Load Cases</i>	85
5.3.4 <i>Running Pushover Analysis</i>	91
5.4 Hasil Analisis <i>Pushover</i>	92
5.4.1 Kurva Kapasitas	92
5.4.2 Titik Kinerja Metode <i>Capacity Spectrum</i> (ATC-40)	104
5.4.3 Level Kinerja Struktur	110
5.4.4 Mekanisme Sendi Plastis	111
5.5 Studi Kerusakan Bangunan	116
BAB VI KESIMPULAN DAN SARAN	126
6.1 Kesimpulan	127
6.2 Saran	129
DAFTAR PUSTAKA	131

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1	Perbandingan Penelitian Terdahulu dengan Penelitian yang akan Dilakukan	12
Tabel 3.1	Beban Mati yang Digunakan	17
Tabel 3.2	Beban Hidup yang Digunakan	17
Tabel 3.3	Kategori Risiko Bangunan Gedung dan Non Gedung untuk Beban Gempa	18
Tabel 3.4	Faktor Keutamaan Gempa	19
Tabel 3.5	Koefisien Situs F_a	20
Tabel 3.6	Koefisien Situs F_v	21
Tabel 3.7	Kategori Desain Seismik Berdasarkan Parameter Respons Percepatan Pada Periode Pendek (S_{DS})	22
Tabel 3.8	Kategori Desain Seismik Berdasarkan Parameter Respons Percepatan Pada Periode 1 Detik (S_{D1})	22
Tabel 3.9	Definisi Syarat Kategori Desain Seismik	23
Tabel 3.10	Faktor R, C_d , dan Ω_0 untuk Sistem Penahan Gaya Gempa	25
Tabel 3.11	Koefisien untuk Batas Atas Pada Periode yang Dihitung	26
Tabel 3.12	Nilai Parameter Periode Pendekatan C_t dan x	26
Tabel 3.13	<i>Deformation Limits</i>	36
Tabel 3.14	Kondisi Bangunan Setelah Terjadi Gempa dan Kategori Bangunan pada Tingkat Kinerja Struktur	38
Tabel 3.15	Model Tipe Bangunan	40
Tabel 4.1	Tipe dan Dimensi Kolom	48
Tabel 4.2	Tipe dan Dimensi Balok	48
Tabel 4.3	Tipe dan Dimensi Pelat	49
Tabel 5.1	Perhitungan Berat Kolom Pada Tingkat 2	56
Tabel 5.2	Rekapitulasi Berat Kolom Pada Setiap Tingkat	57
Tabel 5.3	Perhitungan Berat Balok Pada Tingkat 2	57
Tabel 5.4	Rekapitulasi Berat Balok Pada Setiap Tingkat	58

Tabel 5.5	Beban Mati Pelat	58
Tabel 5.6	Beban Mati Pelat Atap	58
Tabel 5.7	Berat Pelat Pada Tingkat 2	59
Tabel 5.8	Rekapitulasi Berat Pelat Pada Setiap Tingkat	59
Tabel 5.9	Berat Dinding Pada Tingkat 2	60
Tabel 5.10	Rekapitulasi Berat Dinding Pada Setiap Tingkat	62
Tabel 5.11	Beban Hidup Pada Setiap Tingkat	62
Tabel 5.12	Berat Beban Hidup Pada Tingkat 2	63
Tabel 5.13	Rekapitulasi Berat Beban Hidup Pada Setiap Tingkat	63
Tabel 5.14	Beban Penutup Atap	65
Tabel 5.15	Beban Hujan Pada Atap	67
Tabel 5.16	Hasil Reaksi Tumpuan Pada Bangunan Atap	68
Tabel 5.17	Berat Seismik Efektif	69
Tabel 5.18	Perhitungan Nilai Gaya Gempa Horizontal	75
Tabel 5.19	<i>Mass Participating ratio</i>	79
Tabel 5.20	Nilai V dinamik Struktur	79
Tabel 5.21	Data Kurva Kapasitas Arah x	93
Tabel 5.22	Data Kurva Kapasitas Arah y	94
Tabel 5.23	Kekakuan Kolom (Muto) pada Posisi Sumbu Lemah Struktur	101
Tabel 5.24	Kekakuan Kolom (Muto) pada Posisi Sumbu Kuat Struktur	104
Tabel 5.25	<i>Output Capacity Spectrum</i> dan <i>Demand Spectrum</i> Arah x	107
Tabel 5.26	<i>Output Capacity Spectrum</i> dan <i>Demand Spectrum</i> Arah y	108
Tabel 5.27	<i>Performance Point</i> Metode ATC-40	110
Tabel 5.28	Keterangan Jenis Warna Pada Sendi Plastis	112
Tabel 5.29	Model Tipe Bangunan Yang Digunakan	117
Tabel 5.30	Hasil Persamaan Atenuasi Joyner-Boore-Fumal 1997	121
Tabel 5.31	Nilai S_a	122
Tabel 5.32	Nilai S_d	123
Tabel 5.33	Probabilitas Kerusakan Gedung	125
Tabel 5.34	<i>Cummulative Probability</i>	125

DAFTAR GAMBAR

Gambar 3.1 Peta Spektrum Respons Percepatan Periode 0,2 Detik (S_5)	20
Gambar 3.2 Peta Spektrum Respons Percepatan Periode 1,0 Detik (S_1)	20
Gambar 3.3 Spektrum Respons Desain	24
Gambar 3.4 Mekanisme Terjadinya Sendi Plastis Pada Struktur Gedung Akibat Beban Gempa	29
Gambar 3.5 Kurva Hubungan Gaya Dan Perpindahan Serta Karakteristik Sendi Plastis	30
Gambar 3.6 Kurva Kapasitas (<i>Capacity Curve</i>)	32
Gambar 3.7 Faktor Partisipasi Modal dan Modal Koefisien Massa	33
Gambar 3.8(a) Perubahan Format Kurva Kapasitas Kurva Kapasitas Format Standard	34
Gambar 3.8(b) Perubahan Format Kurva Kapasitas Kurva Kapasitas Format ADRS	34
Gambar 3.9(a) Perubahan Format Respons Spektra Respon Spektra Format Standard	35
Gambar 3.9(b) Perubahan Format Respons Spektra Respon Spektra Format ADRS	35
Gambar 3.10 Penentuan <i>Performance Point</i>	36
Gambar 3.11 Ilustrasi Keruntuhan Gedung	37
Gambar 3.12 <i>Building Structural Fragility – High Code Seismic Design Level</i>	41
Gambar 3.13 <i>Building Structural Fragility – Moderate Code Seismic Design Level</i>	42
Gambar 3.14 <i>Building Structural Fragility – Low Code Seismic Design Level</i>	42
Gambar 3.15 Kurva Fungsi Atenuasi Joyner – Boore – Fumal Tahun 1997	44
Gambar 3.16 Nilai – Nilai Koefisien Atenuasi Joyner – Boore – Fumal 1997	44
Gambar 4.1 Denah Tipikal Gedung Laboratorium Fakultas Kedokteran Universitas Islam Indonesia	46
Gambar 4.2 Denah Potongan Gedung Laboratorium Fakultas Kedokteran Universitas Islam Indonesia	47

Gambar 4.3	Desain Bangunan Atap dengan ETABS 9.6	49
Gambar 4.4	Desain Bangunan Utama dengan SAP2000 Versi 15.1	50
Gambar 4.5	Bagan Alir Penelitian	54
Gambar 5.1	Pembagian Berat Pada Setiap Tingkat Bangunan Utama	55
Gambar 5.2	Tampak Atas Struktur Atap	64
Gambar 5.3	Bentuk Potongan Pada Struktur Atap	64
Gambar 5.4	Pendistribusian Beban Mati Penutup Atap Pada ETABS	65
Gambar 5.5	Pendistribusian Beban Hidup Pekerja Pada ETABS	66
Gambar 5.6	Pendistribusian Beban Air Hujan Pada ETABS	67
Gambar 5.7	Grafik Respon Spektrum	72
Gambar 5.8	Membuat <i>Response Spectrum Function</i>	76
Gambar 5.9	Mengisi Parameter Respon Spektrum	76
Gambar 5.10	<i>Response Spectrum Cases RSPX</i>	77
Gambar 5.11	<i>Response Spectrum Cases RSPY</i>	77
Gambar 5.12	Mendefinisikan <i>Mass Source</i>	78
Gambar 5.13	<i>Response Spectrum Cases RSPX (Scale Factor)</i>	80
Gambar 5.14	<i>Response Spectrum Cases RSPX (Scale Factor)</i>	81
Gambar 5.15	Vdinamik Struktur	81
Gambar 5.16	<i>Input Hinge</i> Pada Balok	82
Gambar 5.17	Pendefinisian Sendi Plastis pada Balok	82
Gambar 5.18	<i>Input Hinge</i> Pada Kolom	83
Gambar 5.19	Pendefinisian Sendi Plastis pada Kolom	83
Gambar 5.20	<i>Define Static Load Pattern</i>	84
Gambar 5.21	<i>User Seismic Loading (EQX)</i>	84
Gambar 5.22	<i>User Seismic Loading (EQY)</i>	85
Gambar 5.23	Pengaturan Pushover Beban Gravitasi	86
Gambar 5.24	<i>Load Application Control For Nonlinear Analysis (GRAV)</i>	86
Gambar 5.25	<i>Results Sved For Nonlinear Static Load Cases (GRAV)</i>	87
Gambar 5.26	<i>Nonlinear Parameter (GRAV)</i>	87
Gambar 5.27	Pengaturan Pushover Beban PUSHX	88
Gambar 5.28	<i>Load Application Control For Nonlinear Analysis (PUSHX)</i>	88

Gambar 5.29 <i>Results Sved For Nonlinear Static Load Cases (PUSHX)</i>	89
Gambar 5.30 <i>Nonlinear Parameter (PUSHX)</i>	89
Gambar 5.31 Pengaturan Pushover Beban PUSHY	90
Gambar 5.32 <i>Load Application Control For Nonlinear Analysis (PUSHY)</i>	90
Gambar 5.33 <i>Results Sved For Nonlinear Static Load Cases (PUSHY)</i>	91
Gambar 5.34 <i>Nonlinear Parameter (PUSHY)</i>	91
Gambar 5.35 <i>Running Pushover Analysis</i>	92
Gambar 5.36 Kurva Kapasitas Arah x	93
Gambar 5.37 Kurva Kapasitas Arah y	94
Gambar 5.38 Perbandingan Kurva Kapasitas Arah x dan Arah y	96
Gambar 5.39 Sumbu Kuat dan Sumbu Lemah Struktur	96
Gambar 5.40 Potongan Portal pada Posisi Sebagai Sumbu Lemah Struktur	97
Gambar 5.41 Ukuran Balok T	97
Gambar 5.42 Nilai Konstanta k pada Sumbu Lemah Struktur	99
Gambar 5.43 Potongan Portal pada Posisi Sebagai Sumbu Kuat Struktur	101
Gambar 5.44 Nilai Konstanta k pada Posisi Sumbu Kuat Struktur	102
Gambar 5.45 <i>Define Pushover Parameters for ATC40 Capacity Spectrum</i>	105
Gambar 5.46 <i>Parameter for ATC-40 Capacity Spectrum (PUSHX-PUSHY)</i>	105
Gambar 5.47 <i>Capacity Spectrum Pushover Arah x Hasil SAP2000</i>	106
Gambar 5.48 <i>Capacity Spectrum Pushover Arah y Hasil SAP2000</i>	106
Gambar 4.49 <i>Capacity Spectrum dan Demand Spectrum Arah x</i>	108
Gambar 4.50 <i>Capacity Spectrum dan Demand Spectrum Arah y</i>	109
Gambar 5.51 Step Awal Terjadinya Sendi Plastis Arah x (Step 14)	112
Gambar 5.52 Awal Terjadinya Sendi Plastis Pada Kolom Arah x (Step 15)	113
Gambar 5.53 Awal Terjadi Kelelehan Pada Struktur Arah x (Step 39)	113
Gambar 5.54 Struktur Mulai <i>Collapse</i> Arah x (Step 67)	114
Gambar 5.55 Step Awal Terjadinya Sendi Plastis Arah y (Step 16)	114
Gambar 5.56 Awal Terjadinya Sendi Platsis Pada Kolom Arah y (Step 18)	115
Gambar 5.57 Awal Terjadi Kelelehan Pada Struktur Arah y (Step 36)	115
Gambar 5.58 Struktur Mulai <i>Collapse</i> Arah y (Step 78)	116
Gambar 5.59 Nilai Vs Berdasarkan USGS (<i>United Stated Geological Survey</i>)	119

Gambar 5.60 <i>Response Cuve</i> Dari S_a Dan S_d	123
Gambar 5.61 <i>Capacity Spectrum</i>	124
Gambar 5.62 Perpotongan Antara <i>Response Curve</i> Dan <i>Capacity Spectrum</i>	124
Gambar 5.63 Probabilitas Kerusakan Bangunan	126

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1 Denah Balok Lantai 2	135
Lampiran 2 Denah Balok Lantai 3	136
Lampiran 3 Denah Balok Lantai 4	137
Lampiran 4 Denah Balok Atap	138
Lampiran 5 Denah Kolom Miring	139
Lampiran 6 Denah Kolom Lantai 1	140
Lampiran 7 Denah Kolom Lantai 2	141
Lampiran 8 Denah Kolom Lantai 3	142
Lampiran 9 Denah Kolom Lantai 4	143
Lampiran 10 Denah Kolom Atap	144
Lampiran 11 Detail Kolom	145
Lampiran 12 Denah Pelat Lantai 2	146
Lampiran 13 Denah Pelat Lantai 3	147
Lampiran 14 Denah Pelat Lantai 4	148
Lampiran 15 Denah Pelat Atap	149
Lampiran 16 Detail Pembesian Sloof dan Balok	150

DAFTAR NOTASI

ADRS	= <i>Acceleration Displacement Response Spectrum</i>
a_{pi}, d_{pi}	= Percepatan (<i>acceleration</i>) pada titik maksimum
ATC-40	= <i>Applied Technology Council</i>
a_y, d_y	= Percepatan (<i>acceleration</i>) pada titik leleh
β_{eff}	= Perhitungan Redaman Viskous Efektif
β_{ds}	= Log Normal Standar Deviasi dari Spektral Displacement Tingkat Kerusakan
Be	= Panjang Balok Efektif
C	= Koefisien Gempa
C_a	= Percepatan Tanah Puncak
C_d	= Faktor Pembesaran Defleksi
CP	= <i>Collapse Prevention</i>
Cm	= Koefisien Kekakuan Muto
C_{r1}	= Koefisien Risiko Terpetakan 1 Detik
C_s	= Nilai Koefisien Respon Seismik
C_t	= Parameter Periode Pendekatan
C_v	= Nilai Koefisien Gempa
D	= Beban Mati
δ_t	= Displacement Total
E	= Pengaruh Beban Gempa
E_c	= Modulus Elastisitas Beton
F_a	= Faktor Percepatan pada Getaran Periode Pendek
FEMA	= <i>Federal Emergency Management Agency</i>
f'_c	= Tegangan Desak Beton (MPa)
f_v	= Tegangan Leleh Baja (MPa)
F_1	= Faktor Percepatan pada Getaran Periode 1 Detik
g	= Percepatan Gravitasi (m/dt^2)

<i>HAZUS</i>	= Hazard US
H_i	= Tinggi (m) dari Dasar Sampai Tingkat ke-i
I_e	= Faktor Keutamaan Gempa
IO	= <i>Immediate Occupancy</i>
ib	= Inersia Balok T
K	= Faktor Modifikasi Redaman
k	= Kekakuan Bangunan
kb	= Konstanta k Balok
kc	= Konstanta k Kolom
Km	= Kekakuan Kolom Muto
L	= Beban Hidup
LS	= <i>Life Safety</i>
M3	= Momen Sumbu 3
N	= Jumlah Lantai
PBSE	= <i>Performance Based Earthquake Evaluation</i>
PBSD	= <i>Performance Based Earthquake Design</i>
PF ₁	= <i>Modal Participation</i>
PM2M3	= Gaya Aksial dan Momen pada Kolom
Qd	= Beban Mati Merata per Meter
R	= Koefisien Modifikasi Respons
s	= Jarak Tulangan (mm)
S_I	= Percepatan Batuan Dasar pada Periode Pendek 1 Detik (g)
S_a	= Spektrum Respons Percepatan Desain
S_{ai}	= <i>Spectral Acceleration</i> pada Periode ke-i
S_{DI}	= Percepatan Spektrum Respons Desain Panjang
S_{di}	= Spectral Displacement pada Periode ke-i
S_{Ds}	= Percepatan Spektrum respons Desain Periode Pendek
SF	= <i>Safety Factor</i>
S_{M1}	= Respon Percepatan Panjang
S_{MS}	= Respon Percepatan Pendek
S_s	= Percepatan Batuan Dasar pada Periode Pendek (g)

T	= Periode Getar Fundamental Struktur (Detik)
T_a	= Periode Fundamental Pendekatan (Detik)
T_c	= Periode dari Hasil Komputer (SAP2000) (Detik)
V	= Gaya Geser Dasar
V_{maks}	= Gaya Geser Maksimum
V_s	= Kecepatan Gelombang Geser pada 30 m (m/s)
W	= Berat Mati Bangunan di Tambah Beban Hidup
W_i	= Bagian Berat Seismik Efektif Total Struktur (W)
W_i/g	= Massa pada Level-i
$W_{t_{xy}}$	= Berat Total Bangunan arah x dan arah y
α_1	= <i>Modal Mass Coefficient</i>
Δ_{atap}	= Perpindahan Atap

ABSTRAK

Daerah Istimewa Yogyakarta adalah salah satu daerah yang ditetapkan sebagai daerah rawan gempa. Gempa bumi di Yogyakarta yang terjadi pada 27 Mei 2006 menimbulkan banyak korban jiwa dan telah merusak banyak bangunan. Hal tersebut menjadi kekhawatiran apakah bangunan lain yang termasuk dengan fasilitas publik dan bangunan penting yang berada di daerah rawan gempa dapat bertahan jika terjadi gempa atau gempa yang sama terulang kembali, maka evaluasi kinerja struktur dianggap perlu dilakukan ditambah dengan dapat diketahuinya probabilitas kerusakan bangunan tersebut maka dapat menjadi upaya untuk mencegah terjadinya korban yang banyak dan juga sarana untuk melakukan mitigasi atau perkuatan terhadap gedung yang bersangkutan jika terjadi gempa.

Penelitian ini dievaluasi kinerja strukturnya dan dihitung probabilitas tingkat kerusakan akibat gempa dari gedung Laboratorium Fakultas Kedokteran Universitas Islam Indonesia. Evaluasi kinerja struktur dengan *pushover analysis* metode *capacity spectrum* menurut ATC-40 dan menghitung tingkat kerusakan gedung tersebut berdasarkan metode HAZUS. Hasil analisis *pushover* untuk mengetahui kurva kapasitas, target perpindahan gedung, kinerja struktur dan skema keruntuhan gedung. Hasil analisis tingkat kerusakan didapat nilai probabilitas kerusakan pada setiap level kerusakan bangunan apabila terjadi gempa, dengan skenario gempa Yogyakarta tanggal 27 Mei 2006.

Hasil analisis menunjukkan level kinerja gedung pada arah-x dan arah-y dengan parameter *Maximum Total Drift Ratio* adalah *Immediate Occupancy* dan untuk *Maximum Inelastic Drift Ratio* adalah *Immediate Occupancy*. Dapat disimpulkan bahwa bangunan masih mampu menahan gempa yang terjadi, resiko korban jiwa manusia sangat kecil. Dalam kaitannya dengan probabilitas tingkat kerusakan gedung nilai total *vulnerability* sebesar 2,54% dengan pembagian tingkat kerusakan *slight* dengan probabilitas sebesar 2,28%, mengalami kerusakan tingkat *moderate* dengan probabilitas sebesar 0,26%, mengalami kerusakan tingkat *extensive* dengan probabilitas sebesar 0,0007%, mengalami kerusakan tingkat *complete* dengan probabilitas sebesar 0,0003%. Probabilitas bangunan tidak mengalami kerusakan sama sekali adalah sebesar 97,46%, sehingga dapat dikatakan bahwa bangunan sangat aman terhadap terjadinya kerusakan akibat gempa.

Kata Kunci: Gedung Laboratorium, Gempa Bumi, *Pushover*, Level Kinerja, Probabilitas kerusakan.

ABSTRACT

Special Region of Yogyakarta is one of the areas designated as earthquake areas. The Yogyakarta earthquake that occurred on May 27, 2006 caused many casualties and damaged many buildings. This case is becoming a concern whether other buildings including public facilities and important buildings in earthquake prone areas can survive if the same earthquake or earthquake recurs, then the performance evaluation of the structure is deemed necessary to do so that the probability of damage to the building can be identified. an effort to prevent the occurrence of many casualties and also a means to make repairs or reinforcement of the relevant building in the event of an earthquake.

This study evaluated its performance of the structure and calculate the probability of the level of earthquake damage from the Laboratory building of the Faculty of Medicine, Islamic University of Indonesia. Structure performance evaluation by pushover analysis of capacity spectrum method according to ATC-40 and calculating the level of damage to the building based on the HAZUS method. The results of pushover analysis to find out the capacity curve, the target of building displacement, the performance of the structure and the scheme of building collapse. The results of the damage level analysis obtained the probability of damage at each level of building damage in the event of an earthquake, with the Yogyakarta earthquake scenario on May 27, 2006.

The analysis results show the building performance level in the x-direction and y-direction with the Maximum Total Drift Ratio parameter is Immediate Occupancy and for Maximum Inelastic Drift Ratio is Immediate Occupancy. It can be concluded that buildings are still able to withstand earthquakes that occur, the risk of human casualties is very small. In relation to the probability of building damage the value of the total vulnerability is 2,54% with a slight damage level distribution with a probability of 2,28%, a moderate level damage with a probability of 0,26%, extensive damage with a probability of 0,0007%, experience complete level damage with a probability of 0,0003%. The buildings probability have no damage at all reached 97,46%, which means that the building is very safe against earthquake damage.

Keywords : *Laboratory Building, Earthquake, Pushover, Performance Level, Damage Probability.*

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Indonesia merupakan negara yang berada di wilayah jalur gempa Pasifik (*Circum Pasific Earthquake Belt*) dan jalur gempa Asia (*Trans Asiatic Earthquake Belt*) sehingga sangat berpotensi mengalami gempa bumi. Sebagian besar wilayah Indonesia adalah daerah rawan terhadap gempa. Daerah Istimewa Yogyakarta adalah salah satu daerah rawan gempa. Gempa bumi di Yogyakarta yang terjadi pada 27 Mei 2006 menimbulkan banyak korban jiwa dan telah merusak banyak bangunan seperti rumah-rumah penduduk, candi, bangunan perkantoran, rumah sakit, serta akses jalan menjadi terhambat karena ada beberapa jembatan yang runtuh.

Hal tersebut menjadi kekhawatiran apakah bangunan lain yang termasuk fasilitas publik dan bangunan penting yang berada di daerah rawan gempa dapat bertahan jika terjadi gempa atau gempa yang sama terulang lagi (Satyarno, 2010).

Sehubungan dengan adanya potensial kerusakan bangunan akibat gempa maka diperlukan evaluasi kekuatan struktur pada bangunan yang sudah dibangun. Evaluasi bangunan tidak hanya dilakukan pasca gempa, namun perlu upaya mitigasi untuk meminimalkan dampak yang ditimbulkan akibat bencana gempa. Sehingga perlu dilakukan evaluasi kinerja seismik pada bangunan yang sudah terbangun atau eksisting, hal ini merupakan langkah yang tepat dalam penanggulangan dampak bencana gempa.

Tavio (2018) menyatakan bahwa pada saat ini metode perencanaan bangunan tahan gempa telah beralih dari berdasar kekuatan (*force based design*) menuju berdasarkan kinerja (*performance based design*). Perencanaan berbasis kinerja sangat penting karena sasaran kinerja bangunan terhadap gempa dinyatakan dengan jelas. Sasaran kinerja gempa ditentukan dari tingkat kinerja struktur. Tingkatan kinerja struktur dapat diketahui dengan melihat tingkat kerusakan pada struktur saat terkena gempa rencana dengan periode ulang tertentu, oleh karenanya tingkat kinerja struktur akan selalu berhubungan dengan

biaya perbaikan terhadap bangunan tersebut. Dalam kaitannya desain berbasis kinerja biasanya kinerja struktur didesain sesuai dengan tujuan dan kegunaan suatu bangunan, dengan pertimbangan faktor ekonomis terhadap perbaikan bangunan saat terjadi gempa tanpa mengesampingkan keselamatan terhadap pengguna bangunan.

Selain upaya desain berbasis kinerja kemudian dievaluasi kinerja struktur bangunan tersebut, terdapat cara lain yang berguna untuk upaya mitigasi bencana gempa dan dapat mengurangi banyak korban akibat gempa yaitu dengan memprediksi probabilitas tingkat kerusakan akibat gempa pada tiap bangunan atau gedung guna melihat seberapa besar peluang kerusakan pada bangunan tersebut bila terkena gempa rencana. Di negara-negara maju upaya untuk memprediksi probabilitas tingkat kerusakan bangunan akibat gempa sudah banyak dilakukan.

Masalah lain yang menjadi pertimbangan adalah mengenai beban gempa dimana semakin lama, semakin meningkat sehingga perlu adanya pembaruan peraturan pembebanan gempa setiap waktu tertentu. SNI 1726-2012 merupakan peraturan gempa yang merupakan pembaruan dari peraturan SNI 1726-2002. Dengan adanya SNI 1726-2012 maka otomatis peraturan SNI 1726-2002 sudah tidak berlaku. Tetapi bangunan yang sudah terbangun dengan peraturan SNI 1726-2002 akan berpotensi mengalami kegagalan struktur akibat gempa yang terjadi sehingga dapat membahayakan penghuni yang ada didalam dan disekitar bangunan tersebut.

Penelitian ini difokuskan untuk melakukan evaluasi kinerja struktur pada struktur bangunan gedung yang sudah berdiri (kondisi eksisting) dari Gedung Laboratorium Fakultas Kedokteran Universitas Islam Indonesia. Data terkait ukuran struktur hingga material struktur berdasarkan data yang diperoleh berupa *as built drawing*. Lokasi gedung tersebut berada di kompleks kampus terpadu Universitas Islam Indonesia, Jalan Kaliurang km 14,5 Sleman, Yogyakarta.

Gedung ini dibangun sekitar tahun 2012 dimana gedung ini memiliki 5 tingkat. Perencanaan gedung tersebut masih memakai peraturan gempa yang lama. Sehingga menjadi sangat menarik jika dilakukan evaluasi pada struktur

tersebut dengan peraturan pembeban gempa yang baru yaitu SNI 1726-2012, perubahan tersebut mengakibatkan perubahan parameter berupa desain risiko gempa yang jauh lebih besar dari peraturan lama.

Evaluasi kinerja struktur yang dilakukan adalah dengan analisa *pushover*. Analisa *pushover* merupakan analisa statik nonlinier berguna untuk mengetahui perilaku keruntuhan suatu bangunan atau struktur. Analisa dilakukan dengan memberikan suatu pola beban lateral statik pada struktur, yang kemudian secara bertahap ditingkatkan dengan faktor pengali hingga target perpindahan bangunan tercapai.

Dilatarbelakangi hal tersebut maka akan dilakukan evaluasi kinerja dengan metode *pushover*. Dalam analisis *pushover* akan didapatkan kurva kapasitas, kurva tersebut menunjukkan hubungan antara gaya geser dasar (*base shear*) dan perpindahan atap (*displacement*) akibat beban gempa lateral yang diberikan pada struktur dengan pola pembebanan tertentu sampai kondisi ultimit. Kurva kapasitas akan memperlihatkan suatu kondisi linier sebelum mencapai kondisi leleh dan selanjutnya berperilaku non-linier. Sehingga akan terbentuk pola keruntuhan atau sendi plastis pada struktur balok atau kolom bangunan (Pranata, 2006)

Kemudian dari kurva kapasitas akan didapatkan nilai tingkat kinerja struktur dengan metode *capacity spectrum* menurut ATC-40 berdasarkan kriteria simpangan total maksimum (*maximum total drift ratio*) dan simpangan inelastik maksimum (*maximum inelastic drift ratio*).

Setelah dilakukan evaluasi kinerja struktur maka akan dihitung probabilitas tingkat kerusakan. Dalam menghitung tingkat kerusakan metode yang digunakan adalah dengan metode HAZUS. Digunakan karena merupakan salah satu upaya pengurangan risiko bencana akibat gempa. Metode ini menghitung seberapa besar tingkat probabilitas pada keempat kategori kerusakan (*slight, moderate, extensive, complete*) berdasarkan tipe bangunan, *seismic design code*, dan *capacity curve* bangunan. Dengan diketahuinya seberapa besar probabilitas kerusakan pada bangunan, dapat digunakan dalam upaya untuk mitigasi bencana.

Hasil evaluasi tersebut juga diharapkan dapat mengetahui apakah dengan menggunakan peraturan gempa terbaru struktur bangunan masih mampu menahan gempa. Selain itu dari hasil analisis tingkat kerusakan akan didapat nilai probabilitas kerusakan bangunan tersebut apabila terjadi gempa, dengan skenario gempa Yogyakarta tanggal 27 Mei 2006.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan pada latar belakang diatas maka, masalah yang menjadi fokus dalam penelitian adalah sebagai berikut ini.

1. Bagaimana kurva kapasitas hasil dari analisis *pushover* pada bangunan gedung Laboratorium Fakultas Kedokteran Universitas Islam Indonesia ?
2. Berapakah titik kinerja (*performance point*) dari hasil analisis *pushover* struktur bangunan gedung tersebut ?
3. Bagaimana level kinerja seismik bangunan sesuai metode ATC-40 ?
4. Bagaimana mekanisme sendi plastis gedung tersebut setelah dianalisis dengan *pushover* ?
5. Berapakah probabilitas kerusakan bangunan saat ditinjau menggunakan metode *HAZUS* ?

1.3 Tujuan Penelitian

Berdasarkan rumusan masalah, tujuan dilakukannya penelitian adalah sebagai berikut ini.

1. Mendapatkan bentuk kurva kapasitas pada bangunan gedung Laboratorium Fakultas Kedokteran Universitas Islam Indonesia,
2. Mendapatkan titik kinerja (*performance point*) dari hasil analisis *pushover*,
3. Mengetahui level kinerja seismik bangunan sesuai metode ATC-40,
4. Menentukan mekanisme sendi plastis yang terjadi, dan
5. Mengetahui probabilitas kerusakan bangunan tersebut saat ditinjau menggunakan metode *HAZUS*.

1.4 Manfaat Penelitian

Berdasarkan tujuan penelitian, maka diharapkan penelitian dapat memberikan manfaat sebagai berikut ini.

1. Bagi penulis, menambah ilmu dan pemahaman akan analisis statik nonlinier dan menghitung probabilitas kerusakan pada struktur gedung. Kemudian menambah pemahaman akan aplikasi program komputer ETABS dan SAP2000,
2. Bagi pembaca, memberikan wawasan dan ilmu pengetahuan mengenai perilaku struktur bangunan terhadap gempa dengan analisis *pushover* dan menjadi bahan referensi jika terdapat penelitian selanjutnya terkait analisis *pushover* dan tingkat kerusakan bangunan,
3. Bagi gedung yang menjadi bahan *study case*, diharapkan penelitian ini dapat menjadi salah satu referensi kaitannya dalam perbaikan, perkuatan, dan rehabilitasi,

1.5 Batasan Masalah

Batasan masalah pada penelitian dijelaskan sebagai berikut ini.

1. Bangunan yang diteliti adalah gedung Laboratorium Fakultas Kedokteran Universitas Islam Indonesia,
2. Fungsi gedung adalah sebagai Laboratorium,
3. Struktur gedung merupakan gedung beton bertulang dengan bentuk denah yang beraturan,
4. Beban yang dihitung meliputi beban mati (*dead load*), beban hidup (*live load*), dan beban gempa (*earthquake load*) pada bangunan utama. Untuk bangunan atap ditambahkan beban pekerja (*live worker*) dan beban hujan (*rain load*),
5. Jenis tanah diasumsikan adalah tanah keras,
6. Struktur yang digunakan struktur beton dijelaskan sebagai berikut ini.
 - a. Struktur portal beton bertulang,
 - b. Pelat lantai beton bertulang,

- c. Kuda-kuda pada atap terbuat dari beton bertulang menggunakan kolom berbentuk miring dengan kemiringan 45° ,
7. Data material bahan ($f'c$ dan fy) digunakan berdasarkan data *as built drawing* dari gedung Laboratorium Fakultas Kedokteran Universitas Islam Indonesia,
8. Peraturan yang digunakan sebagai berikut ini.
 - a. Beban Minimum untuk Perancangan Bangunan Gedung dan Struktur lain (SNI 1727-2013),
 - b. Pedoman Perencanaan Pembebanan untuk Rumah dan Gedung (SKBI 1.3.53.1987)
 - c. Tata Cara Perencanaan Ketahanan Gempa untuk Struktur Bangunan Gedung dan Non Gedung (SNI 1726-2012),
 - d. *The Federal Emergency Management Agency 356 – Prestandard and Commentary For The Seismic Rehabilitation Of Buildings* (FEMA-356),
 - e. *The Federal Emergency Management Agency HAZUS – Multy Hazard (FEMA HAZUS-MH)*,
9. Kriteria kinerja struktur gedung menggunakan peraturan *Applied Technology Council* (ATC-40),
10. Perhitungan hanya sampai menghitung probabilitas tingkat kerusakan bangunan pada setiap level kerusakan,
11. Tidak meninjau segi ekonomis, estetika, serta arsitektur bangunan,
12. Lift dan tangga tidak dimodelkan,
13. Struktur yang dianalisis adalah struktur bangunan utama berupa kolom, balok, pelat, dan untuk struktur atap dianalisis berupa kolom miring dan balok,
14. Analisis pada penelitian adalah sebagai berikut ini,
 - a. Pemodelan untuk bangunan utama gedung secara 3D dengan menggunakan program SAP2000 Versi 15.1 dan untuk pemodelan bangunan atap secara 3D dengan menggunakan ETABS 9.6,
 - b. Tumpuan bangunan utama dan atap diasumsikan sebagai jepit,

- c. Sistem struktur adalah *open frame*,
- d. Balok dan kolom diasumsikan sebagai *frame*,
- e. Pelat lantai dimodelkan sebagai *shell*,
- f. Daktilitas bangunan dianggap elastik,
- g. Jumlah tingkat yang dianalisis adalah 5 tingkat dengan 1 atap dengan kuda-kuda beton bertulang yang dimodelkan secara terpisah,
- h. Pelat pada tingkat ke-5 dibuat mendatar dikarenakan memudahkan dalam melakukan *input* serta analisis gempa statik ekuivalen dan juga untuk menentukan titik kontrol untuk *pushover analysis*,
- i. Gaya lateral yang ditinjau berupa beban gempa horizontal sedangkan beban angin diabaikan,
- j. Bangunan atap dimodelkan secara terpisah dengan bangunan utama secara 3D dengan program ETABS 9.6,
- k. Analisis yang digunakan adalah analisis *pushover* statik nonlinier dengan program SAP2000 Versi 15.1,
- l. Analisis *pushover* yang digunakan sesuai ATC-40 prosedur B,
- m. Pendefinisian sendi plastis (*Hinges properties*) dalam SAP2000 Versi 15.1 input secara otomatis berdasarkan FEMA 356,
- n. Dalam kaitanya dengan tingkat kerusakan data gempa yang digunakan berdasarkan skenario gempa Yogyakarta tahun 2006,
- o. Probabilitas kerusakan bangunan dihitung secara manual dengan bantuan *software Microsoft Excel 2010*.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

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 dapat diambil kesimpulan yang berkesinambungan. Berikut adalah rangkuman penelitian – penelitian terdahulu dan penelitian yang akan dilakukan.

2.1.1 Penelitian – Penelitian Terdahulu

Berikut beberapa kutipan hasil penelitian yang berhubungan dengan penelitian yang akan dilakukan.

1. Analisis Struktur Gedung POP Hotel Terhadap Beban Gempa Dengan Metode *Pushover Analysis*

Penelitian ini bersumber dari *journal* dari Arifin Zainal, Suyadi, Sebayang Surya (2015). Analisis yang dilakukan menggunakan program SAP 2000 Versi 14. Lokasi penelitian berada di Bandar Lampung. Gedung POP Hotel memiliki 8 lantai yang tipikal dengan tambahan *basement*, *ground*, dan *roof*.

Melalui analisis statik nonlinier (*pushover*) dinilai memberikan hasil yang paling representatif terhadap perilaku dan kinerja bangunan. Hasil analisis yang menjadi perhatian yaitu *performance* bangunan dan pola keruntuhan bangunan. Dalam menentukan *performance point* bangunan, program SAP 2000 Versi 14 melakukan iterasi mengikuti prosedur B, ATC-40. Iterasi yang dilakukan berdasarkan kurva *demand* elastik (*damping ratio* 5%)

Hasil penelitian adalah sebagai berikut ini.

- a. Analisis *pushover* arah x bangunan mengalami kerusakan level kinerja *Immediate Occupancy* dengan nilai perpindahan sebesar 0,21 meter.
- b. Analisis *pushover* arah y bangunan mengalami kerusakan dengan level kinerja *Damage Control* dengan perpindahan sebesar 0,47 meter dan gedung mengalami keruntuhan *beam sway*.

2. Evaluasi Kinerja Seismik Laboratorium Seni Musik dan Tari Universitas Negeri Yogyakarta dengan Analisis *Pushover* Metode *Capacity Spectrum*.

Penelitian ini bersumber dari tugas akhir yang dilakukan oleh Ikramullah (2017). Gedung laboratorium seni musik dan tari UNY merupakan gedung berjumlah empat lantai. Bangunan tersebut untuk fasilitas pendidikan. Ukuran dimensi dan mutu beton serta baja mengikuti denah *as built drawing* dari gedung tersebut. Pemodelan dilakukan dengan bantuan program SAP 2000 Versi 18.

Dalam analisisnya menggunakan metode analisis *pushover*. Tujuan dilakukannya penelitian ini adalah untuk mengetahui kurva kapasitas, target perpindahan gedung tersebut, kinerja struktur menurut ATC-40, dan skema keruntuhan gedung tersebut. Dalam menentukan titik kinerja gedung digunakan metode *capacity spectrum* yang mengacu pada ATC-40.

Hasil penelitian adalah sebagai berikut ini.

- a. Besar gaya lateral maksimum dan *displacement* untuk arah-x sebesar 2426,623 KN dan 0,23465 m, dan untuk arah-y sebesar 2195,849 KN dan 0,2098 m.
 - b. Nilai *performance point* untuk arah-x adalah $V = 2397,681$ KN, $D = 0,209$ m, $Sa = 0,185$ g, dan $Sd = 0,192$ m dan untuk arah-y adalah $V = 2214,057$ KN, $D = 0,226$ m, $Sa = 0,17$ g, dan $Sd = 0,206$ m.
 - c. Sendi plastis terjadi pada balok step ke-1 di kedua arah, untuk sendi plastis pada kolom terjadi pada step ke-3 arah-x dan step ke-2 arah-y. struktur mulai leleh pada step ke-15 untuk arah-x dan step ke-9 untuk arah-y.
 - d. Level kinerja gedung baik arah-x maupun arah-y dengan parameter *maximum total drift ratio* dan *maximum inelastic drift ratio* masuk dalam kategori *damage control*. Setelah terjadi gempa gedung tidak mengalami kerusakan yang signifikan dan dapat langsung digunakan.
3. Penilaian Kerusakan dan Peluang Kerugian Bangunan Beton Bertulang Karena Skenario Gempa Yogyakarta dengan Analisis *Pushover* dan Hazus
- Pada penelitian ini bersumber dari Jurnal luar Negeri (*MATEC Web Conferences*) oleh Muntafi, Faraodi, Asroni (2018). Bangunan yang diteliti adalah

gedung perkuliahan berlokasi di Yogyakarta. Gedung tersebut berlantai 3 dengan tinggi total bangunan 17,076 m. Pemodelan struktur dalam 3D dibuat dengan bantuan *software* ETABS Versi 7.2.4 untuk struktur atap dan bantuan *software* SAP 2000 Versi 11 untuk struktur bangunan utama.

Tingkat kerentanan bangunan terhadap gempa dianalisis dengan metode *pushover* terhadap *HAZUS*. Metode yang dipakai adalah analisis statik nonlinear (*pushover*) sesuai peraturan gempa SNI 1726-2012. Variabel dalam penelitian ini adalah analisis *pushover*, perpindahan (*displacement*), rasio simpangan antar tingkat (*drift ratio*), gaya geser dasar (*base shear*), kurva kapasitas, kurva spektrum respon, dan kurva kerentanan.

Hasil penelitian adalah sebagai berikut ini.

- a. Kurva kapasitas pembebanan arah-x berhenti pada step ke-12 nilai titik kontrol sebesar 0,110129 m dan nilai gaya geser dasar sebesar 325,030 ton. Kurva kapasitas pembebanan arah-y berhenti pada step ke-15 nilai titik kontrol sebesar 0,112566 m dan nilai gaya geser dasar sebesar 205,203 ton. Hal tersebut menunjukkan bahwa struktur arah-x memiliki kekakuan lebih tinggi dari pada struktur arah-y.
- b. Untuk nilai *drift ratio* pada pembebanan arah-x adalah $0,004 < 0,01$ dari hasil tersebut level kinerja arah-x adalah *Immediate Occupancy*. Untuk nilai *drift ratio* pada pembebanan arah-y adalah $0,00434 < 0,01$ dari hasil tersebut level kinerja arah-y adalah *Immediate Occupancy*. Hal ini berarti jika terjadi gempa, struktur mampu menahan gempa tersebut, tidak terjadi kerusakan yang berarti pada struktur, sehingga dapat langsung dipakai tanpa harus diperbaiki.
- c. Setelah dilakukan analisis tingkat kerentanan bangunan berdasarkan *HAZUS*, diperoleh bentuk kurva kerentanan yang cukup landai. Dari nilai *cumulative probability* menunjukkan bangunan diperkirakan mengalami kerusakan tingkat *slight* dengan probabilitas sebesar 48,12%, diperkirakan mengalami kerusakan tingkat *moderate* dengan probabilitas sebesar 25,53%, diperkirakan mengalami kerusakan tingkat *extensive* dengan probabilitas sebesar 3,94%, diperkirakan mengalami

kerusakan tingkat *complete* dengan probabilitas sebesar 0,23% sehingga nilai total *vulnerability* adalah 48,12%, bangunan tidak mengalami kerusakan sama sekali sebesar 22,19%.

4. Studi Kerentanan Bangunan Akibat Gempa : Studi Kasus Perumahan Di Bantul

Penelitian ini bersumber dari jurnal ilmiah semesta teknika milik Bawono (2016). Dalam penelitian tersebut akan dilakukan studi kerentanan bangunan perumahan di Bantul akibat gempa. Penelitian dilakukan setelah bangunan perumahan sudah selesai dibangun kembali pasca gempa 27 Mei 2006, menghitung probabilitas kerusakan bangunan digunakan cara Fuzzy AHP.

Tujuan penelitian tersebut untuk membandingkan hasil perhitungan probabilitas kerusakan bangunan pada perumahan di Bantul dengan hasil perhitungan probabilitas kerusakan menurut *HAZUS*. Dengan perbandingan tersebut dapat diketahui mendekati tipe bangunan apakah bangunan di perumahan Bantul bila dibandingkan dengan bangunan *HAZUS*.

Hasil penelitian adalah sebagai berikut ini.

- a. Nilai probabilitas kerusakan pada tiap rumah berbeda beda, hal ini disebabkan oleh jarak dari pusat gempa, kondisi geologi tanah.
- b. Bangunan yang diteliti pada penelitian tersebut mendekati tipe bangunan *HAZUS* yaitu tembokan tanpa perkuatan atau URML.

2.1.2 Penelitian yang akan Dilakukan dan Perbandingan dengan Penelitian Sebelumnya

Dari keseluruhan penelitian sebelumnya baik bersumber dari tugas akhir sebelumnya maupun dari *journal*, akan dibandingkan dengan penelitian yang akan dilakukan. Dirangkum menjadi sebuah tabel yang dapat dilihat pada Tabel 2.1 berikut:

Tabel 2.1 Perbandingan Penelitian Terdahulu dengan Penelitian yang Akan Dilakukan

Parameter Perbandingan	Penelitian Terdahulu				Penelitian yang Akan Dilakukan
Peneliti	Arifin, Zainal dkk (2015)	Bawono, Adi (2016)	Ikramullah (2017)	Muntafi, dkk (2018)	Aga Saputra, Ardha (2018)
Judul Penelitian	Analisis Struktur Gedung POP Hotel Terhadap Beban Gempa Dengan Metode <i>Pushover Analysis</i> .	Studi Kerentanan Bangunan Akibat Gempa : Studi Kasus Perumahan Di Bantul	Evaluasi Kinerja Seismik Laboratorium Seni Musik dan Tari Universitas Negeri Yogyakarta dengan Analisis <i>Pushover</i> metode <i>Capacity Spectrum</i> .	Penilaian Kerusakan dan Peluang Kerugian Bangunan Beton Bertulang Karena Skenario Gempa Yogyakarta dengan Analisis <i>Pushover</i> dan Hazus	Evaluasi Kinerja dan Probabilitas Kerusakan Seismik Gedung Laboratorium Dengan Analisis <i>Pushover</i> dan Metode <i>HAZUS</i> .
Tujuan Penelitian	Mengetahui pola keruntuhan dan perpindahan saat diberikan beban gempa pada bangunan tersebut.	Membandingkan probabilitas kerusakan bangunan perumahan di Bantul dengan probabilitas kerusakan menurut <i>HAZUS</i> . Mengetahui tipe bangunan tersebut menurut <i>HAZUS</i> .	Mengetahui kurva kapasitas, target perpindahan gedung, kinerja struktur menurut ATC-40, dan skema keruntuhan gedung tersebut.	Mengetahui kurva kapasitas, level kinerja (<i>performance level</i>), mekanisme sendi plastis atau keruntuhan bangunan setelah dilakukan <i>pushover</i> dan, menghitung kurva kerentanan dengan metode <i>HAZUS</i> .	Mengetahui kurva kapasitas, <i>performance point</i> , kinerja struktur menurut ATC-40, skema keruntuhan, dan menghitung probabilitas kerusakan dengan metode <i>HAZUS</i> .
Bentuk dan Tinggi Bangunan Gedung	Gedung beraturan 8 lantai yang tipikal dengan tambahan <i>basement</i> , <i>ground</i> , dan <i>roof</i> .	Perumahan di daerah bantul yang daerah tersebut merupakan daerah yang paling banyak mengalami kerusakan gempa 27 Mei 2006	Gedung beraturan berlantai 4. Ketinggian gedung dari lantai dasar sampai atap adalah 22,75 m. Ketinggian lantai 1 – 4 sebesar 4,2 m dan tinggi atap 5,95 m	Gedung tidak beraturan berlantai 3 dengan tinggi total bangunan 17,076 m. Tinggi lantai 1 adalah 4 m, lantai 2 adalah 4 m, dan lantai 3 adalah 4,115 m.	Gedung beraturan bertingkat 5. Tinggi total bangunan 21.9 m sudah termasuk atap, untuk tinggi lantai 1 – 3 adalah 4 m, untuk lantai 4 adalah 3,6 m dan tinggi atap 3,3 m
Peraturan yang Digunakan	ATC-40 (1996), SNI 1727-2013, SNI 1726-2012, SNI 2847-2002	HAZUS-MH MR4 (1999)	ATC-40 (1996), SNI 1726-2012, SNI 1727-2013, SNI 2847-2013, FEMA-273 (1997), FEMA-356 (2000), FEMA-440 (2005)	ATC-40 (1996), SNI 1726-2012, SKBI-1.3.5.3.1987, FEMA-356 (2000), FEMA-440 (2005), HAZUS-MH MR4 (1999)	ATC-40 (1996), SNI 1726-2012, SNI 1727-2013, SNI 2847-2013, FEMA-273 (1997), FEMA-356 (2000), FEMA-440 (2005), HAZUS-MH MR4 (1999)

Lanjutan Tabel 2.1 Perbandingan Penelitian Terdahulu dengan Penelitian yang Akan Dilakukan

<p>Metode penelitian</p>	<p>Menyiapkan data penelitian, perhitungan beban struktur antara lain beban hidup, mati dan gempa. Kemudian melakukan pemodelan struktur dengan SAP 2000, analisis struktur dengan metode <i>pushover</i>, terakhir menyimpulkan hasil analisis tersebut.</p>	<p>Digunakan metode <i>Fuzzy Analytic Hierarchi Proses</i> (FAHP). Kemudian dihitung perbandingan probabilitas kerusakan penelitian dan <i>HAZUS</i>.</p>	<p>Pemodelan geometri struktur gedung dan ukuran struktur sesuai data perencanaan, menghitung beban dan gaya yang bekerja (<i>dead, live, quake load</i>), melakukan analisis <i>pushover</i> dengan metode <i>capacity spectrum</i> prosedur B ATC-40.</p>	<p>Pengumpulan data bangunan, memodelkan struktur atap dengan program ETABS dan struktur utama pada SAP 2000, elemen struktur yang dimodelkan kolom utama dan balok-balok primer. Kemudian analisis <i>pushover</i> setelah selesai dilakukan, dilanjutkan analisis kerentanan menggunakan metode <i>HAZUS</i>.</p>	<p>Pemodelan dan ukuran struktur bangunan sesuai data perencanaan, menghitung beban dan gaya yang bekerja (<i>dead, live, quake load</i>), melakukan analisis <i>pushover</i> dengan metode <i>capacity spectrum</i> prosedur B ATC-40. Setelah selesai <i>pushover</i> dilakukan analisis kerentanan menggunakan metode <i>HAZUS</i>.</p>
<p>Kesimpulan dari Hasil Penelitian</p>	<p>Analisis <i>pushover</i> arah x bangunan tersebut mengalami level kinerja <i>Immediate Occupancy</i> dengan nilai perpindahan sebesar 0,21 meter. Analisis <i>pushover</i> arah y bangunan mengalami level kinerja <i>Damage Control</i> dengan perpindahan sebesar 0,47 meter dan gedung mengalami keruntuhan <i>beam sway</i></p>	<p>Nilai probabilitas kerusakan pada tiap rumah berbeda-beda, hal ini disebabkan karena jarak dari pusat gempa, kondisi geologi tanah, topografi tanah, dan jenis tanah yang terdapat di bawah masing-masing rumah.. Bangunan yang diteliti mendekati tipe bangunan <i>HAZUS</i> yaitu tembokan tanpa perkuatan URML (<i>Unreinforced Masonry Bearing Walls</i>)</p>	<p>Besar gaya lateral maksimum arah-x 2426,623 KN, arah-y 2195,849 KN. Struktur mulai leleh pada step ke-15 untuk arah-x dan pada step ke-9 untuk arah-y. Sendi plastis terjadi pada balok step ke-1 dan pada kolom step ke-3 untuk arah-x serta step ke-2 untuk arah-y. Level kinerja gedung arah-x dan arah-y termasuk dalam kategori <i>Damage Control</i>. Jika terjadi gempa gedung tidak mengalami kerusakan yang signifikan, dan dapat langsung digunakan</p>	<p>Gedung berada pada level kinerja <i>Immediate Occupancy</i> (IO) dengan nilai total <i>vulnerability</i> sebesar 77,81% dimana besar <i>cumulative probability</i> untuk level <i>slight, moderate, extensive</i>, dan <i>complete</i> secara berturut-turut sebesar 48,12%, 25,53%, 3,94%, 0,23%.</p>	

2.2 Keaslian Penelitian

Berdasarkan dari penelitian-penelitian yang telah dilakukan sebelumnya yang terangkum dalam Tabel 2.1, penelitian mengenai evaluasi kinerja sudah sering dilakukan, namun sangat jarang ditambahkan analisis probabilitas tingkat kerusakan bangunan. Hanya saja beberapa sudah ada yang menghitung hingga probabilitas tingkat kerusakan tersebut, adapun yang membedakan adalah gedung yang ditinjau, peraturan – peraturan, hingga metode yang digunakan. Detail bukti penelitian yang akan dilakukan merupakan karya asli dan bukan merupakan bentuk karya plagiasi adalah sebagai berikut :

1. Data yang digunakan merupakan denah berdasarkan *as built drawing*, dari gedung Laboratorium Fakultas Kedokteran Universitas Islam Indonesia,
2. Analisis *pushover* menggunakan program komputer SAP2000 Versi 15.1 dan akan di modelkan secara 3D dengan ukuran serta mutu mengikuti data eksisting bangunan. Desain tersebut meliputi desain bagian struktur bangunan dan atap bangunan tersebut,
3. Setelah analisis *pushover* selesai dilakukan, kemudian penelitian berlanjut mengenai analisis tingkat kerusakan struktur bangunan gedung menggunakan metode *HAZUS* pada bangunan gedung Laboratorium Fakultas Kedokteran Universitas Islam Indonesia,
4. Metode *HAZUS* yang digunakan berdasarkan pada *Chapter 6 HAZUS (Direct Physical Damage- Essential and High Potential Loss Facilities)*,
5. *Capacity spectrum* berasal dari analisis kinerja bangunan bukan berdasarkan dari *HAZUS*, sehingga dalam mencari nilai S_d untuk probabilitas kerusakan sesuai dengan karakteristik bangunan tersebut,

Berdasarkan hal tersebut maka dapat dikatakan bahwa penelitian ini dapat dipertanggungjawabkan keasliannya.

BAB III

LANDASAN TEORI

3.1 Gempa Bumi

Gempa bumi adalah bergetarnya permukaan tanah karena pelepasan energi secara tiba-tiba akibat dari pecah atau slipnya massa batuan di lapisan kerak bumi (Prawirodikromo, 2012). Gempa yang berkaitan dengan struktur bangunan gedung dan non gedung adalah gempa bumi tektonik.

Gempa tektonik akibat pergerakan lempeng dapat terjadi di laut dan di darat. Indonesia sendiri dilewati oleh lempeng Eurasia dan lempeng Indo-Australia sehingga bencana gempa dapat terjadi kapan saja, maka dari itu bangunan gedung dan non gedung di Indonesia harus didesain mampu menahan gempa bumi baik yang kecil, sedang hingga besar.

3.2 Perkembangan Teknologi Bangunan Tahan Gempa

Prawirodikromo (2012) menyatakan diperlukan perencanaan bangunan yang dapat mengurangi atau bahkan menghindari risiko kerusakan akibat gempa, sehingga dibutuhkan bangunan yang sangat kuat, sangat aman untuk menghindari kerusakan.

Para ahli kemudian memutuskan bahwa bangunan yang dibangun harus relatif kuat menahan gempa tetapi biaya pembangunannya tidak perlu mahal. Prinsip ini nantinya akan bermuara pada bangunan yang aman tetapi ekonomis. Bangunan seperti ini kemudian populer disebut *earthquake resistant building*, yaitu bangunan yang kuat terhadap bahaya gempa tetap pembangunannya relatif tidak mahal.

Tavio dan Usman (2018) menyebutkan dalam desain struktur bangunan tahan gempa ada tiga konsep desain yaitu:

1. Metode desain layan, diutamakan kemampuan layan, kontrol pada tegangan yang terjadi.
2. Metode desain ultimit (desain berbasis gaya / *force based design*), diutamakan kekuatan, kontrol pada regangan.

3. Metode desain berbasis kinerja (*performance based design*) diutamakan keamanan, kontrol pada deformasi dan kinerja yang lain harus memenuhi syarat.

Perkembangan konsep desain layan yang menggunakan konsep material izin, kontrol pada batas deformasi beban rencana saat ini sudah ditinggalkan dan beralih pada konsep desain ultimit yang berbasis kriteria keruntuhan material, kapasitas penampang untuk beban terfaktor dan yang terbaru saat ini adalah konsep desain gempa berbasis kinerja dimana daktilitas deformasi dan kapasitas beban pada deformasi yang besar menjadi parameternya.

Pada konsep desain tegangan izin dan desain ultimit hanya memuaskan satu tingkat desain tidak memastikan bahwa tingkat desain lainnya akan terpenuhi sedangkan pada konsep desain berbasis kinerja memastikan desain memenuhi tingkat kinerja yang ditentukan, dimana pada konsep desain berbasis kinerja ini mampu memenuhi kapasitas layan dan kuat rencana. Perbedaan dari ketiga konsep tersebut sebagai berikut ini.

1. Desain layan hanya memastikan kapasitas material, defleksi dan vibrasi, untuk beban layan di dalam batas izin tetapi tidak untuk kekuatan dan kekakuan.
2. Desain ultimit hanya memastikan faktor keamanan tertentu terhadap kelebihan beban di dalam struktur atau penampang.
3. Desain berbasis kinerja memastikan struktur mampu memenuhi kapasitas layan dan kapasitas ultimit serta memenuhi tingkat kinerja yang ditentukan.

3.3 Analisis Pembebanan

Pada tugas akhir ini hanya akan dianalisis 3 jenis beban yang paling berpengaruh terhadap struktur yaitu beban mati, beban hidup, dan beban gempa.

3.3.1 Beban Mati

Menurut SNI 1727 – 2013 Pasal 3.1.1 beban mati adalah berat seluruh bahan konstruksi bangunan gedung yang terpasang termasuk dinding, lantai, atap, plafon, tangga, dinding partisi tetap, *finishing*, klading gedung, dan komponen arsitektural lainnya.

Berdasarkan SNI 1727 – 2013 Pasal 3.1.2 jika tidak ada informasi yang jelas, nilai yang harus digunakan adalah nilai yang disetujui oleh pihak yang berwenang. Berdasar hal tersebut dalam tugas akhir ini besaran beban mati yang digunakan bersumber pada SKBI-1.3.5.3-1987. Beban mati yang digunakan antara lain dapat dilihat pada Tabel 3.1 berikut ini.

Tabel 3.1 Beban Mati yang Digunakan

No	Material Bangunan	Berat
1	Beton Bertulang	2,4 ton/m ³
2	pasir	1,8 ton/m ³
3	spesi	1,95 ton/m ³
4	keramik	0,015 ton/m ²
5	langit – langit dan penggantung	0,007 ton/m ²
6	Penutup atap genteng	0,05 ton/m ²

Sumber : SKBI-1.3.5.3-1987 (1987)

3.3.2 Beban Hidup

Menurut SNI 1727 – 2013 Pasal 4.1 beban hidup adalah beban yang diakibatkan oleh pengguna dan penghuni bangunan gedung atau struktur lain yang tidak termasuk beban konstruksi dan beban lingkungan. Dalam perencanaan ini beban yang hidup yang digunakan sesuai dengan peraturan baru (SNI 1727-2013) dimana pembebanannya berdasarkan perfungsi dari ruangan pada setiap tingkatnya dilihat pada Tabel 3.1 berikut :

Tabel 3.2 Beban Hidup yang Digunakan

No	Fungsi / Penggunaan	Beban
1	Ruang Laboratorium	0,2926 ton/m ²
2	Ruang Kantor	0,2446 ton/m ²
3	Koridor	0,3904 ton/m ²
4	Balkon	0,4388 ton/m ²
5	Ruang Arsip	0,4883 ton/m ²
6	Atap	0,0979 ton/m ²

Sumber : SNI 1727-2013 (2013)

3.3.3 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. Dalam kaitannya dalam perencanaan beban gempa untuk tugas akhir ini terdapat ketentuan – ketentuan sebagai berikut :

1. Kategori risiko struktur bangunan gedung

Kategori risiko bangunan sesuai SNI 1726 – 2012 di bagi menjadi 4 kategori berdasarkan jenis pemanfaatan bangunan tersebut dan kaitannya dengan risiko yang akan ditimbulkan berdasarkan prioritasnya. Kategori tersebut ditunjukkan pada Tabel 3.3.

Tabel 3.3 Kategori Risiko Bangunan Gedung dan Non Gedung untuk Beban Gempa

Jenis Pemanfaatan	Kategori Risiko
<p>Gedung dan non gedung yang memiliki risiko rendah terhadap jiwa manusia pada saat terjadi kegagalan, termasuk, tetapi tidak dibatasi untuk, antara lain :</p> <ul style="list-style-type: none"> – Fasilitas pertanian, perkebunan, peternakan, dan perikanan – Fasilitas semntara, – Gudang penyimpanan, – Rumah jaga dan struktur kecil lainnya 	I
<p>Semua gedung dan struktur lain kecuali yang termasuk dalam kategori risiko I, III,IV, termasuk, tetapi tidak dibatasi untuk :</p> <ul style="list-style-type: none"> – Perumahan – Rumah toko dan rumah kantor – Pasar, – Gedung perkantoran – Gedung apartemen/rumah susun – Pusat perbelanjaan/mall – Bangunan industri – Fasilitas manufaktur – Pabrik 	II
<p>Gedung dan non gedung yang memiliki risiko tinggi terhadap jiwa manusia pada saat terjadi kegagalan termasuk, tapi tidak dibatasi untuk :</p> <ul style="list-style-type: none"> – Bioskop, – Gedung pertemuan, – Stadion, – Fasilitas kesehatan yang tidak memiliki unit bedah dan unit gawat darurat, – Fasilitas penitipan anak, – Penjara, – Bangunan untuk orang jompo <p>Gedung dan non gedung, tidak termasuk kedalam kategori risiko IV, yang memiliki potensi untuk menyebabkan dampak ekonomi yang besar 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 non gedung yang tidak termasuk dalam kategori risiko IV, yang mengandung bahan beracun atau peledak dimana jumlah kandungan bahannya melebihi nilai batas yang diisinyatkan oleh instansi yang berwenang dan cukup menimbulkan bahaya bagi masyarakat jika terjadi kebocoran.</p>	III

Lanjutan Tabel 3.3 Kategori Risiko Bangunan Gedung dan Non Gedung untuk Beban Gempa

<p>Gedung dan non gedung yang ditunjukkan 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 sakit dan fasilitas kesehatan lain yang memiliki fasilitas bedah dan unit gawat darurat, - Fasilitas pemadam kebaran, ambulans, dan kantor polisis, serta garasi kendaraan darurat tempat perlindungan terhadap gempa bumi, angin badai, dan tempat perlindungan darurat lainnya, - Fasilitas kesiapan darurat, komunikasi, pusat operasi dan fasilitas lainnya untuk tanggap darurat, - Pusat pembangkit eergi dan fasilitas publik lainnya yang dibutuhkan pada saat keadaan darurat, - Struktur tambahan (termasuk menara telekomunikasi, tangki penyiapan bahan bakar, menara pendingin, struktur stasiun listrik, tangki air pemadam kabakaran atau struktur rumah atau struktur pendukung air atau material atau peralatan pemadam kebakaran) yang diisyaratkan untuk beroperasi pada saat keadaan darurat. <p>Gedung dan non gedung yang dibutuhkan untuk mempertahankan fungsi struktur bangunan lain yang termasuk ke dalam kategori risiko IV</p>	IV
--	----

Sumber : SNI 1726-2012 (2012)

2. Faktor keutamaan gempa

Setiap risiko bangunan memiliki faktor keutamaan gempa yang berbeda – beda hal ini digunakan untuk sebagai faktor pengali dalam perhitungan beban gempa yang dapat dilihat pada Tabel 3.4 menunjukkan hubungan kategori risiko gempa dengan faktor keutamaan gempa.

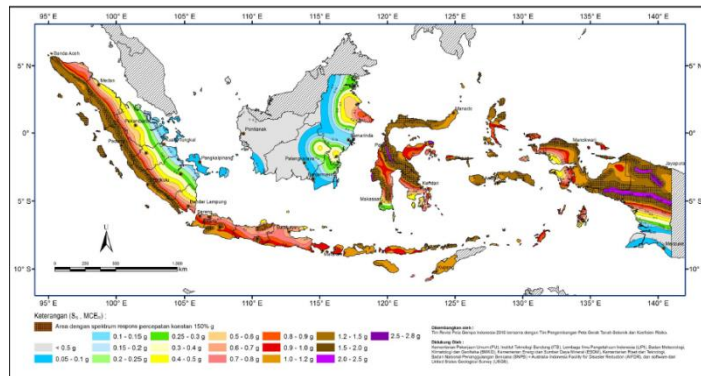
Tabel 3.4 Faktor Keutamaan Gempa

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

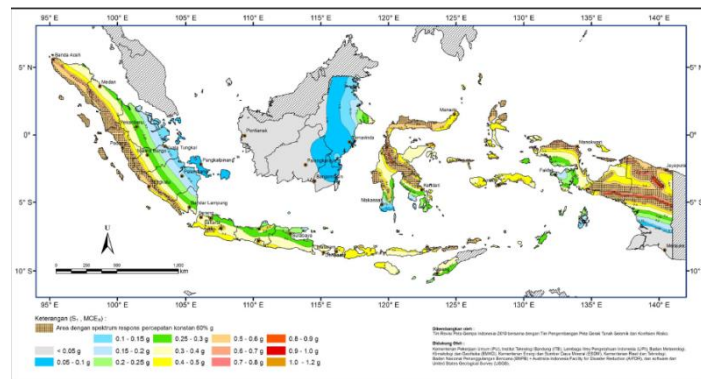
Sumber : SNI 1726-2012 (2012)

3. Penentuan nilai respons spektra

Respons spektra setiap daerah berbeda - beda akibat adanya kemungkinan kejadian gempa daerah satu dengan lainnya sangat berbeda. Untuk mendesain sebuah bangunan gedung, diperlukan penentuan nilai respons spektra pada percepatan periode pendek yaitu 0,2 detik (S_s) dan nilai respon spektra pada percepatan 1 detik (S_1). Nilai tersebut dapat dilihat pada peta gempa pada SNI 1726 – 2012. Seperti yang disajikan pada Gambar 3.1 dan Gambar 3.2.



Gambar 3.1 Peta Spektrum Respons Percepatan Periode 0,2 Detik ($S_{0.2}$)
(Sumber : SNI 1726-2012, 2012)



Gambar 3.2 Peta Spektrum Respons Percepatan Periode 1,0 Detik ($S_{1.0}$)
(Sumber : SNI 1726-2012, 2012)

Selain itu untuk menentukan parameter respons spektra percepatan gempa di permukaan tanah diperlukan faktor amplifikasi seismik pada periode 0,2 detik (F_a) dan periode 1 detik (F_v) yang bisa didapatkan dari hubungan parameter respons spektra percepatan gempa dengan kelas situs yang dapat dilihat pada Tabel 3.5 dan Tabel 3.6.

Tabel 3.5 Koefisien Situs F_a

Kelas Situs	Parameter respons spectral percepatan gempa (MCE_R) terpetakan pada periode pendek, $T = 0,2$ detik, S_s				
	$S_s \leq 0,25$	$S_s = 0,5$	$S_s = 0,75$	$S_s = 1,0$	$S_s \geq$
SA (batuan keras)	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
SB (batuan)	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
SC (tanah keras, sangat padat dan batuan lunak)	1,2	1,2	1,1	1,0	1,0
SD (tanah sedang)	1,6	1,4	1,2	1,1	1,0
SE (tanah lunak)	2,5	1,7	1,2	0,9	0,9
SF (tanah khusus)	SS^2				

Sumber : SNI 1726-2012 (2012)

Catatan :

- Untuk nilai-nilai antara S_I dapat dilakukan interpolasi linier
- SS = Situs yang memerlukan investigasi geoteknik spesifik dan analisis respons situs spesifik.

Tabel 3.6 Koefisien Situs F_v

Kelas Situs	Parameter respons spectral percepatan gempa (MCE_R) terpetakan pada periode pendek, T = 1 detik, S_I				
	$S_I \leq 0,1$	$S_I = 0,2$	$S_I = 0,3$	$S_I = 0,4$	$S_I \geq 0,5$
SA (batuan keras)	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
SB (batuan)	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
SC (tanah keras, sangat padat dan batuan lunak)	1,7	1,6	1,5	1,4	1,3
SD (tanah sedang)	2,4	2	1,8	1,6	1,5
SE (tanah lunak)	3,5	3,2	2,8	2,4	2,4
SF (tanah khusus)	SS ²				

Catatan :

- Untuk nilai-nilai antara S_I dapat dilakukan interpolasi linier
- SS = Situs yang memerlukan investigasi geoteknik spesifik dan analisis respons situs spesifik.

Parameter respons spektrum percepatan di permukaan tanah dapat diketahui dengan Persamaan 3.1 dan Persamaan 3.2.

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

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

Keterangan :

S_s = parameter respons spektrum percepatan MCE_R terpetakan untuk periode pendek.

S_I = parameter respons spektrum percepatan gempa MCE_R terpetakan untuk periode 1,0 detik

Kemudian dihitung nilai respons spektrum desain yang akan di pakai dalam perancangan. Perhitungannya dilakukan berdasarkan Persamaan 3.3 dan Persamaan 3.4.

$$S_{DS} = \frac{2}{3} S_{MS} \quad (3.3)$$

$$S_{DI} = \frac{2}{3} S_{MI} \quad (3.4)$$

Keterangan :

S_{DS} = parameter spektral desain perioda pendek

S_{DI} = parameter spektral desain untuk perioda 1 detik

4. Kategori desain seismik

Struktur harus ditetapkan memiliki suatu Kategori Desain Seismik (KDS) yang mengikuti ketentuan seperti berikut ini.

- a. Struktur dengan kategori risiko I,II, atau III nilai $S_1 > 0,75$ ditetapkan sebagai struktur dengan Kategori Desain Seismik E
- b. Struktur dengan kategori risiko IV nilai $S_1 > 0,75$ harus ditetapkan sebagai struktur dengan kategori Desain Seismik F.

Struktur yang memiliki ketentuan diluar ketentuan tersebut Kategori Desain Seismiknya ditetapkan berdasarkan hubungan nilai SDS dan SD1 terhadap Kategori Resiko Gedung seperti pada Tabel 3.7 dan Tabel 3.8.

Tabel 3.7 Kategori Desain Seismik Berdasarkan Parameter Respons Percepatan Pada Perioda Pendek (S_{DS})

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

Tabel 3.8 Kategori Desain Seismik Berdasarkan Parameter Respons Percepatan Pada Perioda 1 Detik (S_{DI})

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

Sumber : SNI 1726-2012 (2012)

5. Definisi Kategori Desain Seismik

- a. Kategori desain seismik A dan B

Gedung yang memiliki kategori desain seismik A dan B, didesain minimal, menggunakan peraturan yang mengacu kepada desain Struktur

Momen Pemikul Momen Biasa (SMPMB) maupun Sistem Dinding Struktur Biasa (SDSB).

b. Kategori Desain Seismik C

Gedung yang memiliki kategori desain seismik C, didesain minimal, menggunakan peraturan yang mengacu kepada desain Struktur Momen Pemikul Momen Menengah (SMPMM) maupun Sistem Dinding Struktur Biasa (SDSB).

c. Kategori Desain Seismik D

Gedung yang memiliki kategori desain seismik D, didesain menggunakan peraturan yang mengacu kepada desain Struktur Momen Pemikul Momen Khusus (SMPMK), Dinding Struktur Khusus (SDSK).

d. Kategori Desain Seismik E dan F

Gedung yang memiliki kategori desain seismik E dan F, harus didesain mengikuti peraturan yang diisyaratkan di kategori desain seismik D.

Dari definisi kategori desain seismik diatas dapat disimpulkan dalam Tabel 3.9.

Tabel 3.9 Definisi Syarat Kategori Desain Seismik

Tingkat Risiko Kegempaan	Kategori Desain Seismik	Syarat
Rendah	A dan B	SRPM B/M/K SDS B/K
Menengah	C	SRPM M/K SDS B/K
Tinggi	D,E dan F	SRPM K SDS K

Sumber : SNI 1726-2012 (2012)

Keterangan :

SRPM = Sistem Rangka Pemikul Momen

SDS = Sistem Dinding Struktur

B ; M ; K = Biasa; Menengah; Khusus

6. Spektrum Respons Desain

Pada SNI 1726 – 2012 pasal 6.4 disebutkan bahwa bila spektrum oleh tata cara ini dan prosedur gerak tanah dari spesifik-spesifik tidak digunakan, maka kurva spektrum respons desain harus dikembangkan dengan mengacu pada Gambar 3.3 dan mengikuti ketentuan.

- a. Periode yang lebih kecil dari T_0 , spektrum respons percepatan desain, S_a , harus diambil dari Persamaan berikut :

$$S_a = S_{DS} \left(0,4 + 0,6 \frac{T}{T_0} \right) \quad (3.5)$$

- b. Periode lebih besar dari atau sama dengan T_0 dan lebih kecil dari atau sama dengan T_S , spektrum respons percepatan desain, S_a , sama dengan S_{DS} .

- c. Periode lebih besar dari T_S , spektrum respons percepatan desain, S_a , diambil :

$$S_a = \frac{S_{D1}}{T} \quad (3.6)$$

Keterangan :

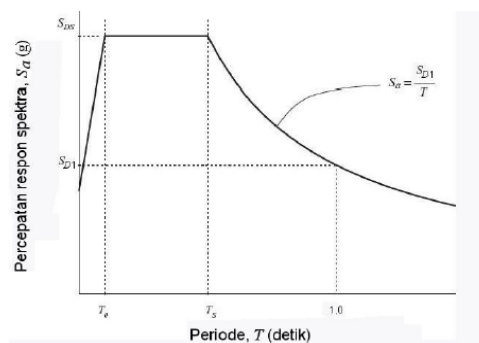
S_{DS} = parameter respons spektrum percepatan desain para periode pendek

S_{D1} = parameter respons spektrum percepatan desain pada periode 1 detik

T = periode getar fundamental struktur

$$T_0 = 0,2 \frac{S_{D1}}{S_{DS}} \quad (3.7)$$

$$T_S = \frac{S_{D1}}{S_{DS}} \quad (3.8)$$



Gambar 3.3 Spektrum Respons Desain

(Sumber : SNI 1726-2012, 2012)

7. Parameter dan pemilihan sistem gedung

Setelah itu gedung yang akan didesain sesuai Tabel 3.10, akan di dapatkan 3 jenis faktor yang berguna dalam menghitung beban lateral. Ketiga faktor tersebut adalah faktor modifikasi respon R , faktor kuat lebih sistem Ω_0 , dan faktor pembesaran defleksi C_d . Untuk Tabel yang disajikan hanya contoh untuk Rangka Beton Bertulang Pemikul Momen yang sering digunakan.

Tabel 3.10 Faktor R , C_d , dan Ω_0 untuk Sistem Penahan Gaya Gempa
(Contoh untuk Rangka Beton Bertulang Pemikul Momen)

Sistem Penahan- gaya seismik	Koefisien modifikasi respons, R	Faktor kuat lebih sistem Ω_0	Faktor pembesaran defleksi, C_d	Batasan sistem struktur dan batasan tinggi struktur h_n (m)				
				Kategori desain seismik				
				B	C	D	E	F
3. Sistem Rangka pemikul momen								
a. Rangka beton bertulang pemikul momen khusus	8	3	$5\frac{1}{2}$	TB	TB	TB	TB	TB
b. Rangka beton bertulang pemikul momen menengah	5	3	$4\frac{1}{2}$	TB	TB	TI	TI	TI
c. Rangka beton bertulang pemikul momen biasa	3	3	$2\frac{1}{2}$	TB	TI	TI	TI	TI

Sumber : SNI 1726-2012 (2012)

Keterangan:

TB = Tidak Dibatasi dan TI = Tidak Diiijinkan

8. Periode fundamental pendekatan

Dalam menentukan periode fundamental struktur T dapat diperoleh dari hasil analisis strktuktur yang ditinjau. Namun SNI 1726 – 2012 memberi persyaratan bahwa periode fundamental yang dipakai sebagai perhitungan tidak boleh melebihi dari batas atas periode fundamental pendekatan yang mana nilainya adalah perkalian dari koefisien periode batas atas (C_u) yang bisa di dapatkan pada Tabel 3.11, dengan periode pendekatan (T_a). Untuk memudahkan pelaksanaan periode alami fundamental T ini boleh langsung digunakan periode pendekatan T_a .

Periode pendekatan ditentukan berdasarkan Persamaan 3.9.

$$T_a = C_t \cdot h_n^x \quad (3.9)$$

Keterangan :

hn adalah ketinggian struktur bangunan gedung dengan satuan meter diatas dasar sampai tingkat tertentu, sedangkan nilai C_t dan x di tentukan pada Tabel 3.12.

Tabel 3.11 Koefisien untuk Batas Atas Pada Perioda yang Dihitung

Parameter percepatan respons spektral desain pada 1 detik, S_{D1}	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 1726-2012 (2012)

Tabel 3.12 Nilai Parameter Perioda Pendekatan C_t dan x

Tipe Struktur	C_t	x
Sistem rangka pemikul momen dimana rangka memikul 100 persen gaya gempa yang diisyaratkan dan tidak dilingkupi atau dihubungkan dengan komponen yang lebih kaku dan akan mencegah rangka dari defleksi jika dikenai gaya gempa :		
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 1726-2012 (2012)

9. Gaya geser dasar seismik

Besar gaya geser dasar seismik seperti Persamaan 3.10.

$$V = C_s \times W \quad (3.10)$$

Keterangan :

V = gaya geser dasar seismik

C_s = koefisien respons seismik

W = berat gravitasi total struktur gedung efektif

Sedangkan koefisien respons seismik ditentukan oleh Persamaan 3.11 yang nilainya tidak melebihi oleh nilai yang dihasilkan oleh Persamaan 3.12, dan nilai C_s tidak kurang dari nilai yang dihasilkan persamaan 3.13. Sebagai tambahan persyaratan, untuk struktur yang berlokasi di daerah di mana $S_1 \geq 0,6g$; maka nilai C_s yang diambil tidak diperkenankan melebihi dari nilai yang dihasilkan pada Persamaan 3.14

$$C_s = \frac{S_{DS}}{\left(\frac{R}{I_e}\right)} \quad (3.11)$$

$$C_s = \frac{S_{S1}}{T\left(\frac{R}{I_e}\right)} \quad (3.12)$$

Cs harus tidak kurang dari

$$C_s = 0,044 \cdot SDS \cdot I_e \geq 0,01 \quad (3.13)$$

$$C_s = \frac{0,5S_1}{\left(\frac{R}{I_e}\right)} \quad (3.14)$$

10. Distribusi vertikal gaya gempa

Pendistribusian beban ke setiap lantai mengikuti Persamaan 3.15 dengan menggunakan koefisien faktor distribusi vertikal berupa C_{vx} sesuai pada Persamaan 3.16

$$F_x = C_{vx} \times V \quad (3.15)$$

$$C_{vx} = \frac{w_x h_x^k}{\sum_{i=1}^n w_i h_i^k} \quad (3.16)$$

Keterangan :

C_{vx} = faktor distribusi vertikal,

V = geser dasar seismik,

W_x dan W_i = berat seismik efektif total struktur (w) tingkat I atau x ,

h_x dan h_i = tinggi tingkat i atau x yang diukur dari dasar struktur,

k = ekponen yang berhubungan dengan periode getar struktur nilainya adalah 1,0 untuk periode getar $< 0,5$ detik, dan bernilai 2,0 jika periode getar $> 2,5$ detik. Untuk periode getar diantara 0,5 detik dan 2 detik perlu dilakukan interpolasi.

3.4 Struktur Bangunan Gedung Beraturan dan Tidak Beraturan

Pada SNI 1726-2012 untuk evaluasi bangunan gedung harus diklasifikasikan sebagai bangunan beraturan atau bangunan tidak beraturan berdasarkan pada standar yang dipakai. Bangunan yang akan diklasifikasikan harus berdasarkan pada konfigurasi horizontal dan vertikal struktur bangunan gedung.

Dalam SNI 1726-2012 tidak secara jelas dijabarkan mengenai bangunan beraturan, namun jika mengacu pada peraturan sebelumnya yakni SNI 1726-2002 definisi dari bangunan beraturan adalah bangunan persegi atau persegi panjang tanpa tonjolan dan kalau terdapat tonjolan, panjangnya tidak lebih dari 25% dari ukuran terbesar denah struktur gedung dalam arah tonjolan tersebut.

3.5 Konsep *Performance Based Earthquake Engineering* (PBEE)

Pada konsep desain berbasis kinerja dapat dipastikan bahwa desain mampu memenuhi tingkat kinerja yang ditentukan, dimana pada konsep desain berbasis kinerja ini mampu memenuhi kapasitas layan dan kuat rencana.

Pada Sub Bab 3.2 dijelaskan bahwa konsep desain berbasis kinerja menjadi konsep yang sekarang banyak digunakan dikarenakan dengan desain berbasis kinerja memastikan struktur mampu memenuhi tingkat kinerja yang ditentukan. Konsep rekayasa gempa berbasis kinerja dibagi menjadi dua bagian yakni *Performance Based Earthquake Design* (PBSD) dan *Performance Based Earthquake Evaluation* (PBSE). Karena dalam tugas akhir ini hanya akan membicarakan terkait evaluasi kinerja struktur bangunan, salah satu metode evaluasi tersebut adalah dengan menggunakan analisis beban dorong (*pushover*) statik nonlinier.

3.6 Analisis Statik Nonlinier (*Pushover Analysis*)

Analisis *pushover* adalah analisis statik nonlinier. Pada analisis *pushover* ini pengaruh gempa rencana terhadap struktur bangunan gedung dianggap sebagai beban-beban static yang menangkap pada pusat massa masing-masing tingkat, yang nilainya ditingkatkan secara berangsur-angsur sampai melampaui pembebanan yang menyebabkan terjadinya pelelehan (sendi plastis) pertama di

dalam struktur bangunan gedung, kemudian dengan peningkatan beban lebih lanjut mengalami perubahan bentuk pasca-elastic yang besar sampai mencapai kondisi plastis (Pranata, Y, 2006)

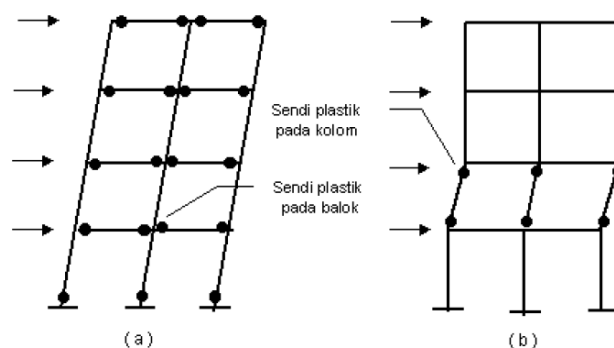
Analisis statik *pushover* adalah analisa *static nonlinier* yang relatif mudah dan diharapkan dapat digunakan untuk meramalkan performa struktur terhadap beban lateral. Program komputer seperti SAP2000 -*Nonlinear* telah memasukkan kemampuan untuk melakukan analisis *static pushover*.

3.7 Sendi Plastis (*Hinge*)

Sendi plastis (*Hinge*) merupakan bentuk ketidakmampuan elemen struktur dalam menahan gaya-gaya yang bekerja pada struktur tersebut. Ketika suatu gedung dilanda gempa yang cukup besar, akan timbul momen, momen tersebut melampaui besar momen leleh balok atau kolom, maka terjadi sendi plastis pada balok atau kolom ditandai dengan melelehnya tulangan baja. Sendi plastis terjadi secara bertahap sampai bangunan gedung tersebut runtuh.

Jamal (2011) menjelaskan Terdapat 2 pola kemungkinan terbentuknya sendi plastis, yaitu:

1. Sendi plastis terjadi pada balok. Pola ini tidak begitu bahaya karena tidak ada efek $P-\Delta$ (sangat kecil), sehingga diperlukan banyak sendi plastis untuk mencapai taraf keruntuhan balok.
2. Sendi plastis terjadi pada kolom. Bila pola terjadi, maka keadaan menjadi bahaya karena adanya efek $P-\Delta$



Gambar 3.4 Mekanisme Terjadinya Sendi Plastis pada Struktur Gedung Akibat Beban Gempa

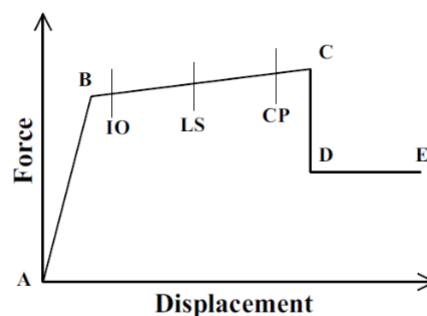
(Sumber : Aplikasi SNI Gempa 1726, 2012)

Kedua pola diatas apabila diilustrasikan pada struktur MDOF (*Multi Degree of Freedom*) sesuai dengan Gambar 3.4. Syarat terjadinya sendi plastis setidaknya ada 3 kondisi:

1. Balok tidak boleh mengalami kegagalan geser di daerah tumpuan selain momen lentur yang besar, gaya geser di daerah tumpuan balok juga sangat besar.
2. *Joint* (sambungan balok-kolom) tidak boleh gagal sewaktu menyalurkan gaya-gaya yang cukup besar dari balok ke kolom.
3. Kolom harus lebih kuat dari pada kapasitas balok, sehingga dapat dikatakan istilah SCWB (*Strong Column Weak Beam*)

Pemodelan sendi plastis digunakan untuk mendefinisikan perilaku nonlinear atau momen rotasi yang ditempatkan pada balok dan kolom struktur. Pemodelan sendi plastis berupa *rigid*. Dalam analisis elemen balok menggunakan tipe sendi *default-M3* dan elemen kolom menggunakan tipe sendi *default-PMM*.

Perilaku plastifikasi sendi plastis, didefinisikan sesuai *Tabel 6-7* untuk balok dan *Tabel 6-8* untuk kolom, masing-masing tertera pada FEMA 356. Keseluruhan proses evaluasi akan dikerjakan secara otomatis oleh program SAP2000 seperti yang terlihat pada Gambar 3.5 berikut ini.



Gambar 3.5 Kurva Hubungan Gaya dan Perpindahan Serta Karakteristik Sendi Plastis

(Sumber : *Analysis Reference Manual CSI*)

Gambar 3.4 menunjukkan hubungan gaya dan perpindahan serta karakteristik sendi plastis yang bergerak dari titik A-B-C-D kemudian E. Titik-titik tersebut menunjukkan karakteristik sendi plastis yang timbul pada elemen struktur hasil analisis pushover. Titik A adalah titik origin, titik B menandakan

pelelehan pertama, titik C menandakan kapasitas ultimit, titik D adalah kekuatan sisa (*residual strength*). Dan titik E menandakan elemen struktur tersebut telah mengalami keruntuhan (*failure*). Level kinerja bangunan (IO,LS, dan CP) terletak diantara sendi plastis leleh pertama sampai mencapai batas ultimitnya. Dan warna yang tertera pada huruf-huruf tersebut merupakan indikator karakteristik sendi plastis yang sudah di *built-in* pada program SAP2000.

3.8 Analisis Statik Nonlinier (*Pushover Analysis*) dengan Metode *Capacity Spectrum*

Hasil analisis *pushover* menggambarkan hubungan antara *base shear* dan *roof displacement*, hubungan tersebut kemudian dideskripsi kedalam kurva kapasitas struktur. Selain itu, analisis *pushover* juga dapat memperlihatkan secara visual perilaku struktur pada saat kondisi elastis, plastis dan sampai keruntuhan. Salah satu metode untuk menentukan level kinerja suatu struktur adalah dengan metode *Capacity Spectrum (CSM)* berdasar dari ATC-40 (*Applied Technology Council*),1996.

Metode *capacity spectrum* menyajikan secara grafis dua buah grafik yang disebut spektrum, yaitu spektrum kapasitas yang menggambarkan kapasitas struktur berupa gaya dorong total (*base shear*) dan perpindahan lateral struktur (biasanya ditetapkan dipuncak bangunan) dan spektrum *demand* yang menggambarkan besarnya *demand* (tuntutan kerja) akibat gempa dengan periode ulang tertentu. Dalam metode spektrum kapasitas proses dimulai dengan menghasilkan kurva hubungan gaya perpindahan yang memperhitungkan kondisi inelastikitas struktur. Proses tersebut sama dengan metode koefisien perpindahan, yang hasilnya diplotkan dalam format ADRS (*Acceleration Displacement Response Spectrum*) (Dewobroto,2005).

3.8.1 Analisis *pushover* menggunakan ATC-40 prosedur B

Dalam ATC-40, terdapat beberapa prosedur yang digunakan untuk mengetahui nilai dari *performance point* yaitu prosedur A, B, dan C. Pada tugas akhir ini menggunakan prosedur B untuk menentukan nilai *performance point*.

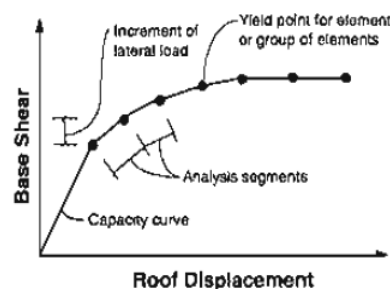
Hal-hal yang perlu diperhatikan pada prosedur B menurut ATC-40 adalah sebagai berikut ini.

1. Menggunakan metode analitik,
2. Lebih sederhana dari prosedur A, karena asumsi yang disederhanakan (tetapi tidak selalu memiliki hasil yang lebih akurat),
3. Metode termudah jika menggunakan lembar pemrograman,
4. Metode penerapan yang cukup jelas, dan
5. Penggunaan metode di butuhkan pemahaman akan asumsi yang digunakan.

Dipilih menggunakan analisis pushover dengan ATC-40 prosedur B karena prosedur tersebut sudah langsung *built-in* dengan program SAP2000 sehingga mempermudah dalam analisis. Output yang dihasilkan berupa titik performa (*performance point*) *base shear-displacement*, S_a-S_d , dan $T_{eff}-B_{eff}$. Selain menghasilkan titik performa, pada prosedur ini juga didapat urutan terjadinya sendi plastis pada struktur bangunan, hal tersebut sangat berguna untuk mengontrol bagian tertentu yang sangat lemah dan kemudian diharapkan akan direncanakan lebih baik agar struktur bangunan memiliki daya tahan yang lebih kuat.

3.8.2 Kurva kapasitas

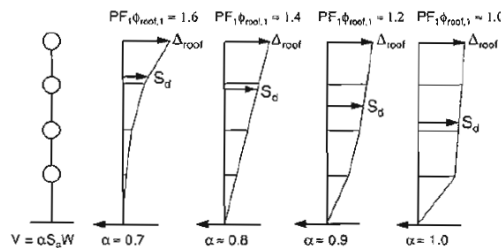
Kurva kapasitas menggambarkan kekuatan struktur yang besarnya sangat tergantung dari kemampuan deformasi dari masing-masing komponen struktur. Kurva kapasitas menerangkan tentang hubungan antara *base shear* dan *roof displacement*, untuk lebih jelasnya mengenai kurva kapasitas dapat dilihat pada Gambar 3.6



Gambar 3.6 Kurva Kapasitas (*Capacity Curve*)
(Sumber : *Applied Technology Council-40,1996 Figure 8-1*)

1. Konversi kurva kapasitas dalam format *Acceleration-Displacement Response Spectra* (ADRS)

Untuk merubah kurva kapasitas ke dalam format ADRS atau menjadi spektrum kapasitas maka terlebih dahulu dipahami tentang hubungan faktor partisipasi modal, modal koefisien massa, dan perpindahan bangunan. Hubungan tersebut dapat dilihat pada Gambar 3.7



Gambar 3.7 Faktor Partisipasi Modal dan Modal Koefisien Massa

(Sumber : *Applied Technology Council-40,1996 Figure 8-5*)

Pada Gambar 3.7 terlihat hubungan antara faktor partisipasi modal dan modal koefisien massa untuk nilai simpangan antar lantai yang berbeda disetiap bangunan. Proses pertama untuk merubah kurva kapasitas ke format ADRS adalah menghitung nilai faktor partisipasi massa (PF_1), dan modal koefisien massa (α_1). Untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada Persamaan 3.17 dan Persamaan 3.18.

$$PF_1 = \left[\frac{\sum_{i=1}^N (w_i \phi_{i1}) / g}{\sum_{i=1}^N (w_i \phi_{i1}^2) / g} \right] \quad (3.17)$$

$$\alpha = \frac{\left[\sum_{i=1}^N (w_i \phi_{i1}) / g \right]^2}{\left[\sum_{i=1}^N (w_i / g) \right] \left[\sum_{i=1}^N (w_i \phi_{i1}^2) / g \right]} \quad (3.18)$$

Keterangan :

PF_1 : faktor partisipasi modal pada *mode* pertama;

α_1 : modal koefisien massa pada mode pertama;

w_i / g : massa pada tingkat ke- i ;

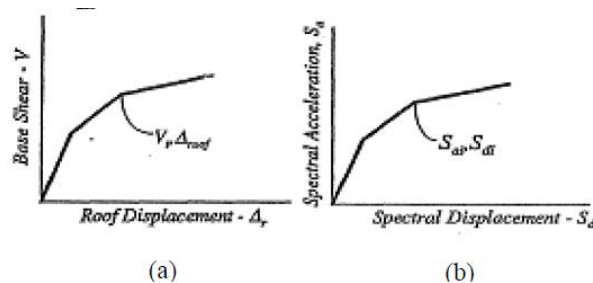
ϕ_{i1} : amplitud *mode-1* pada tingkat ke-*i*.

Kemudian setiap point pada kurva kapasitas (V) dan (Δ_{roof}) dikonversi ke point (S_a) dan (S_d). Dihat pada Persamaan 3.19 dan Persamaan 3.20.

$$S_a = \frac{V/W}{\alpha_1} \quad (3.19)$$

$$S_d = \frac{\Delta_{roof}}{PF_1 \phi_{roof,1}} \quad (3.20)$$

Dari persamaan di atas maka akan didapatkan spektrum kapasitas. Perubahan format kurva kapasitas dapat dilihat pada Gambar 3.8.



Gambar 3.8 Perubahan Format Kurva Kapasitas. (a) Kurva Kapasitas Format Standar, (b) Kurva Kapasitas Format ADRS
(Sumber : *Applied Technology Council-40,1996 Page 8-5*)

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

Metode konversi kurva kapasitas ke format spektrum kapasitas secara khusus telah di *built-in* pada program SAP2000, konversi kurva kapasitas ke format ADRS dikerjakan secara otomatis oleh program tersebut.

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

Untuk merubah respon spektrum ke dalam format ADRS dapat dihitung dengan Persamaan berikut.

$$S_d = \frac{T^2}{4\pi^2} S_a \cdot (g) \quad (3.21)$$

atau

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{S_d}{S_a}} \quad (3.22)$$

Keterangan :

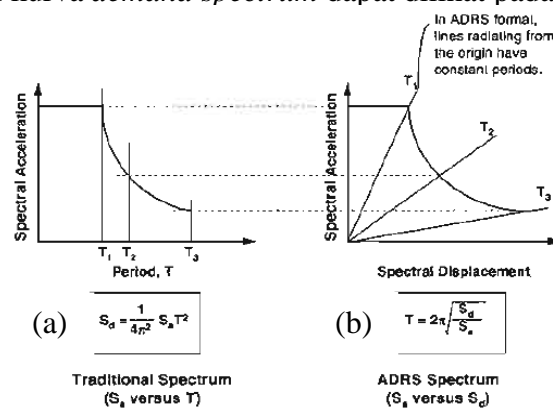
S_a : spectra percepatan / *spectral acceleration* (m);

S_d : spectra perpindahan / *spectral displacement* (g);

g : percepatan gravitasi ($9,81 \text{ m/s}^2$);

T : periode getar fundamental (dt)

Sehingga hasil kurva *demand spectrum* dapat dilihat pada Gambar 3.9



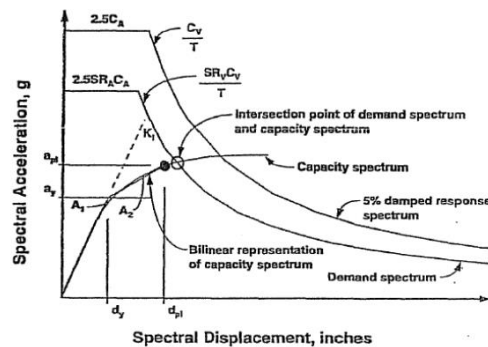
Gambar 3.9 Perubahan Format Respons Spektra . (a) Respon Spektra Format Standar, (b) Respon Spektra Format ADRS

(Sumber : *Applied Technology Council-40,1996 Figure 8-6*)

Pada SAP2000, proses konversi kurva kapasitas dan kurva respon spektrum ke format ADRS sudah dihitung dan dibuat secara otomatis oleh program tersebut, yang dilakukan hanya perlu memasukkan data untuk membuat respon spektrum.

3.8.3 Performance point (titik kinerja)

Perpotongan antara *demand spectrum* dan *capacity spectrum* akan menghasilkan sebuah titik, titik tersebut yang dinamakan *performance point*. Pada *performance point* dapat mengetahui nilai periode bangunan dan redaman efektif akibat perubahan kekakuan struktur setelah terjadi sendi plastis. Untuk penentuan nilai *performance point* membutuhkan iterasi yang akan dilakukan secara otomatis menggunakan program SAP2000. Penjelasan lebih lanjut dapat dilihat pada Gambar 3.10.



Gambar 3.10 Penentuan *Performance Point*
(Sumber : *Applied Technology Council-40 Figure 8-28,1996*)

Titik kinerja merupakan perpotongan antara *capacity spectrum* dan *demand spectrum*. Dengan demikian titik kinerja merupakan representasi dari dua kondisi yaitu :

1. Karena terletak pada spektrum kapasitas, merupakan representasi kekuatan struktur pada suatu nilai perpindahan tertentu.
2. Karena terletak pada kurva *demand*, menunjukkan bahwa kekuatan struktur dapat memenuhi *demand* beban yang diberikan

3.8.4 Batasan deformasi (*Drift*) menurut ATC-40

Deformasi lateral pada saat *performance point* harus dicek terhadap deformasi limit yang ditetapkan dalam ATC-40, 1996 bab 11.3.3. deformasi limit pada berbagai tingkat kinerja dapat dilihat pada Tabel 3.13 berikut.

Tabel 3.13 *Deformation Limits*

<i>Interstory drift limit</i>	<i>Performance Level</i>			
	<i>Immediate occupancy</i>	<i>Damage control</i>	<i>Life safety</i>	<i>Structural stability</i>
<i>Maximum total drift ratio</i>	0,01	0,01-0,02	0,02	$0.33 \sqrt{P_i}$
<i>Maximum inelastic drift ratio</i>	0,005	0,005-0,015	<i>No limit</i>	<i>No limit</i>

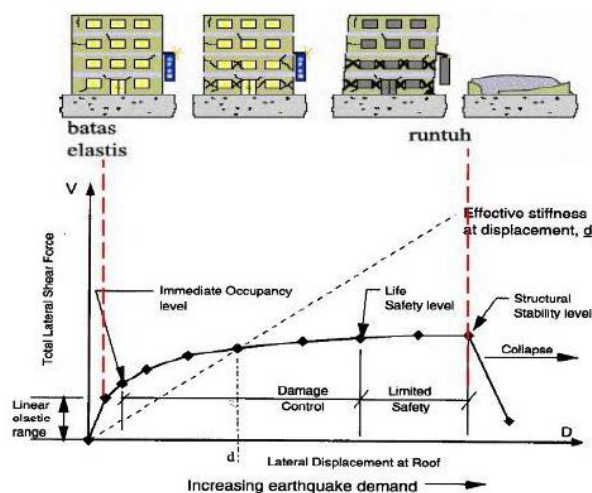
(Sumber : *Applied Technology Council-40, 1996*)

Pada Tabel 3.13 dijelaskan bahwa simpangan total maksimum (*maximum total drift ratio*) 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. *Maximum inelastic drift ratio* adalah proporsi simpangan total maksimum diluar

titik leleh efektif sehingga dapat dikatakan bahwa *maximum inelastic drift ratio* merupakan nilai simpangan maksimum pada atap saat *performance point* dikurangi dengan *displacement* pada pelelehan pertama dibagi dengan tinggi total bangunan.

3.8.5 Kinerja struktur metode ATC-40

Ada beberapa tingkatan kinerja sesuai ATC-40, dimana tingkatan kinerja digambarkan 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. Untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada Gambar 3.11 berikut ini.



Gambar 3.11 Ilustrasi Keruntuhan Gedung

(Sumber : *Applied Technology Council-40,1996*)

Pada Gambar 3.11, simbol (\blacklozenge) pada kurva kapasitas mewakili kejadian-kejadian pening selama respon lateral terhadap struktur. Kejadian-kejadian penting tersebut seperti pelelehan pertama pada salah satu elemen struktur atau kerusakan tertentu contohnya adalah pecahnya atau terkelupasnya selimut beton pada kolom atau kegagalan geser pada spandrel hingga keruntuhan total pada sistem.

Gambar 3.11 telah diketahui kurva kapasitas suatu struktur terhadap beban lateral, dimana terdapat level-level kinerja tertentu. Level kinerja tersebut dapat

dideskripsikan lagi atas bagaimana kondisi bangunan setelah terjadi gempa dan kategori bangunan yang diizinkan terhadap level kinerja tertentu, untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada Tabel 3.14.

Tabel 3.14 Kondisi Bangunan Setelah Terjadi Gempa dan Kategori Bangunan pada Tingkat Kinerja Struktur

Tingkat Kinerja	Kondisi Bangunan Pasca Gempa	Kategori Bangunan
<i>SP-1 Immediate Occupancy (IO)</i>	Bangunan aman saat terjadi gempa, resiko korban jiwa dan kegagalan struktur tidak terlalu berarti, gedung tidak mengalami kerusakan berarti, dan dapat segera difungsikan kembali.	Struktur bangunan yang mutlak difungsikan sebagai sarana penyelamatan, penyimpanan barang berbahaya, atau struktur bangunan yang dapat mempengaruhi ekonomi nasional. Contohnya rumah sakit, gudang bahan bakar atau bahan berbahaya.
<i>SP-2 Damage Control (DC)</i>	Merupakan transisi antara <i>SP-1</i> dan <i>SP-3</i> . Bangunan masih mampu menahan gempa yang terjadi, resiko korban jiwa manusia sangat kecil.	Struktur untuk bangunan bersejarah, bangunan yang menjadi tempat penyimpanan barang-barang berharga.
<i>SP-3 Life Safety (LS)</i>	Bangunan mengalami kerusakan tetapi tidak diperkenankan mengalami keruntuhan yang menyebabkan korban jiwa manusia (resiko korban jiwa sangat rendah). Setelah terjadi gempa maka bangunan dapat berfungsi kembali setelah dilakukan perbaikan komponen struktural maupun non struktural.	Fasilitas-fasilitas umum, gedung perkantoran, perumahan, gudang dan lain sebagainya.
<i>SP-4 Limited Safety</i>	Merupakan transisi antara <i>SP-3</i> dan <i>SP-4</i> dan bukan merupakan tingkatan serta tidak memperhitungkan aspek ekonomis dalam melakukan perbaikan pasca gempa.	-
<i>SP-5 Structural Stability (SS)</i>	Struktur pasca gempa mengalami kerusakan hingga diambang keruntuhan total maupun parsial. Komponen struktur penahan beban gravitasi masih bekerja meskipun keseluruhan kestabilan sudah diambang keseluruhan.	-
<i>SP-6 Not Considered</i>	Bukan merupakan tingkatan kinerja struktur, tetapi hanya untuk melakukan evaluasi seismik non-struktural atau retrofit.	-

Sumber : *Applied Technology Council-40*, (1996)

3.9 Kekakuan Struktur

Pada prinsip bangunan geser (*shear building*) balok lantai tingkat dianggap tetap horizontal baik sebelum maupun setelah terjadi penggoyangan. Adanya pelat lantai yang menyatu secara kaku dengan balok diharapkan dapat membantu kekakuan balok sehingga anggapan tersebut tidak terlalu kasar. Pada prinsip desain bangunan tahan gempa dikehendaki agar kolom lebih kuat dibandingkan balok. (Prawirodikromo, 2017)

Pada prinsipnya semakin kaku balok maka semakin besar kemampuannya dalam mengekang rotasi ujung kolom, sehingga akan menambah kekakuan kolom. Perhitungan kekakuan balok akan lebih teliti apabila pengaruh pelat lantai ikut diperhatikan sehingga diperhitungkan sebagai balok T. Pada prinsip Muto, kekakuan joint juga dapat diperhitungkan sehingga hitungan kekakuan baik kekakuan balok dan kekakuan kolom menjadi lebih teliti.

Muto (1975) memberikan alternatif tata cara menghitung kekakuan kolom dengan memperhitungkan kekakuan balok. Hal ini berarti bahwa join-join dimungkinkan untuk berotasi. Pada penurunan kekakuan kolom dengan cara Muto (1975) ini terdapat beberapa asumsi yang diantaranya :

1. Bangunan cukup besar, banyak kolom, simetri, gaya geser kolom dianggap sama,
2. Join-join mengalami rotasi yang sama,
3. Pengaruh P-delta (beban gravitasi diabaikan),
4. Bending momen terbangun anti simetrik,
5. Titik balik pada kolom dan balok dianggap ditengah-tengah.

Pada tugas akhir ini akan dilakukan pengecekan dengan perhitungan kekakuan menggunakan kekakuan metode Muto. Akan dibandingkan nilai kekakuan antar bangunan yang berposisi sebagai sumbu kuat dan posisi sebagai sumbu lemah struktur metode Muto dengan hasil *displacement* yang terjadi pada analisis *pushover*. Apakah sudah sesuai antara hasil analisis *pushover* dengan perhitungan kekakuan struktur yang dihitung secara manual dengan metode Muto.

3.10 Analisis Probabilitas Kerusakan Bangunan dengan Metode HAZUS

Metode *HAZUS* digunakan untuk memprediksi tingkat kerusakan struktur bangunan yang disebabkan oleh guncangan akibat beban gempa. Metode *HAZUS* membagi tingkat kerusakan menjadi 4 keadaan tingkat yaitu *slight* (rusak ringan), *moderate* (rusak sedang), *extensive* (rusak berat), dan *complete* (robah atau hancur).

Dari perhitungan dengan metode *HAZUS* dapat diketahui seberapa besar tingkat probabilitas pada keempat kategori kerusakan tersebut pada bangunan yang dianalisa dan dapat digunakan dalam upaya untuk mitigasi bencana.

3.10.1 Deskripsi model tipe bangunan

Di deskripsikan dalam *HAZUS* terdapat 36 jenis tipe bangunan yang berdasarkan FEMA, untuk selengkapnya dapat dijelaskan pada Tabel 3.15.

Tabel 3.15 Model Tipe Bangunan

No	Kode	Description	Height			
			Range		Typical	
			Name	Stories	Stories	Ft
1	W1	Wood, Light Frame ($\leq 5,000$ sq.ft.)		1-2	1	14
2	W2	Wood, Commercial and Industrial ($>5,000$ sq.ft)		All	2	24
3	S1L	Steel Moment Frame	Low-Rise	1-3	2	24
4	S1M		Mid-Rise	4-7	5	60
5	S1H		High-Rise	+8	13	156
6	S2L	Steel Brace Frame	Low-Rise			
7	S2M		Mid-Rise			
8	S2H		High-Rise			
9	S3	Steel Light Frame		All	1	15
10	S4L	Steel Frame With Cast-In Place Concrete Shear Wall	Low-Rise	1-3	2	24
11	S4M		Mid-Rise	4-7	5	60
12	S4H		High-Rise	+8	13	156
13	S5L	Steel Frame With Unreinforced Masonry Infill Wall	Low-Rise	1-3	2	24
14	S5M		Mid-Rise	4-7	5	60
15	S5H		High-Rise	+8	13	156
16	C1L	Concrete Moment Frame	Low-Rise	1-3	2	20
17	C1M		Mid-Rise	4-7	5	50
18	C1H		High-Rise	+8	12	120
19	C2L	Concrete Shear Wall	Low-Rise	1-3	2	20
20	C2M	Concrete Shear Wall	Mid-Rise			
21	C2H		High-Rise			
22	C3L	Concrete Frame With Unreinforced Masonry Infill Walls	Low-Rise	1-3	2	20
23	C3M		Mid-Rise	4-7	5	50
24	C3H		High-Rise	+8	12	120
25	PC1	Precast Concrete Tilt-Up Walls		All	1	15
26	PC2L	Precast Concrete Frame With Concrete Shear Walls	Low-Rise	1-3	2	20
27	PC2M		Mid-Rise	4-7	5	50
28	PC2H		High-Rise	+8	12	120
29	RM1L	Reinforced Masonry Bearing Walls With Wood or Metal Deck Diaphragms	Low-Rise	1-3	2	20
30	RM1M		Mid-Rise	+4	5	50
31	RM2L	Reinforced Masonry Bearing Walls With Precast Concrete Diaphragms	Low-Rise	1-3	2	20
32	RM2M		Mid-Rise	4-7	5	50
33	RM2H		High-Rise	+8	12	120
34	URML	Unreinforced Masonry Bearing Walls	Low-Rise	1-2	1	15
35	URMM		Mid-Rise	+3	3	35
36	MH	Mobile Homes		All	1	10

(Sumber : HAZUZ, 1999)

3.10.2 Building Structural Fragility parameters

Dalam menghitung probabilitas tingkat kerusakan, perlu membutuhkan parameter-parameter tertentu. Dalam hal ini parameter yang dibutuhkan dalam menghitung probabilitas kerusakan membutuhkan parameter *summarize median* dan *lognormal standard deviation* (β_{sds}). Parameter tersebut sudah ditentukan berdasar tingkat kerusakan. Kemudian parameter tersebut dibedakan kembali berdasar tingkatan *code seismic design level* yakni *high, moderate, low*. Dijelaskan pada tabel *structural fragility curve parameter* pada *chapter 6 Direct Physical Damage – Essential and High Potential Loss Facilities* halaman 14-15..

Gambar tabel *building structural fragility* menurut HAZUS disajikan pada Gambar 3.12 – Gambar 3.14 berikut.

Building Properties		Interstory Drift at Threshold of Damage State					Spectral Displacement (inches)							
Type	Height (inches)						Slight		Moderate		Extensive		Complete	
	Roof	Modal	Slight	Moderate	Extensive	Complete	Median	Beta	Median	Beta	Median	Beta	Median	Beta
W1	168	126	0.0050	0.0150	0.0500	0.1250	0.63	0.66	1.89	0.72	6.30	0.72	15.75	0.91
W2	288	216	0.0050	0.0150	0.0500	0.1250	1.08	0.69	3.24	0.77	10.80	0.89	27.00	0.85
S1L	288	216	0.0075	0.0150	0.0375	0.1000	1.62	0.67	3.24	0.70	8.10	0.71	21.60	0.68
S1M	720	540	0.0050	0.0100	0.0250	0.0667	2.70	0.62	5.40	0.62	13.50	0.63	36.00	0.71
S1H	1872	1123	0.0037	0.0075	0.0188	0.0500	4.21	0.63	8.42	0.62	21.06	0.62	56.16	0.63
S2L	288	216	0.0063	0.0125	0.0375	0.1000	1.35	0.69	2.70	0.80	8.10	0.89	21.60	0.84
S2M	720	540	0.0042	0.0083	0.0250	0.0667	2.25	0.62	4.50	0.66	13.50	0.66	36.00	0.71
S2H	1872	1123	0.0031	0.0063	0.0188	0.0500	3.51	0.62	7.02	0.63	21.06	0.63	56.16	0.66
S3	180	135	0.0050	0.0100	0.0300	0.0875	0.68	0.66	1.35	0.71	4.05	0.80	11.81	0.90
S4L	288	216	0.0050	0.0100	0.0300	0.0875	1.08	0.77	2.16	0.82	6.48	0.92	18.90	0.91
S4M	720	540	0.0033	0.0067	0.0200	0.0583	1.80	0.69	3.60	0.67	10.80	0.68	31.50	0.82
S4H	1872	1123	0.0025	0.0050	0.0150	0.0438	2.81	0.62	5.62	0.63	16.85	0.65	49.14	0.73
S5L														
S5M														
S5H														
C1L	240	180	0.0063	0.0125	0.0375	0.1000	1.13	0.69	2.25	0.74	6.75	0.82	18.00	0.81
C1M	600	450	0.0042	0.0083	0.0250	0.0667	1.87	0.63	3.75	0.65	11.25	0.66	30.00	0.71
C1H	1440	864	0.0031	0.0063	0.0188	0.0500	2.70	0.63	5.40	0.63	16.20	0.63	43.20	0.69
C2L	240	180	0.0050	0.0125	0.0375	0.1000	0.90	0.69	2.25	0.72	6.75	0.82	18.00	0.95
C2M	600	450	0.0033	0.0083	0.0250	0.0667	1.50	0.65	3.75	0.69	11.25	0.66	30.00	0.70
C2H	1440	864	0.0025	0.0063	0.0188	0.0500	2.16	0.62	4.32	0.63	16.20	0.64	43.20	0.69
C3L														
C3M														
C3H														
PC1	180	135	0.0050	0.0100	0.0300	0.0875	0.68	0.63	1.35	0.74	4.05	0.79	11.81	0.96
PC2L	240	180	0.0050	0.0100	0.0300	0.0875	0.90	0.76	1.80	0.80	5.40	0.87	15.75	0.97
PC2M	600	450	0.0033	0.0067	0.0200	0.0583	1.50	0.66	3.00	0.73	9.00	0.72	26.25	0.73
PC2H	1440	864	0.0025	0.0050	0.0150	0.0438	2.16	0.62	4.32	0.64	12.96	0.65	37.80	0.74
RM1L	240	180	0.0050	0.0100	0.0300	0.0875	0.90	0.70	1.80	0.74	5.40	0.76	15.75	0.98
RM1M	600	450	0.0033	0.0067	0.0200	0.0583	1.50	0.63	3.00	0.68	9.00	0.70	26.25	0.70
RM2L	240	180	0.0050	0.0100	0.0300	0.0875	0.90	0.66	1.80	0.70	5.40	0.76	15.75	0.97
RM2M	600	450	0.0033	0.0067	0.0200	0.0583	1.50	0.63	3.00	0.70	9.00	0.69	26.25	0.68
RM2H	1440	864	0.0025	0.0050	0.0150	0.0438	2.16	0.63	4.32	0.63	12.96	0.63	37.80	0.65
URML														
URMM														
MH	120	120	0.0050	0.0100	0.0300	0.0875	0.60	0.81	1.20	0.89	3.60	0.97	10.50	0.86

Gambar 3.12 Building Structural Fragility – High Code Seismic Design Level
(Sumber : HAZUS, 1999)

Building Properties			Interstory Drift at Threshold of Damage State				Spectral Displacement (inches)							
Type	Height (inches)		Slight	Moderate	Extensive	Complete	Slight		Moderate		Extensive		Complete	
	Roof	Modal					Median	Beta	Median	Beta	Median	Beta	Median	Beta
W1	168	126	0.0050	0.0124	0.0383	0.0937	0.63	0.76	1.56	0.77	4.82	0.78	11.81	0.96
W2	288	216	0.0050	0.0124	0.0383	0.0938	1.08	0.79	2.68	0.86	8.27	0.88	20.25	0.84
S1L	288	216	0.0075	0.0130	0.0294	0.0750	1.62	0.73	2.80	0.71	6.35	0.70	16.20	0.77
S1M	720	540	0.0050	0.0086	0.0196	0.0500	2.70	0.64	4.67	0.65	10.58	0.66	27.00	0.75
S1H	1872	1123	0.0037	0.0065	0.0147	0.0375	4.21	0.62	7.29	0.62	16.51	0.66	42.12	0.70
S2L	288	216	0.0063	0.0108	0.0292	0.0750	1.35	0.82	2.34	0.85	6.30	0.89	16.20	0.85
S2M	720	540	0.0042	0.0072	0.0194	0.0500	2.25	0.66	3.90	0.66	10.50	0.68	27.00	0.81
S2H	1872	1123	0.0031	0.0054	0.0146	0.0375	3.51	0.62	6.08	0.63	16.38	0.65	42.12	0.71
S3	180	135	0.0050	0.0087	0.0234	0.0656	0.68	0.77	1.17	0.81	3.16	0.89	8.86	0.89
S4L	288	216	0.0050	0.0087	0.0234	0.0656	1.08	0.88	1.87	0.92	5.05	0.98	14.18	0.87
S4M	720	540	0.0033	0.0058	0.0156	0.0438	1.80	0.70	3.12	0.67	8.41	0.70	23.62	0.90
S4H	1872	1123	0.0025	0.0043	0.0117	0.0328	2.81	0.66	4.87	0.66	13.13	0.70	36.86	0.81
S5L														
S5M														
S5H														
C1L	240	180	0.0063	0.0108	0.0292	0.0750	1.13	0.80	1.95	0.82	5.25	0.84	13.50	0.81
C1M	600	450	0.0042	0.0072	0.0194	0.0500	1.87	0.66	3.25	0.67	8.75	0.66	22.50	0.84
C1H	1440	864	0.0031	0.0054	0.0146	0.0375	2.70	0.64	4.68	0.64	12.60	0.68	32.40	0.81
C2L	240	180	0.0050	0.0105	0.0289	0.0750	0.90	0.77	1.89	0.86	5.21	0.91	13.50	0.89
C2M	600	450	0.0033	0.0070	0.0193	0.0500	1.50	0.71	3.16	0.70	8.68	0.69	22.50	0.83
C2H	1440	864	0.0025	0.0053	0.0145	0.0375	2.16	0.64	4.55	0.65	12.51	0.66	32.40	0.79
C3L														
C3M														
C3H														
PC1	180	135	0.0050	0.0087	0.0234	0.0656	0.68	0.79	1.17	0.81	3.16	0.86	8.86	1.00
PC2L	240	180	0.0050	0.0087	0.0234	0.0656	0.90	0.83	1.56	0.89	4.21	0.97	11.81	0.89
PC2M	600	450	0.0033	0.0058	0.0156	0.0438	1.50	0.76	2.60	0.74	7.01	0.73	19.69	0.88
PC2H	1440	864	0.0025	0.0043	0.0117	0.0328	2.16	0.65	3.75	0.66	10.10	0.70	28.35	0.81
RM1L	240	180	0.0050	0.0087	0.0234	0.0656	0.90	0.80	1.56	0.85	4.21	0.92	11.81	0.97
RM1M	600	450	0.0033	0.0058	0.0156	0.0438	1.50	0.73	2.60	0.75	7.01	0.75	19.69	0.80
RM2L	240	180	0.0050	0.0087	0.0234	0.0656	0.90	0.77	1.56	0.81	4.21	0.92	11.81	0.96
RM2M	600	450	0.0033	0.0058	0.0156	0.0438	1.50	0.72	2.60	0.72	7.01	0.72	19.69	0.77
RM2H	1440	864	0.0025	0.0043	0.0117	0.0328	2.16	0.63	3.75	0.65	10.10	0.66	28.35	0.76
URML														
URMM														
MH	120	120	0.0050	0.0100	0.0300	0.0875	0.60	0.81	1.20	0.89	3.60	0.97	10.50	0.86

Gambar 3.13 Building Structural Fragility – Moderate Code Seismic Design Level
(Sumber : HAZUS, 1999)

Building Properties			Interstory Drift at Threshold of Damage State				Spectral Displacement (inches)							
Type	Height (inches)		Slight	Moderate	Extensive	Complete	Slight		Moderate		Extensive		Complete	
	Roof	Modal					Median	Beta	Median	Beta	Median	Beta	Median	Beta
W1	168	126	0.0050	0.0124	0.0383	0.0937	0.63	0.80	1.56	0.81	4.82	0.88	11.81	1.01
W2	288	216	0.0050	0.0124	0.0383	0.0938	1.08	0.89	2.68	0.89	8.27	0.86	20.25	0.97
S1L	288	216	0.0075	0.0119	0.0253	0.0625	1.62	0.73	2.58	0.73	5.47	0.75	13.50	0.93
S1M	720	540	0.0050	0.0080	0.0169	0.0417	2.70	0.66	4.30	0.70	9.12	0.78	22.50	0.91
S1H	1872	1123	0.0037	0.0060	0.0127	0.0313	4.21	0.64	6.72	0.66	14.23	0.68	35.10	0.86
S2L	288	216	0.0063	0.0100	0.0250	0.0625	1.35	0.89	2.16	0.89	5.40	0.88	13.50	0.97
S2M	720	540	0.0042	0.0067	0.0167	0.0417	2.25	0.67	3.60	0.68	9.00	0.74	22.50	0.92
S2H	1872	1123	0.0031	0.0050	0.0125	0.0313	3.51	0.62	5.62	0.63	14.04	0.68	35.10	0.84
S3	180	135	0.0050	0.0080	0.0201	0.0547	0.68	0.89	1.08	0.90	2.71	0.98	7.38	0.85
S4L	288	216	0.0050	0.0080	0.0200	0.0547	1.08	0.98	1.73	0.95	4.33	0.97	11.81	0.98
S4M	720	540	0.0033	0.0053	0.0134	0.0364	1.80	0.69	2.88	0.72	7.22	0.81	19.68	0.98
S4H	1872	1123	0.0025	0.0040	0.0100	0.0273	2.81	0.66	4.50	0.67	11.26	0.78	30.71	0.93
S5L	288	216	0.0038	0.0075	0.0188	0.0438	0.81	1.00	1.62	1.00	4.05	1.03	9.45	0.91
S5M	720	540	0.0025	0.0050	0.0125	0.0292	1.35	0.74	2.70	0.72	6.75	0.78	15.75	0.94
S5H	1872	1123	0.0019	0.0037	0.0094	0.0219	2.11	0.67	4.21	0.69	10.53	0.74	24.57	0.90
C1L	240	180	0.0063	0.0100	0.0250	0.0625	1.13	0.85	1.80	0.85	4.50	0.88	11.25	0.95
C1M	600	450	0.0042	0.0067	0.0167	0.0417	1.87	0.70	3.00	0.69	7.50	0.75	18.75	0.95
C1H	1440	864	0.0031	0.0050	0.0125	0.0313	2.70	0.66	4.32	0.71	10.80	0.79	27.00	0.95
C2L	240	180	0.0050	0.0096	0.0247	0.0625	0.90	0.91	1.72	0.94	4.44	1.01	11.25	0.90
C2M	600	450	0.0033	0.0064	0.0164	0.0417	1.50	0.76	2.86	0.74	7.40	0.74	18.75	0.94
C2H	1440	864	0.0025	0.0048	0.0123	0.0313	2.16	0.66	4.12	0.67	10.66	0.74	27.00	0.91
C3L	240	180	0.0038	0.0075	0.0188	0.0438	0.68	0.92	1.35	0.99	3.38	1.04	7.88	0.88
C3M	600	450	0.0025	0.0050	0.0125	0.0292	1.12	0.77	2.25	0.79	5.62	0.78	13.12	0.93
C3H	1440	864	0.0019	0.0038	0.0094	0.0219	1.62	0.68	3.24	0.69	8.10	0.70	18.90	0.88
PC1	180	135	0.0050	0.0080	0.0201	0.0547	0.68	0.89	1.08	0.95	2.71	1.00	7.38	0.96
PC2L	240	180	0.0050	0.0080	0.0201	0.0547	0.90	0.98	1.44	0.98	3.61	1.02	9.84	0.91
PC2M	600	450	0.0033	0.0053	0.0134	0.0364	1.50	0.76	2.40	0.75	6.02	0.75	16.40	0.94
PC2H	1440	864	0.0025	0.0040	0.0100	0.0273	2.16	0.66	3.46	0.68	8.66	0.73	23.63	0.92
RM1L	240	180	0.0050	0.0080	0.0201	0.0547	0.90	0.97	1.44	1.01	3.61	1.07	9.84	0.88
RM1M	600	450	0.0033	0.0053	0.0134	0.0364	1.50	0.78	2.40	0.78	6.02	0.78	16.40	0.94
RM2L	240	180	0.0050	0.0080	0.0201	0.0547	0.90	0.94	1.44	0.98	3.61	1.05	9.84	0.89
RM2M	600	450	0.0033	0.0053	0.0134	0.0364	1.50	0.76	2.40	0.75	6.02	0.75	16.40	0.92
RM2H	1440	864	0.0025	0.0040	0.0100	0.0273	2.16	0.66	3.46	0.67	8.66	0.80	23.63	0.89
URML	180	135	0.0038	0.0075	0.0187	0.0438	0.51	0.89	1.01	0.91	2.53	0.96	5.91	1.09
URMM	420	315	0.0025	0.0050	0.0125	0.0292	0.79	0.81	1.57	0.84	3.94	0.87	9.19	0.82
MH	120	120	0.0050	0.0100	0.0300	0.0875	0.60	0.81	1.20	0.89	3.60	0.97	10.50	0.86

Gambar 3.14 Building Structural Fragility – Low Code Seismic Design Level
(Sumber : HAZUS, 1999)

Dari gambar tabel diatas dapat dihitung probabilitas kerusakan (*probability of being in or exceeding a damage state*) dengan Persamaan berikut :

$$P[ds|Sd] = \Phi \left[\frac{1}{\beta_{ds}} \ln \left(\frac{Sd}{\bar{Sd}, ds} \right) \right] \quad (3.23)$$

Keterangan :

$P[ds|Sd]$ = Peluang kemungkinan mengalami kejadian kerusakan

Sd = Perpindahan Spektral (*inches*),

\bar{Sd}, ds = Nilai median dari perpindahan spektral, pada saat bangunan mencapai kondisi batas kerusakan,

β_{ds} = Nilai standar deviasi logaritma natural dari perpindahan spektral untuk status kerusakan,

Φ = Nilai fungsi standar kumulatif distribusi normal.

Dari menghitung nilai *probability of being in or exceeding a damage state* maka dapat didapatkan nilai *cumulative probability* yang berguna mengetahui berapa persentase tingkat kerusakan pada suatu struktur bangunan.

3.11 Persamaan Atenuasi

Persamaan atenuasi merupakan suatu fungsi yang menggambarkan hubungan antara intensitas (*i*) gerakan tanah setempat, *magnitude* (*M*) dan jarak (*R*) dari sumber titik dalam daerah sumber gempa. Dengan adanya persamaan atenuasi maka gerakan tanah atau insitas gempa disuatu tempat relatif terhadap sumber gempa dapat diprediksi. Persamaan atenuasi dipakai untuk mencari nilai S_a dalam *response curve* dalam proses menentukan probabilitas tingkat kerusakan bangunan suatu bangunan. Dalam menentukan persamaan atenuasi didasarkan pada karakteristik atenuasi yang sesuai dengan gempa yang ditinjau yakni gempa di Yogyakarta tanggal 27 Mei 2006. Gempa di Yogyakarta menurut data penelitian studi peta gempa tahun 2010 memiliki nilai *M* sebesar 6,3 Mw. Dari data tersebut persamaan atenuasi cukup sesuai dengan karakteristik gempa di Yogyakarta adalah persamaan atenuasi menurut Joyner – Boore – Fumal tahun 1997 yang menyinggung besarnya *magnitude* gempa antara 5,5 Mw – 7,5 Mw.

Persamaan atenuasi menurut Joyner – Boore – Fumal tahun 1997 adalah sebagai berikut :

$$\ln[Y] = b_1 + b_2(M - 6) + b_3(M - 6)^2 + b_5.Ln(r) + b_v.Ln(V_S / V_A) \tag{3.24}$$

Keterangan :

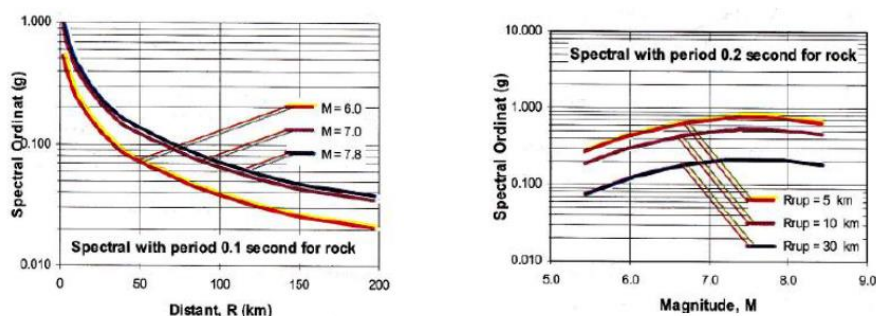
$$R = \sqrt{rjb^2 + h^2} \tag{3.25}$$

h = kedalaman (km),

rjb = jarak episenter (km) < 80 km,

V_S = kecepatan gelombang geser pada 30 m (m/s)

V_A = kecepatan gelombang geser referensi



Gambar 3.15 Kurva Fungsi Atenuasi Joyner – Boore – Fumal tahun 1997
(Sumber : Lecture 6 atenuasi, spectra percepatan & respon spektrum, Muntafi Y)

Dari persamaan atenuasi Joyner – Boore – Fumal tahun 1997, ditentukan koefisien atenuasi Joyner – Boore – Fumal 1997 yang ditujukan pada Gambar 3.16 berikut.

Period (s)	b1ss	b1rs	b1all	b2	b3	b5	bv	V _A	h	s
0.00	-0.313	-0.117	-0.242	0.527	0.000	-0.778	-0.371	1396.00	5.57	0.520
0.10	1.006	1.087	1.059	0.753	-0.226	-0.934	-0.212	1112.00	6.27	0.479
0.20	0.999	1.170	1.089	0.711	-0.207	-0.924	-0.292	2118.00	7.02	0.502
0.30	0.598	0.803	0.700	0.769	-0.161	-0.893	-0.401	2133.00	5.94	0.522
0.40	0.212	0.423	0.311	0.831	-0.120	-0.867	-0.487	1954.00	4.91	0.538
0.50	-0.122	0.087	-0.025	0.884	-0.090	-0.846	-0.553	1782.00	4.13	0.556
0.60	-0.401	-0.203	-0.314	0.928	-0.069	-0.830	-0.602	1644.00	3.57	0.569
0.75	-0.737	-0.562	-0.661	0.979	-0.046	-0.813	-0.653	1507.00	3.07	0.587
1.00	-1.133	-1.009	-1.080	1.036	-0.032	-0.798	-0.698	1406.00	2.90	0.613
1.50	-1.552	-1.538	-1.550	1.085	-0.044	-0.796	-0.704	1479.00	3.92	0.649
2.00	-1.669	-1.801	-1.743	1.085	-0.085	-0.812	-0.655	1795.00	5.85	0.672

Gambar 3.16 Nilai – Nilai Koefisien Atenuasi Joyner – Boore – Fumal 1997
(Sumber : Joyner – Boore – Fumal, 1997)

b_{1ss} digunakan gempa *strike – slip*, b_{1rs} digunakan untuk gempa *reverse – slip* dan b_{1all} digunakan untuk gempa lain. Data gempa di Yogyakarta tahun 2006 menunjukkan bahwa mekanisme gempa adalah *shallow crustal earthquake – strike slip*, sehingga koefisien gempa di Yogyakarta menggunakan b_{1ss} .

3.11.1 Menghitung *spectral displacement* (SD) dari data *spectral acceleration* (SA)

Setelah nilai *spectral acceleration* (SA) diketahui melalui persamaan atenuasi Joyner – Boore – Fumal tahun 1997, selanjutnya adalah menghitung nilai *spectral displacement* yang akan digunakan untuk membuat *respons curve* dimana SD sebagai sumbu X dan SA sebagai sumbu Y.

Persamaan untuk menghitung *spectral displacement* (SD) adalah sebagai berikut :

$$Sd = 9,8 \times Sa \times T^2 \quad (3.26)$$

Keterangan :

Sa = *Spectral Acceleration* (g),

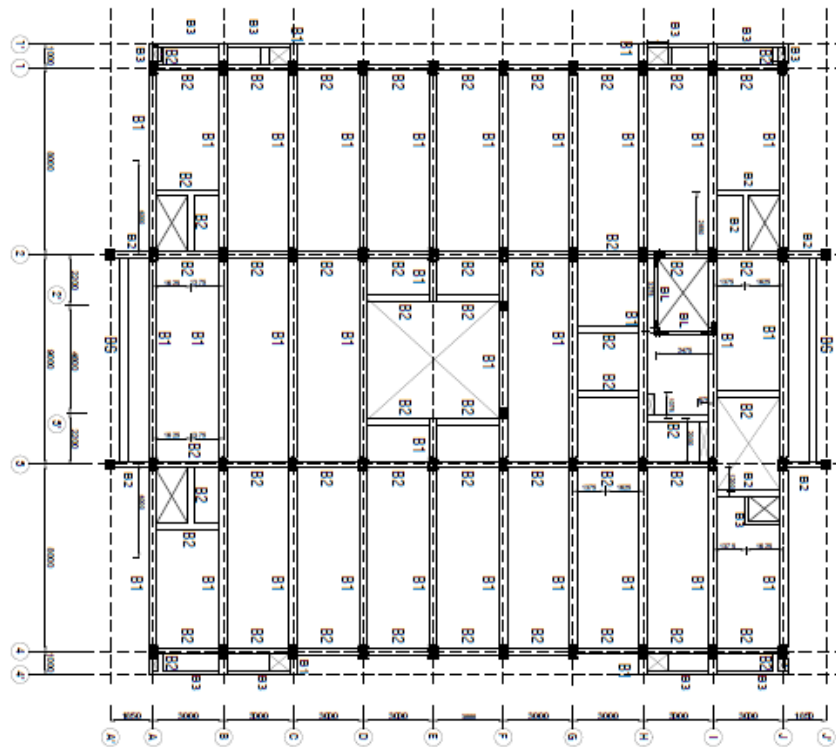
Sd = *Spectral Displacement* (inch),

T = *Time Period* (s)

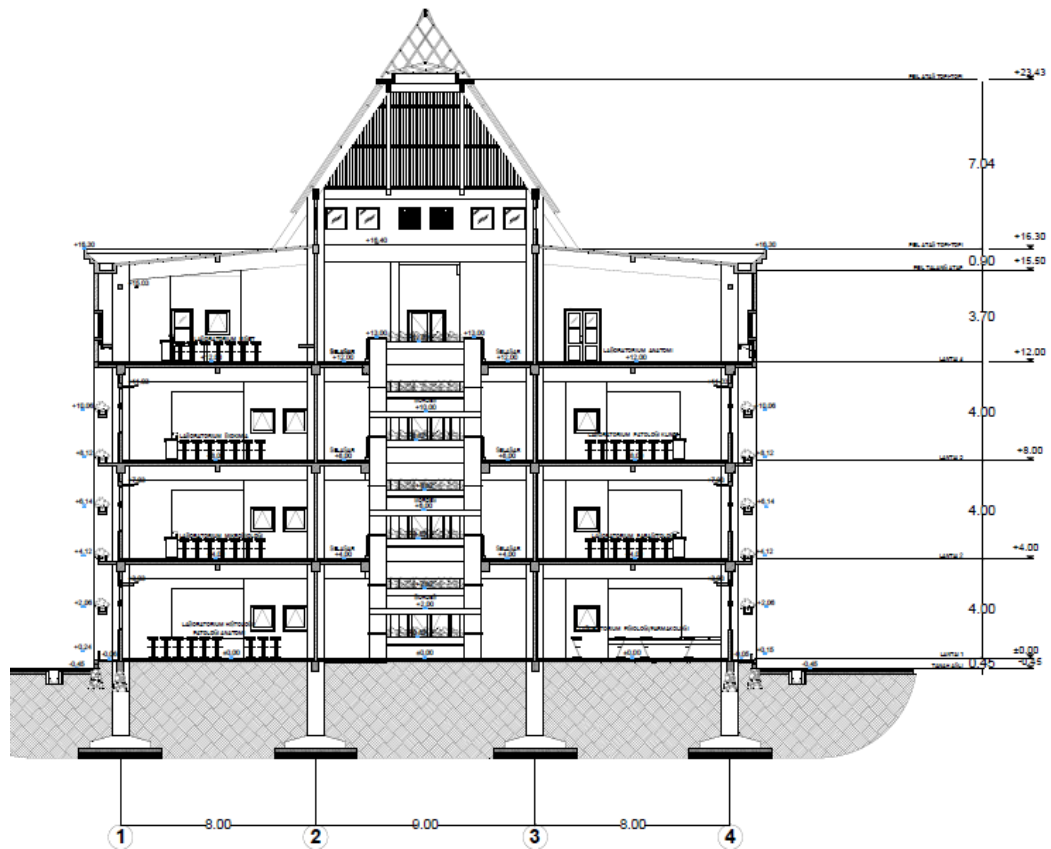
BAB IV METODOLOGI PENELITIAN

4.1 Obyek Penelitian

Obyek penelitian ini adalah gedung Laboratorium Fakultas Kedokteran Universitas Islam Indonesia yang berlokasi di Kampus Terpadu Universitas Islam Indonesia, Jalan Kaliurang km 14,5 Sleman, Yogyakarta. Gedung tersebut memiliki 5 tingkat. Tinggi total bangunan dari dasar bangunan sampai ke atap adalah sebesar 21,9 meter. Denah bangunan dan Denah Potongan Gedung disajikan pada Gambar 4.1 dan Gambar 4.2.



**Gambar 4.1 Denah Tipikal Gedung Laboratorium Fakultas Kedokteran
Universitas Islam Indonesia**
(Sumber : Data As Built Drawing, 2012)



Gambar 4.2Denah Potongan Gedung Laboratorium Fakultas Kedokteran
Universitas Islam Indonesia
(Sumber : Data *As Built Drawing*, 2012)

4.2 Pengambilan Data

Data yang diperlukan dalam penelitian ini adalah data *As Built Drawing*. Data tersebut diperoleh dari Pengelola Fasilitas Kampus (PFK) Badan Wakaf UII. Data yang diperoleh dari *As Built Drawing* adalah sebagai berikut.

1. Mutu beton
 - a. $f'c$ = 20 Mpa (data *as built drawing*)
 - b. berat jenis beton = 2,4 ton/m³
 - c. modulus elastisitas beton (E_c) = $4700 \cdot \sqrt{f'c} = 21019,0389$ Mpa
2. Mutu baja tulangan (data *as built drawing*)
 - a. Baja tulangan dengan diameter ≥ 10 mm dipakai jenis baja tulangan berulir dengan kekuatan leleh sebesar 400 Mpa.
 - b. Baja tulangan dengan diameter < 10 mm dipakai jenis baja tulangan polos dengan kekuatan leleh sebesar 240 Mpa.

3. Dimensi elemen struktur

a. Kolom

Dimensi dan tipe kolom dapat dilihat pada Tabel 4.1 berikut.

Tabel 4.1 Tipe dan Dimensi Kolom

No	Tipe Kolom	Dimensi (mm)
1	K1	400x600
2	K1U	400x600
3	K2	400x600
4	K3	400x400
5	K4	400x200
6	K5	400x400
7	K6	200x200
8	KP	150x150
9	KM	200x350

Sumber : Data As Built Drawing (2013)

b. Balok

Dimensi dan tipe balok dapat dilihat pada Tabel 4.2 berikut

Tabel 4.2 Tipe dan Dimensi Balok

No	Tipe Sloof, Balok	Dimensi (mm)
1	B1	350x700
2	B2	250x350
3	B2A	150x250
4	B2B	250x700
5	B2C	250x350
6	B3	150x200
7	B4	150x400
8	B5	150x450
9	BM1	350x700
10	BM2	250x700
11	BM3	350x700
12	BM4	350x700
13	BM5	150x700

Sumber : Data As Built Drawing (2013)

c. Pelat

Dimensi dan tipe pelat dapat dilihat pada Tabel 4.3 berikut

Tabel 4.3 Tipe dan Dimensi Pelat

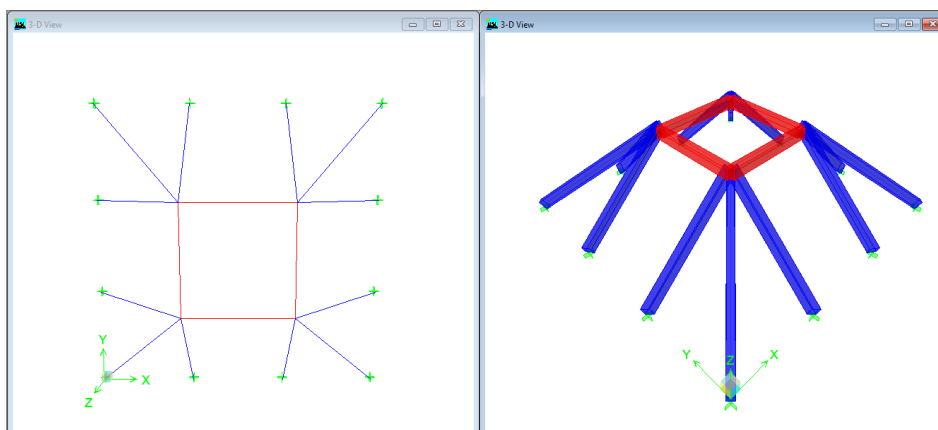
No	Tipe Pelat	Tebal (mm)
1	P1	120
2	P2	120
3	P3	120
4	P4	100
5	P5	120
6	P6	100

Sumber : Data As Built Drawing (2013)

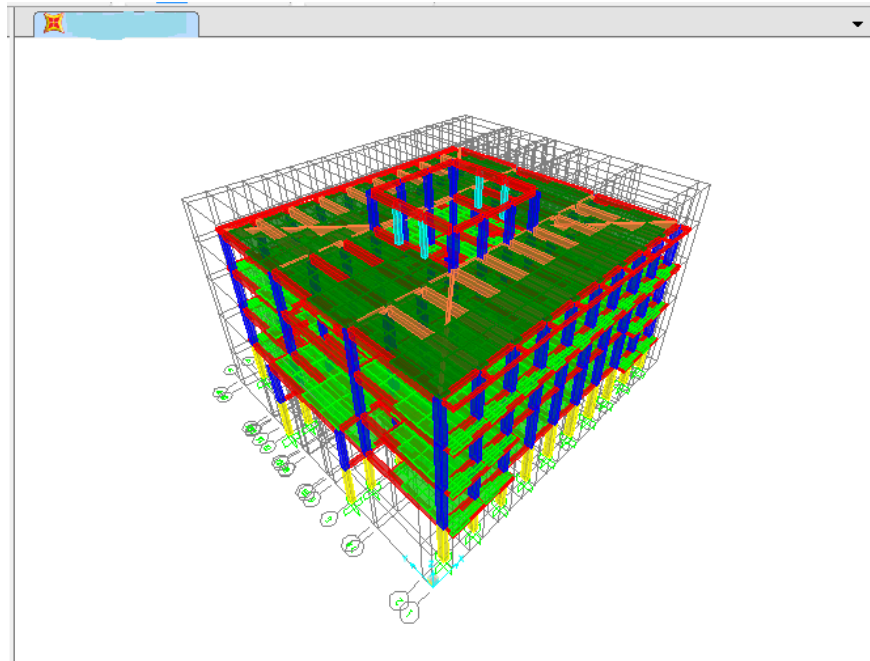
4.3 Program atau *Software* yang Digunakan

Pada penelitian ini bantuan beberapa *software* sangat dibutuhkan, untuk mempermudah menyelesaikan masalah. *Software* yang digunakan adalah sebagai berikut ini.

1. SAP2000 Versi 15.1 dan ETABS 9.6, Program ini berfungsi sebagai alat pemodelan struktur bangunan dan analisis struktur. Adapun pemodelan yang dibuat adalah dengan memisahkan antara desain bangunan atap dan bangunan utama. Hasil dari analisis pada bangunan atap akan berupa gaya yang akan didistribusikan ke bangunan utama. Desain bangunan atap akan dimodelkan ke dalam program ETABS 9.6 dan bangunan utama akan dimodelkan ke dalam program SAP2000 Versi 15.1, dapat dilihat pada Gambar 4.3 dan Gambar 4.4.



Gambar 4.3 Desain Bangunan Atap dengan ETABS 9.6



Gambar 4.4 Desain Bangunan Utama dengan SAP2000 Versi 15.1

2. *Microsoft Excel 2010*, Program ini digunakan dalam menghitung dan menganalisis data hasil *output* dari program ETABS 9.6 dan SAP2000 Versi 15.1.
3. *Autocad 2014*, Program ini digunakan untuk menggambar denah bangunan, tampak gedung tersebut.

4.4 Tahapan Tugas Akhir

Tahapan pengerjaan dalam tugas akhir adalah sebagai berikut ini.

1. Studi literatur

Pada studi literatur bersumber dari tugas akhir, *journal*, dan buku – buku yang ada kaitannya dengan analisis *pushover* statik nonlinier dan analisis kerentanan dengan metode *HAZUS*. Acuan yang digunakan dalam studi literatur di tugas akhir ini adalah SNI 1726-2012 untuk bangunan tahan gempa, SNI 1727-2013 untuk pembebanan yang digunakan, *Applied Technology Council for Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings* (ATC-40), *Federal Emergency Management Agency for Prestandard and Commentary for The Seismic Rehabilitation of Buildings* (FEMA-356), *HAZUS Book 1999 Chapter 6*.

2. Pengumpulan data

Pada tugas akhir ini data yang didapat berupa data struktur dan arsitek sesuai *As Built Drawing* dari Gedung tersebut.

3. Perhitungan pembebanan

Dalam perhitungan pembebanan terdiri atas berikut ini.

a. Beban gravitasi (beban mati dan beban hidup)

Dalam perhitungannya sendiri sudah dijelaskan pada bab landasan teori sub sub bab 3.3.1 dan 3.3.2

b. Beban gempa

Dalam perhitungan beban gempa telah dijelaskan pada bab landasan teori sub sub bab 3.3.3

4. Pemodelan 3D

Pemodelan 3D dibuat dengan program ETABS 9.6 untuk bangunan atap. Digunakan program tersebut karena pemodelannya yang lebih mudah dan serta program ETABS lebih baik jika digunakan untuk bangunan-bangunan yang dipikalnya bermaterial beton. Pemodelan 3D untuk bangunan utama dibuat dengan program SAP2000 Versi 15.1. Digunakan program tersebut dikarenakan *input* material sendi plastis (*Hinges*) yang dapat diketahui sumbernya serta pengaturan di dalamnya yang lebih detail dari pada di ETABS 9.6 kemudian untuk pembebanan *pushover* (*pushover cases*) lebih banyak pilihan dan jauh lebih detail dari pada pada ETABS 9.6. Bagian struktur atap dan bangunan utama dibuat terpisah namun tetap dalam bentuk 3D.

a. Pelat

Pelat yang digunakan dalam pemodelan pelat lantai dan atap adalah bertipe *shell*. Hal tersebut karena pelat diasumsikan menerima gaya vertikal akibat beban mati, beban mati (D), beban mati tambahan (SD), dan beban hidup, juga menerima gaya horizontal yang berupa beban gempa. Pelat tingkat dianggap sebagai diafragma karena memiliki kekakuan searah pelat yang cukup besar, sehingga gerakan pelat akan

menjadi satu kesatuan dalam arah bidangnya (tetapi masih dapat menerima lenturan pada arah tegak lurus)

b. Balok

Balok dimodelkan sebagai elemen *frame* dengan perilaku sebagai jepit sehingga reaksi momen maksimum akan terjadi pada kedua ujung batang balok.

c. Kolom

Kolom dimodelkan sebagai elemen *frame* dengan perilaku sebagai jepit sehingga reaksi momen maksimum akan terjadi pada kedua ujung batang kolom.

d. Pondasi

Pondasi dimodelkan dengan elemen *constrain* berbentuk jepit.

5. Input pembebanan

Setelah melakukan pemodelan 3D langkah selanjutnya adalah input pembebanan. Masukkan beban mati, hidup, dan beban gempa yang telah dihitung pada pemodelan struktur.

6. *Running analysis*

Running analysis dengan *analysis case dead, live, modal, Eqx, Epy, Rspz, dan Rspy*.

7. Cek syarat bahwa $0,85 V_{\text{statik}} \leq V_{\text{dinamik}}$ dan partisipasi massa struktur sebesar 90%.

8. Mementukan titik kontrol

Dalam penentuan titik kontrol ini menjadi sangat penting karena titik kontrol ini yang akan menentukan apakah hasil dari *running pushover* sudah benar atau tidak, jika salah dalam penempatan titik kontrol, kurva kapasitas baik arah x dan arah y tidak akan keluar hasilnya. Biasanya dalam menentukan titik kontrol, diletakkan pada titik pusat massa pada tingkat paling atas dalam suatu bangunan.

9. Pemberian beban statik nonlinier (*Pushover analysis case*)

Beban statik nonlinier yang diberikan berupa beban gravitasi (GRAV) dan beban gempa berupa beban dorong statik lateral (PUSHX dan PUSHY).

10. Penentuan letak sendi plastis

Sendi plastis diharapkan terjadi pada struktur balok dan kolom utama. Untuk balok dikenakan beban momen arah sumbu lokal 3 (M3), sedangkan pada kolom dikenakan beban gaya aksial (P), momen (M) sumbu lokal 2 (M2) dan sumbu lokal 3 (M3).

11. Analisis struktur dengan metode *pushover*

Dilakukan dengan memberikan beban dorong pada setiap pusat massa lantai dan ditingkatkan secara berkala hingga tercapai target perpindahan pada atap gedung. Hasil dari metode *pushover* ini berupa kurva kapasitas gedung yang telah dianalisis.

12. Menentukan *performance point*

Menentukan *performance point* berdasarkan metode *capacity spektrum* ATC-40 dengan memberikan nilai parameter response spektrum pada kolom perintah kemudian hasil dari *performance point* sudah secara otomatis dihitung oleh program SAP2000 Versi 15.1,

13. Pembahasan hasil analisis *pushover*

Dari hasil *performance point* dapat diketahui kriteria kinerja struktur berdasarkan metode *capacity spektrum* ATC-40.

14. Pengecekan lokasi terjadinya sendi plastis

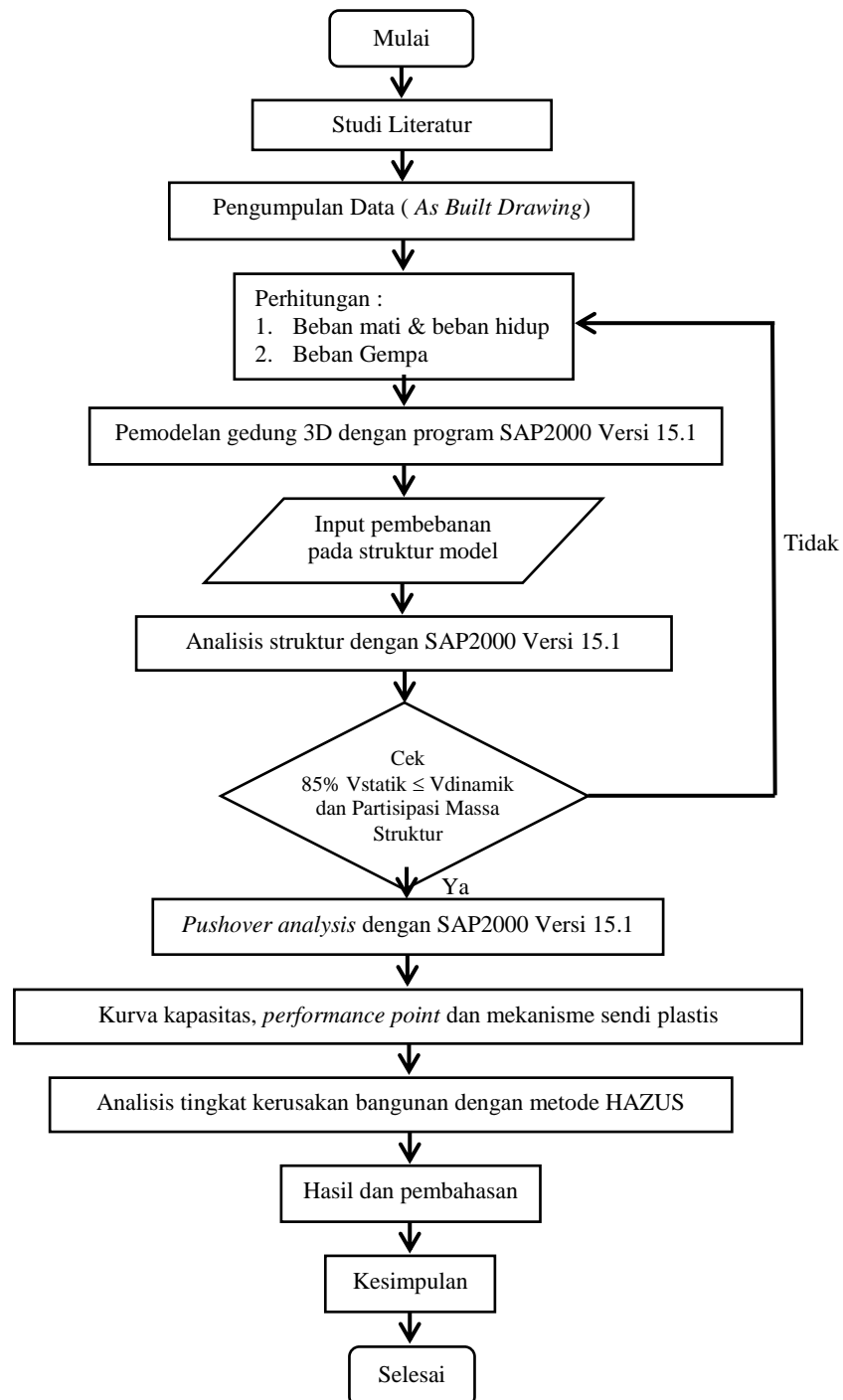
Kemudian memastikan lokasi terjadinya sendi plastis di bagian kolom dan balok mana yang telah mengalami kondisi *collapse*,

15. Menganalisis tingkat kerusakan dengan metode *HAZUS*,

16. Membuat kesimpulan dari hasil analisis yang telah dilakukan.

4.5 Bagan Alir Penelitian

Skema proses pelaksanaan penelitian secara garis besar tergambar dalam bagan alir Gambar 4.4 berikut ini.



Gambar 4.5 Bagan Alir Penelitian

BAB V ANALISIS DAN PEMBAHASAN

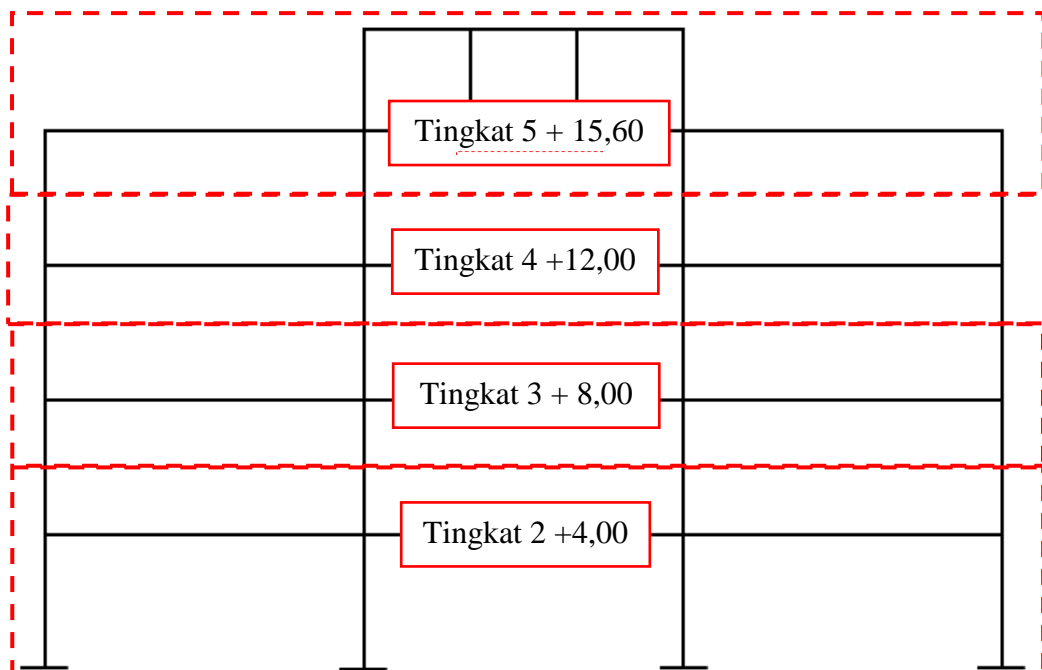
5.1 Pembebanan Struktur

Pembebanan struktur terdiri dari beban mati, beban hidup, dan beban gempa yang masing – masing beban tersebut didistribusikan pada bangunan utama dan untuk bangunan atap ditambahkan dengan beban air hujan, yang masing-masing bangunan yakni bangunan utama dan bangunan atap dimodelkan secara terpisah. Berikut adalah perhitungan dari pembebanan tersebut :

5.1.1. Pembebanan struktur pada bangunan utama

1. Beban mati

Beban mati pada dasarnya terdiri dari berat sendiri bangunan tersebut seperti balok, kolom, pelat , serta beban mati tambahan berupa dinding partisi. Perhitungan beban mati dihitung secara manual, untuk pembagian beban mati disetiap tingkat dapat dilihat pada potongan disalah satu bagian pada bangunan utama berikut ini.



Gambar 5.1 Pembagian Berat pada Setiap Tingkat Bangunan Utama

a. Kolom

Dari Gambar 5.1 dapat dilihat pembagian berat kolom setiap tingkat. Pada bagian tingkat 2 dapat dilihat kolom yang bekerja adalah setengah kolom tingkat 2 ditambah kolom tingkat dasar yang berada di bawahnya, untuk lebih jelasnya mengenai berat kolom tersebut dapat dilihat pada Tabel 5.1 berikut ini

Tabel 5.1 Perhitungan Berat Kolom pada Tingkat 2

No	Jenis elemen	Dimensi (m)			Vol (m ³)	Jumlah	Bj (ton/m ³)	Berat (ton) Vol×Jumlah×Bj
		T	B	H				
Kolom Tingkat Dasar +0,00								
1	K1	4	0,4	0,6	0,96	18	2,4	41,4720
2	K1U	4	0,4	0,6	0,96	2	2,4	4,6080
3	K2	4	0,4	0,6	0,96	20	2,4	46,0800
4	K3	4	0,4	0,4	0,64	4	2,4	6,1440
5	K4	4	0,4	0,2	0,32	2	2,4	1,5360
Jumlah						46		99,8400
Setengah kolom Tingkat 2 +4,00								
1	K1	2	0,4	0,6	0,48	18	2,4	20,7360
2	K1U	2	0,4	0,6	0,48	2	2,4	2,3040
3	K2	2	0,4	0,6	0,48	20	2,4	23,0400
4	K3	2	0,4	0,4	0,32	4	2,4	3,0720
5	K4	2	0,4	0,2	0,16	2	2,4	0,7680
Jumlah						46		49,9200
Berat kolom Tingkat dasar + setengah kolom kolom Tingkat 2								149,7600

Untuk perhitungan selanjutnya langkah perhitungannya sama seperti tabel diatas untuk perhitungan pada kolom tingkat 3 berarti setengah kolom tingkat 2 ditambah dengan setengah kolom tingkat 3, dan seterusnya. Hasil rekapitulasi berat kolom disetiap tingkat, dapat dilihat pada Tabel 5.2.

Tabel 5.2 Rekapitulasi Berat Kolom pada Setiap Tingkat

Kolom Tingkat	Berat (ton)
Tingkat 5 + 15,60	60,3936
Tingkat 4 +12,00	88,3200
Tingkat 3 + 8,00	96,7680
Tingkat 2 +4,00	149,7600

b. Balok

Pada Gambar 5.1 dapat dilihat pembagian berat balok pada setiap tingkat. Contoh perhitungan berat balok pada tingkat 2, dapat dilihat pada Tabel 5.3 berikut ini.

Tabel 5.3 Perhitungan Berat Balok pada Tingkat 2

No	Jenis elemen	Dimensi (m)			Vol (m ³)	Jumlah	Bj (ton/m ³)	Berat (ton) Vol×Jumlah×Bj
		L	B	H				
Balok Tingkat 2 +4,00								
1	B1	8	0,35	0,7	1,9600	20	2,4	94,0800
2		9	0,35	0,7	2,2050	9	2,4	47,6280
3		2.2	0,35	0,7	0,5390	2	2,4	2,5872
4		1	0,35	0,7	0,2450	4	2,4	2,3520
5	B2	3	0,25	0,35	0,2625	45	2,4	28,3500
6		1	0,15	0,25	0,0375	4	2,4	0,3600
7		1.85	0,25	0,7	0,3238	4	2,4	3,1080
8		2.65	0,25	0,35	0,2319	3	2,4	1,6695
9	B3	3	0,15	0,2	0,0900	8	2,4	1,7280
Jumlah						99		181,8627

Langkah perhitungan untuk balok tingkat 3 dan seterusnya sama seperti perhitungan pada Tabel 5.3. Hasil rekapitulasi perhitungan berat balok di setiap tingkat dapat dilihat pada Tabel 5.4.

Tabel 5.4 Rekapitulasi Berat Balok pada Setiap Tingkat

Balok Tingkat	Berat (ton)
Tingkat 5 + 15,60	187,3979
Tingkat 4 + 12,00	182,8512
Tingkat 3 + 8,00	191,3727
Tingkat 2 + 4,00	181,8627

c. Pelat

Perhitungan beban pada pelat dan pelat atap akan disajikan pada Tabel 5.5 dan Tabel 5.6 berikut ini.

Tabel 5.5 Beban Mati Pelat

Nama	Tebal (m)	Bj (ton/m ³)	Beban (ton/m ²) Tebal×Bj
Pelat beton	0,12	2,4	0,2880
Spesi	0,025	1,95	0,0488
Pasir	0,04	1,8	0,0720
Tegel	0,015		0,015
plafond	0,011		0,011
Penggantung	0,007		0,007
ME	0,025		0,025
Total			0,4668

Tabel 5.6 Beban mati Pelat Atap

Nama	Tebal (m)	Bj (ton/m ³)	Beban (ton/m ²) Tebal×Bj
Pelat beton	0,1	2,4	0,2400
Lap. Kedap air	0,02	1,9	0,0380
Penggantung	0,007		0,007
ME	0,025		0,025
Total			0,3100

Beban mati tersebut didistribusikan pada setiap tingkat pada bangunan sehingga didapatkan berat setiap elevasi pada masing-masing tingkat. Contoh perhitungan berat pelat pada tingkat 2, dapat dilihat pada Tabel 5.7.

Tabel 5.7 Berat Pelat pada Tingkat 2

No	Elemen pelat	Ukuran (m)		Jumlah	Qd (ton/m ²)	Berat pelat (ton) A×Jumlah×Qd
		P	L			
1	P1	8	3	14	0,4668	156,8280
2	P3	3	1	4	0,4668	5,6010
3	P1	5,35	3	2	0,4668	14,9827
4	P3	2,65	1,375	3	0,4668	5,1022
5	P1	3	1	2	0,4668	2,8005
6	P1	9	3	2	0,4668	25,2045
7	P1	5,925	3	1	0,4668	8,2965
8	P2	3,725	3	1	0,4668	5,2159
9	P2	2,325	2	1	0,4668	2,1704
10	P3	3	1	2	0,4668	2,8005
11	P1	5,35	3	1	0,4668	7,4913
12	P1	5,508	3	1	0,4668	7,7126
13	P3	2,2	3	4	0,4668	12,3222
14	P1	9	3	2	0,4668	25,2045
Jumlah				40		281,7328

Untuk perhitungan berat pada semua tingkat dapat dilihat di Tabel 5.8 berikut ini.

Tabel 5.8 Rekapitulasi Berat Pelat pada Setiap Tingkat

Pelat Tingkat	Berat (ton)
Tingkat 5 + 15,60	179,6644
Tingkat 4 + 12,00	310,7505
Tingkat 3 + 8,00	309,8778
Tingkat 2 + 4,00	281,7328

d. Dinding

Pada beban dinding terdiri dari dinding tidak penuh (dinding 60%) dan dinding penuh. Dinding akan dibebankan tepat diatas balok disetiap tingkat. Contoh perhitungan berat dinding pada tingkat 2, dapat dilihat pada Tabel 5.9.

Tabel 5.9 Berat Dinding pada tingkat 2

No	Nama	%	Kode Balok	Panjang (m)	Tebal dinding (m)	T. Kolom (m)	H. Balok (m)	Tebal Pelat (m)	T. dinding (m)	Jumlah	Vol (m ³)	Bj (ton/m ³)	Berat (ton) Vol×Bj
Dinding pada Tingkat Dasar +0,00													
1	Dinding + Pintu dan Jendela	0,6	S3	3	0,15	4	0,2	0,12	3,68	14	23,1840	1,7	23,6477
2	Dinding + Pintu dan Jendela	0,6		1	0,15	4	0,2	0,12	3,68	2	1,1040	1,7	1,1261
3	Full Dinding	1		1	0,15	4	0,2	0,12	3,68	8	4,4160	1,7	7,5072
4	Full Dinding	1	S2	3	0,15	4	0,35	0,12	3,53	9	14,2965	1,7	24,3041
5	Full Dinding	1	S3	3	0,15	4	0,2	0,12	3,68	5	8,2800	1,7	14,0760
6	Dinding + Pintu dan Jendela	0,6	S1	2.65	0,15	4	0,2	0,12	3,68	2	2,9256	1,7	4,9735
7	Full Dinding	1	S3	1.625	0,15	4	0,2	0,12	3,68	2	1,7940	1,7	3,0498
8	Full Dinding	1		2.65	0,15	4	0,2	0,12	3,68	2	2,9256	1,7	2,9841
9	Dinding + Pintu dan Jendela	0,6		3.15	0,15	4	0,2	0,12	3,68	1	1,7388	1,7	1,7736
10	Dinding + Pintu dan Jendela	0,6		1.85	0,15	4	0,35	0,12	3,53	4	3,9183	1,7	6,6611
11	Full Dinding	1	S2	3	0,15	4	0,35	0,12	3,53	19	30,1815	1,7	30,7851
12	Dinding + Pintu dan Jendela	0,6		1.375	0,15	4	0,2	0,12	3,68	7	5,3130	1,7	9,0321
13	Full Dinding	1	S3	3.275	0,15	4	0,2	0,12	3,68	1	1,8078	1,7	1,8440
14	Dinding + Pintu dan Jendela	0,6		9	0,15	4	0,5	0,12	3,38	4	18,2520	1,7	18,6170
15	Dinding + Pintu dan Jendela	0,6	S1	3.075	0,15	4	0,2	0,12	3,68	2	3,3948	1,7	3,4627
16	Dinding + Pintu dan Jendela	0,6	S3	0.525	0,15	4	0,2	0,12	3,68	1	0,2898	1,7	0,4927
17	Full Dinding	1		1.95	0,15	4	0,2	0,12	3,68	1	1,0764	1,7	1,0979
18	Dinding + Pintu dan Jendela	0,6		1	0,15	4	0,25	0,12	3,63	18	9,8010	1,7	16,6617
19	Full Dinding	1	S4	2.65	0,15	4	0,2	0,12	3,68	2	2,9256	1,7	4,9735
Jumlah										109			201,0562

Lanjutan Tabel 5.9 Berat Dinding pada Tingkat 2

(1/2) Tinggi dinding pada Tingkat 2 +4.00													
No	Nama	%	Kode Balok	Panjang (m)	Tebal dinding (m)	T. Kolom (m)	H. Balok (m)	Tebal Pelat (m)	T. dinding (m)	Jumlah	Vol (m ³)	Bj (ton/m ³)	Berat (ton) Vol×Bj
1	Full Dinding	1	B1	1	0,15	2	0,7	0,12	1,18	7	1,2390	1,7	2,1063
2	Dinding + Pintu dan Jendela	0,6	B3	3	0,15	2	0,2	0,12	1,68	5	3,7800	1,7	3,8556
3	Full Dinding	1		3	0,15	2	0,2	0,12	1,68	4	3,0240	1,7	5,1408
4	Full Dinding	1	B2	1	0,15	2	0,35	0,12	1,53	5	1,1475	1,7	1,9508
5	Dinding + Pintu dan Jendela	0,6	B1	8	0,15	2	0,7	0,12	1,18	8	11,3280	1,7	11,5546
6	Dinding + Pintu dan Jendela	0,6	B2	3	0,15	2	0,35	0,12	1,53	33	22,7205	1,7	23,1749
7	Full Dinding	1		2.65	0,15	2	0,35	0,12	1,53	2	1,2164	1,7	2,0678
8	Dinding + Pintu dan Jendela	0,6		2.65	0,15	2	0,35	0,12	1,53	1	0,6082	1,7	0,6203
9	Full Dinding	1		3	0,15	2	0,35	0,12	1,53	4	2,7540	1,7	4,6818
10	Dinding + Pintu dan Jendela	1		1.85	0,15	2	0,35	0,12	1,53	4	1,6983	1,7	2,8871
11	Dinding + Pintu dan Jendela	0.6	B1	9	0,15	2	0,7	0,12	1,18	4	6,3720	1,7	6,4994
12	Dinding + Pintu dan Jendela	0.6	B3	1.292	0,15	2	0,2	0,12	1,68	1	0,3256	1,7	0,3321
13	Dinding + Pintu dan Jendela	0.6		1.625	0,15	2	0,2	0,12	1,68	1	0,4095	1,7	0,4177
Jumlah										79			65,2892
Berat Total Dinding pada Tingkat 2 = Dinding pada Tingkat Dasar +0,00 + (1/2) Tinggi dinding pada Tingkat 2 +4,00													266,3454

Untuk perhitungan dinding pada tingkat selanjutnya langkah pengerjaanya sama seperti perhitungan di atas. Hasil rekapitulasi berat dinding pada setiap tingkat, dapat dilihat pada Tabel 5.10 berikut ini.

Tabel 5.10 Rekapitulasi Berat Dinding pada Setiap Tingkat

Dinding Tingkat	Berat (ton)
Tingkat 5 + 15,60	75,2444
Tingkat 4 +12,00	131,2159
Tingkat 3 + 8,00	135,9946
Tingkat 2 +4,00	266,3454

2. Beban hidup

Penentuan beban hidup bangunan didasarkan pada peraturan SNI 1727-2013, yang berarti beban hidup tersebut didistribusikan perfungsi ruangan di lantai tersebut. Beban hidup yang digunakan pada setiap tingkatnya perfungsi dari ruangan, dapat dilihat pada Tabel 5.11 berikut ini.

Tabel 5.11 Beban Hidup pada Setiap Tingkat

No	Tingkat	Fungsi Ruangan	Beban hidup (ton/m ²)
1	Tingkat 2 +4,00	R. Laboratorium	0,2926
		R. Kantor	0,2446
		koridor	0,3904
		R. arsip	0,4883
2	Tingkat 3 +8,00	R. Laboratorium	0,2926
		R. Kantor	0,2446
		koridor	0,3904
		Balkon	0,4388
3	Tingkat 4 +12,00	R. arsip	0,4883
		R. Laboratorium	0,2926
		R. Kantor	0,2446
		koridor	0,3904
4	Tingkat 5 +15,60	R. arsip	0,4883
		Atap	0,0979

Beban hidup tersebut didistribusikan pada setiap tingkat bangunan sehingga didapatkan berat beban hidup pada setiap tingkat. Berikut adalah contoh perhitungan berat beban hidup pada tingkat 2, untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada Tabel 5.12.

Tabel 5.12 Berat Beban Hidup pada Tingkat 2

No	Elemen pelat	Ukuran (m)		Jumlah	Ql (ton/m ²)	Berat pelat (ton) A×Jumlah×Ql
		P	L			
1	P1	8	3	14	0,2926	98,2997
2	P3	3	1	4	0,2926	3,5107
3	P1	5,35	3	2	0,2446	7,8532
4	P3	2,65	1,375	3	0,2446	2,6743
5	P1	3	1	2	0,2446	1,4679
6	P1	9	3	2	0,2446	13,2110
7	P1	5,925	3	1	0,2446	4,3486
8	P2	3,725	3	1	0,2446	2,7339
9	P2	2,325	2	1	0,2446	1,1376
10	P3	3	1	2	0,4883	2,9297
11	P1	5,35	3	1	0,4883	7,8369
12	P1	5,508	3	1	0,4883	8,0683
13	P3	2,2	3	4	0,3904	10,3070
14	P1	9	3	2	0,3904	21,0826
Jumlah				40		185,4614

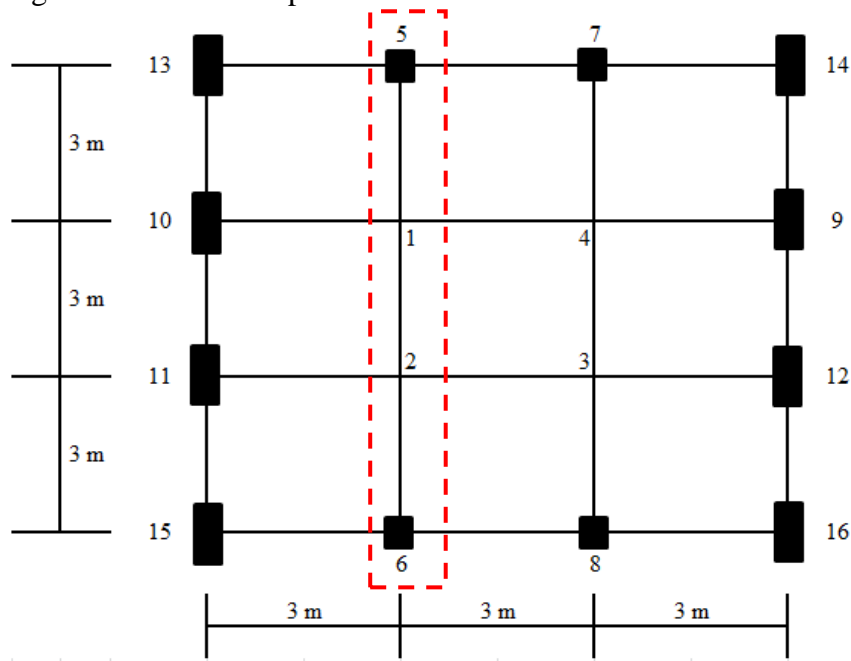
Berat beban hidup pada tingkat selanjutnya perhitungannya sama dengan pada Tabel 5.12. Hasil rekapitulasi berat beban hidup pada tingkat selanjutnya dapat dilihat pada Tabel 5.13 berikut ini.

Tabel 5.13 Rekapitulasi Berat Beban Hidup pada Setiap Tingkat

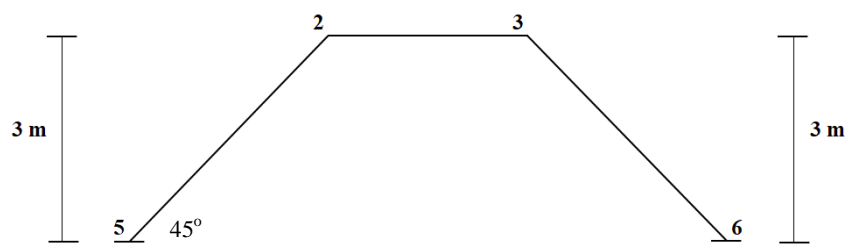
Pelat Tingkat	Berat (ton)
Tingkat 5 + 15,60	56,7156
Tingkat 4 +12,00	204,2944
Tingkat 3 + 8,00	211,9233
Tingkat 2 +4,00	185,4614

5.1.2. Pembebanan struktur pada bangunan atap

Struktur atap menggunakan kolom beton berbentuk miring dan disambungkan dengan balok beton. Berikut adalah gambar tampak atas dan potongan dari struktur atap.



Gambar 5.2 Tampak Atas Struktur Atap



Gambar 5.3 Bentuk Potongan pada Struktur Atap

1. Beban mati

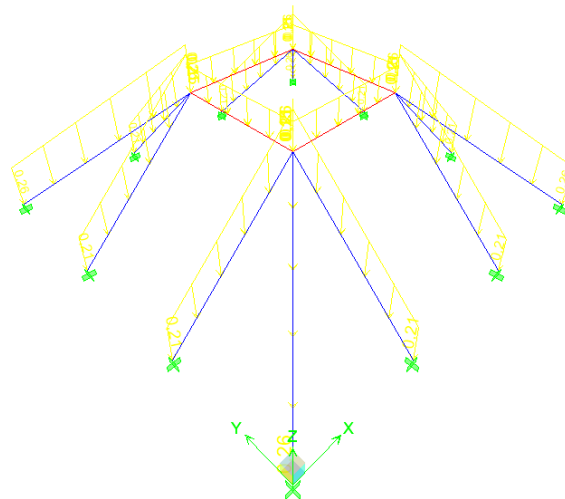
Beban mati penutup atap menggunakan peraturan dari SKBI 1.3.53 1987 dimana beban mati yang ditetapkan sebesar 50 kg/m^2 . Beban mati tersebut akan

dibebankan pada sisi-sisi struktur atap didistribusikan menjadi beban merata. Adapun perhitungannya dapat dilihat pada Tabel 5.14 berikut ini.

Tabel 5.14 Beban Penutup Atap

No	Sisi	Panjang (m)	Beban (kg/m ²)	Beban penutup atap (ton/m) (Panjang×beban)
1	1 -9	4,2426	50	0,2121
2	4 -12	4,2426	50	0,2121
3	1 -7	4,2426	50	0,2121
4	2 -5	4,2426	50	0,2121
5	2 -10	4,2426	50	0,2121
6	3 - 11	4,2426	50	0,2121
7	3 - 6	4,2426	50	0,2121
8	4 -8	4,2426	50	0,2121
9	1 -14	5,1962	50	0,2598
10	2 - 13	5,1962	50	0,2598
11	3 - 15	5,1962	50	0,2598
12	4 - 16	5,1962	50	0,2598
13	1 - 2	3	50	0,1500
14	2 - 3	3	50	0,1500
15	3 - 4	3	50	0,1500
16	1 - 4	3	50	0,1500

Gambar pendistribusian beban mati penutup atap pada program ETABS, dapat disajikan pada Gambar 5.4 berikut ini.



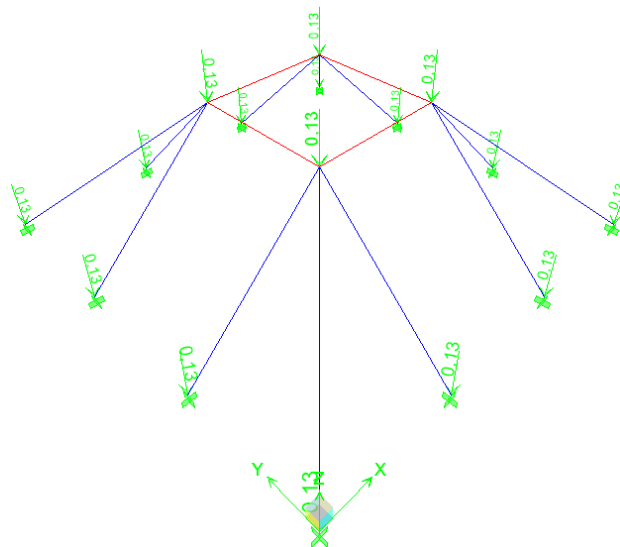
Gambar 5.4 Pendistribusian Beban Mati Penutup Atap pada ETABS

2. Beban hidup

Beban hidup yang digunakan adalah beban hidup pekerja dan beban hujan

a. Beban pekerja

Sesuai dengan SNI 1727 – 2013, dimana beban hidup yang digunakan sebesar 1,3 KN atau 0,13 ton. Beban hidup pekerja akan didistribusikan menjadi beban titik yang akan ditempatkan di joint-joint atap dari titik 1 – 16. Pendistribusian beban hidup pekerja pada atap di ETABS dapat disajikan pada Gambar 5.5 berikut ini.



Gambar 5.5 Pendistribusian Beban Hidup Pekerja pada ETABS

b. Beban hujan

Beban hujan yang digunakan mengacu pada SKBI 1.3.93.1987. Beban hujan dihitung berdasar Persamaan berikut ini.

$$(40 - 0,8\alpha) \quad (5.1)$$

Keterangan :

α : sudut kemiringan atap dalam derajat.

Beban hujan dianggap sebagai beban merata yang akan membebani di setiap sisi dari struktur atap. Perhitungan beban hujan sebagai berikut ini.

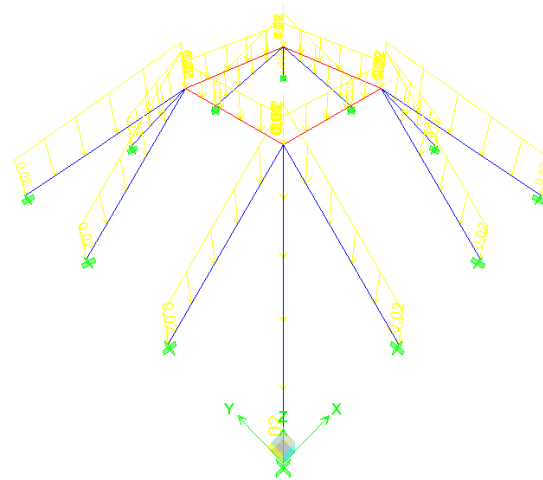
$$\begin{aligned} \text{Beban hujan} &= (40 - 0,8\alpha) \\ &= (40 - 0,8 \times 45^\circ) \\ &= 4 \text{ kg/m}^2 \end{aligned}$$

Sehingga beban merata di setiap sisi bagian struktur atap dapat dilihat pada Tabel 5.15.

Tabel 5.15 Beban Hujan pada Atap

No	Sisi	Panjang (m)	Beban (kg/m ²)	Beban hujan (ton/m) (Panjang×beban)
1	1 -9	4,2426	4	0,0170
2	4 -12	4,2426	4	0,0170
3	1 -7	4,2426	4	0,0170
4	2 -5	4,2426	4	0,0170
5	2 -10	4,2426	4	0,0170
6	3 - 11	4,2426	4	0,0170
7	3 - 6	4,2426	4	0,0170
8	4 -8	4,2426	4	0,0170
9	1 -14	5,1962	4	0,0208
10	2 - 13	5,1962	4	0,0208
11	3 - 15	5,1962	4	0,0208
12	4 - 16	5,1962	4	0,0208
13	1 - 2	3	4	0,0120
14	2 - 3	3	4	0,0120
15	3 - 4	3	4	0,0120
16	1 - 4	3	4	0,0120

Beban hujan di ETABS dapat disajikan pada Gambar 5.6 berikut ini.

**Gambar 5.6 Pendistribusian Beban Air Hujan pada ETABS**

Akibat beban mati, beban hidup pekerja, dan beban hujan maka akan terjadi reaksi pada semua tumpuan pada kuda-kuda beton tersebut. Reaksi pada setiap tumpuan kuda-kuda beton berupa gaya (F) dan momen (M). Hasil reaksi tersebut akan menjadi beban titik yang akan didistribusikan pada bangunan utama. Hasil reaksi yang diakibatkan oleh beban-beban tersebut dapat dilihat pada Tabel 5.16.

Tabel 5.16 Hasil Reaksi Tumpuan pada Bangunan Atap

No	Titik Tumpuan	beban	Reaksi					
			Fx (ton)	Fy (ton)	Fz (ton)	Mx (tonm)	My (tonm)	Mz (tonm)
1	14	<i>Dead</i>	0,29	-0,29	0,77	-0,261	-0,261	0
		<i>Live</i>	0,02	-0,02	0,16	0	0	0
		<i>Rain</i>	0,03	-0,03	0,09	-0,033	-0,033	0
		<i>Super Dead</i>	0,32	-0,32	1,07	-0,415	-0,415	0
2	9	<i>Dead</i>	-0,01	-0,67	1,08	-0,235	-0,002	-0,013
		<i>Live</i>	0	-0,05	0,19	-0,001	0	0
		<i>Rain</i>	0	-0,06	0,1	-0,026	0	-0,002
		<i>Super Dead</i>	-0,01	-0,72	1,27	-0,324	-0,004	-0,025
3	12	<i>Dead</i>	0,01	-0,67	1,08	-0,235	0,002	0,013
		<i>Live</i>	0	-0,05	0,19	-0,001	0	0
		<i>Rain</i>	0	-0,06	0,1	-0,026	0	0,002
		<i>Super Dead</i>	0,01	-0,72	1,27	-0,324	0,004	0,025
4	16	<i>Dead</i>	-0,29	-0,29	0,77	-0,261	0,261	0
		<i>Live</i>	-0,02	-0,02	0,16	0	0	0
		<i>Rain</i>	-0,03	-0,03	0,09	-0,033	0,033	0
		<i>Super Dead</i>	-0,32	-0,32	1,07	-0,415	0,415	0
5	7	<i>Dead</i>	0,67	0,01	1,08	-0,002	-0,235	0,013
		<i>Live</i>	0,05	0	0,19	0	-0,001	0
		<i>Rain</i>	0,06	0	0,1	0	-0,026	0,002
		<i>Super Dead</i>	0,72	0,01	1,27	-0,004	-0,324	0,025
6	8	<i>Dead</i>	-0,67	0,01	1,08	-0,002	0,235	-0,013
		<i>Live</i>	-0,05	0	0,19	0	0,001	0
		<i>Rain</i>	-0,06	0	0,1	0	0,026	-0,002
		<i>Super Dead</i>	-0,72	0,01	1,27	-0,004	0,324	-0,025
7	5	<i>Dead</i>	0,67	-0,01	1,08	0,002	-0,235	-0,013
		<i>Live</i>	0,05	0	0,19	0	-0,001	0
		<i>Rain</i>	0,06	0	0,1	0	-0,026	-0,002
		<i>Super Dead</i>	0,72	-0,01	1,27	0,004	-0,324	-0,025
8	6	<i>Dead</i>	-0,67	-0,01	1,08	0,002	0,235	0,013
		<i>Live</i>	-0,05	0	0,19	0	0,001	0
		<i>Rain</i>	-0,06	0	0,1	0	0,026	0,002
		<i>Super Dead</i>	-0,72	-0,01	1,27	0,004	0,324	0,025
9	13	<i>Dead</i>	0,29	0,29	0,77	0,261	-0,261	0
		<i>Live</i>	0,02	0,02	0,16	0	0	0
		<i>Rain</i>	0,03	0,03	0,09	0,033	-0,033	0
		<i>Super Dead</i>	0,32	0,32	1,07	0,415	-0,415	0
10	10	<i>Dead</i>	-0,01	0,67	1,08	0,235	-0,002	0,013
		<i>Live</i>	0	0,05	0,19	0,001	0	0
		<i>Rain</i>	0	0,06	0,1	0,026	0	0,002
		<i>Super Dead</i>	-0,01	0,72	1,27	0,324	-0,004	0,025

Lanjutan Tabel 5.16 Hasil Reaksi Tumpuan pada Bangunan Atap

No	Titik Tumpuan	beban	Fx (ton)	Fy (ton)	Fz (ton)	Mx (tonm)	My (tonm)	Mz (tonm)
11	11	<i>Dead</i>	0,01	0,67	1,08	0,235	0,002	-0,013
		<i>Live</i>	0	0,05	0,19	0,001	0	0
		<i>Rain</i>	0	0,06	0,1	0,026	0	-0,002
		<i>Super Dead</i>	0,01	0,72	1,27	0,324	0,004	-0,025
12	15	<i>Dead</i>	-0,29	0,29	0,77	0,261	0,261	0
		<i>Live</i>	-0,02	0,02	0,16	0	0	0
		<i>Rain</i>	-0,03	0,03	0,09	0,033	0,033	0
		<i>Super Dead</i>	-0,32	0,32	1,07	0,415	0,415	0

5.1.3. Beban Gempa Statik Ekuivalen

1. Berat total bangunan

Berat bangunan sangat mempengaruhi besar atau kecilnya gaya gempa yang terjadi pada suatu bangunan, semakin besar berat bangunan maka semakin besar juga gaya gempa yang terjadi pada bangunan tersebut. Dari perhitungan yang telah dilakukan pada sub bab sebelumnya maka dapat direkap perhitungan berat bangunan untuk setiap tingkat.

Pada perhitungan berat bangunan yang digunakan adalah berat seismik efektif bangunan yakni dengan kombinasi $1D + 0,3L$. Untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada Tabel 5.17 berikut ini.

Tabel 5.17 Berat Seismik Efektif

Tingkat	Berat (ton)				Beban mati, D (ton)	Beban hidup, L (ton)	1D + 0,3L (ton)
	kolom	Balok	Dinding	Pelat			
Tingkat 5 + 15,60	60,3936	187,3979	75,2444	179,6644	502,7003	56,7156	519,7150
Tingkat 4 + 12,00	88,3200	182,8512	131,2159	310,7505	713,1376	204,2944	774,4259
Tingkat 3 + 8,00	96,7680	191,3727	135,9946	309,8778	734,0131	211,9233	797,5901
Tingkat 2 + 4,00	149,7600	181,8627	266,3454	281,7328	879,7008	185,4614	935,3392
Tingkat dasar + 0,00	0	0	0	0	0	0	0
Jumlah total berat bangunan							3027,0701

2. Spektrum respon desain

Berikut adalah data - data yang diperlukan untuk mendesain respon spektrum :

- a. Lokasi bangunan : Sleman, Yogyakarta
- b. Fungsi bangunan : Laboratorium
- c. Jenis tanah : Tanah keras
- d. Percepatan batuan dasar pada periode pendek (S_s)

Nilai S_s didapatkan dari peta *respon spectra* percepatan 0,2 dt di batuan dasar (S_B) untuk probabilitas terlampaui 2% dalam 50 tahun SNI 1726 - 2012 yang sudah diterangkan pada Gambar 3.1, nilai S_s untuk daerah Kabupaten Sleman Yogyakarta berada pada rentang 1,2 – 1,5 g. Sehingga nilai S_s diambil 1,35 g.

- e. Percepatan batuan dasar pada perioda 1 detik (S_I)

Nilai S_I didapatkan dari peta *respon spectra* percepatan 1 dt di batuan dasar (S_B) untuk probabilitas terlampaui 2% dalam 50 tahun SNI 1726 - 2012 yang sudah diterangkan pada Gambar 3.2, nilai S_I untuk daerah Kabupaten Sleman Yogyakarta berada pada rentang 0,4 – 0,5 g. Sehingga nilai S_I diambil 0,45 g.

- f. Koefisien situs

Penentuan *respon spectra* percepatan gempa di permukaan tanah diperlukan faktor amplifikasi seismik (F_a dan F_v) terdapat pada Tabel 3.1 dan 3.2. Faktor amplifikasi seismik pada getaran perioda pendek (F_a), karena $S_s > 1,25$ dan terletak di tanah keras (SC) sehingga nilai $F_a = 1$. Faktor amplifikasi seismik pada getaran perioda 1 detik (F_v), karena nilai $S_I = 0,45$ dan berada pada rentan 0,4 – 0,5 terletak pada koefisien situs tanah keras (SC) sehingga nilai $F_v = 1,35$

- g. Parameter respons spektrum

Hubungan koefisien – koefisien situs dan parameter *respon spectra* tersebut adalah:

Percepatan pada perioda pendek (S_{MS})

$$S_{MS} = F_a \times S_s \quad (5.2)$$

$$= 1 \times 1,35$$

$$= 1,35 \text{ g}$$

Percepatan pada perioda 1 detik (S_{M1})

$$S_{M1} = F_v \times S_I \quad (5.3)$$

$$= 1,35 \times 0,45$$

$$= 0,6075 \text{ g}$$

h. Parameter percepatan spektral desain

Spektral desain untuk perioda pendek (S_{DS})

$$S_{DS} = \frac{2}{3} \times S_{MS} \quad (5.4)$$

$$= \frac{2}{3} \times 1,35$$

$$= 0,9$$

Spektral desain untuk perioda 1 detik (S_{D1})

$$S_{D1} = \frac{2}{3} \times S_{M1} \quad (5.5)$$

$$= \frac{2}{3} \times 0,6075$$

$$= 0,4050$$

i. Spektrum respons percepatan desain

$$T_0 = 0,2 \frac{S_{D1}}{S_{DS}} \quad (5.6)$$

$$= 0,2 \frac{0,4050}{0,9}$$

$$= 0,09$$

$$T_s = \frac{S_{D1}}{S_{DS}} \quad (5.7)$$

$$= \frac{0,4050}{0,9}$$

$$= 0,45$$

$$S_a = S_{DS} \left(0,4 + 0,6 \frac{T}{T_0} \right) \quad (5.8)$$

$$= 0,9 \left(0,4 + 0,6 \frac{0}{0,09} \right)$$

$$= 0,36 \text{ g untuk } T < T_0$$

$$S_a = S_{DS} \quad (5.9)$$

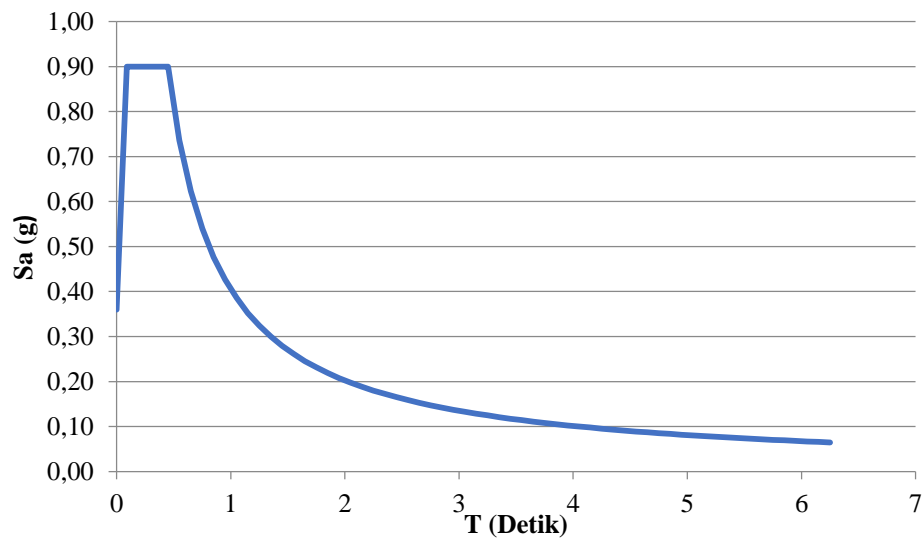
$$= 0,9 \text{ g untuk } T_0 \leq T \leq T_s$$

$$S_a = \frac{S_{D1}}{T} \quad (5.10)$$

$$= \frac{0,4050}{T}$$

$$= 0,7364$$

Berdasarkan parameter dari perhitungan diatas dapat dibuat grafik respon spektrum menurut SNI 1726-2012, ditunjukkan pada Gambar 5.7 berikut ini.



Gambar 5.7 Grafik Respon Spektrum

3. Periode pendekatan fundamental

a. Menentukan waktu getar struktur (T)

$$T_a = C_t h_n^x \quad (5.11)$$

$$= 0,0466 \times 21,9^{0,9}$$

$$= 0,7495 \text{ detik}$$

Keterangan :

h_n = tinggi total bangunan dari dasar sampai atap (m)

C_t = koefisien didapat dari Tabel 15 SNI 1726-2012 dimana nilai C_t diambil 0,0466

x = didapat dari Tabel 15 SNI 1726 – 2012 diambil 0,9 karena tipe struktur menggunakan rangka beton pemikul momen.

b. Nilai periode maksimum

Karena $S_{DI} > 0,4$ digunakan $C_u = 1,4$ diambil dari Tabel 14 SNI 1726-2012)

$$\begin{aligned} T_{max} &= C_u \times T_a & (5.12) \\ &= 1.4 \times 0,7495 \\ &= 1,0493 \text{ detik} \end{aligned}$$

c. Nilai periode struktur yang digunakan

Didapat dari SAP2000 Versi 15.1 nilai $T_c = 0,9768$

Karena $T_a < T_c < T_{max}$

Jadi T yang digunakan adalah 0,9768

4. Perhitungan koefisien respon seismik

a. Tingkat daktilitas struktur, $R = 1$ (untuk evaluasi)

b. Faktor keutamaan struktur, $I_e = 1,5$ (fungsi bangunan untuk Laboratorium)

c. Nilai C_s

$$\begin{aligned} C_s &= S_a \times \frac{I_e}{R} & (5.13) \\ &= 0.4146 \times \frac{1,5}{1} \\ &= 0,6219 \end{aligned}$$

d. Nilai C_s , tidak perlu melebihi $C_{s \max}$

$$C_{s \max} = \frac{S_{DI}}{T \left(\frac{R}{I_e} \right)} \quad (5.14)$$

$$= \frac{0,4050}{0,9769 \left(\frac{1}{1,5} \right)}$$

$$= 0,6219$$

e. Nilai C_s tidak kurang dari

$$C_{s \min} = 0,044 \times S_{DS} \times I_e > 0.01 \quad (5.15)$$

$$= 0,044 \times 0.9 \times 1,5$$

$$= 0,0594$$

Nilai C_s tidak perlu melebihi $C_{s \max}$ dan tidak kurang dari $C_{s \min}$, jadi didapatkan nilai C_s pakai = 0,6219

5. Perhitungan gaya geser dasar

Perhitungan gaya geser dasar seismik dapat dihitung dengan persamaan berikut ini.

$$V = C_s \times W_t$$

$$= 0,6219 \times 3027,0701$$

$$= 1882,5545 \text{ ton}$$

6. Distribusi vertikal gaya gempa

Gaya gempa lateral (F) yang timbul pada semua tingkat harus diperhitungkan berdasarkan SNI 1726-2012 berikut ini.

a. Nilai k

Untuk struktur perioda antara 0,5 – 2,5 detik, nilai k harus sebesar 2 atau dapat ditentukan dengan interpolasi linier antara 1 dan 2. Nilai k untuk $T = 0,9769$ detik dicari dengan menggunakan interpolasi sebagai berikut ini.

$$k = \frac{(2-1) \times (0,9769 - 0,5)}{(2,5 - 0,5) + 1}$$

$$= 1,2384$$

b. Nilai C_v

$$C_{v \text{ tingkat } 2} = \frac{W_x \times h_x^k}{\sum_{i=1}^n W_i \times h_i^k}$$

$$= \frac{935,3392 \times 4^{1,2384}}{48096,3411}$$

$$= 0,1082 \text{ (11\%)}$$

c. Nilai Gaya gempa lateral F

$$F_{\text{tingkat 2}} = C_v_{\text{tingkat 2}} \times V$$

$$= 0,1081 \times 1882,5545$$

$$= 203,8010 \text{ ton}$$

Untuk perhitungan C_v dan F pada tingkat selanjutnya dapat dilihat pada Tabel 5.18 berikut ini.

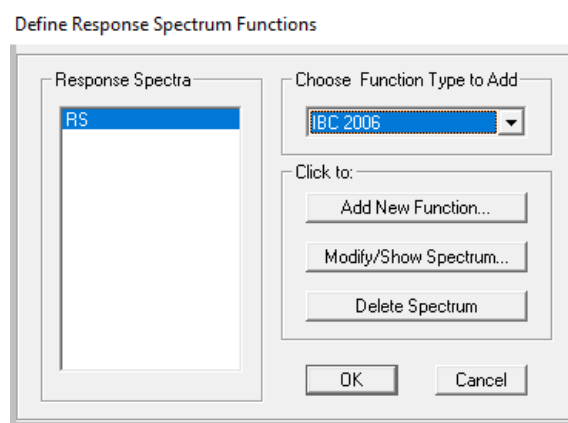
Tabel 5.18 Perhitungan Nilai Gaya Gempa Horizontal

Tingkat	Berat (ton)	h (m)	h^k	$W \times h^k$	C_v	F (ton)
Tingkat 5 + 15,60	519,7150	15,60	30,0321	15608,1563	32%	610,9239
Tingkat 4 + 12,00	774,4259	12	21,7009	16805,7073	35%	657,7976
Tingkat 3 + 8,00	797,5901	8	13,1342	10475,6788	22%	410,0319
Tingkat 2 + 4,00	935,3392	4	5,5667	5206,7987	11%	203,8010
Tingkat dasar +0,00	0	0	0	0	0%	0
Jumlah				48096,3411	100%	1882,5545

5.2 Analisis Beban Gempa Respon Spektrum

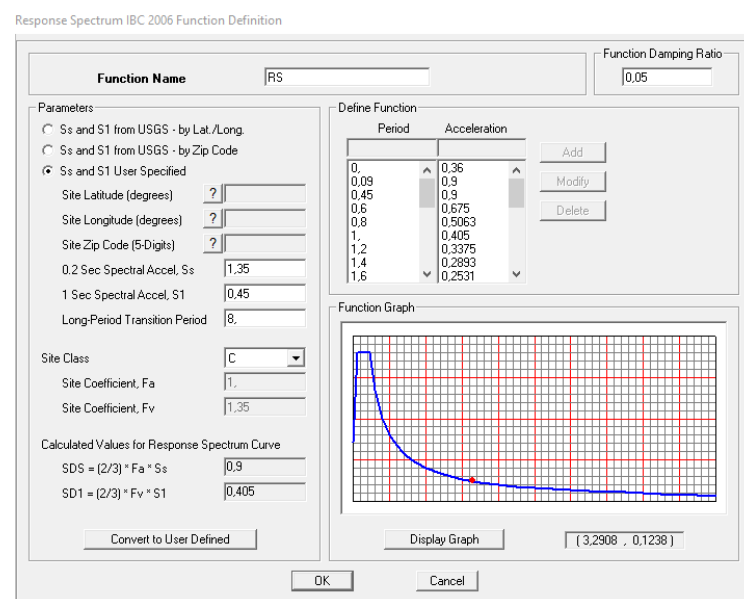
5.2.1. Input Data Respon Spektrum

Cara *input* data respon respon spektrum, pilih menu *Define – function – Respons Spectrum* Pada *boxes option* di *chose function type to add* – pilih *IBC2006 Spectrum – add new function* (dipilih IBC2006 karena parameter didalamnya juga sama dengan SNI 1726-2012 tinggal disesuaikan dengan zonasi peta gempa di Indonesia). Seperti pada Gambar 5.8.



Gambar 5.8 Membuat Response Spectrum Function

Kemudian akan muncul kotak dialog, kemudian diisi sesuai parameter yang dibutuhkan S_s , S_1 , *Site clas* seperti pada Gambar 5.9 berikut ini.



Gambar 5.9 Mengisi Parameter Respon Spektrum

5.2.2 Definisi Tipe Analisis Respon Spektrum

Mendefinisikan tipe analisis respon spektrum dilakukan dengan cara pilih pada menu *define – Load Cases – Add New Load Cases*. Kemudian langkah pertama isikan *Load Cases Name* RSPX dan kedua RSPY. Kemudian isi *Load Cases Type* Response Spectrum. Untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada Gambar 5.10 dan Gambar 5.11.

Load Case Data - Response Spectrum

Load Case Name: RSPX Set Def Name Notes: Modify/Show... Load Case Type: Response Spectrum Design...

Modal Combination: CQC GMC R1: 1. Directional Combination: SRSS
 SRSS GMC R2: 0. CQC3
 Absolute Periodic + Rigid Type: SRSS Absolute
 GMC Scale Factor:
 NRC 10 Percent
 Double Sum

Modal Load Case: Use Modes from this Modal Load Case: MODAL

Loads Applied:

Load Type	Load Name	Function	Scale Factor
Accel	U2	RS	4.4145
Accel	U1	RS	14.7150
Accel	U2	RS	4.4145

Show Advanced Load Parameters

Other Parameters: Modal Damping: Constant at 0.05 Modify/Show... OK Cancel

Gambar 5.10 Response Spectrum Cases RSPX

Load Case Data - Response Spectrum

Load Case Name: RSPY Set Def Name Notes: Modify/Show... Load Case Type: Response Spectrum Design...

Modal Combination: CQC GMC R1: 1. Directional Combination: SRSS
 SRSS GMC R2: 0. CQC3
 Absolute Periodic + Rigid Type: SRSS Absolute
 GMC Scale Factor:
 NRC 10 Percent
 Double Sum

Modal Load Case: Use Modes from this Modal Load Case: MODAL

Loads Applied:

Load Type	Load Name	Function	Scale Factor
Accel	U1	RS	4.4145
Accel	U1	RS	4.4145
Accel	U2	RS	14.7150

Show Advanced Load Parameters

Other Parameters: Modal Damping: Constant at 0.05 Modify/Show... OK Cancel

Gambar 5.11 Response Spectrum Cases RSPY

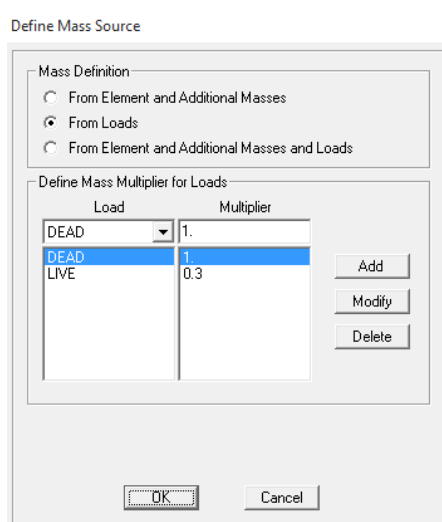
Pada kotak dialog *modal combination* dipilih CQC (*Complete Quadratic Combination*). Untuk RSPX pada kotak dialog *Input response spectra* U1 diisi angka 14.715 didapatkan dari $\frac{I_e}{R} \times 9.81$, U2 diisi dengan nilai 30% dari U1 yakni 4.4145. Pada RSPY untuk U1 diisi dengan nilai 4.4145 dan U2 diisi dengan nilai 14.715.

5.2.3 Penentuan Massa Struktur (*mass source*)

Dalam analisis dinamik respons struktur, secara garis besar beban berasal dari percepatan gempa dikalikan massa struktur. Oleh karena itu pendefinisian

massa struktur juga sangat penting dalam analisis, karena bila tidak tepat 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. Pendefinisian massa struktur dapat dilakukan dengan cara pilih pada menu *define – mass source –* pada *boxes option mass definition* pilih *from load* – isikan pada *define mass multiplier for loads* dengan *dead load = 1* dan *live load = 0,3*, beban hidup efektif diambil sebesar 30% dari total beban hidup yang dihitung. *From loads* dipilih maka massa yang terhitung adalah dari beban mati tambahan dan juga termasuk berat sendiri bangunan (Purbolaras, 2010), seperti terlihat pada Gambar 5.12 berikut ini.



Gambar 5.12 Mendefinisikan Mass Source

5.2.4 Partisipasi Massa

Setelah *running analysis* kemudian di cek partisipasi massa. Diketahui bahwa partisipasi massa (*mass participating ratio*) harus memenuhi syarat SNI 1726 – 2012 Pasal 7.9.1 dengan minimal 90% dari *massa actual* dalam masing-masing arah horizontal orthogonal dari respon yang ditinjau oleh model. Pada Tabel 5.19 dapat ditunjukkan nilai partisipasi massa untuk arah x dan arah y pada mode – 6 sudah melebihi 90% sehingga sudah memenuhi syarat. Untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada Tabel 5.19.

Tabel 5.19 Mass Participating Ratio

Mode	Mass participating ratio	
	SumUX	SumUY
1	0,8508	0,0000
2	0,8508	0,0027
3	0,8508	0,8388
4	0,9537	0,8388
5	0,9537	0,8398
6	0,9537	0,9464
7	0,9768	0,9464
8	0,9921	0,9464
9	0,9921	0,9827
10	1,0000	0,9829
11	1,0000	0,9977
12	1,0000	0,9996

5.2.5 Cek syarat V dinamik $\geq 0.85 V$ statik

Sebelum melakukan analisis *pushover* dilakukan pengecekan apakah nilai V dinamik $\geq 0,85 V$ statik dengan cara *display – show table – Base Reactions –* selanjutnya pilih *output cases RSPX,RSPY – OK. Output base reaction (V)* dapat dilihat pada Tabel 5.20 berikut ini

Tabel 5.20 Nilai V Dinamik Struktur

OutputCase	GlobalFX	GlobalFY
Text	Ton	Ton
RSPX	1110,1779	418,8957
RSPY	333,0683	1396,306

1. Arah x (RSPX)

$$V \text{ dinamik } x = 1110,1779$$

$$0.85 \times V \text{ statik} = 0,85 \times 1882,5545$$

$$= 1600,171$$

Cek syarat

$$V \text{ dinamik} \geq 0.85 V \text{ statik}$$

$$1110,1779 < 1600,171 \text{ (Belum Memenuhi Syarat)}$$

$$\text{Evaluasi Scale factor} = \frac{0,85 V_{\text{statik}}}{V_{\text{dinamik}}}$$

$$= \frac{1600,171}{1110,1779}$$

$$= 1,4414$$

$$U1 = 14,7150 \times 1,4414 = 21,2097$$

$$U2 = 30\% \times 21,2097 = 6,3629$$

2. Arah y (RSPY)

$$V \text{ dinamik } y = 1396,306$$

$$0.85 \times V \text{ statik} = 0.85 \times 1882,5545 \\ = 1600,171$$

Cek syarat

$$V \text{ dinamik} \geq 0.85 V \text{ statik}$$

$$1396,306 < 1600,171 \text{ (Belum Memenuhi Syarat)}$$

$$\text{Evaluasi Scale factor} = \frac{0,85V_{\text{statik}}}{V_{\text{dinamik}}} \\ = \frac{1600,171}{1396,306} \\ = 1,1460$$

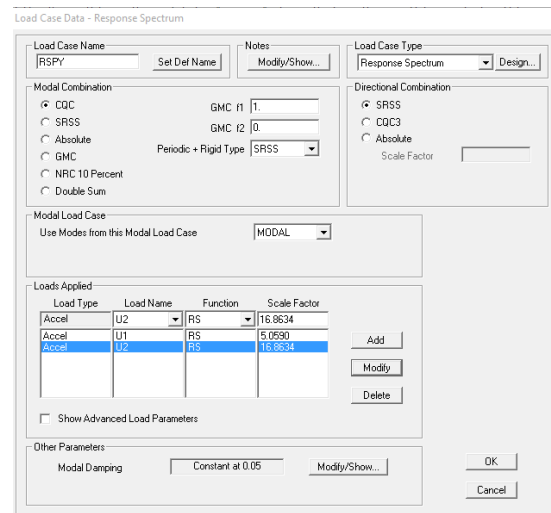
$$U1 = 30\% \times 16,8634 = 5,0590$$

$$U2 = 14.7150 \times 1,1460 = 16,8634$$

Nilai evaluasi *scale factor* arah x dan arah y digunakan sebagai faktor pengali nilai U1 dan U2 pada *respon spectrum cases*. Untuk nilai U1 dan U2 pada RSPX dan RSPY diinput sesuai perhitungan diatas dapat dilihat pada Gambar 5.13 dan Gambar 5.14 berikut ini.

Load Type	Load Name	Function	Scale Factor
Accel	U2	RS	6.3629
Accel	U1	RS	21.2097
Accel	U2	RS	6.3629

Gambar 5.13 Response Spectrum Cases RSPX (Scale Factor)



Gambar 5.14 Response Spectrum Cases RSPY (Scale Factor)

Kemudian dicek kembali apakah nilai V dinamik $\geq 0,85 V$ statik sudah memenuhi syarat tersebut, dengan cara *display – show table – Base Reactions –* selanjutnya pilih *output cases RSPX,RSPY – OK*.

OutputCase Text	CaseType Text	StepType Text	GlobalFX Tonn	GlobalFY Tonn	GlobalFZ Tonn
RSPX	LinRespSpec	Max	1600.1726	603.781	1.7583
RSPY	LinRespSpec	Max	381.6949	1600.1676	1.8354

Gambar 5.15 Vdinamik Struktur

5.3 Pushover Analysis

5.3.1. Pendefinisian Sendi Plastis

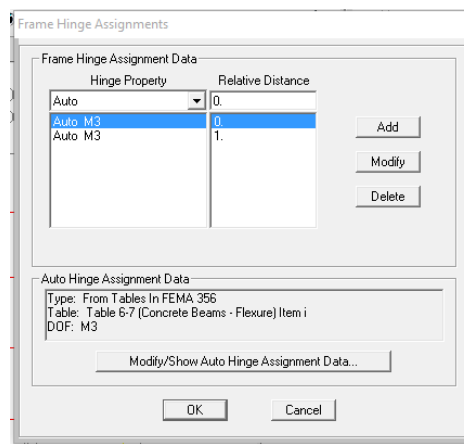
Dalam analisis *pushover* hal lain yang perlu diperhatikan adalah pemodelan atau pendefinisian sendi plastis (*plastic hinges*) pada elemen struktur yang dibuat. Pendefinisian sendi plastis ini didasarkan pada perilaku struktur yang didesain. Perilaku struktur akan sangat berpengaruh pada jenis struktur yang dimodelkan.

Dalam hal ini struktur akan berperilaku sebagai *beam sway mechanism*, yang artinya ketika struktur terkena beban lateral maka balok akan terlebih dahulu mengalami kelelahan pada ujung-ujung balok tersebut kemudian dilanjutkan dengan kelelahan pada kolom pada kolom dan dinding geser pada pangkalnya (jika pada bangunan terdapat dinding geser).

1. Pendefinisian sendi plastis pada balok

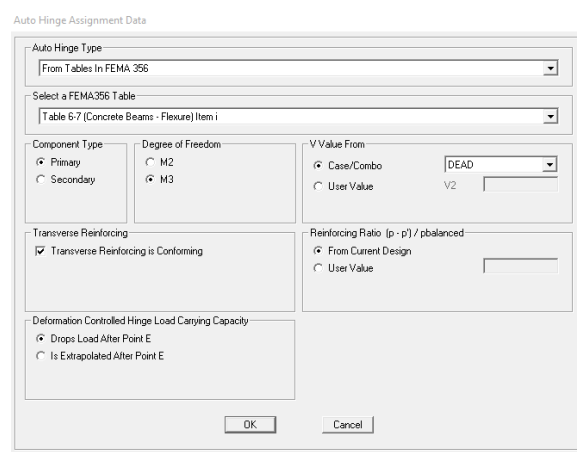
Penempatan sendi plastis pada balok dilakukan dengan cara sebagai berikut ini.

- Pilih semua elemen balok pada bangunan pada seluruh tingkat
- Pilih *assign – frame – hinges* – lalu isikan *frame Hinge Assignment Data* – klik *add*. Untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada Gambar 5.16 berikut ini.



Gambar 5.16 Input Hinge pada Balok

- Membuat 2 sendi plastis yaitu *relative distance* 0 dan *relative distance* 1 pada kotak dialog *frame hinge data*, yang berarti sendi plastis pada balok diletakkan diujung elemen struktur.
- Pada kotak dialog *Auto Hinges* pilih *From Table In FEMA 356*, pada kotak dialog *Select a FEMA 356 Table* pilih *Table 6-7 (Concrete Beams-Flexure) item i*, kotak dialog *Degree of Freedom* pilih M3.

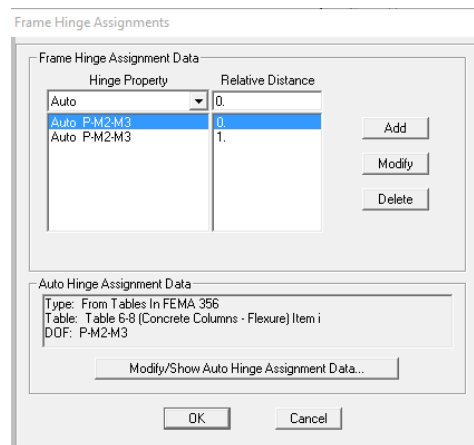


Gambar 5.17 Pendefinisian Sendi Plastis pada Balok

2. Pendefinisian sendi plastis pada kolom

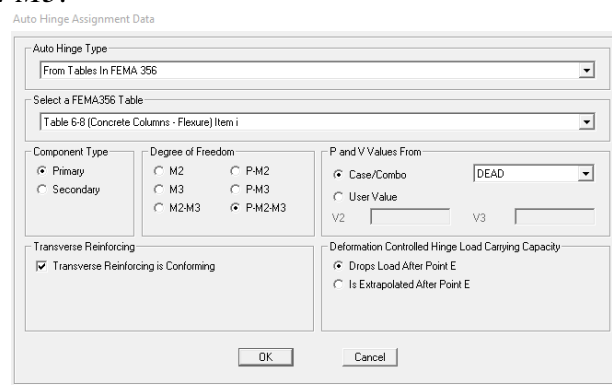
Penempatan sendi platis pada kolom dilakukan dengan cara sebagai berikut ini.

- Pilih semua elemen kolom pada bangunan pada seluruh tingkat
- Pilih *assign – frame – hinges* – lalu isikan *frame Hinge Assignment Data* – klik *add*. Untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada Gambar 5.18 berikut ini.



Gambar 5.18 Input Hinge pada Kolom

- Membuat 2 sendi plastis yaitu *relative distance* 0 dan *relative distance* 1 pada kotak dialog *frame hinge data*, yang berarti sendi plastis pada kolom diletakkan diujung elemen struktur.
- Pada kotak dialog *Auto Hinges Type* pilih *From Table In FEMA 356*, pada kotak dialog *Select a FEMA 356 Table* pilih *Table 6-8 (Concrete Columns-Flexure) item i*, pada kotak dialog *Degree of Freedom* pilih *P-M2-M3*.

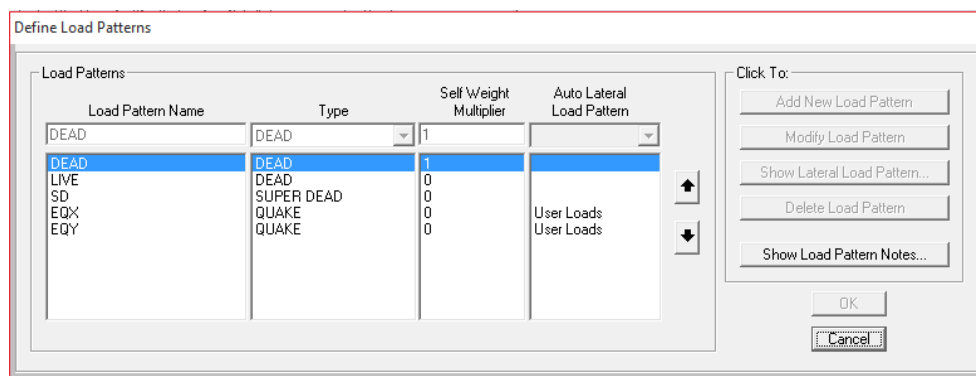


Gambar 5.19 Pendefinisian Sendi Plastis pada Kolom

5.3.2. Gaya Lateral *Pushover Analysis*

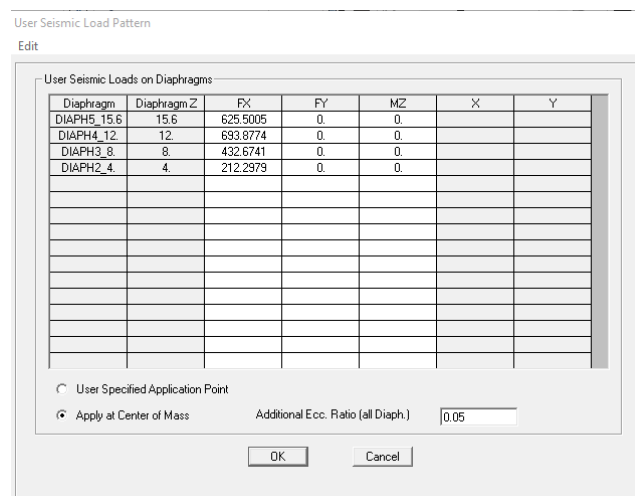
Pushover analysis dilakukan dengan memberikan gaya lateral horizontal static berupa beban titik yang diletakkan di setiap tingkat pada pusat massa bangunan arah x dan y.

Langkah pemberian beban lateral tersebut dilakukan dengan cara pilih *define – Load Pattern* – buat EQX dan EQY dengan *type* QUAKE – isi kotak dialog *auto lateral load* dengan *User loads*. Untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada Gambar 5.21 berikut ini.



Gambar 5.20 Define Load Patterns

Kemudian klik EQX lalu klik *modify lateral load*. Kemudian isi kotak dialog *user seismic loading* dengan gaya gempa yang dihitung, yang diisi beban gempa adalah Fx karena yang didesain gaya lateral arah x. Setelah diisi centang *apply at center of mass* – ok. Untuk lebih jelasnya dapat disajikan pada Gambar 5.22 berikut ini.



Gambar 5.21 User Seismic Loading (EQX)

Kemudian klik EQY lalu klik *modify lateral load*. Kemudian isi kotak dialog *user seismic loading* dengan gaya gempa yang dihitung, yang diisi beban gempa adalah Fy karena yang didesain gaya lateral arah y. Setelah diisi centang *apply at center of mass* – ok. Untuk lebih jelasnya dapat disajikan pada Gambar 5.23 berikut ini.

Diaphragm	Diaphragm Z	FX	FY	MZ	X	Y
DIAPH5_15.6	15.6	0.	625.5005	0.		
DIAPH4_12	12.	0.	693.8774	0.		
DIAPH3_8	8.	0.	432.6741	0.		
DIAPH2_4	4.	0.	212.2979	0.		

User Specified Application Point
 Apply at Center of Mass

Additional Ecc. Ratio (all Diaph.)

OK Cancel

Gambar 5.22 User Seismic Loading (EQY)

Maka otomatis gaya lateral akan didistribusikan di pusat massa pada setiap tingkat bangunan.

5.3.3. Pendefinisian *Pushover Load Cases*

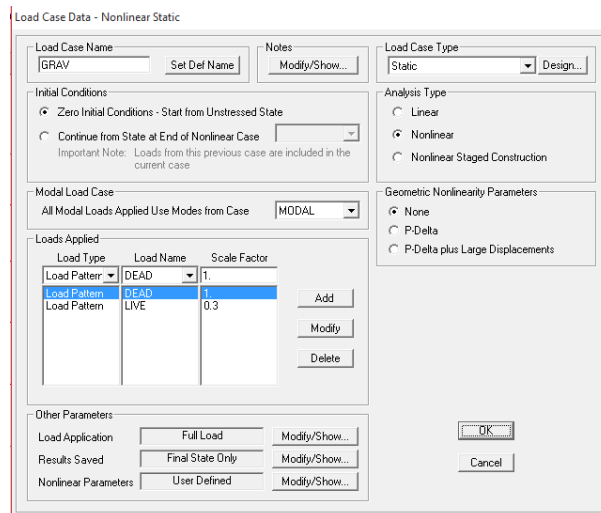
Pembebanan analisis *pushover* dilakukan dengan dua tahap. Tahap pertama analisis belum mempertimbangkan kondisi nonlinier dimana struktur diberi beban mati dan beban hidup (gravitasi). Tahap kedua analisis dilanjutkan dengan memberikan pola beban lateral diberikan secara bertahap.

1. Pendefinisian *pushover* beban gravitasi (GRAV)

Pembebanan gravitasi dilakukan dengan cara pilih *define – Load Cases – add new load case*. Selanjutnya pemodifikasian nilai dari GRAV dapat dilihat pada Gambar 5.11 dan pengisian data *load cases* sebagai berikut ini.

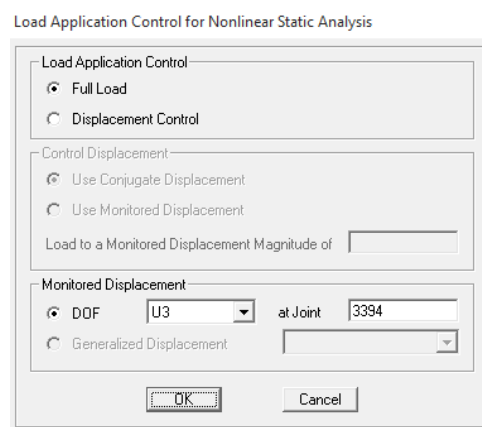
- a. *Load Case Name* : GRAV
- b. *Initial Conditions* : *Zero Initial Conditions – Start from Unstressed State*, pembebanan dilakukan pada kondisi awal sebelum menerima beban
- c. *Load Case Type* : *Static*

- d. *Analysis Type* : *Nonlinear*
- e. *Load Applied* : *Load Pattern DEAD = 1.0*
 : *Load Pattern LIVE = 0.3*



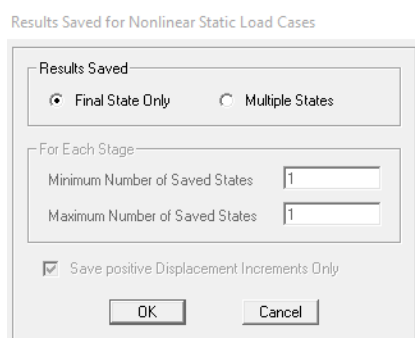
Gambar 5.23 Pengaturan Pushover Beban Gravitasi

- f. *Load Application* : klik *modify/show* pada *Load Application Control* dipilih *Full Load*, pada *Monitored Displacement* pilih *DOF U3 at Joint 3394* (joint pusat massa bangunan pada tingkat atas) klik OK



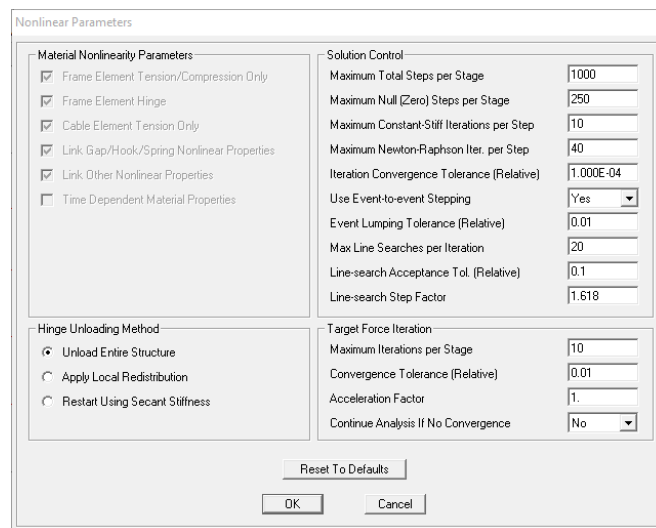
Gambar 5.24 Load Application Control For Nonlinear Analysis (GRAV)

- g. *Results Saved* : klik *modify/show*, pada *Results Saved* pilih *Final State Only* lalu klik OK



Gambar 5.25 Results Saved For Nonlinear Static Load Cases (GRAV)

- h. *Nonlinear Parameters*: klik *modify/show*, parameternya diisi sesuai pada Gambar 5.26 berikut ini.

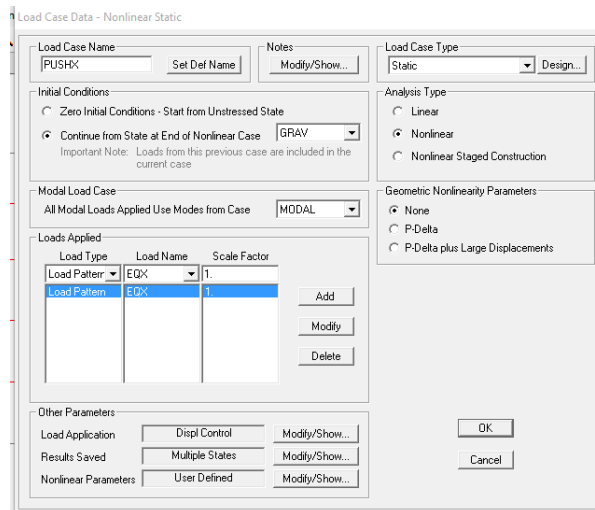


Gambar 5.26 Nonlinear Parameter (GRAV)

2. Pendefinisian *pushover* beban lateral (PUSHX dan PUSHY)

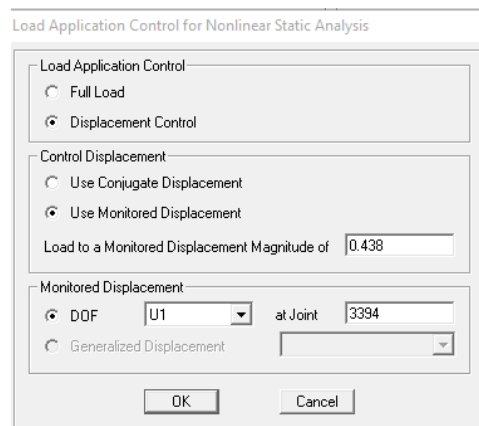
Pembebanan lateral baik arah x dan y dilakukan dengan cara pilih *define – Load Cases – add new load case*. Selanjutnya dilakukan pemodifikasian nilai PUSHX dapat dilihat pada Gambar 5.27 dan pengisian *load case data* sebagai berikut ini.

- a. *Load Case Name* : PUSHX
- b. *Initial Conditions* : *Continue From State at End Nonlinear Case* diisi GRAV
- c. *Load Case Type* : *Static*
- d. *Analysis Type* : *Nonlinear*
- e. *Load Applied* : *Load Pattern EQX = 1,0*



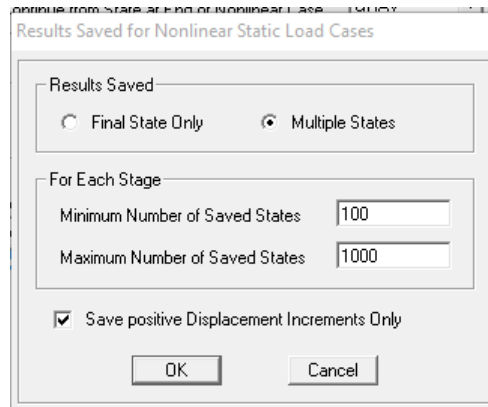
Gambar 5.27 Pengaturan Pushover Beban PUSHX

- f. *Load Application* : klik *modify/show* pada *Load Application Control* dipilih *Displacement Control*, pada *Control Displacement* pilih *Use Monitored Displacement*, *Load to a Monitored Displacement Magnitude of* diisi 0,438 hasil tersebut di peroleh dari 2% dari tinggi total bangunan 21,9 meter. pada *Monitored Displacement* pilih *DOF U1 at Joint 3394* (joint pusat massa bangunan pada tingkat atas) klik OK.



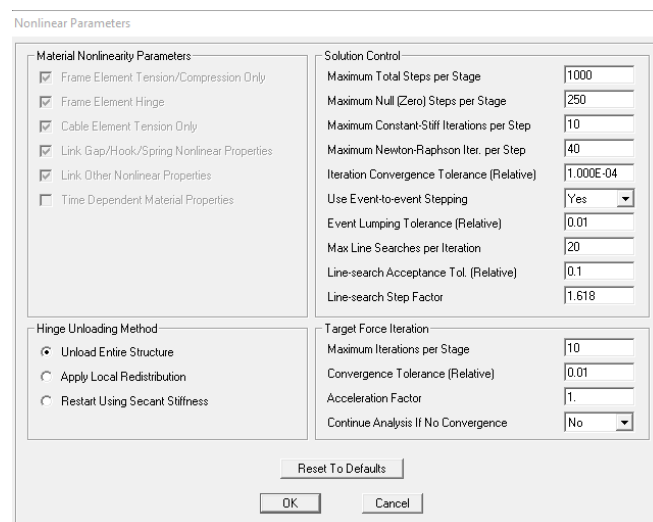
Gambar 5.28 Load Application Control For Nonlinear Analysis (PUSHX)

- g. *Results Saved* : klik *modify/show*, pada *Results Saved* pilih *Multiple State* diisi sesuai Gambar 5.29 berikut, kemudian centang *Save positive Displacement Increments Only* lalu klik OK



Gambar 5.29 Results Saved For Nonlinear Static Load Cases (PUSHX)

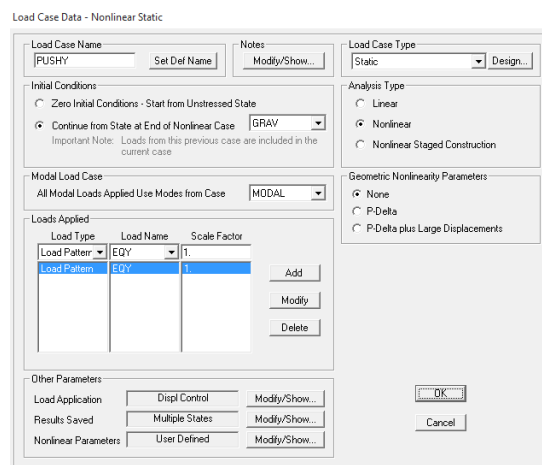
- h. *Nonlinear Parameters*: klik *modify/show*, parameterinya diisi sesuai pada Gambar 5.30 berikut ini.



Gambar 5.30 Nonlinear Paramater (PUSHX)

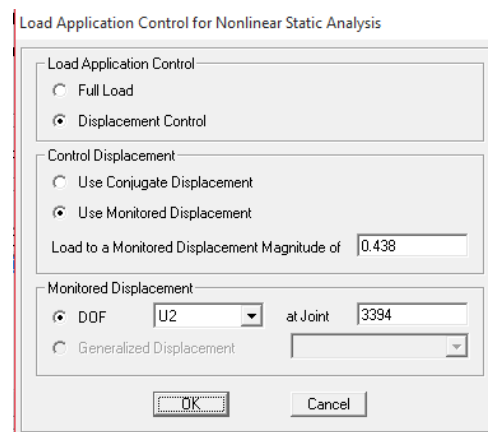
Pendefinisian *pushover* lateral arah y atau PUSHY dapat dilihat pada Gambar 5.31 dan pengisian data load case sebagai berikut ini.

- a. *Load Case Name* : PUSHY
- b. *Initial Conditions* : *Continue From State at End Nonlinear Case* diisi GRAV
- c. *Load Case Type* : *Static*
- d. *Analysis Type* : *Nonlinear*
- e. *Load Applied* : *Load Pattern EQY = 1,0*



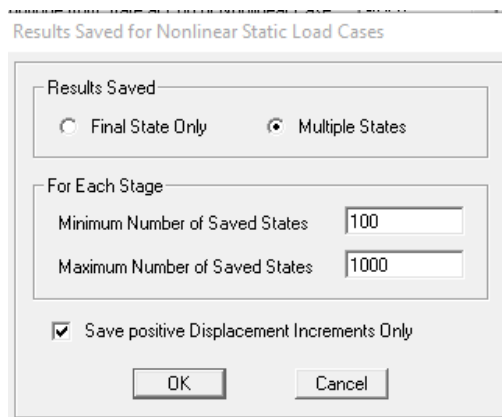
Gambar 5.31 Pengaturan *Pushover* Beban PUSHY

- f. *Load Application* : klik *modify/show* pada *Load Application Control* dipilih *Displacement Control*, pada *Control Displacement* pilih *Use Monitored Displacement*, *Load to a Monitored Displacement Magnitude of* diisi 0,438 hasil tersebut di peroleh dari 2% dari tinggi total bangunan 21,9 meter. pada *Monitored Displacement* pilih *DOF U2 at Joint 3394* (joint pusat massa bangunan pada tingkat atas) klik OK.



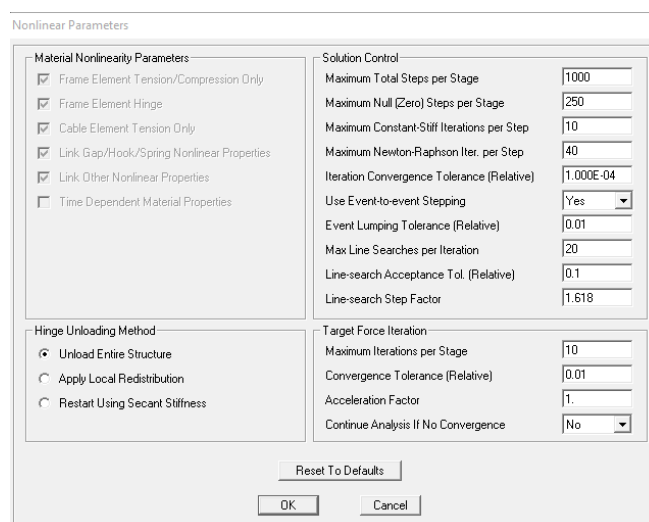
Gambar 5.32 Load Application Control For Nonlinear Analysis (PUSHY)

- g. *Results Saved* : klik *modify/show*, pada *Results Saved* pilih *Multiple State* diisi sesuai Gambar 5.33 berikut, kemudian centang *Save positive Displacement Increments Only* lalu klik OK



Gambar 5.33 Results Saved For Nonlinear Static Load Cases (PUSHY)

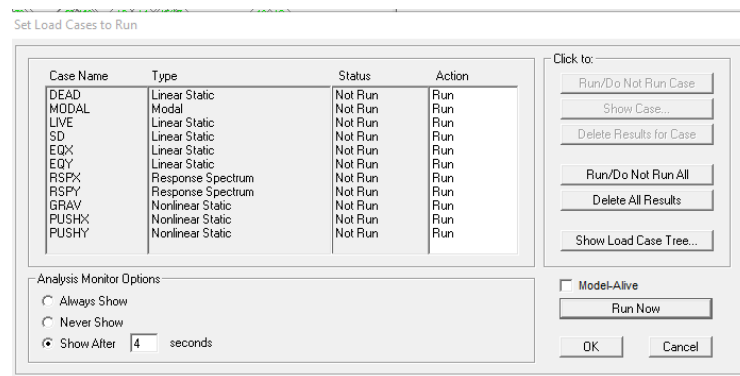
- h. *Nonlinear Parameters*: klik *modify/show*, parameternya diisi sesuai pada Gambar 5.34 berikut ini.



Gambar 5.34 Nonlinear Paramater (PUSHY)

5.3.4. Running Pushover Analysis

Setelah *setting* sendi plastis pada balok kolom dan kemudian memasukan pembebanan pushover (*Load Cases pushover*), langkah selanjutnya adalah *running pushover analysis* dengan cara klik menu *Analyze – Run Analysis* (Run seluruh parameter) – *Run Now* - OK. Kemudian program akan menjalankan *running* tersebut.



Gambar 5.35 Running Pushover Analysis

Running, biasanya akan memakan waktu lama, dalam pemodelan ini dibutuhkan waktu selama kurang lebih 3 jam hingga selesai.

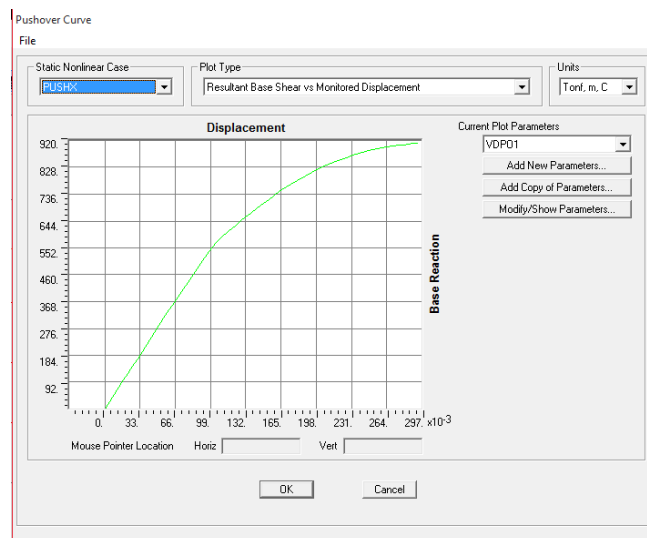
5.4 Hasil Analisis *Pushover*

Hasil analisis *pushover* yaitu berupa kurva kapasitas dan titik kinerja sesuai dengan metoda spektrum kapasitas ATC-40 kemudian akan didapatkan hasil akhir berupa level kinerja dari suatu bangunan.

5.4.1 Kurva Kapasitas

Hubungan antara perpindahan lateral lantai atap dan gaya geser dasar digambarkan dalam suatu kurva yang menggambarkan kapasitas struktur dan hal tersebut dinamakan kurva kapasitas (*capacity curve*). Kurva kapasitas yang didapatkan dari analisis *pushover* menggambarkan kekuatan struktur yang besarnya sangat tergantung dari kemampuan momen deformasi dari masing-masing komponen struktur. Cara termudah untuk membuat kurva ini adalah dengan mendorong struktur secara bertahap (*pushover*) dan mencatat hubungan antara gaya geser dasar (*base shear*) dan perpindahan (*displacement*) atap akibat beban lateral yang dikerjakan pada struktur dengan pola pembebanan tertentu.

Cara menampilkan bentuk kurva kapasitas di program SAP2000 dengan pilih *display – show static pushover curve*. Maka akan muncul kurva kapasitas dari masing- masing desain pembeban yang telah didesain. Dapat dilihat pada Gambar 5.36 dan Gambar 5.37 berikut.



Gambar 5.36 Kurva Kapasitas Arah x (PUSH X)

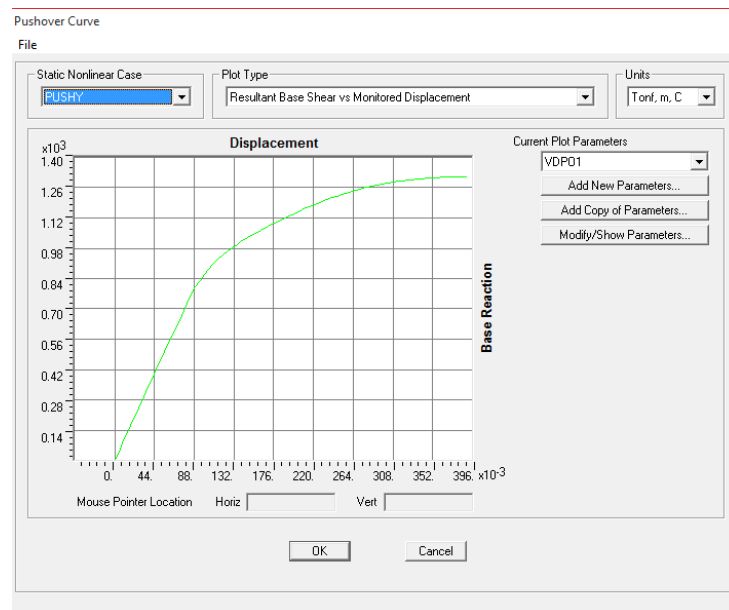
Dari kurva kapasitas arah x, melalui SAP2000 diperoleh tabel antara *base Reaction (V)* dan *displacement (D)* menampilkannya dengan cara *file – display tables*, dilihat pada Tabel 5.21 dan Tabel 5. 22 berikut ini.

Tabel 5.21 Data Kurva Kapasitas Arah x

Step	Displacement (m)	Base force (ton)	Step	Displacement (m)	Base force (ton)
0	0	0	31	0,1535	717,5279
1	0,0043	24,5902	32	0,1578	729,2244
2	0,0087	49,1803	33	0,1635	744,09
3	0,0131	73,7705	34	0,1697	759,6877
4	0,0175	98,3606	35	0,1741	770,0654
5	0,0219	122,9508	36	0,1800	783,4443
6	0,0262	147,541	37	0,1874	799,0171
7	0,0306	172,1311	38	0,1936	810,8737
8	0,0350	196,7213	39	0,1998	821,9507
9	0,0394	221,3115	40	0,2073	834,4209
10	0,0438	245,9016	41	0,2117	841,5601
11	0,0481	270,4918	42	0,2161	848,3139
12	0,0525	295,0819	43	0,2212	855,467
13	0,0569	319,6721	44	0,2260	861,7928
14	0,0586	329,0604	45	0,2319	869,3559
15	0,0634	356,1819	46	0,2378	876,1804
16	0,0717	401,8256	47	0,2440	882,0055
17	0,0776	433,7739	48	0,2507	887,9246
18	0,0845	471,4154	49	0,2591	894,2589
19	0,0897	499,2825	50	0,2640	897,2257
20	0,0957	530,8267	51	0,2704	900,7566
21	0,1003	553,2373	52	0,2748	903,0316
22	0,1050	574,0742	53	0,2802	905,46
23	0,1096	590,6021	54	0,2882	909,3769

Lanjutan Tabel 5.21 Data Kurva Kapasitas Arah x

Step	Displacement (m)	Base force (ton)	Step	Displacement (m)	Base force (ton)
24	0,1153	608,639	55	0,2929	911,6062
25	0,1219	628,3805	56	0,2940	912,1205
26	0,1263	641,3898			
27	0,1318	657,4553			
28	0,1367	671,3597			
29	0,1430	688,637			
30	0,1489	705,2364			



Gambar 5.37 Kurva Kapasitas Arah y (PUSH Y)

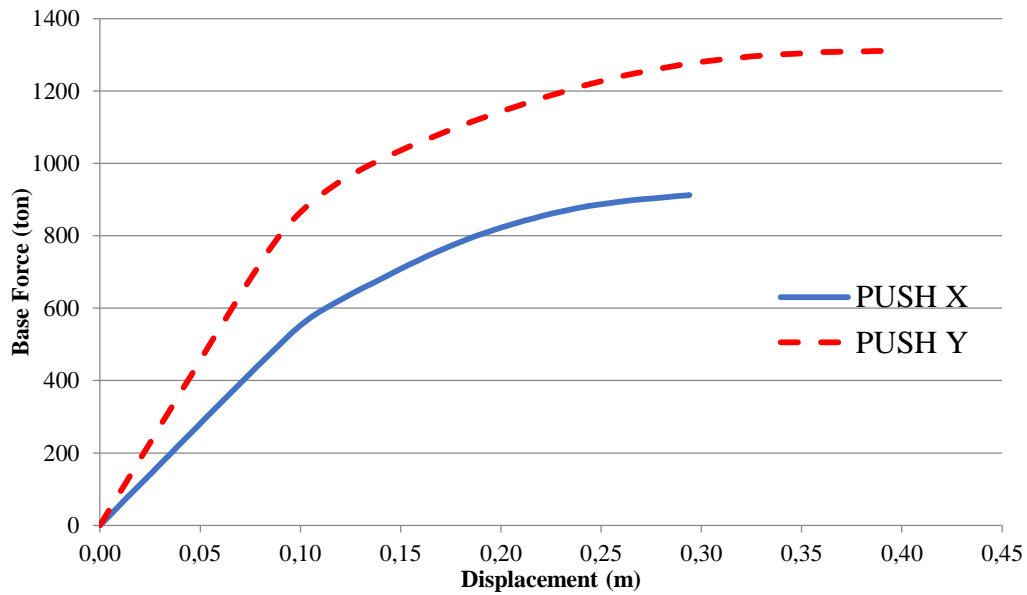
Tabel 5.22 Data Kurva Kapasitas Arah y

Step	Displacement (m)	Base force (ton)	Step	Displacement (m)	Base force (ton)
0	0	0	41	0,2166	1173,2408
1	0,0044	39,9672	42	0,2209	1180,9985
2	0,0087	79,9343	43	0,2253	1188,493
3	0,0131	119,9015	44	0,2297	1195,749
4	0,0175	159,8686	45	0,2341	1203,1465
5	0,0219	199,8358	46	0,2407	1213,7366
6	0,0263	239,8029	47	0,2458	1221,3405
7	0,0306	279,7701	48	0,2522	1230,0793
8	0,0350	319,7372	49	0,2591	1239,3658
9	0,0394	359,7044	50	0,2635	1244,7771
10	0,0420	383,0806	51	0,2709	1253,3211
11	0,0463	422,8594	52	0,2782	1261,0737
12	0,0507	462,6381	53	0,2855	1268,1805
13	0,0551	502,4386	54	0,2899	1272,1957
14	0,0625	569,321	55	0,2961	1277,5777

Lanjutan Tabel 5.22 Data Kurva Kapasitas Arah y

Step	Displacement (m)	Base force (ton)	Step	Displacement (m)	Base force (ton)
15	0,0669	608,5644	56	0,3026	1282,5632
16	0,0737	669,9169	57	0,3093	1286,8873
17	0,0802	725,9802	58	0,3146	1290,0071
18	0,0849	764,5291	59	0,3189	1292,1135
19	0,0896	800,4348	60	0,3244	1295,2259
20	0,0943	832,5056	61	0,3288	1297,107
21	0,0989	859,3295	62	0,3355	1299,4897
22	0,1038	884,6664	63	0,3409	1301,6728
23	0,1084	905,1454	64	0,3453	1302,7387
24	0,1138	927,9008	65	0,3480	1303,7788
25	0,1199	950,1517	66	0,3524	1304,6856
26	0,1243	964,9292	67	0,3591	1306,8394
27	0,1305	984,0048	68	0,3622	1307,5885
28	0,1352	997,6056	69	0,3655	1307,9017
29	0,1395	1009,1417	70	0,3697	1308,7319
30	0,1466	1027,5635	71	0,3741	1309,0484
31	0,1538	1045,2492	72	0,3785	1309,3975
32	0,1623	1064,991	73	0,3829	1309,8718
33	0,1694	1080,6941	74	0,3866	1310,4691
34	0,1768	1097,1047	75	0,3886	1310,6319
35	0,1842	1112,3041	76	0,3908	1310,7411
36	0,1886	1121,3887	77	0,3908	1310,7411
37	0,1961	1135,7066			
38	0,2034	1149,25			
39	0,2078	1157,3732			
40	0,2122	1165,4289			

Dari Tabel 5.21 dapat dilihat untuk kurva kapasitas *pushover* arah x gaya geser dasar maksimum sebesar 912,1205 ton dengan *displacement* pada atap sebesar 0,2940 m berakhir di step ke-56. Dari Tabel 5.22 dapat dilihat untuk kurva kapasitas *pushover* arah y gaya geser dasar maksimum sebesar 1310,7411 ton dengan *displacement* pada atap sebesar 0,3908 m berakhir di step ke-77. Analisis tidak mencapai titik kontrol *displacement* yang ditentukan yakni 0,438 m karena telah terlampauinya kapasitas deformasi pada tiap elemen struktur yang sebelumnya telah didefinisikan pada properti sendi plastis. Perbandingan kurva kapasitas *pushover* arah x dan arah y dilihat pada Gambar 5.38.



Gambar 5.38 Perbandingan Kurva Kapasitas Arah x dan Arah y

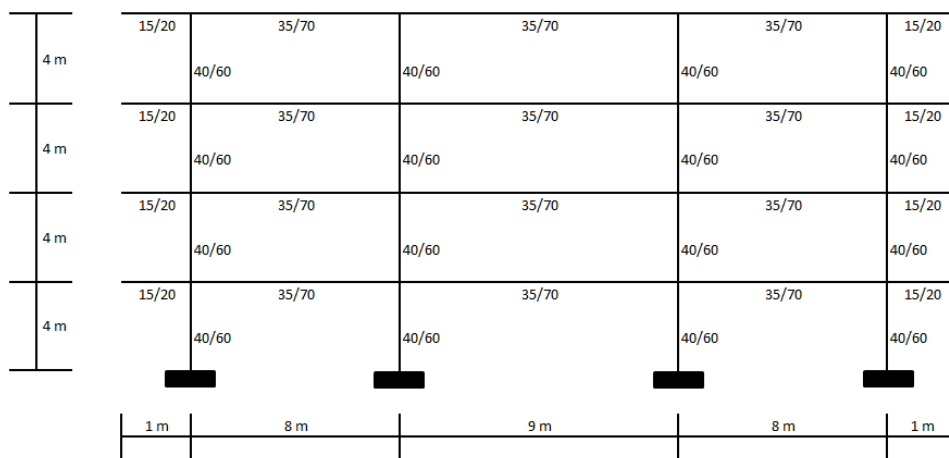
Berdasarkan Gambar 5.38 terlihat bahwa *pushover* arah y memiliki bentuk kurva yang lebih tegak dari pada *pushover* arah x, sehingga dapat dikatakan bahwa *pushover* arah y lebih kaku dari pada *pushover* arah x. hal tersebut dikarenakan posisi arah y memiliki ukuran kolom dan balok yang lebih besar dari pada arah x. Walaupun arah y hanya ditumpu oleh 4 kolom dianggap sebagai sumbu lemah dan arah x ditumpu oleh 10 kolom dianggap sebagai sumbu kuat, namun desain bangunan pada arah y ukuran kolom dan balok dibuat besar sehingga berpengaruh kepada kekakuan strukturnya. Sumbu kuat dan sumbu lemah struktur dilihat pada Gambar 5.3.



Gambar 5.39 Sumbu Kuat dan Sumbu Lemah Struktur

Untuk mengetahui apakah *pushover* arah y lebih kaku dari pada *pushover* arah x tersebut maka dapat dihitung secara manual dengan menggunakan rumus kekakuan. Dalam tugas akhir ini diambil contoh perhitungan kekakuan muto.

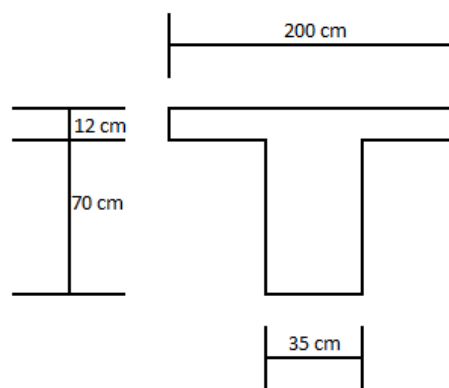
1. Perhitungan kekakuan muto untuk sumbu lemah struktur
 - a. Estimasi portal struktur, berikut adalah contoh gambar pada salah satu portal di struktur bangunan yang berada di posisi sebagai sumbu lemah struktur, dapat dilihat pada Gambar 5.40 berikut ini.



Gambar 5.40 Potongan Portal pada Posisi Sebagai Sumbu Lemah Struktur

- b. Menghitung momen inersia balok T dan Kolom

Dapat dilihat pada Gambar 5.40 terdapat dua jenis ukuran balok dengan tiga panjang yang berbeda maka dibuat tiga inersia balok karena terdapat tiga ukuran yang berbeda yakni 1 m, 8 m dan 9 m. berikut adalah contoh perhitungan untuk mencari inersia balok T dengan panjang 8 m.



Gambar 5.41 Ukuran Balok T

$$\text{Panjang total balok} = 800 \text{ cm}$$

$$\text{Panjang efektif balok (be)} = (1/4)*800 = 200 \text{ cm}$$

Menentukan posisi garis netral

$$y_b = \frac{(200 \times 12 \times 76) + (70 \times 35 \times 35)}{(200 \times 12) + (70 \times 35)} = 55,2887 \text{ cm}$$

$$y_a = (70+12)-55,2887 = 26,7113 \text{ cm}$$

menghitung inersia balok T bentang 8 m

$$\begin{aligned} i_b &= ((1/12) \times 200 \times (12^3)) &&= 28800 \text{ cm}^4 \\ &(12 \times 200 \times (20,7113^2)) &&= 1029499,07 \text{ cm}^4 \\ &((1/12) \times 35 \times (70^3)) &&= 1000416,67 \text{ cm}^4 \\ &(70 \times 35 \times (20,2887^2)) &&= 1008496,8 \text{ cm}^4 \\ &\hline &&&= 3067212,54 \text{ cm}^4 \end{aligned}$$

$$\text{Inersia balok T bentang 9 m} = 3199500 \text{ cm}^4$$

$$\text{Inersia balok T bentang 1 m} = 265776,8 \text{ cm}^4$$

$$\text{Inersia kolom 40/60} = ((1/12) \times 40 \times (60^3)) = 720000 \text{ cm}^4$$

c. Menghitung besaran i/L

$$\text{Bentang 8 m} = i_b/L = \frac{3067212,54}{800} = 3834,0167 \text{ cm}^3$$

$$= i_k/L = \frac{720000}{400} = 1800 \text{ cm}^3$$

$$\text{Bentang 9 m} = i_b/L = 3554,9999 \text{ cm}^3$$

$$= i_k/L = 1800 \text{ cm}^3$$

$$\text{Bentang 1 m} = i_b/L = 2657,7679 \text{ cm}^3$$

$$= i_k/L = 1800 \text{ cm}^3$$

d. Menghitung nilai k

Diambil nilai konstanta $i_k/L = 1800 \text{ cm}^3$ maka :

$$\text{Bentang 8 m} = k_b = \frac{3834,0167}{1800} = 2,13$$

$$= k_c = \frac{1800}{1800} = 1$$

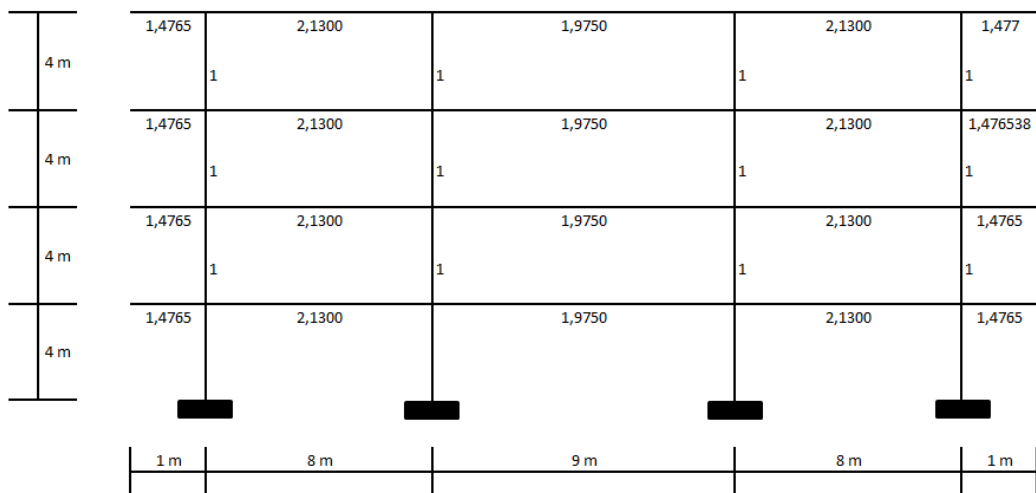
$$\text{Bentang 9 m} = k_b = 1,975$$

$$= k_c = 1$$

Bentang 1 m = $k_b = 1,4765$

$$= k_c = 1$$

Untuk lebih jelas mengenai penempatan nilai k tersebut dapat dilihat pada Gambar 5.42 berikut ini.



Gambar 5.42 Nilai Konstanta k Pada Sumbu Lemah Struktur

e. Menghitung nilai k'

Untuk struktur pada kolom tingkat dasar (tingkat 2 +4,00)

$$k_1' = (1,4765 + 2,13) / (2 \times 1) = 1,8033$$

$$k_2' = (2,13 + 1,975) / (2 \times 1) = 2,0525$$

$$k_3' = 2,0525$$

$$k_4' = 1,8033$$

f. Menghitung nilai C_m'

Untuk struktur kolom tingkat dasar (tingkat 2 +4,00) maka nilai koefisien Muto, C_m' .

$$C_{m1}' = (1,8033 + 0,5) / (1,8033 + 2) = 0,6056$$

$$C_{m2}' = (2,13 + 0,5) / (2,13 + 2) = 0,6368$$

$$C_{m3}' = 0,6368$$

$$C_{m4}' = 0,6056$$

g. Menghitung nilai C_m

Untuk struktur kolom diatas tingkat dasar (tingkat 2 +4,00) maka nilai koefisien Muto, C_m .

$$Cm_1 = \frac{((1,4795 + 2,13) + (1,4765 + 2,13))}{((1,4765 + 2,13) + (1,4765 + 2,13)) + (4 \times 1)} = 0,6423$$

$$Cm_2 = \frac{((2,13 + 1,9750) + (2,13 + 1,9750))}{((2,13 + 1,9750) + (2,13 + 1,9750)) + (4 \times 1)} = 0,6724$$

$$Cm_3 = 0,6724$$

$$Cm_4 = 0,6423$$

h. Kekakuan kolom jepit-jepit

$$K = \frac{12EI}{h^3} = \frac{12 \times 214394,2 \times 720000}{400^3} = 28943,2167 \text{ kg/cm}$$

i. Kekakuan kolom (Muto)

$$\text{Kolom dasar} = Km_1' = 28943,2167 \times 0,6056 = 17528,01 \text{ kg/cm}$$

$$= Km_2' = 28943,2167 \times 0,6368 = 18431,04 \text{ kg/cm}$$

$$= Km_3' = 18431,04 \text{ kg/cm}$$

$$= Km_4' = 17528,01 \text{ kg/cm}$$

$$\text{Kolom atas} = Km_1 = 28943,2167 \times 0,6423 = 18618,42 \text{ kg/cm}$$

$$= Km_2 = 28943,2167 \times 0,6724 = 19461,42 \text{ kg/cm}$$

$$= Km_3 = 19461,42 \text{ kg/cm}$$

$$= Km_4 = 18618,42 \text{ kg/cm}$$

j. Kekakuan kolom total

$$\text{Kolom tingkat 5 +15,60} = 18618,42 + 19461,42 + 19461,42 + 18618,42 = 76159,69 \text{ kg/cm}$$

$$\text{Kolom tingkat 4 +12,00} = 76159,69 \text{ kg/cm}$$

$$\text{Kolom tingkat 3 +8,00} = 76159,69 \text{ kg/cm}$$

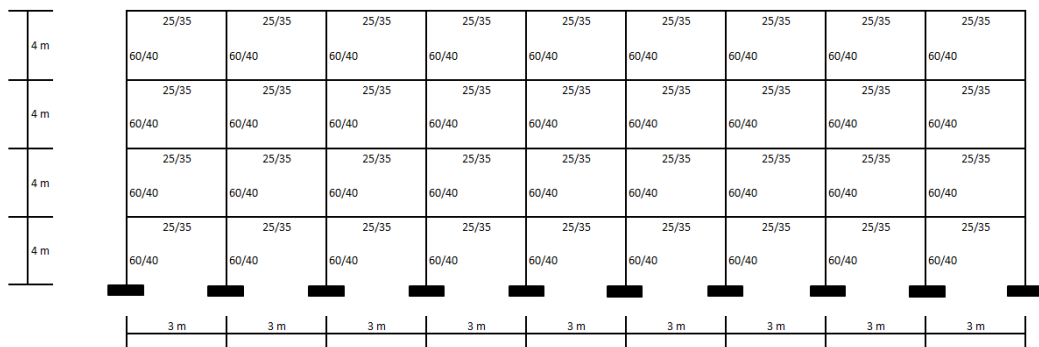
$$\text{Kolom tingkat dasar} = 17528,01 + 18431,04 + 18431,04 + 17528,01 = 71918,10 \text{ kg/cm}$$

Dapat dilihat pada Tabel 5.23.

Tabel 5.23 Kekakuan Kolom (Muto) pada Posisi Sumbu Lemah Arah y Struktur

Kolom Tingkat	Kekakuan 1-Portal (A)	Jumlah Portal (B)	Nilai Total Kekakuan (AxB)	Satuan
Tingkat 5 +15,60	76159,69	10	761596,92	Kg/cm
Tingkat 4 +12,00	76159,69	10	761596,92	Kg/cm
Tingkat 3 +8,00	76159,69	10	761596,92	Kg/cm
Tingkat 2 +4,00	64814,13	10	648141,33	Kg/cm

2. Perhitungan Kekakuan muto untuk sumbu kuat struktur
- a. Estimasi portal struktur berikut adalah Gambar portal bangunan untuk posisi sebagai sumbu kuat struktur, dapat dilihat pada Gambar 5.43 berikut ini.



Gambar 5.43 Potongan Portal pada Posisi Sebagai Sumbu Kuat Struktur

- b. Menghitung momen inersia balok T dan Kolom

$$\text{Inersia balok T bentang 3 m} = 846362,4988 \text{ cm}^4$$

$$\text{Inersia kolom 60/40} = 320000 \text{ cm}^4$$

- c. Menghitung besaran I/L

$$I_b/L = 2821,208 \text{ cm}^3$$

$$I_k/L = 800 \text{ cm}^3$$

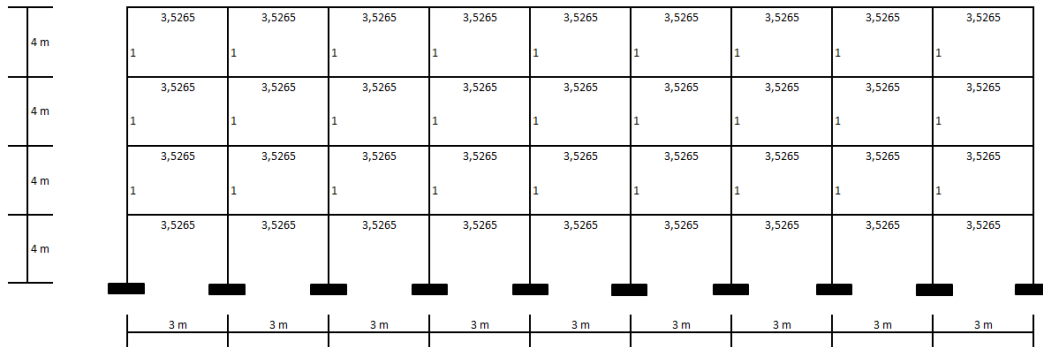
- d. Menghitung nilai k

Diambil nilai konstanta $I_k/L = 800 \text{ cm}^3$ maka :

$$k_b = 3,5265$$

$$k_c = 1$$

berikut adalah Gambar penempatan nilai k untuk portal struktur sumbu kuat.



Gambar 5.44 Nilai Konstanta k Pada Sumbu Kuat Struktur

e. Menghitung nilai k'

Untuk struktur pada kolom tingkat dasar

$$k_1' = 1,1763$$

$$k_2' = 3,5265$$

$$k_3' = 3,5265$$

$$k_4' = 3,5265$$

$$k_5' = 3,5265$$

$$k_6' = 3,5265$$

$$k_7' = 3,5265$$

$$k_8' = 3,5265$$

$$k_9' = 3,5265$$

$$k_{10}' = 1,1763$$

f. Menghitung nilai Cm'

Untuk struktur kolom tingkat dasar maka nilai koefisien Muto, Cm'

$$Cm_1' = 0,6014$$

$$Cm_2' = 0,7286$$

$$Cm_3' = 0,7286$$

$$Cm_4' = 0,7286$$

$$Cm_5' = 0,7286$$

$$Cm_6' = 0,7286$$

$$Cm_7' = 0,7286$$

$$Cm_8' = 0,7286$$

$$Cm_9' = 0,7286$$

$$Cm_{10}' = 0,6014$$

g. Menghitung nilai Cm

Untuk struktur kolom diatas tingkat dasar maka nilai koefisien Muto ,

$$Cm_1 = 0,6381$$

$$Cm_2 = 0,7791$$

$$Cm_3 = 0,7791$$

$$Cm_4 = 0,7791$$

$$Cm_5 = 0,7791$$

$$Cm_6 = 0,7791$$

$$Cm_7 = 0,7791$$

$$Cm_8 = 0,7791$$

$$Cm_9 = 0,7791$$

$$Cm_{10} = 0,6381$$

h. Kekakuan kolom jepit-jepit

$$K = 12863,6519 \text{ kg/cm}$$

i. Kekakuan kolom (Muto)

$$\text{Kolom dasar} = Km_1' = 7736,2002 \text{ kg/cm}$$

$$= Km_2' = 9372, 2121 \text{ kg/cm}$$

$$= Km_3' = 9372, 2121 \text{ kg/cm}$$

$$= Km_4' = 9372, 2121 \text{ kg/cm}$$

$$= Km_5' = 9372, 2121 \text{ kg/cm}$$

$$= Km_6' = 9372, 2121 \text{ kg/cm}$$

$$= Km_7' = 9372, 2121 \text{ kg/cm}$$

$$= Km_8' = 9372, 2121 \text{ kg/cm}$$

$$= Km_9' = 9372, 2121 \text{ kg/cm}$$

$$= Km_{10}' = 9372, 2121 \text{ kg/cm}$$

$$\text{Kolom atas} = Km_1 = 8208,3989 \text{ kg/cm}$$

$$= Km_2 = 10021,8045 \text{ kg/cm}$$

$$= Km_3 = 10021,8045 \text{ kg/cm}$$

$$= Km_4 = 10021,8045 \text{ kg/cm}$$

$$= Km_5 = 10021,8045 \text{ kg/cm}$$

$$= K_{m_6} = 10021,8045 \text{ kg/cm}$$

$$= K_{m_7} = 10021,8045 \text{ kg/cm}$$

$$= K_{m_8} = 10021,8045 \text{ kg/cm}$$

$$= K_{m_9} = 10021,8045 \text{ kg/cm}$$

$$= K_{m_{10}} = 8208,3989 \text{ kg/cm}$$

j. Kekakuan kolom total

Berikut adalah rekapitulasi total kekakuan kolom pada sumbu kuat untuk setiap tingkat, dapat dilihat pada Tabel 5.24 berikut ini.

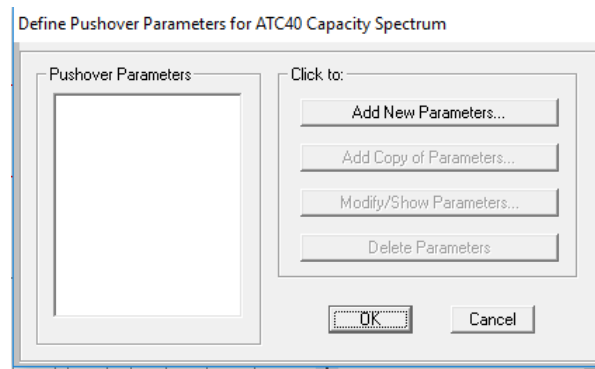
Tabel 5.24 Kekakuan Kolom (Muto) pada Posisi Sumbu Kuat Arah x Struktur

Kolom Tingkat	Kekakuan 1-Portal (A)	Jumlah Portal (B)	Nilai Total Kekakuan (AxB)	Satuan
Tingkat 5 +15,60	96591,2335	4	386364,93	Kg/cm
Tingkat 4 +12,00	96591,2335	4	386364,93	Kg/cm
Tingkat 3 +8,00	96591,2335	4	386364,93	Kg/cm
Tingkat 2 +4,00	90450,0978	4	309036,63	Kg/cm

Dari Tabel 5.23 dan Tabel 5.24 diperlihatkan bahwa nilai kekakuan (muto) struktur untuk sumbu lemah arah y nilai nya jauh lebih besar dari pada sumbu kuat arah x, walaupun sebagai sumbu lemah namun memiliki kekakuan yang besar dikarenakan ukuran balok dan kolom yang lebih besar mengakibatkan nilai kekakuan juga bertambah. Sesuai dengan kurva kapasitas *pushover* yang menunjukkan bahwa kurva *pushover* arah y lebih tegak dari pada kurva *pushover* arah x. sehingga hasil analisis *pushover* dan perhitungan kekakuan sudah sesuai.

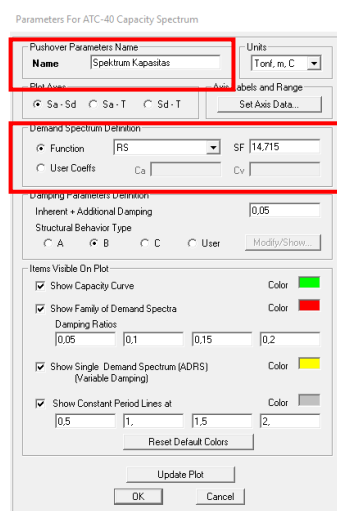
5.4.2 Titik Kinerja Metode *Capacity Spectrum* (ATC-40)

Dalam metode *capacity spectrum*, kurva kapasitas yang dihasilkan dalam analisis *pushover* yakni hubungan antara gaya geser dasar dan perpindahan oleh SAP2000 dikonversi ke dalam bentuk spektrum kapasitas dengan format ADRS (*Acceleration Displacement Respon Spectrum*), yaitu S_a dan S_d (sebagai *spektrum capacity*), caranya dengan klik *Define – Pushover Parameter Sets – ATC 40 capacity spektrum*, kemudian akan muncul kotak dialog seperti pada Gambar 5.45 kemudian klik *Add New Parameters*.



Gambar 5.45 Define Pushover Parameters for ATC40 Capacity Spektrum

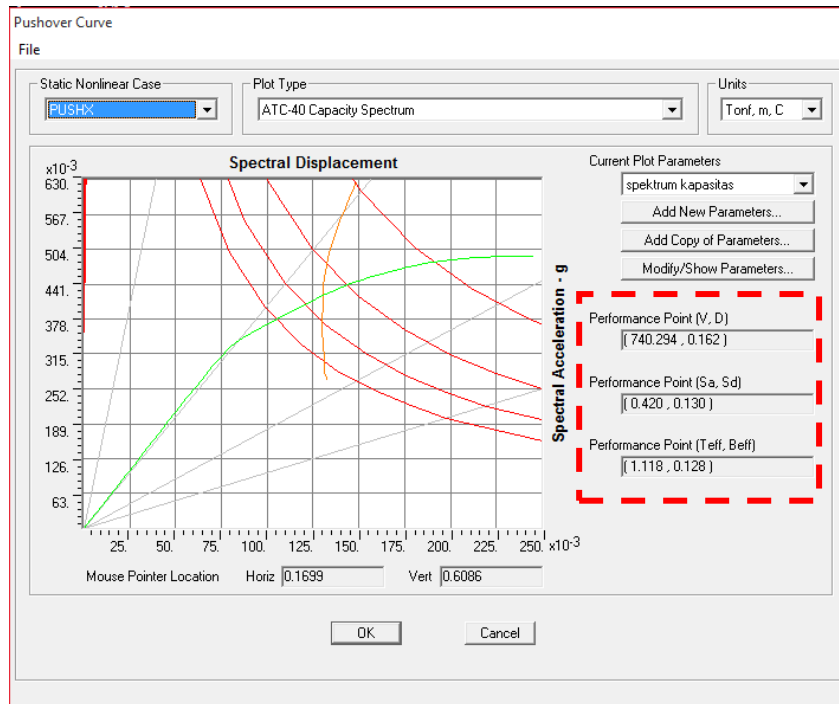
Kemudian isi kotak dialog berikut sesuai dengan Gambar 5.46 kemudian klik OK.



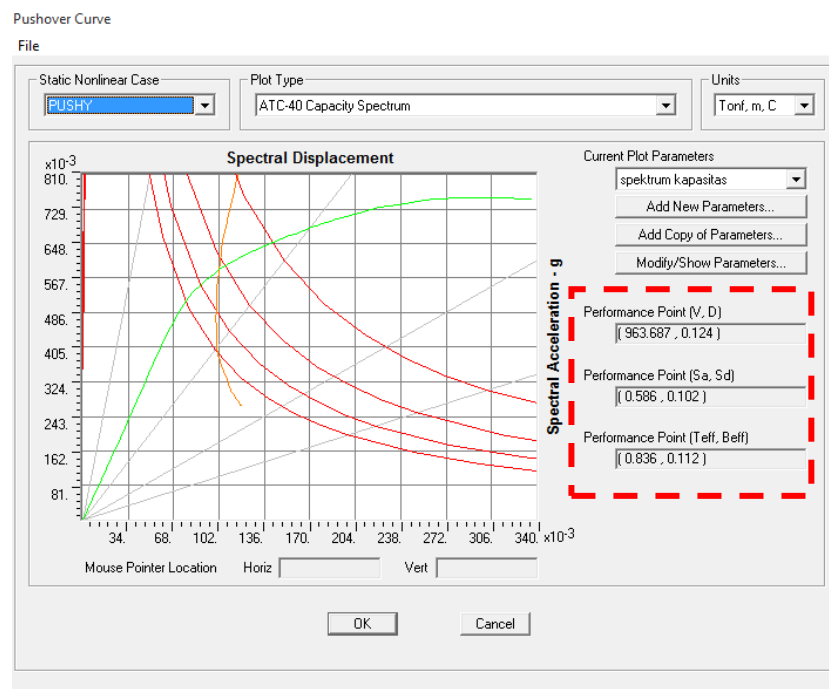
Gambar 5.46 Parameter for ATC-40 Capacity Spektrum (PUSH X-PUSH Y)

Pada kotak dialog *Pushover Parameters Name* diisi dengan Spektrum Kapasitas. Kemudian pada kotak dialog *Demand Spectrum Definition* diisi dengan klik *Function* isi dengan RS kemudian isi parameter SF dengan 14,715 nilai tersebut diambil dari nilai skala faktor yang dimasukkan ke dalam parameter respon spektrum ATC-40 digunakan untuk koreksi ordinat spektrum respon sebesar $\frac{I}{R} g$, dengan risiko bangunan (I) = 1,5, reduksi beban gempa (R) = 1, dan gravitasi (g) = 9,81 sehingga didapatkan angka koreksi ordinat spektrum respon sebesar 14,715. Kemudian untuk menampilkan hasil modifikasi spektrum kapasitas pada program SAP2000 dilakukan dengan cara klik *Display – Show*

Static Pushover Curve – pada *plot type* pilih *ATC-40 Capacity Spectrum*. Kurva *capacity spectrum* dan *demand spectrum* arah x (PUSH X) dan arah y (PUSH Y) disajikan pada Gambar 5.47 dan Gambar 5.48



Gambar 5.47 Capacity Spectrum Pushover Arah x Hasil SAP2000



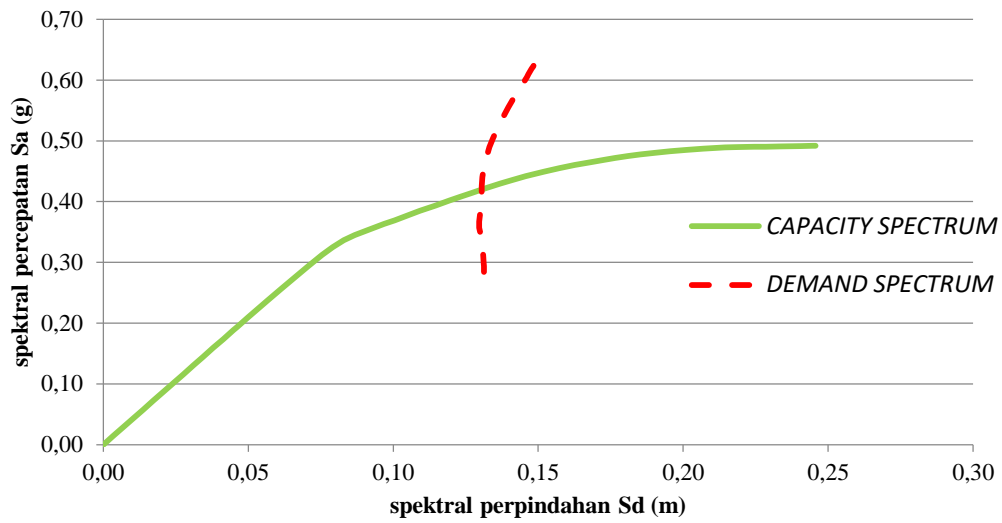
Gambar 5.48 Capacity Spectrum Pushover Arah y Hasil SAP2000

Kemudian dapat dibuat tabel *output* hasil *capacity spectrum* dan *demand spectrum* untuk lebih jelasnya dilihat pada Tabel 5.25 dan Tabel 5.26 berikut ini.

Tabel 5.25 Output Capacity Curve dan Demand Spectrum Arah x

Step	Sd (C)	Sa (C)	Sd (D)	Sa (D)	Step	Sd (C)	Sa (C)	Sd (D)	Sa (D)
0	0	0	0,1485	0,6238	36	0,1456	0,4416	0,1303	0,3951
1	0,0034	0,0145	0,1485	0,6238	37	0,1519	0,4491	0,1301	0,3845
2	0,0069	0,0290	0,1485	0,6238	38	0,1572	0,4549	0,1299	0,3759
3	0,0103	0,0435	0,1485	0,6238	39	0,1625	0,4601	0,1297	0,3671
4	0,0138	0,0580	0,1485	0,6238	40	0,1690	0,4655	0,1297	0,3572
5	0,0172	0,0724	0,1485	0,6238	41	0,1727	0,4686	0,1298	0,3523
6	0,0207	0,0869	0,1485	0,6238	42	0,1766	0,4719	0,1301	0,3476
7	0,0241	0,1014	0,1485	0,6238	43	0,1810	0,4750	0,1303	0,3418
8	0,0276	0,1159	0,1485	0,6238	44	0,1852	0,4775	0,1304	0,3363
9	0,0310	0,1304	0,1485	0,6238	45	0,1903	0,4802	0,1306	0,3295
10	0,0345	0,1449	0,1485	0,6238	46	0,1955	0,4830	0,1308	0,3232
11	0,0379	0,1594	0,1485	0,6238	47	0,2010	0,4852	0,1310	0,3162
12	0,0414	0,1739	0,1485	0,6238	48	0,2070	0,4871	0,1311	0,3085
13	0,0448	0,1884	0,1485	0,6238	49	0,2144	0,4891	0,1312	0,2993
14	0,0461	0,1939	0,1485	0,6238	50	0,2188	0,4898	0,1313	0,2938
15	0,0500	0,2099	0,1483	0,6226	51	0,2245	0,4903	0,1313	0,2866
16	0,0565	0,2366	0,1478	0,6186	52	0,2284	0,4905	0,1313	0,2820
17	0,0611	0,2554	0,1474	0,6161	53	0,2333	0,4908	0,1317	0,2769
18	0,0666	0,2774	0,1470	0,6125	54	0,2406	0,4915	0,1323	0,2703
19	0,0707	0,2937	0,1467	0,6097	55	0,2447	0,4916	0,1329	0,2669
20	0,0754	0,3122	0,1461	0,6046	56	0,2457	0,4917	0,1330	0,2662
21	0,0791	0,3250	0,1447	0,5948					
22	0,0829	0,3363	0,1425	0,5777					
23	0,0867	0,3448	0,1397	0,5552					
24	0,0914	0,3534	0,1368	0,5290					
25	0,0969	0,3633	0,1344	0,5041					
26	0,1005	0,3692	0,1332	0,4896					
27	0,1051	0,3776	0,1323	0,4749					
28	0,1092	0,3846	0,1316	0,4636					
29	0,1145	0,3935	0,1310	0,4502					
30	0,1194	0,4019	0,1308	0,4401					
31	0,1233	0,4083	0,1306	0,4326					
32	0,1269	0,4140	0,1305	0,4257					
33	0,1317	0,4220	0,1305	0,4181					
34	0,1369	0,4298	0,1304	0,4093					
35	0,1406	0,4349	0,1303	0,4030					

Pada Tabel 5.25 terdapat parameter Sd dan Sa (C) kemudian ada parameter Sd dan Sa (D) dari hasil tersebut dapat dibuat sebuah grafik yang dinamakan *performance point* yakni bertemunya grafik Sd dan Sa (C) serta grafik Sd dan Sa (D). Disajikan pada Gambar 5.49.



Gambar 5.49 Capacity Spectrum dan Demand Spectrum Arah x

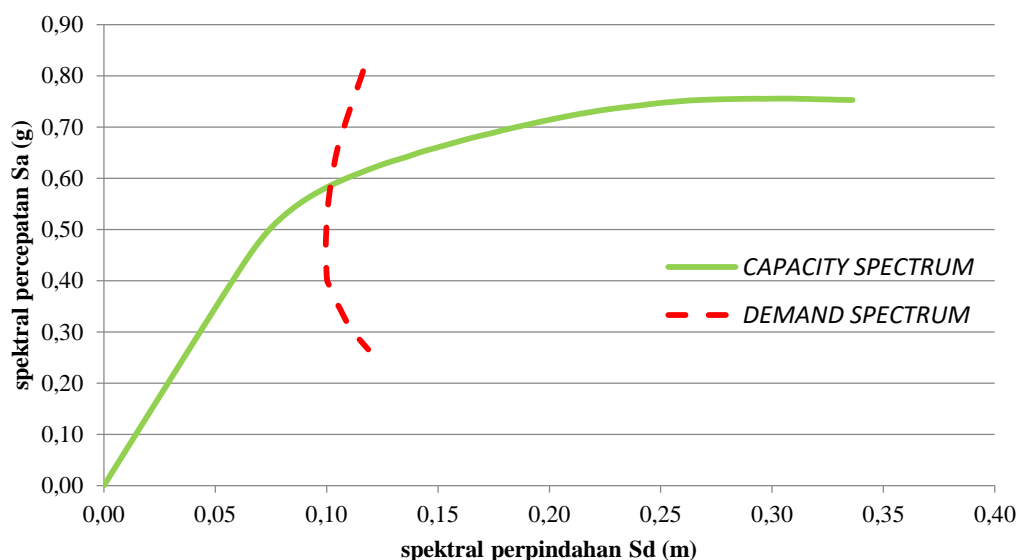
Tabel 5.26 Output Capacity Spectrum dan Demand Spectrum Arah y

Step	Sd (C)	Sa (C)	Sd (D)	Sa (D)	Step	Sd (C)	Sa (C)	Sd (D)	Sa (D)
0	0	0	0,1164	0,8089	41	0,1827	0,6973	0,1014	0,3872
1	0,0035	0,0241	0,1164	0,8089	42	0,1864	0,7009	0,1018	0,3829
2	0,0069	0,0482	0,1164	0,8089	43	0,1901	0,7045	0,1022	0,3788
3	0,0104	0,0723	0,1164	0,8089	44	0,1938	0,7081	0,1026	0,3749
4	0,0139	0,0964	0,1164	0,8089	45	0,1975	0,7116	0,1030	0,3711
5	0,0173	0,1204	0,1164	0,8089	46	0,2030	0,7167	0,1035	0,3655
6	0,0208	0,1445	0,1164	0,8089	47	0,2073	0,7203	0,1039	0,3611
7	0,0243	0,1686	0,1164	0,8089	48	0,2129	0,7249	0,1046	0,3562
8	0,0277	0,1927	0,1164	0,8089	49	0,2188	0,7293	0,1053	0,3509
9	0,0312	0,2168	0,1164	0,8089	50	0,2226	0,7321	0,1057	0,3476
10	0,0332	0,2309	0,1164	0,8089	51	0,2290	0,7360	0,1064	0,3419
11	0,0367	0,2550	0,1164	0,8084	52	0,2353	0,7393	0,1070	0,3364
12	0,0402	0,2790	0,1163	0,8080	53	0,2417	0,7425	0,1077	0,3309
13	0,0436	0,3030	0,1163	0,8072	54	0,2456	0,7448	0,1081	0,3277
14	0,0495	0,3433	0,1161	0,8053	55	0,2511	0,7474	0,1086	0,3232
15	0,0530	0,3671	0,1160	0,8039	56	0,2569	0,7495	0,1091	0,3183
16	0,0584	0,4042	0,1158	0,8012	57	0,2630	0,7517	0,1096	0,3134
17	0,0636	0,4385	0,1153	0,7952	58	0,2677	0,7527	0,1100	0,3092
18	0,0674	0,4623	0,1146	0,7858	59	0,2717	0,7533	0,1104	0,3062
19	0,0713	0,4844	0,1133	0,7696	60	0,2764	0,7540	0,1111	0,3030
20	0,0752	0,5039	0,1114	0,7464	61	0,2804	0,7544	0,1116	0,3003
21	0,0792	0,5207	0,1092	0,7174	62	0,2864	0,7548	0,1124	0,2963
22	0,0837	0,5371	0,1068	0,6854	63	0,2913	0,7551	0,1131	0,2932
23	0,0878	0,5504	0,1049	0,6575	64	0,2952	0,7550	0,1136	0,2906
24	0,0927	0,5642	0,1036	0,6306	65	0,2976	0,7550	0,1139	0,2891
25	0,0981	0,5776	0,1024	0,6026	66	0,3017	0,7554	0,1145	0,2866
26	0,1021	0,5865	0,1017	0,5843	67	0,3077	0,7554	0,1152	0,2829
27	0,1077	0,5976	0,1010	0,5601	68	0,3103	0,7552	0,1156	0,2812
28	0,1119	0,6052	0,1006	0,5437	69	0,3134	0,7548	0,1160	0,2793
29	0,1159	0,6118	0,1002	0,5292	70	0,3171	0,7546	0,1164	0,2770
30	0,1223	0,6225	0,1000	0,5088	71	0,3211	0,7540	0,1169	0,2745
31	0,1286	0,6320	0,0998	0,4905	72	0,3251	0,7537	0,1174	0,2721
32	0,1360	0,6415	0,0996	0,4701	73	0,3290	0,7531	0,1179	0,2698
33	0,1423	0,6510	0,0997	0,4564	74	0,3323	0,7530	0,1182	0,2679

Lanjutan Tabel 5.26 Output Capacity Spectrum dan Demand Spectrum Arah y

Step	Sd (C)	Sa (C)	Sd (D)	Sa (D)	Step	Sd (C)	Sa (C)	Sd (D)	Sa (D)
34	0,1487	0,6588	0,0998	0,4420	75	0,3341	0,7527	0,1185	0,2669
35	0,1550	0,6664	0,0998	0,4292	76	0,3361	0,7526	0,1187	0,2657
36	0,1588	0,6711	0,0999	0,4223	77	0,3361	0,7526	0,1187	0,2657
37	0,1653	0,6788	0,1000	0,4108					
38	0,1715	0,6853	0,1003	0,4005					
39	0,1752	0,6890	0,1006	0,3957					
40	0,1790	0,6935	0,1011	0,3916					

Pada Tabel 5.26 terdapat parameter Sd dan Sa (C) kemudian ada parameter Sd dan Sa (D) dari hasil tersebut dapat dibuat sebuah grafik yang dinamakan *performance point* yakni bertemunya grafik Sd dan Sa (C) serta grafik Sd dan Sa (D). Disajikan pada Gambar 5.50 berikut ini.

**Gambar 5.50 Capacity Spectrum dan Demand Spectrum Arah y**

Terlihat pada Gambar 5.45 bahwa hasil *Pushover* untuk arah x diperoleh hasil $\delta_t = 0,162$ m dan gaya geser dasar target $V_t = 740,294$ ton $< V_{static} = 1882,5545$ ton, maka berdasarkan metode *capacity spectrum* perilaku struktur arah x pada gempa rencana mengalami kondisi elastis.

Terlihat pada Gambar 5.46 bahwa hasil *Pushover* untuk arah y diperoleh hasil $\delta_t = 0,124$ m dan gaya geser dasar target $V_t = 963,687$ ton $< V_{static} = 1882,5545$ ton, maka berdasarkan metode *capacity spectrum* perilaku struktur arah y pada gempa rencana mengalami kondisi elastis.

Nilai *performance point*, waktu getar alami efektif dan redaman *viscous* efektif berdasarkan metode ATC-40 dapat dilihat pada Tabel 5.27 berikut ini.

Tabel 5.27 Performance point Metode ATC-40

Arah beban <i>pushover</i>	<i>Base shear</i> (ton)	<i>Performance point</i>					
		V_t	δ_t (m)	S_a	S_d	T_{eff}	β_{eff}
Arah x	1882,5545	740,294	0,162	0,42	0,13	1,118	0,128
Arah y	1882,5545	963,687	0,124	0,586	0,102	0,836	0,112

5.4.3 Level kinerja struktur

Level kinerja struktur dapat ditentukan berdasarkan kriteria *drift* yang didapat saat titik kinerja tercapai. Berdasarkan pada Tabel 5.25 mengenai batasan *drift* pada atap dapat diketahui level kinerja gedung dengan parameter *maximum total drift ratio* dan *maximum inelastic drift ratio*. Adapun perhitungannya sebagai berikut ini.

1. *Pushover* arah x

$$a. \text{ Maximum total drift ratio} : \frac{\delta_t}{H} = \frac{0,162}{21,9} = 0,007397$$

$$0,007397 < 0,01$$

Menurut ATC-40 *Table 11-2* nilai *maximum total drift ratio* $< 0,01$ maka level kinerja struktur termasuk dalam kategori *Immediate Occupancy (IO)*. Yang artinya bangunan aman saat terjadi gempa, resiko korban jiwa dan kegagalan struktur tidak terlalu berarti, gedung tidak mengalami kerusakan berarti dan dapat segera difungsikan kembali.

$$b. \text{ Maximum Inelastic drift ratio: } \frac{\delta_t - \delta_{il}}{H} = \frac{0,162 - 0,05857}{21,9} = 0,00473$$

$$0,00473 < 0,005$$

Menurut ATC-40 *Table 11-2* nilai *maximum inelastic drift ratio* $< 0,005$ yang artinya masuk dalam kategori *Immediate Occupancy (IO)* yang artinya bangunan aman saat terjadi gempa, resiko korban jiwa dan kegagalan struktur tidak terlalu berarti, gedung tidak mengalami kerusakan berarti dan dapat segera difungsikan kembali.

2. *Pushover* arah y

a. *Maximum total drift ratio* : $\frac{\delta_t}{H} = \frac{0,124}{21,9} = 0,005662$

$$0,005662 < 0,01$$

Menurut ATC-40 *Table 11-2* nilai *maximum total drift ratio* $< 0,01$ maka level kinerja struktur termasuk dalam kategori *Immediate Occupancy (IO)*. Yang artinya bangunan aman saat terjadi gempa, resiko korban jiwa dan kegagalan struktur tidak terlalu berarti, gedung tidak mengalami kerusakan berarti dan dapat segera difungsikan kembali.

b. *Maximum Inelastic drift ratio*: $\frac{\delta_t - \delta_1}{H} = \frac{0,124 - 0,07374}{21,9} = 0,002295$

$$0,002295 < 0,005$$

Menurut ATC-40 *Table 11-2* nilai *maximum inelastic drift ratio* $< 0,005$ yang artinya masuk dalam kategori *Immediate Occupancy (IO)* yang artinya bangunan aman saat terjadi gempa, resiko korban jiwa dan kegagalan struktur tidak terlalu berarti, gedung tidak mengalami kerusakan berarti dan dapat segera difungsikan kembali.

5.4.4 Mekanisme Sendi Plastis

Setelah dilakukan analisis *pushover*, struktur mulai mengalami sendi plastis akibat momen yang terjadi melebihi momen kapasitas elemen tersebut. Perilaku struktur saat beban yang bekerja relatif kecil, maka momen yang bekerja disetiap penampang masih dalam keadaan elastis, sementara jika setelah beban ditingkatkan secara bertahap akan mengakibatkan besar momen pada salah satu penampang mencapai keadaan plastis.

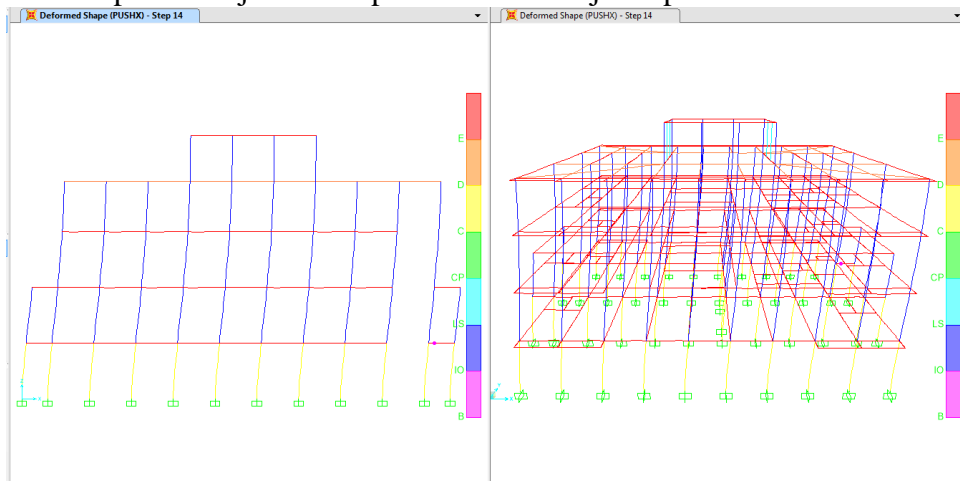
Pada program SAP200, perilaku elemen sendi plastis ditunjukkan dalam bentuk warna yang setiap warna menunjukkan kondisi sendi plastis yang berbeda-beda. Penjelasan mengenai kondisi sendi plastis sesuai warna dalam program SAP2000 dapat dilihat pada Tabel 5.28.

Tabel 5.28 keterangan Jenis Warna pada Sendi Plastis

Keterangan	Simbol	Keterangan
B – IO	●	Menunjukkan batas linier yang kemudian diikuti terjadi pelepasan pertama pada struktur.
IO – LS	●	Kerusakan kecil pada struktur (tidak berarti), kekakuan struktur hampir sama saat sebelum terjadi gempa.
LS – CP	●	Kerusakan mulai dari kecil hingga sedang, kekakuan struktur berkurang tapi masih mempunyai ambang yang cukup besar terhadap keruntuhan.
CP – C	●	Kerusakan parah pada struktur, kekuatan dan kekakuan berkurang cukup banyak.
C – D	●	Batas maksimum gaya geser masih mampu ditahan gedung.
D – E	●	Degradasi kekuatan struktur besar, kondisi struktur tidak stabil hampir runtuh.
E	●	Struktur sudah tidak mampu menahan gaya geser dan runtuh.

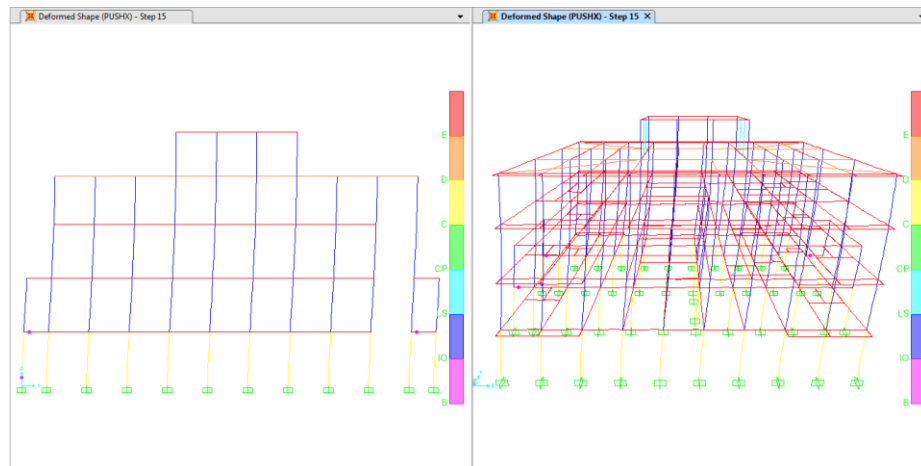
1. Sendi plastis struktur *pushover* arah x
 - a. Step awal saat terjadi sendi plastis

Pembebanan arah x pada sendi plastis mulai terjadi pada step-14 pada balok. Hal tersebut ditandai dengan munculnya titik-titik plastis pada ujung-ujung balok berwarna ungu artinya sendi plastis berada pada level kinerja B-IO. Step awal terjadi sendi plastis arah x disajikan pada Gambar 5.51.

**Gambar 5.51 Step Awal Terjadinya Sendi Plastis Arah x (step 14)**

- b. Step awal saat terjadi sendi plastis pada kolom

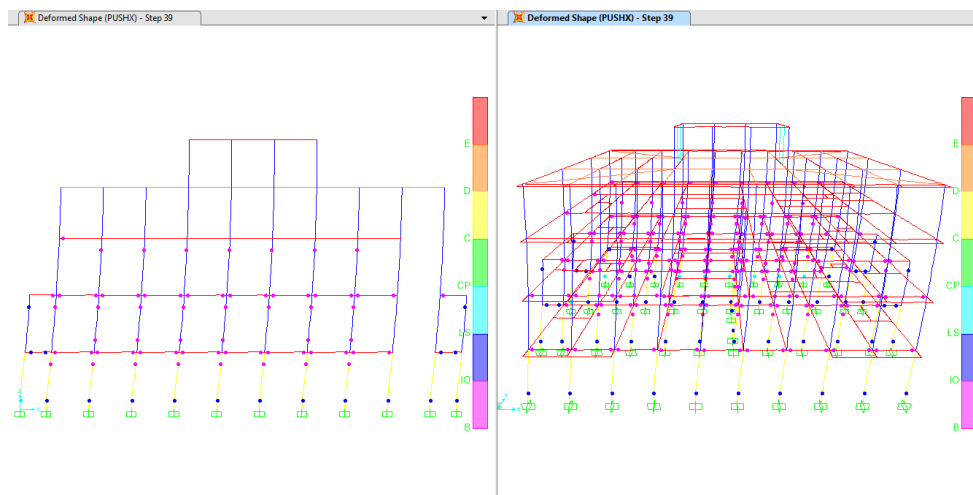
Sendi plastis pada kolom mulai terjadi pada step ke-15 untuk pembebanan arah x. ditandai dengan munculnya titik-titik sendi plastis pada kolom lantai dasar, sendi plastis pada kolom tersebut ditandai dengan warna ungu yaitu B-IO pada kolom dasar yang artinya masih bersifat elastis. Sendi plastis pada kolom dapat dilihat pada Gambar 5.52



Gambar 5.52 Awal Terjadinya Sendi Plastis pada Kolom Arah x (step 15)

c. Step ketika terjadi kelelahan awal

Step ini ditandai dengan terjadinya titik-titik sendi plastis pada balok dengan warna biru muda dengan level kinerja LS – CP, Struktur mulai bersifat *inelastic*. Untuk arah x terjadi kelelahan tersebut terjadi pada step ke-39 terlihat pada Gambar 5.53

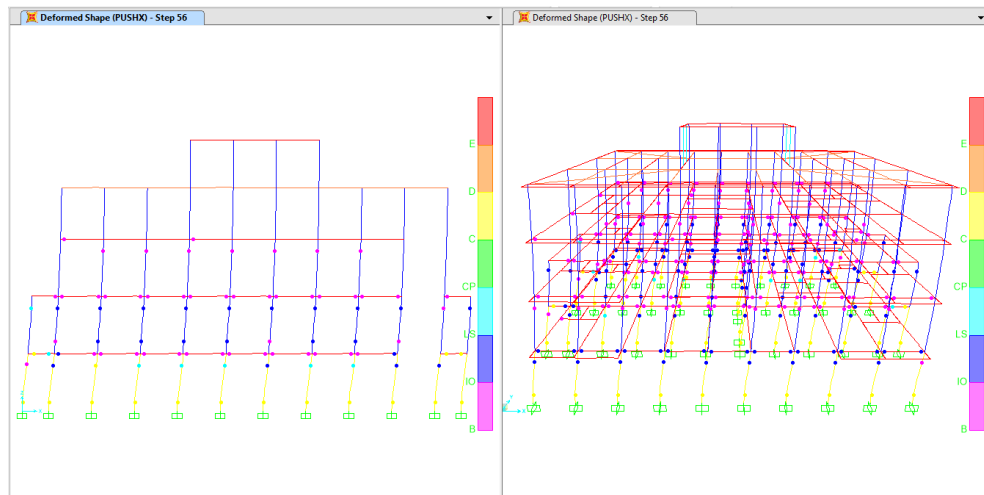


Gambar 5.53 Awal Terjadi Kelelahan pada Struktur Arah x (step 39)

d. Step ketika struktur mulai mengalami *collapse*

Step ini ditandai dengan terjadinya titik-titik plastis berwarna kuning dengan level kinerja C – D yang artinya struktur mulai mengalami kerusakan serius. Dapat dilihat juga bahwa struktur struktur balok yang berada diatas akses jalan keluar masuk bangunan (*entrance*) sudah

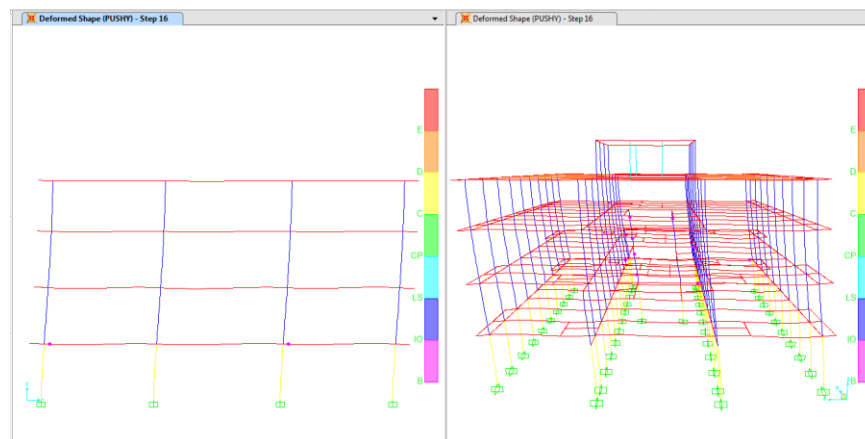
mengalami *collapse* dahulu dan kolom, hal ini sebenarnya tidak diperkenankan mengingat bahwa akses jalan keluar menjadi sangat penting karena jika akses tersebut terhalang maka orang-orang akan sulit keluar dari bangunan pada saat gempa terjadi. Untuk arah x mulai *collapse* pada step ke-56 pada balok dan kolom terlihat pada Gambar 5.54 berikut ini.



Gambar 5.54 Struktur Mulai *Collapse* Arah x (Step 56)

2. Sendi plastis struktur *pushover* arah y
 - a. Step awal saat terjadi sendi plastis

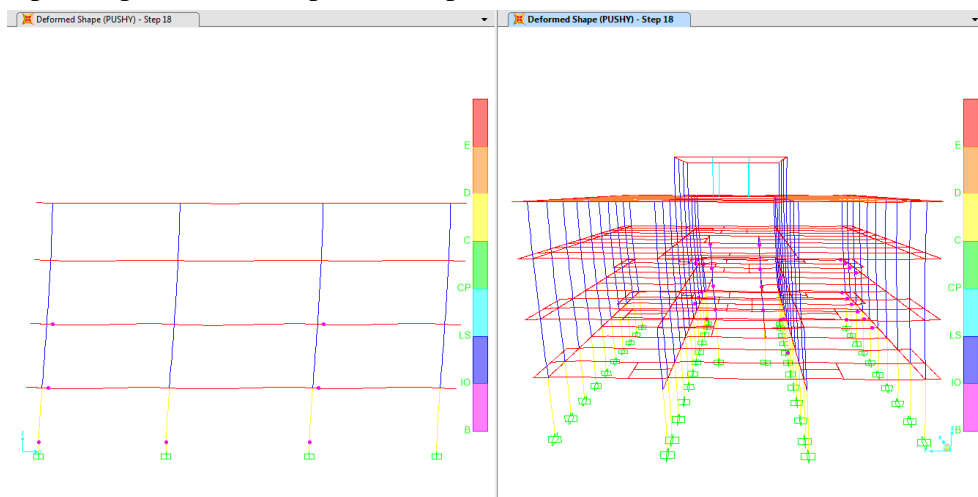
Pembebanan arah x pada sendi plastis mulai terjadi pada step-16 pada balok. Hal tersebut ditandai dengan munculnya titik-titik plastis pada ujung-ujung balok berwarna ungu artinya sendi plastis berada pada level kinerja B-IO. Step awal terjadi sendi pastis arah x disajikan pada Gambar 5.55.



Gambar 5.55 Step Awal Terjadi Sendi Plastis Arah y (step 16)

b. Step awal saat terjadi sendi plastis pada kolom

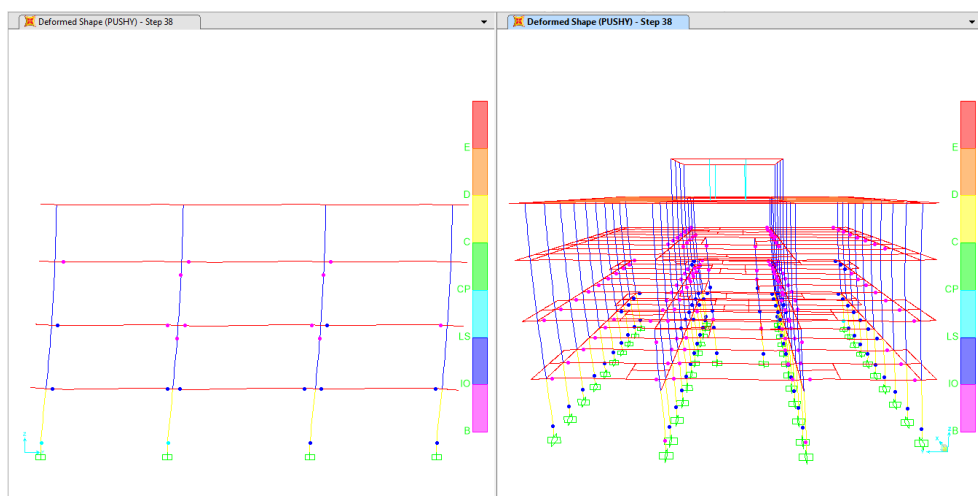
Sendi plastis pada kolom mulai terjadi pada step ke-18 untuk pembebanan arah x. ditandai dengan munculnya titik-titik sendi plastis pada kolom lantai dasar, sendi plastis pada kolom tersebut ditandai dengan warna ungu yaitu B-IO pada kolom dasar yang artinya masih bersifat elastis. Sendi plastis pada kolom dapat dilihat pada Gambar 5.56



Gambar 5.56 Awal Terjadi Sendi Plastis pada Kolom Arah y (step 18)

c. Step ketika terjadi kelelahan awal

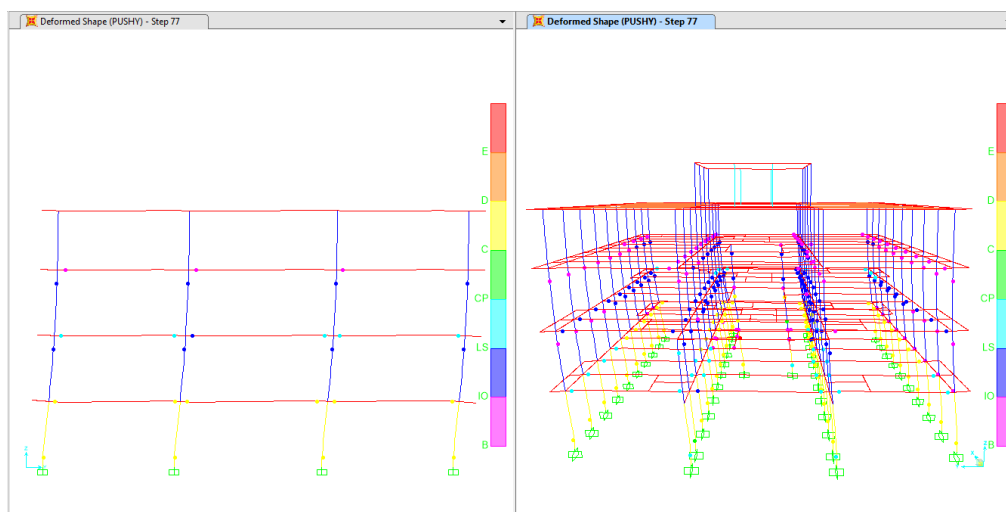
Step ini ditandai dengan terjadinya titik-titik sendi plastis pada balok dengan warna biru muda dengan level kinerja LS – CP, Struktur mulai bersifat *inelastic*. Untuk arah x terjadi kelelahan tersebut terjadi pada step ke-38 terlihat pada Gambar 5.57



Gambar 5.57 Awal Terjadi Kelelahan pada Struktur Arah y (step 38)

d. Step ketika struktur mulai mengalami *collapse*

Step ini ditandai dengan terjadinya titik-titik plastis berwarna kuning dengan level kinerja C – D yang artinya struktur mulai mengalami kerusakan serius. Dapat dilihat juga bahwa struktur struktur balok yang berada diatas akses jalan keluar masuk bangunan (*entrance*) sudah mengalami *collapse* dahulu dan kolom, hal ini sebenarnya tidak diperkenankan mengingat bahwa akses jalan keluar menjadi sangat penting karena jika akses tersebut terhalang maka orang-orang akan sulit keluar dari bangunan pada saat gempa terjadi. Untuk arah x mulai *collapse* pada step ke-77 pada balok dan kolom terlihat pada Gambar 5.58 berikut ini.



Gambar 5.58 Struktur Mulai *Collapse* Arah y (Step 77)

5.5 Studi Kerusakan Bangunan

Adapun langkah-langkah dalam mendapatkan tingkat kerusakan suatu bangunan dengan menggunakan metode HAZUS.

1. Mendeskripsikan model tipe bangunan yang ditinjau

Bangunan yang digunakan adalah bangunan bertipe struktur rangka beton bertulang (*concrete moment frame*) dengan *range mid-rise* karena bangunan mempunyai 5 lantai jadi label bangunan yang digunakan adalah CIM. Untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada Tabel 5.29.

Tabel 5.29 Model Tipe Bangunan yang Digunakan

No	Label	Description	Height			
			Range		Typical	
			name	stories	stories	feet
16	CIL	Concrete moment frame	Low-rise	1-3	2	20
17	CIM		Mid-rise	4-7	5	50
18	CIH		High-rise	+8	12	120

2. Menentukan *design seismic level*

Dalam menentukan *design seismic level* pada suatu bangunan, yang ditinjau adalah berdasarkan peraturan perencanaan yang digunakan saat bangunan didesain awal. Bangunan yang didesain menggunakan Peraturan Beton Indonesia (PBI) 1971 sampai terbitnya SNI T-15-1991-03 atau SNI 03-2847-1992 masuk dalam *design seismic level low code*. Bangunan yang didesain menggunakan SNI 03-2847-2002 masuk dalam kategori *design seismic level moderate code*. Sedangkan untuk bangunan yang didesain menggunakan SNI 03-2847-2012 dan seterusnya masuk dalam kategori *design seismic level high code*. (Muntafi dkk, 2018).

Bangunan Laboratorium Fakultas Kedokteran Universitas Islam Indonesia didesain awal menggunakan SNI 03-2847-2002 sehingga *design seismic level* menggunakan *design seismic level moderate code*.

3. Membuat *response curve*

Response curve merupakan hubungan antara *spectral displacement*, S_d sebagai sumbu x dan *spectral displacement*, S_a sebagai sumbu y. *Spectral acceleration* dapat dicari dengan menggunakan rumus atenuasi. Rumus atenuasi yang sesuai dengan karakteristik gempa Jogja 2006 adalah persamaan atenuasi menurut Joyner – Boore – Fumal (1997). Sebelum menghitung persamaan dari atenuasi tersebut, dilakukan langkah-langkah berikut ini.

a. Menentukan koordinat gedung

Untuk menentukan koordinat gedung dapat menggunakan *google maps*, diketahui koordinat gedung terletak pada 7,688381LS 110,41273BT.

b. Menentukan koordinat episenter

Bersumber dari data BMKG, episenter gempa Yogyakarta berada pada koordinat 8,03LS 110,32BT.

c. Mencari selisih koordinat gedung dan episenter

Koordinat gedung = 7,688381LS 110,41273BT

Koordinat episenter = 8,03 LS 110,32 BT

Selisih = 0,3416 LS 0,0927 BT

d. Mencari jarak episenter

Jarak 1° setara dengan 111,261 km, sehingga dapat diketahui jarak lintang dan bujurnya.

Lintang = $0,3416 \times 111,261 = 38,0089$ km

Bujur = $0,0927 \times 111,261 = 10,3175$ km

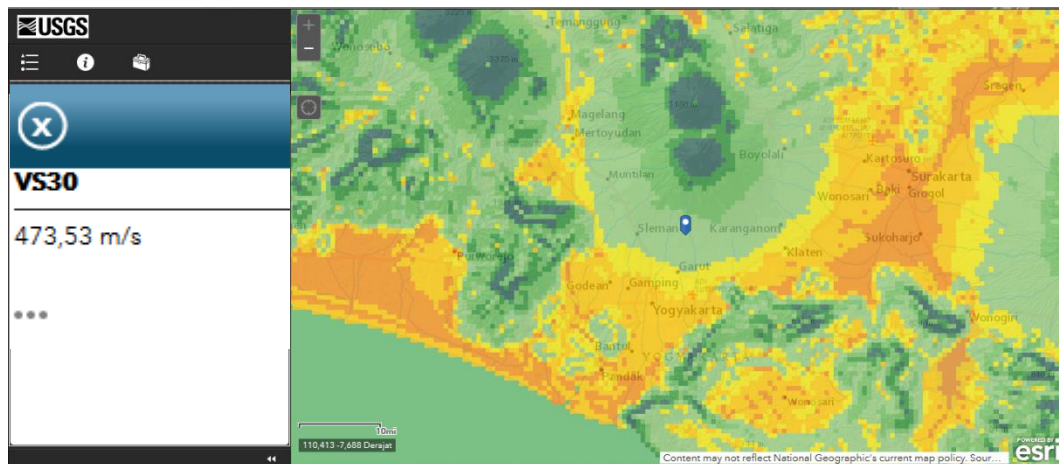
Jarak episenter ke gedung dapat diketahui dengan rumus berikut ini.

$$\begin{aligned} r_{jb} &= \sqrt{38,0089^2 + 10,3175^2} \\ &= \sqrt{1551,1273} \\ &= 39,3843 \text{ km} \end{aligned}$$

e. Persamaan atenuasi Joyner – Boore – Fumal (1997)

$$\ln[Y] = b_1 + b_2(M - 6) + b_3(M - 6)^2 + b_5 \cdot \ln(R) + b_v \cdot \ln\left(\frac{V_s}{V_A}\right)$$

Nilai $M = 6,3$ Mw, merupakan kekuatan gempa di Yogyakarta tanggal 27 Mei 2006, nilai $V_s = 473,53$ m/s, didapatkan dari web resmi USGS (<http://usgs.maps.arcgis.com/apps/webappviewer/index.html?id>) dimana nilai V_s tersebut dicari berdasarkan koordinat gedung. Untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada Gambar 5.59.



Gambar 5.59 Nilai Vs Berdasarkan USGS (*United Stated Geological Survey*)

Berikut adalah contoh perhitungan dari Persamaan atenuasi Joyner-Boore-Fumal (1997).

Perhitungan $\ln[y]$ pada periode (T) ke-0

$$h = 5,27 \text{ (dari Tabel Coefficients Joyner-boore-fumal 1997)}$$

$$\begin{aligned} R &= \sqrt{R_{jb}^2 + h^2} \\ &= \sqrt{39,3843^2 + 5,27^2} \\ &= 39,7762 \end{aligned}$$

$$b_1 = -0,313 \text{ (dari Tabel Coefficients Joyner-boore-fumal 1997)}$$

$$b_2 = 0,527 \text{ (dari Tabel Coefficients Joyner-boore-fumal 1997)}$$

$$b_3 = 0 \text{ (dari Tabel Coefficients Joyner-boore-fumal 1997)}$$

$$b_5 = -0,778 \text{ (dari Tabel Coefficients Joyner-boore-fumal 1997)}$$

$$b_v = -0,371 \text{ (dari Tabel Coefficients Joyner-boore-fumal 1997)}$$

$$V_a = 1396 \text{ (dari Tabel Coefficients Joyner-boore-fumal 1997)}$$

$$\begin{aligned} b_2(M-6) &= 0,527(6,3-6) \\ &= 0,1581 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} b_3(M-6)^2 &= 0(6,3-6)^2 \\ &= 0 \end{aligned}$$

$$\ln(R) = 3,6833$$

$$\begin{aligned} b_5 \cdot \ln(R) &= -0,778 \times 3,6833 \\ &= -2,8648 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}b_v \cdot \text{Ln}\left(\frac{V_s}{V_A}\right) &= -0,371 \times \text{Ln}\left(\frac{373}{1396}\right) \\ &= 0,4011 \\ \text{Ln}[Y] &= -2,6194\end{aligned}$$

Selanjutnya dapat direkap perhitungan dari Persamaan atenuasi Joyner-Boore-Fumal (1997) pada periode berikutnya. Untuk lebih jelasnya dilihat pada Tabel 5.30.

Tabel 5.30 Hasil Persamaan Atenuasi Joyner-Boore-Fumal 1997

T	h	R	b_1	b_2	b_3	b_5	b_v	V_a	$b_2(M-6)$	$b_3(M-6)^2$	$\ln(R)$	$b_5 \cdot \ln(R)$	$b_v \cdot \ln\left(\frac{V_s}{V_A}\right)$	$\ln[Y]$
0	5,57	39,7762	-0,313	0,527	0	-0,778	-0,371	1396	0,1581	0	3,6833	-2,8656	0,4011	-2,6194
0,1	6,27	39,8803	1,006	0,753	-0,226	-0,934	-0,212	1112	0,2259	-0,0203	3,6859	-3,4426	0,1810	-2,0501
0,2	7,02	40,0051	0,999	0,711	-0,207	-0,924	-0,292	2118	0,2133	-0,0186	3,6890	-3,4086	0,4374	-1,7776
0,3	5,94	39,8297	0,598	0,769	-0,161	-0,893	-0,401	2133	0,2307	-0,0145	3,6846	-3,2904	0,6035	-1,8726
0,4	4,91	39,6892	0,212	0,831	-0,12	-0,867	-0,487	1954	0,2493	-0,0108	3,6811	-3,1915	0,6903	-2,0507
0,5	4,13	39,6003	-0,122	0,884	-0,09	-0,846	-0,553	1782	0,2652	-0,0081	3,6788	-3,1123	0,7329	-2,2443
0,6	3,57	39,5458	-0,401	0,928	-0,069	-0,83	-0,602	1644	0,2784	-0,0062	3,6775	-3,0523	0,7493	-2,4318
0,75	3,07	39,5038	-0,737	0,979	-0,046	-0,813	-0,653	1507	0,2937	-0,0041	3,6764	-2,9889	0,7560	-2,6804
1	2,9	39,4909	-1,133	1,036	-0,032	-0,798	-0,696	1406	0,3108	-0,0029	3,6761	-2,9335	0,7574	-3,0011
1,5	3,92	39,5789	-1,552	1,085	-0,044	-0,796	-0,704	1479	0,3255	-0,0040	3,6783	-2,9279	0,8018	-3,3566
2	5,85	39,8164	-1,699	1,085	-0,085	-0,812	-0,655	1795	0,3255	-0,0076	3,6843	-2,9916	0,8728	-3,5000

f. Menghitung nilai S_a

Perhitungan nilai S_a akan dihitung sebagai berikut ini.

$$\begin{aligned} S_a (T=0) &= \text{EXP}(-2,6194) \\ &= 0,0728 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} S_a (T=0.1) &= \text{EXP}(-2,0501) \\ &= 0,1287 \end{aligned}$$

Rekapitulasi nilai S_a pada periode (T) berikutnya dapat dilihat pada Tabel 5.31 berikut ini.

Tabel 5.31 Nilai S_a

T (s)	Sa (g)
0	0,0728
0,1	0,1287
0,2	0,1691
0,3	0,1537
0,4	0,1286
0,5	0,1060
0,6	0,0879
0,75	0,0685
1	0,0497
1,5	0,0349
2	0,0302

g. Menghitung nilai S_d

Perhitungan nilai S_d akan dihitung sebagai berikut ini.

$$\begin{aligned} S_d (T=0) &= 9,8 \times S_a \times T^2 \\ &= 9,8 \times 0,0728 \times 0^2 \\ &= 0 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} S_d (T=0.1) &= 9,8 \times S_a \times T^2 \\ &= 9,8 \times 0,1287 \times 0,1^2 \\ &= 0,0126 \end{aligned}$$

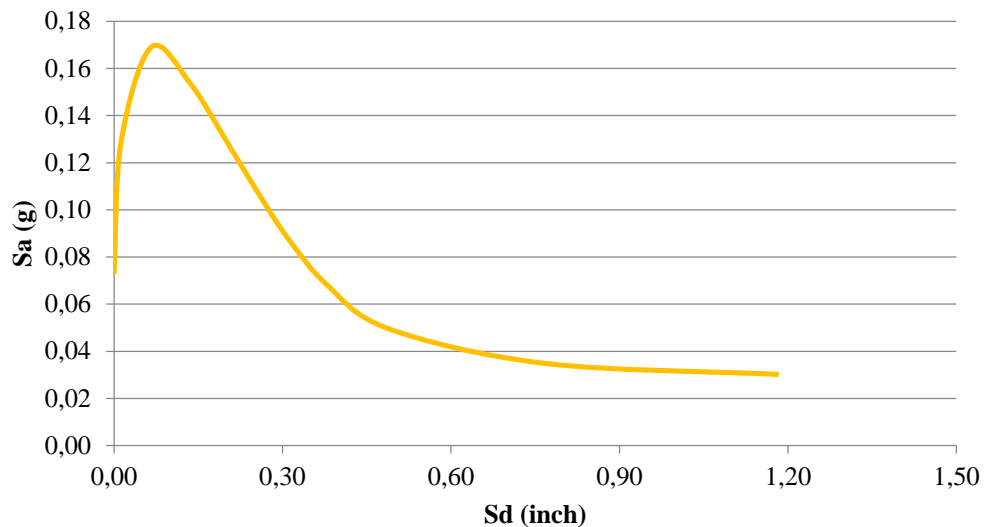
Rekapitulasi nilai S_d pada periode (T) berikutnya dapat dilihat pada Tabel 5.32.

Tabel 5.32 Nilai S_d

T (s)	S_a (g)	S_d (inch)
0	0,0728	0
0,1	0,1287	0,0126
0,2	0,1691	0,0663
0,3	0,1537	0,1356
0,4	0,1286	0,2017
0,5	0,1060	0,2597
0,6	0,0879	0,3100
0,75	0,0685	0,3778
1	0,0497	0,4874
1,5	0,0349	0,7685
2	0,0302	1,1838

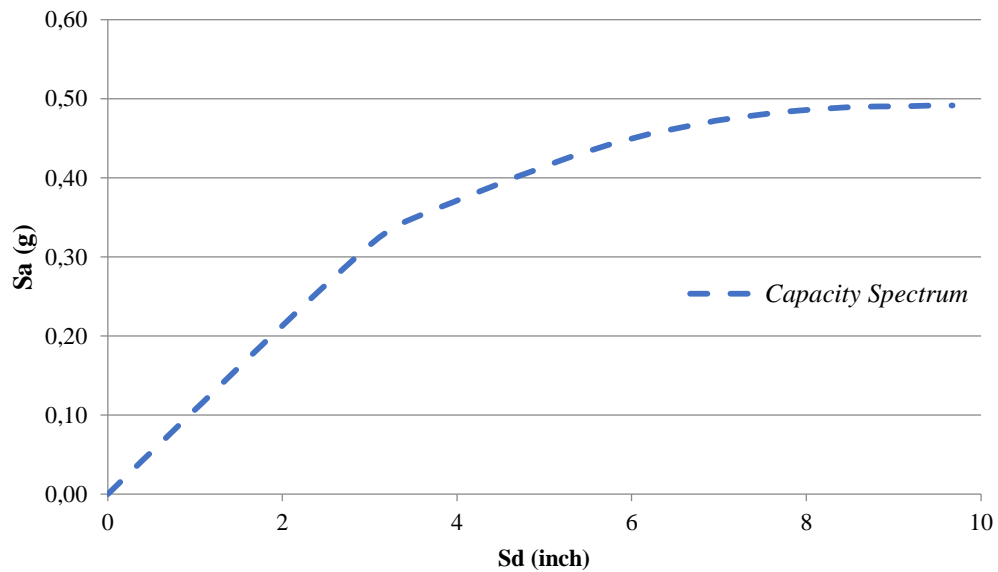
h. Membuat *response curve*

Setelah menghitung nilai S_a dan S_d kemudian dapat dibuat kurva hubungan antara S_a sebagai sumbu y dan S_d sebagai sumbu x kurva tersebut dinamakan *response curve*, dapat dilihat pada Gambar 5.60 berikut ini.

**Gambar 5.60 Response Curve dari S_a dan S_d**

4. Menentukan *capacity spectrum*

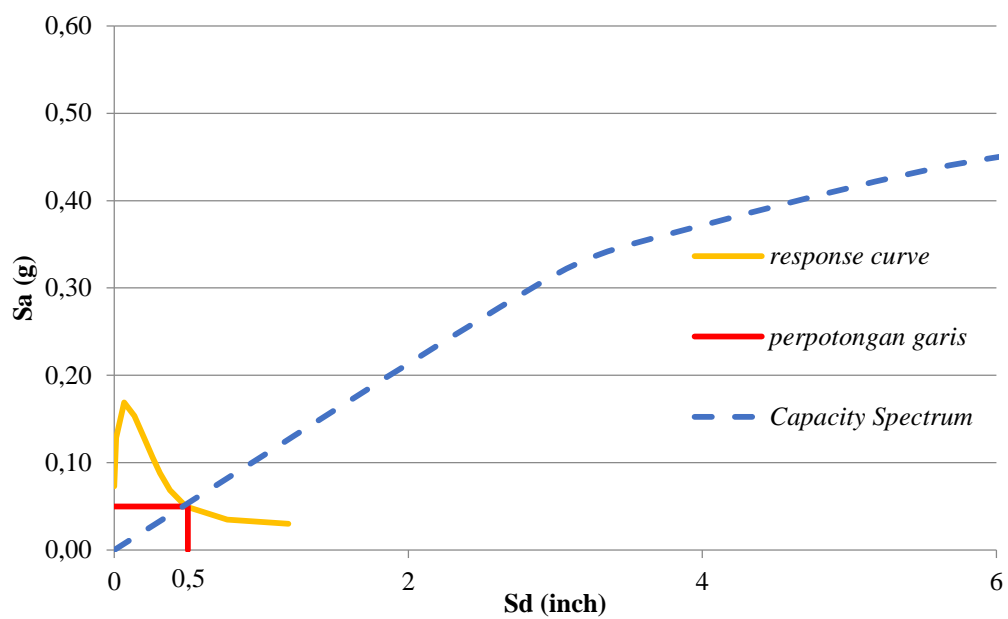
Capacity spectrum diperoleh dari analisis *pushover* yaitu kurva hubungan antara S_a (g) dan S_d (inch). Hasil *capacity spectrum* disajikan pada Gambar 5.61.



Gambar 5.61 Capacity Spectrum

5. Perpotongan antara *response curve* dan *capacity spectrum*

Kemudian dibuat titik perpotongan antara *response curve* dan *capacity spectrum*, sehingga dapat ditentukan nilai S_d yang digunakan untuk mencari tingkat kerusakan dengan metode HAZUS. Dari Gambar 5.62 diketahui nilai S_d sebesar 0,50. Untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada Gambar 5.62 berikut ini.



Gambar 5.62 Perpotongan Antara Response Curve dan Capacity Spectrum

6. Probabilitas kerusakan (*Building Damage Probability*)

Diketahui nilai $S_d = 0,5$ dari hasil perpotongan antara *respon curve* dan *capacity spectrum* digunakan untuk mengetahui kemungkinan terjadinya kerusakan di masa mendatang. Untuk membuat *building damage Probability* digunakan koefisien-koefisien sesuai dengan *code seismic* dan model tipe bangunan yang telah ditentukan yakni *design seismic level moderate code* dan model tipe bangunan CIM. Hasil probabilitas tingkat kerusakan disajikan pada Tabel 5.33 berikut ini.

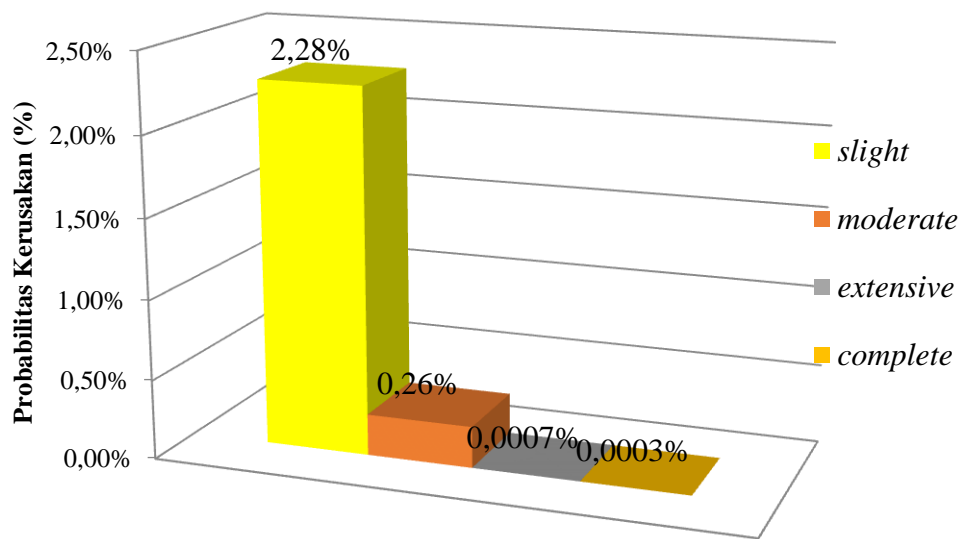
Tabel 5.33 Probabilitas Kerusakan Gedung

<i>Slight</i>						
Sd	S_{ds}	β_{ds}	$\frac{Sd}{S_{ds}}$	$\ln(\frac{Sd}{S_{ds}})$	$\frac{(\ln(\frac{Sd}{S_{ds}}))}{\beta_{ds}}$	$\Phi[(\ln(\frac{Sd}{S_{ds}}))/\beta_{ds}]$
0,5	1,87	0,66	0,2674	-1,3191	-1,9986	0,0228
<i>Moderate</i>						
Sd	S_{ds}	β_{ds}	$\frac{Sd}{S_{ds}}$	$\ln(\frac{Sd}{S_{ds}})$	$\frac{(\ln(\frac{Sd}{S_{ds}}))}{\beta_{ds}}$	$\Phi[(\ln(\frac{Sd}{S_{ds}}))/\beta_{ds}]$
0,5	3,25	0,67	0,1538	-1,8718	-2,7937	0,0026
<i>Extensive</i>						
Sd	S_{ds}	β_{ds}	$\frac{Sd}{S_{ds}}$	$\ln(\frac{Sd}{S_{ds}})$	$\frac{(\ln(\frac{Sd}{S_{ds}}))}{\beta_{ds}}$	$\Phi[(\ln(\frac{Sd}{S_{ds}}))/\beta_{ds}]$
0,5	8,75	0,66	0,0571	-2,8622	-4,3367	0,000007233
<i>Complete</i>						
Sd	S_{ds}	β_{ds}	$\frac{Sd}{S_{ds}}$	$\ln(\frac{Sd}{S_{ds}})$	$\frac{(\ln(\frac{Sd}{S_{ds}}))}{\beta_{ds}}$	$\Phi[(\ln(\frac{Sd}{S_{ds}}))/\beta_{ds}]$
0,5	22,5	0,84	0,0222	-3,8067	-4,5317	0,000002925

Kemudian dihitung *cummulative probability*, untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada Tabel 5.34 berikut ini.

Tabel 5.34 Cummulative Probability

<i>Cummulative probability</i>	<i>slight</i>	<i>moderate</i>	<i>extensive</i>	<i>complete</i>	<i>None collapse</i>
	0,0228	0,0026	0,000007233	0,000002925	0,9746
	2,28%	0,26%	0,0007%	0,0003%	97,46%



Gambar 5.63 Matrik Probabilitas Kerusakan Bangunan

Gambar 5.63 menunjukkan bahwa gedung yang diteliti dengan kategori *design seismic level moderate code* memiliki persentase probabilitas kerusakan akibat gempa, baik dari level kerusakan kecil hingga runtuh total (*vulnerability*) sebesar 2,54% dan persentase probabilitas bangunan untuk tidak roboh atau *none collapse* sebesar 97,46%. Hal tersebut dapat menjadi cerminan bahwa bangunan tersebut sangat aman terhadap gempa berdasarkan skenario gempa Yogyakarta tanggal 27 Mei 2006, dan bangunan dapat langsung dipergunakan kembali mengingat probabilitas bangunan tersebut untuk bertahan dari gempa mencapai lebih dari 90%.

BAB VI KESIMPULAN DAN SARAN

6.1. Kesimpulan

Setelah dilakukan analisis *pushover* dan menghitung probabilitas kerusakan Gedung Laboratorium Fakultas Kedokteran Universitas Islam Indonesia akibat gempa dengan skenario gempa Yogyakarta tahun 2006 maka dapat disimpulkan sebagai berikut ini.

1. Berdasarkan hasil analisis *pushover*, besar gaya geser dasar maksimum untuk kurva kapasitas arah x sebesar 912,1205 ton dengan *displacement* sebesar 0,2940 m yang terjadi pada step ke-56, sedangkan untuk arah y gaya geser dasar maksimum sebesar 1310,7411 ton dan *displacement* sebesar 0,3908 m terjadi pada step ke-77. Dari kurva kapasitas diperlihatkan bahwa *pushover* arah y memiliki bentuk kemiringan yang lebih tegak dari pada *pushover* arah x sehingga dapat dikatakan bahwa arah y lebih kaku dibandingkan arah x, hal tersebut dikarenakan ukuran kolom dan balok arah y lebih besar dari arah x dibuktikan juga dengan perhitungan kekakuan muto hasilnya adalah arah y nilai kekakuannya lebih besar dari pada arah x.
2. Nilai *performance point* dari analisis *pushover* untuk arah-x dengan $V_t = 740,294$ ton dan $\delta_t = 0,162$ m menghasilkan nilai $S_a = 0,42$ g dan $S_d = 0,13$ m, sedangkan untuk arah-y dengan $V_t = 963,687$ ton dan $\delta_t = 0,124$ m menghasilkan nilai $S_a = 0,586$ g dan $S_d = 0,102$ m,
3. Nilai *drift* yang telah dihitung menunjukkan level kinerja struktur sebagai berikut ini.
 - a. *Pushover* arah-x
 - 1) *Maximum total drift ratio* = 0,007397 karena $0,007397 < 0,01$ maka level kinerjanya adalah *Immediate Occupancy (IO)*.
 - 2) *Maximum inelastic drift ratio* = 0,004723 karena $0,004723 < 0,005$ maka level kinerjanya adalah *Immediate Occupancy (IO)*.

- b. Pushover arah-y
- 1) *Maximum total drift ratio* = 0,005662 karena $0,005662 < 0,01$ maka level kinerjanya adalah *Immediate Occupancy (IO)*.
 - 2) *Maximum inelastic drift ratio* = 0,002295 karena $0,002295 < 0,005$ maka level kinerjanya adalah *Immediate Occupancy (IO)*.
4. Akibat pembebanan lateral arah-x dan arah-y secara bertahap mengakibatkan bangunan mengalami sendi plastis baik pada balok maupun kolom. Adapaun mekanisme sendi plastis dijelaskan sebagai berikut.
- a. Step awal terjadi sendi plastis pada arah-x adalah pada step ke-14 dan arah-y pada step ke-16 semua ditandai dengan munculnya sendi plastis pada balok.
 - b. Step awal terjadi sendi plastis pada kolom pada arah-x terjadi pada step ke-15 dan arah-y terjadi pada step ke-18.
 - c. Step ketika terjadi kelelahan awal untuk arah-x pada step-39 dan untuk arah-y pada step ke-38.
 - d. Struktur ketika mulai *collapse* untuk arah-x adalah pada step ke-56 dan arah-y pada step ke-77.
5. Hasil analisis probabilitas kerusakan dengan metode HAZUS yang telah dilakukan diperoleh nilai *cumulative probability* yang menunjukkan bangunan mengalami tingkat kerusakan *slight* dengan probabilitas sebesar 2,28%, kerusakan tingkat *moderate* dengan probabilitas sebesar 0,26%, kerusakan tingkat *extensive* dengan probabilitas sebesar 0,0007%, kerusakan tingkat *complete* dengan probabilitas sebesar 0,0003% sehingga nilai total *vulnerability* adalah sebesar 2,54%, dan probabilitas bangunan tidak mengalami kerusakan sama sekali adalah sebesar 97,46%. Sehingga dapat dikatakan bahwa bangunan sangat aman terhadap gempa dengan skenario gempa Yogyakarta tanggal 27 Mei 2006.

6.2 Saran

Saran untuk pengembangan penelitian lebih lanjut mengenai analisis pushover dan studi kerentanan bangunan, berguna untuk mendapatkan hasil yang kedepannya adalah sebagai berikut ini.

1. Penelitian perlu dilakukan pada bangunan yang lebih kompleks seperti bangunan dengan tipe tak beraturan baik vertikal atau horizontal. Kemudian lokasi bangunan yang berada pada daerah yang sangat rawan sekali terjadi gempa bumi, sehingga analisis pushover dan studi kerentanan bangunan diharapkan mampu memperoleh hasil yang signifikan,
2. Perlu menggunakan komputer dengan spesifikasi tinggi, sehingga dapat mempercepat proses *running pushover* dan kemungkinan terjadi kegagalan dalam running akan semakin kecil,
3. Menggunakan metode analisis lain seperti metode koefisien perpindahan dengan metode FEMA 356 atau FEMA 440 dalam analisis *pushover* dan kemudian membandingkannya dari metode ATC-40, FEMA 356, FEMA 440, guna mengetahui perbedaan hasil dari metode tersebut,
4. Mutu material beton ($f'c$) dan mutu material baja (f_y) untuk evaluasi sebaiknya menggunakan mutu yang sesuai berdasarkan hasil uji laboratorium bahan konstruksi teknik atau berdasarkan pengujian *hammer test*,
5. Dalam kaitannya pembebebanan *pushover* (*pushover load cases*) perlu dipertimbangkan menggunakan beban gempa dinamik percepatan (*accel load*), dikarenakan *accel load* tersebut berdasarkan data dari gempa asli dan pernah terjadi sehingga hasil gaya dan *displacement* yang dihasilkan oleh *pushover analysis* akan menjadi lebih akurat dan dalam perhitungan probabilitas kerusakan angka yang diperoleh pada tiap level kerusakan akan jauh lebih detail,
6. Perlu dikembangkan adanya metode evaluasi yang dibuat berdasarkan standar Indonesia, karena evaluasi kinerja struktur selama ini masih menggunakan standar yang mengacu pada standar pada di negara-negara lain,

7. Dalam kaitannya dengan metode HAZUS dapat melanjutkan penelitian ke tahap perhitungan *fragility curve* sehingga didapatkan hasil yang lebih komprehensif.

DAFTAR PUSTAKA

- Arifin, Z., Suyadi., dan Sebayang, S. 2015. Analisis Struktur Gedung POP Hotel Terhadap Beban Gempa Dengan Metode *Pushover Analysis*. JRSDD, Edisi September 2015, Vol 3, No 3, Hal 427-440. Lampung.
- ATC-40. 1996. *Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings, Volume I*. California. Seismic Safety Commission State of California.
- Bawono, A. 2016. Studi Kerentanan Bangunan Akibat Gempa : Studi Kasus Perumahan Di Bantul. Jurnal Ilmiah Semesta Teknik, Vol 19, No 1, 90-97, Mei 2016. Yogyakarta.
- Boore D.M., Joyner W.B., Fumal T.E. 1997. *Equation for Estimating Horizontal Response Spectra and Peak Acceleration for Western North American Earthquakes : A Summary of Recent Work*. *Seismological Research Letter*. Vol 68 No 1 pp 128-153. America.
- BSN. 2012. *Tata Cara Perencanaan Ketahanan Gempa untuk Struktur Bangunan Gedung dan Non Gedung*, SNI 1726-2012. Penerbit Badan Standarisasi Nasional. Jakarta.
- BSN. 2013. *Beban Minimum untuk Perancangan Bangunan Gedung dan Struktur lain*, SNI 1727-2013. Penerbit Badan Standarisasi Nasional. Jakarta.
- DPU. 1987. *Pedoman Perencanaan Pembebanan Untuk Rumah dan Gedung*, SKBI – 1.3.53.1987 Penerbit Departemen Pekerjaan Umum. Jakarta.
- Dewobroto., Wiryanto. 2005. Evaluasi Kinerja Bangunan Baja Tahan Gempa dengan Analisa Pushover. *Civil Engineering National Conference : Sustainability Construction & Structural Engineering Based on Professionalism*. Unika Soegijapranata. Semarang.
- Dewi, A. 2017. Evaluasi Kinerja Seismik Gedung Rusunawa Jongke Dengan Analisis Pushover Menggunakan Program SAP2000. Tugas Akhir. (Tidak Diterbitkan). Universitas Islam Indonesia. Yogyakarta
- Dwitasari, Y. 2016. Perbandingan Kurva Kapasitas Pada Struktur Gedung Beton Bertulang Dengan Sistem Rangka dan Sistem Ganda. Tugas Akhir. (Tidak Diterbitkan). Universitas Islam Indonesia. Yogyakarta.
- Faraodi, R. 2017. Studi Kerentanan Bangunan Gedung Beton Bertulang Akibat Gempa dengan Analisis *Pushover* dan HAZUS. Tugas Akhir. (Tidak Diterbitkan). Universitas Islam Indonesia. Yogyakarta.

- FEMA-356. 2000. *Prestandard and Commentary For The Seismic Rehabilitation Of Buildings*. Virginia American Society of Civil Engineers.
- FEMA. 1999. *HAZUS-MH MR4 Technical Manual*. Washington, DC, U.S.A
- Ikramullah, 2017. Evaluasi Kinerja Seismik Laboratorium Seni Musik dan Tari Universitas Negeri Yogyakarta dengan Analisis Pushover Metode *Capacity Spectrum*. Tugas Akhir. (Tidak Diterbitkan). Universitas Islam Indonesia. Yogyakarta.
- Marianda, D. 2016. Evaluasi Kinerja Struktur Gedung “Asrama Mahasiswi UGM” Yogyakarta Menggunakan Analisa Pushover Sesuai Pedoman ATC-40. Tugas Akhir. (Tidak Diterbitkan). Universitas Islam Indonesia. Yogyakarta.
- Muntafi, Y., Faraodi, R., Asroni., A. 2018. Damage and Loss Probability Assessment of Reinforced Concrete Building due to Yogyakarta Earthquake Scenario Using Pushover and Hazus Analysis (Case Study : Student Center Building, Faculty of Social Science, UNY). MATEC Web Conference 229 by EDP Sciences. 02014 (2018).
- Muto, K. 1975. *Aseismic Design of Buildings*. Maruzen
- Patria, R. 2017. Evaluasi Kinerja Struktur Bangunan Gedung Studi Kasus Pada Hotel Inna Garuda Extension Yogyakarta. Tesis. (Diterbitkan). Universitas Islam Indonesia. Yogyakarta.
- Prawirodikromo, W. 2012. *Seismologi Teknik dan Rekayasa Kegempaan*. Pustaka Pelajar. Yogyakarta.
- Prawirodikromo, W. 2017. *Analisis Dinamik Struktur*. Pustaka Pelajar. Yogyakarta.
- Pranata dan Yosafat A. 2006. Evaluasi Kinerja Gedung Beton Bertulang Tahan Gempa dengan Pushover Analisis. Jurnal Teknik Sipil, Universitas Kristen Maranatha Vol 3, No 1, Januari 2006. Bandung
- Satyarno, I. 2010. Evaluasi dan Tindakan Pengurangan Kerentanan Bangunan dalam Rangka Mitigasi Bencana Gempa. Pidato Pengukuhan Jabatan Guru Besar. Universitas Gadjah Mada. Yogyakarta.
- Satyarno, I., Nawangalam, P., dan Pratomo, I. 2012. *Belajar SAP 2000 Seri 2*. Zamil Publisihing. Yogyakarta.

- Sunardi, B. 2015. Percepatan Tanah Sintesis Kota Yogyakarta Berdasarkan Deagregasi Bahaya Gempa. *Jurnal Lingkungan Dan Bencana Geologi*. Vol.6 No 3, Desember 2015; 211-228. Jakarta.
- Tavio dan Wijaya U. 2018. *Desaian Rekayasa Gempa Berbasis Kinerja*. Andi Offset. Yogyakarta.
- Jamal, A.U. 2011. Evaluasi Kinerja Struktur Gedung Kuliah Umum Sardjito. Tesis. (Diterbitkan). Universitas Islam Indonesia. Yogyakarta.
- Wibowo, A., Agoes, SMD., Reza, DS. 2017. Kajian Analisis *Pushover* Untuk *Performance Based Design* Pada Gedung Fakultas Ilmu Sosial Dan Politik (FISIP) Universitas Brawijaya. *Jurnal Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Brawijaya*. November 2017. Malang.

LAMPIRAN



PEKERJAAN

**PEMBANGUNAN
LABORATORIUM
FAK. KEDOKTERAN
UII**

LOKASI

KAMPUS TERPADU
Jl. Kallurang Km. 14.4 Steman
JOGJAKARTA

JUDUL

As Built Drawing

PENANGGUNG JAWAB

DR. Ir. Luthfi Hasan, MS

PENGARAH

Ir. Ilman Noor, MSCE

dr. Zainuri Sapta Nugraha

PERENCANA

Koordinator :

Noor Choliss Idham, ST, M.Arch, Ph.D

Konstruktork :

Rizaldi Patria, ST

Mekanikal Elektrikal & Plumbing :

Prapta Suharyana, ST, MSi

PELAKSANA

Construction Manager

Muhammad Gupit Robbicahya, ST, MBA

Drafter :

Nila Kamala Sari, ST

NAMA GAMBAR

SKALA

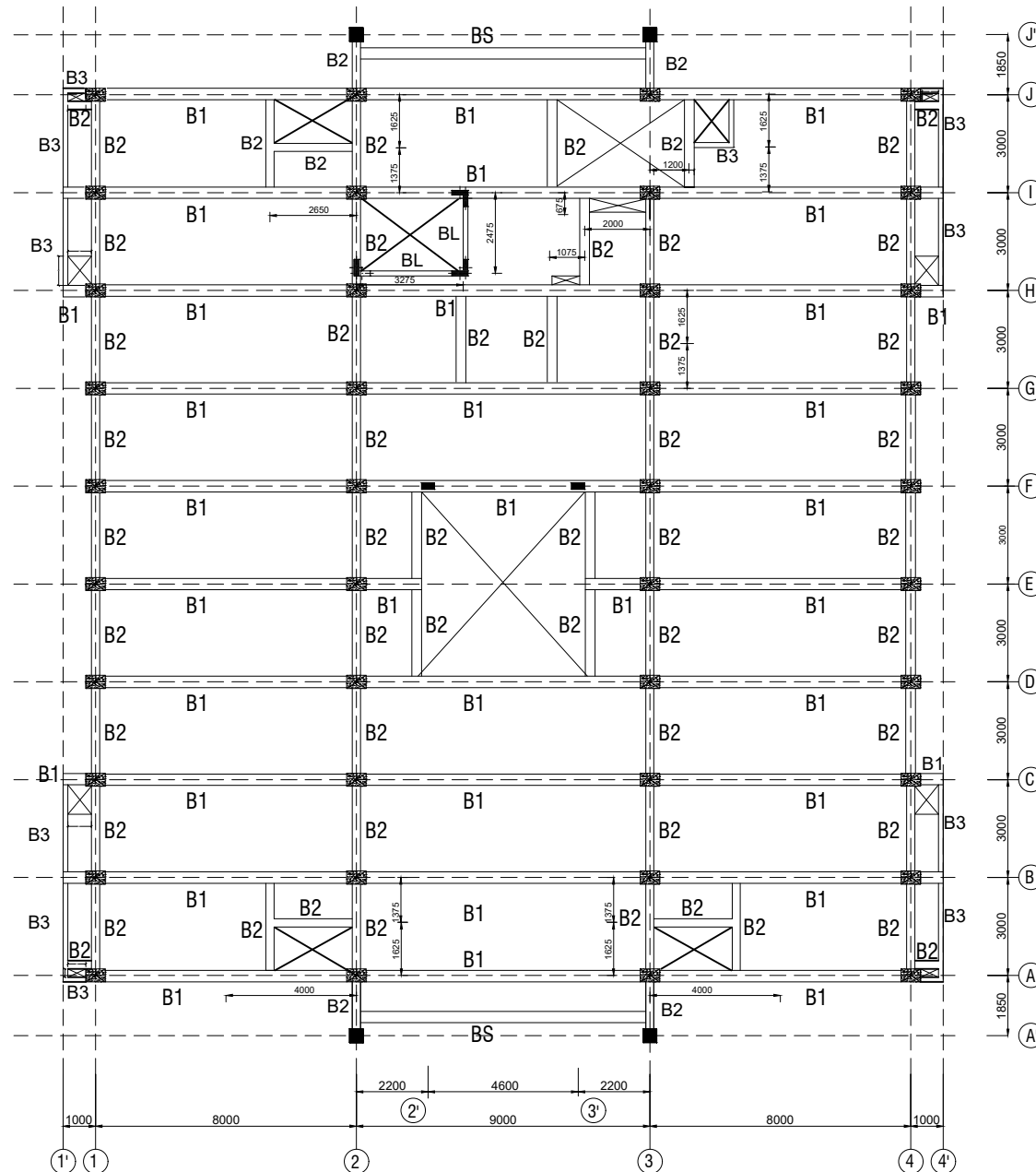
**DENAH
BALOK LT. 2**

NO. LEMBAR

JML LEMBAR

026

72



DENAH BALOK LANTAI 2 (Elevasi +3.92)

NOTASI	KETERANGAN
B1	BALOK (350x700)
B2	BALOK (250x350)
B3	BALOK (150x200)
BL	BALOK LIFT (150x350)
BS	Balok Semu (3D19)



PEKERJAAN

**PEMBANGUNAN
LABORATORIUM
FAK. KEDOKTERAN
UII**

LOKASI

KAMPUS TERPADU
JL. Kallurang KM. 14.4 Steman
JOGJAKARTA

JUDUL

As Built Drawing

PENANGGUNG JAWAB

DR. Ir. Luthfi Hasan, MS

PENGARAH

Ir. Ilman Noor, MSCE

dr. Zainuri Sapta Nugraha

PERENCANA

Koordinator :

Noor Choliss Idham, ST, M. Arch, Ph. D

Konstruktor :

Rizaldi Patria, ST

Mekanikal Elektrikal & Plumbing :

Prapta Suharyana, ST, MSi

PELAKSANA

Construction Manager

Muhammad Gupit Robbicahya, ST, MBA

Drafter :

Nila Kamala Sari, ST

NAMA GAMBAR

SKALA

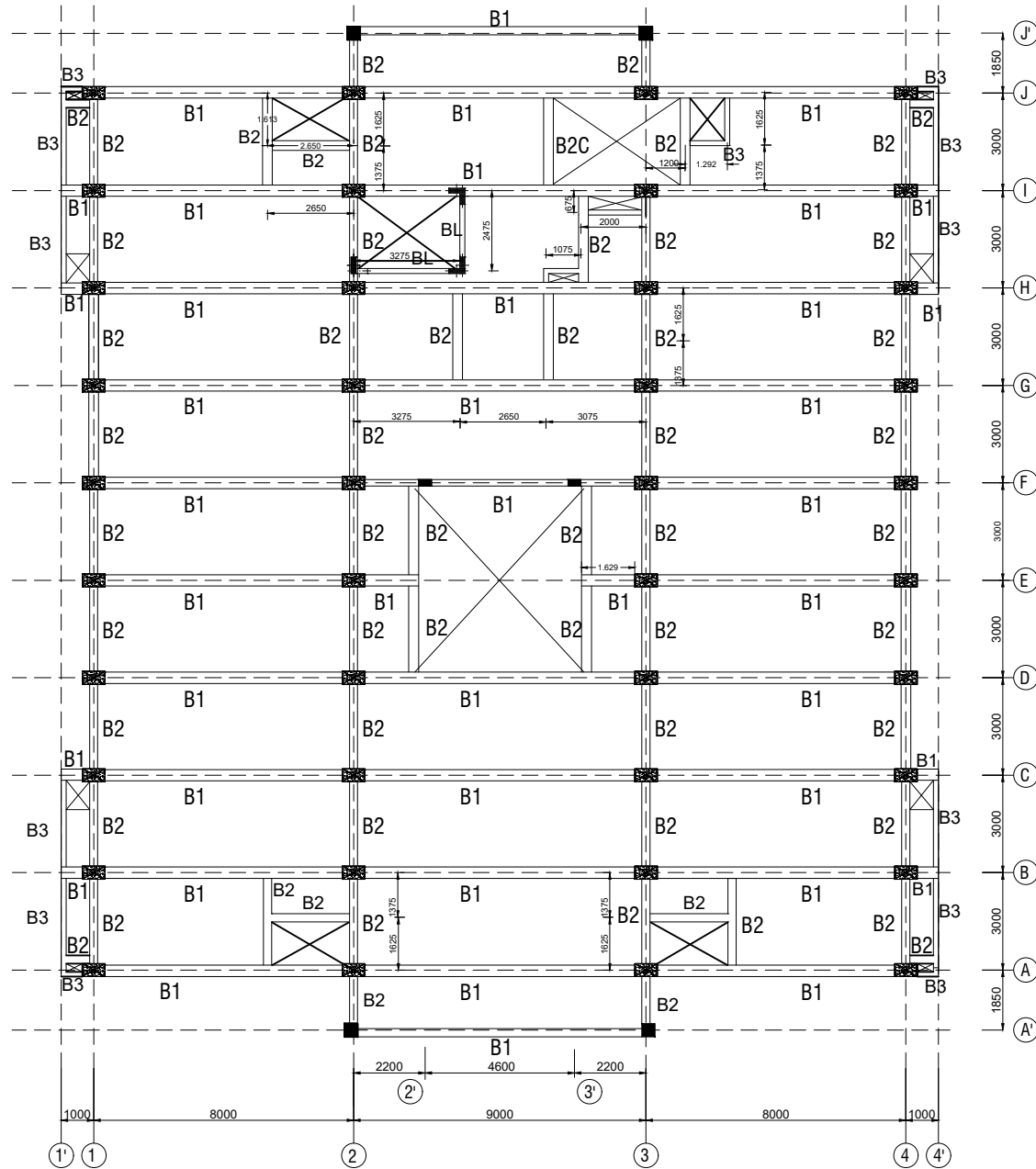
**DENAH
BALOK LT. 3**

NO. LEMBAR

JML LEMBAR

027

72



NOTASI	KETERANGAN
B1	BALOK (350x700)
B2	BALOK (250x350)
B3	BALOK (150x200)
BL	BALOK LIFT (150x350)

DENAH BALOK LANTAI 3 (Elevasi +7.92)



PEKERJAAN

**PEMBANGUNAN
LABORATORIUM
FAK. KEDOKTERAN
UII**

LOKASI

KAMPUS TERPADU
JL. Kallurang KM. 14.4 Steman
JOGJAKARTA

JUDUL

As Built Drawing

PENANGGUNG JAWAB

DR. Ir. Luthfi Hasan, MS

PENGARAH

Ir. Ilman Noor, MSCE

dr. Zainuri Sapta Nugraha

PERENCANA

Koordinator :

Noor Choliss Idham, ST, M. Arch, Ph. D

Konstruktor :

Rizaldi Patria, ST

Mekanikal Elektrikal & Plumbing :

Prapta Suharyana, ST, MSI

PELAKSANA

Construction Manager

Muhammad Gupit Robbichayha, ST, MBA

Drafter :

Nila Kamala Sari, ST

NAMA GAMBAR

SKALA

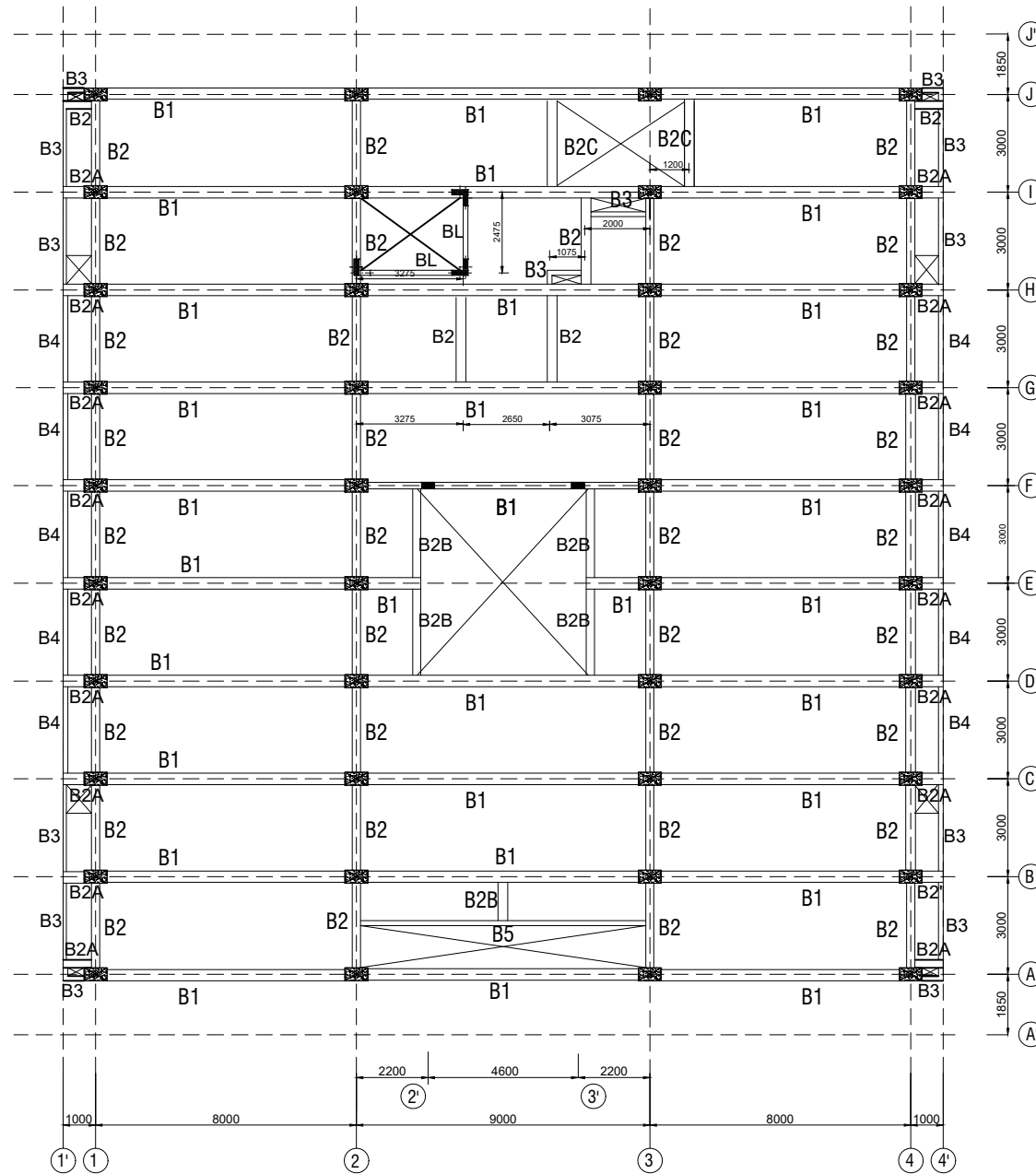
**DENAH
BALOK LT. 4**

NO. LEMBAR

JML LEMBAR

028

72



DENAH BALOK LANTAI 4 (Elevasi +11.92)

NOTASI	KETERANGAN
B1	BALOK (350x700)
B2	BALOK (250x350)
B2A	BALOK (150x250)
B2B	BALOK (250x700)
B2C	BALOK (250x350)
B3	BALOK (150x200)
B4	BALOK (150x450)
B5	BALOK (150x450)
BL	BALOK LIFT (150x350)



PEKERJAAN

**PEMBANGUNAN
LABORATORIUM
FAK. KEDOKTERAN
UII**

LOKASI

KAMPUS TERPADU
JL. Kaliurang KM. 14.4 Sleman
JOGJAKARTA

JUDUL

As Built Drawing

PENANGGUNG JAWAB

DR. Ir. Luthfi Hasan, MS

PENGARAH

Ir. Ilman Noor, MSCE

dr. Zainuri Septa Nugraha

PERENCANA

Koordinator :

Noor Choliz Idham, ST, M.Arch, Ph.D

Konstruktor :

Rizaldi Patria, ST

Mekanikal Elektrikal & Plumbing :

Prapta Suharyana, ST, MSi

PELAKSANA

Construction Manager

Muhammad Gupit Robbicahya, ST, MBA

Drafter :

Nila Kamala Sari, ST

NAMA GAMBAR

SKALA

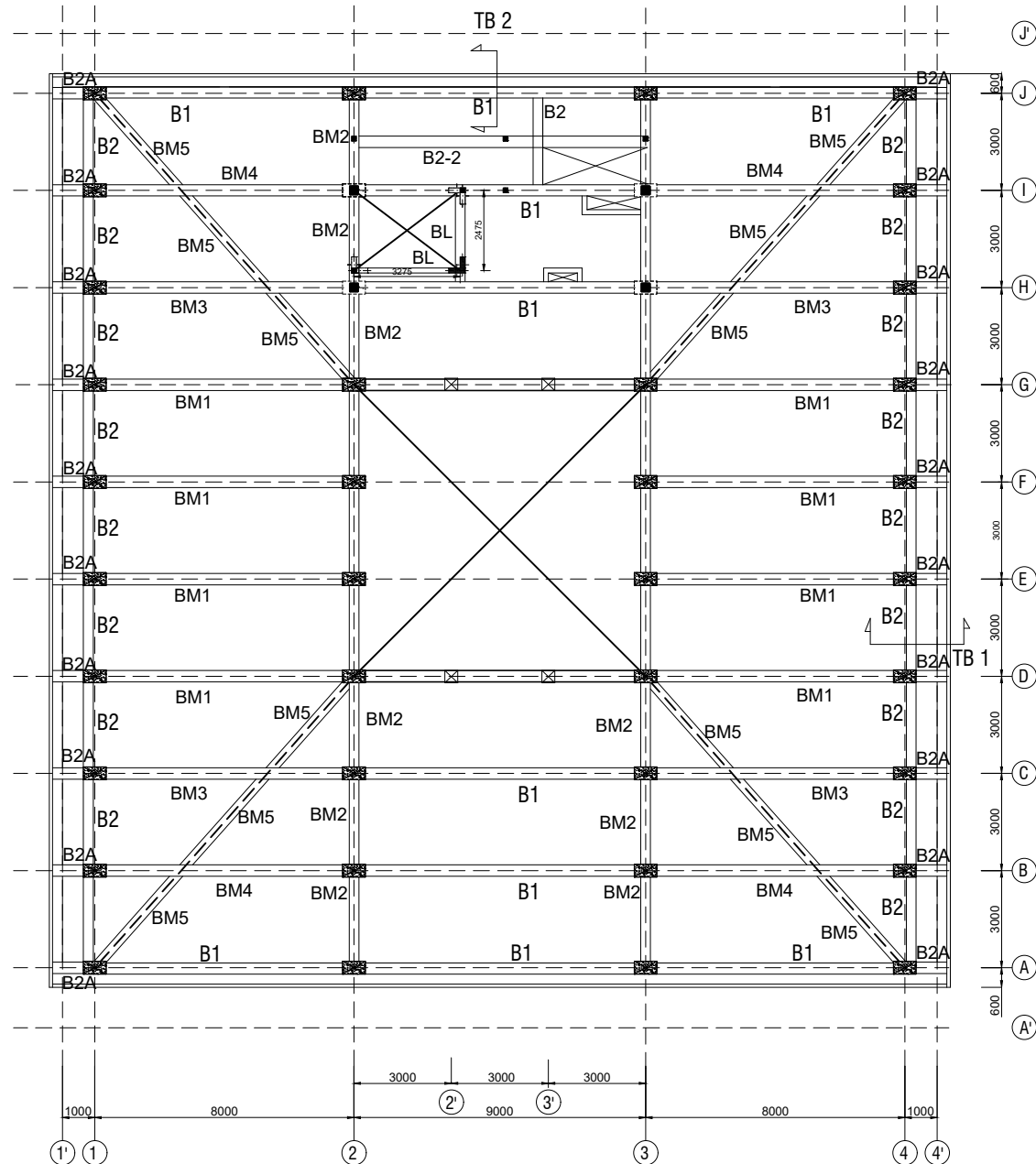
**DENAH
BALOK ATAP**

NO. LEMBAR

JML LEMBAR

029

72



DENAH BALOK ATAP (Elevasi +15.70)

DENAH BALOK ATAP (Elevasi Tengah +16.33)

KETERANGAN	
B2-2	Plat dibuat rata bawah balok

NOTASI	KETERANGAN
B1	BALOK (350x700)
B2	BALOK (250x350)
B2A	BALOK (150x250)
B2-2	BALOK (250x350)
BL	BALOK LIFT (150x350)
BM1	BALOK MIRING (350x700)
BM2	BALOK MIRING (250x350)
BM3	BALOK MIRING (350x700)
BM4	BALOK MIRING (350x700)
BM5	BALOK MIRING (150x700)



PEKERJAAN

**PEMBANGUNAN
LABORATORIUM
FAK. KEDOKTERAN
UII**

LOKASI

KAMPUS TERPADU
JL. Kallurang KM. 14.4 Steman
JOGJAKARTA

JUDUL

As Built Drawing

PENANGGUNG JAWAB

DR. Ir. Luthfi Hasan, MS

PENGARAH

Ir. Ilman Noor, MSCE

dr. Zainuri Sapta Nugraha

PERENCANA

Koordinator :

Noor Cholis Idham, ST, M. Arch, Ph. D

Konstruktur :

Rizaldi Patria, ST

Mekanikal Elektrikal & Plumbing :

Prapta Suharyana, ST, MSI

PELAKSANA

Construction Manager

Muhammad Gupit Robbicahya, ST, MBA

Drafter :

Nila Kamala Sari, ST

NAMA GAMBAR

SKALA

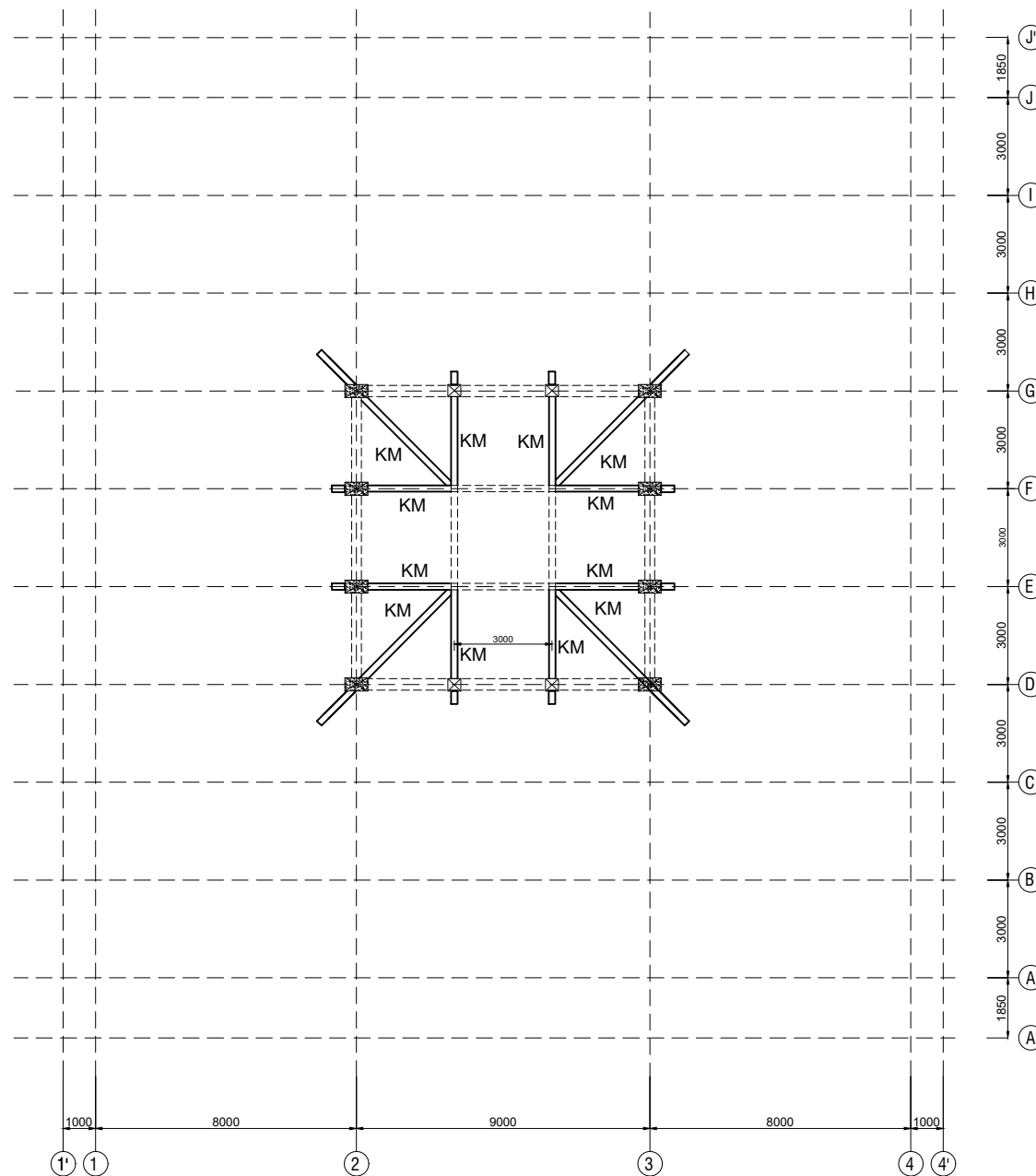
**DENAH
KOLOM MIRING**

NO. LEMBAR

033

JML LEMBAR

72



NOTASI	KETERANGAN
KM	KOLOM (200x350)

DENAH KOLOM MIRING (Elevasi +18.90 -> +21.90)



PEKERJAAN

**PEMBANGUNAN
LABORATORIUM
FAK. KEDOKTERAN
UII**

LOKASI

KAMPUS TERPADU
Jl. Kallurang Km. 14.4 Steman
JOGJAKARTA

JUDUL

As Built Drawing

PENANGGUNG JAWAB

DR. Ir. Luthfi Hasan, MS

PENGARAH

Ir. Ilman Noor, MSCE

dr. Zainuri Sapta Nugraha

PERENCANA

Koordinator :

Noor Choliss Idham, ST, M.Arch, Ph.D

Konstruktor :

Rizaldi Patria, ST

Mekanikal Elektrikal & Plumbing :

Prapta Suharyana, ST, MSi

PELAKSANA

Construction Manager

Muhammad Gupit Robbicahya, ST. MBA

Drafter :

Nila Kamala Sari, ST

NAMA GAMBAR

SKALA

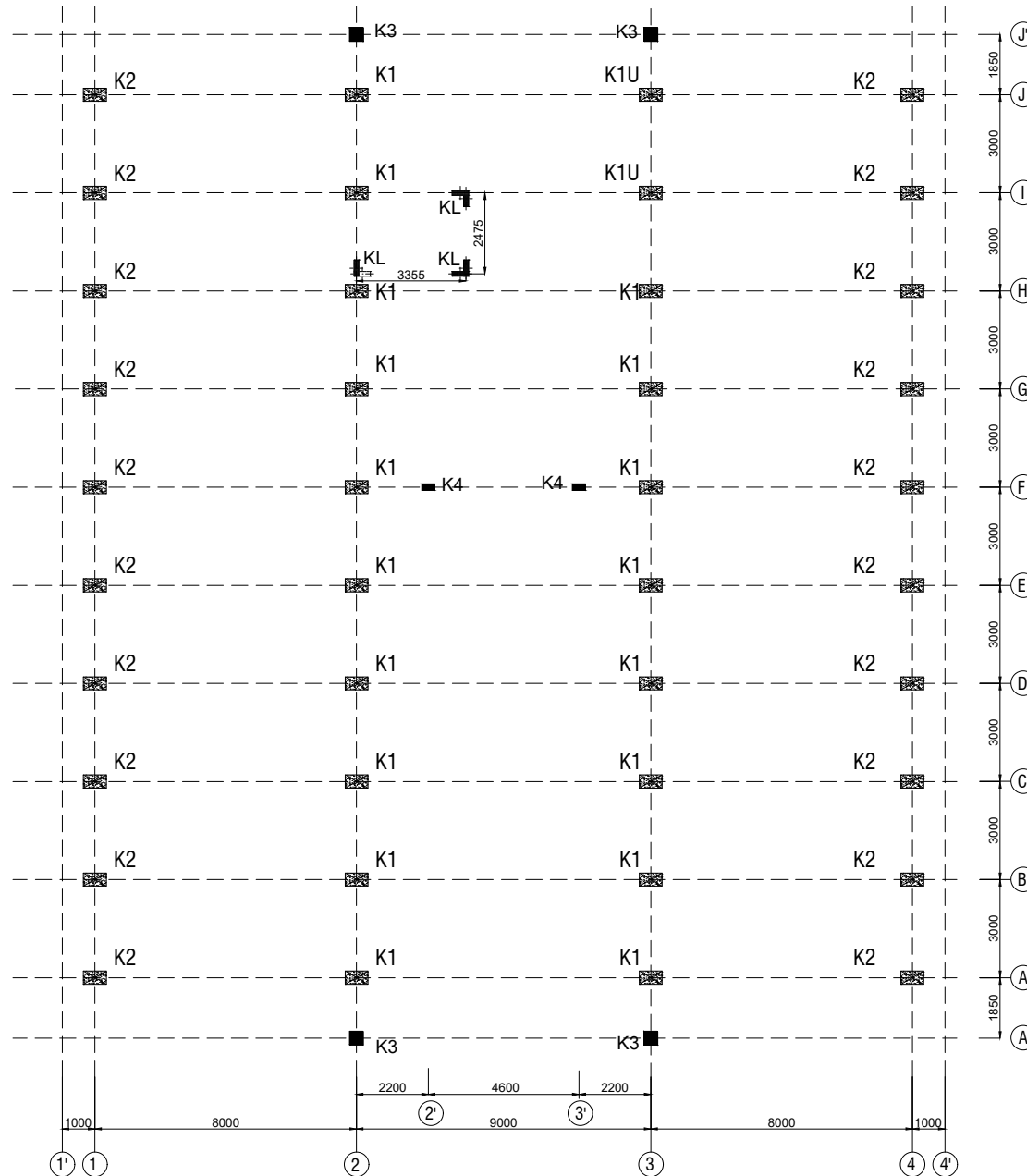
**DENAH
KOLOM
LANTAI 1**

NO. LEMBAR

JML LEMBAR

015

72



DENAH KOLOM LANTAI 1 (Elevasi +4.00)

NOTASI	KETERANGAN
K1	KOLOM (400x600)
K1U	KOLOM (400x600)
K2	KOLOM (400x600)
K3	KOLOM (400x400)
K4	KOLOM (400x200)
KL	KOLOM (500x150)



PEKERJAAN

**PEMBANGUNAN
LABORATORIUM
FAK. KEDOKTERAN
UII**

LOKASI

KAMPUS TERPADU
Jl. Kallurang KM. 14.4 Steman
JOGJAKARTA

JUDUL

As Built Drawing

PENANGGUNG JAWAB

DR. Ir. Luthfi Hasan, MS

PENGARAH

Ir. Ilman Noor, MSCE

dr. Zainuri Sapta Nugraha

PERENCANA

Koordinator :

Noor Choliz Idham, ST, M.Arch, Ph.D

Konstruktork :

Rizaldi Patria, ST

Mekanikal Elektrikal & Plumbing :

Prapta Suharyana, ST, MSi

PELAKSANA

Construction Manager

Muhammad Gupit Robbicahya, ST, MBA

Drafter :

Nila Kamala Sari, ST

NAMA GAMBAR

SKALA

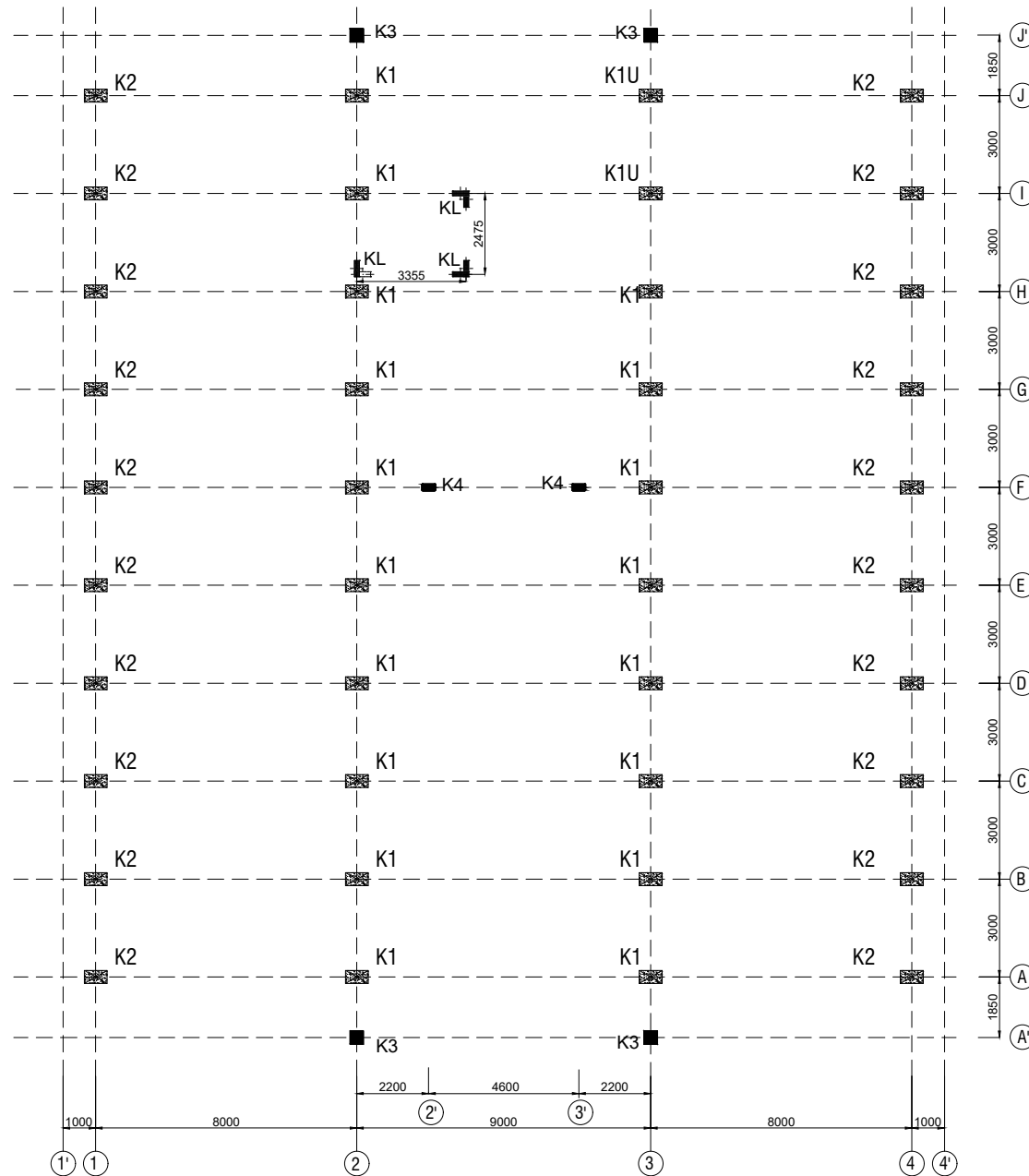
**DENAH
KOLOM
LANTAI 2**

NO. LEMBAR

JML LEMBAR

015A

72



DENAH KOLOM LANTAI 2 (Elevasi +8.00)

NOTASI	KETERANGAN
K1	KOLOM (400x600)
K1U	KOLOM (400x600)
K2	KOLOM (400x600)
K3	KOLOM (400x400)
K4	KOLOM (400x200)
KL	KOLOM (500x150)



PEKERJAAN

**PEMBANGUNAN
LABORATORIUM
FAK. KEDOKTERAN
UII**

LOKASI

KAMPUS TERPADU
JL. Kallurang KM. 14.4 Steman
JOGJAKARTA

JUDUL

As Built Drawing

PENANGGUNG JAWAB

DR. Ir. Luthfi Hasan, MS

PENGARAH

Ir. Ilman Noor, MSCE

dr. Zainuri Sapta Nugraha

PERENCANA

Koordinator :

Noor Choliss Idham, ST, M.Arch, Ph.D

Konstruktork :

Rizaldi Patria, ST

Mekanikal Elektrikal & Plumbing :

Prapta Suharyana, ST, MSi

PELAKSANA

Construction Manager

Muhammad Gupit Robbicahya, ST, MBA

Drafter :

Nila Kamala Sari, ST

NAMA GAMBAR

SKALA

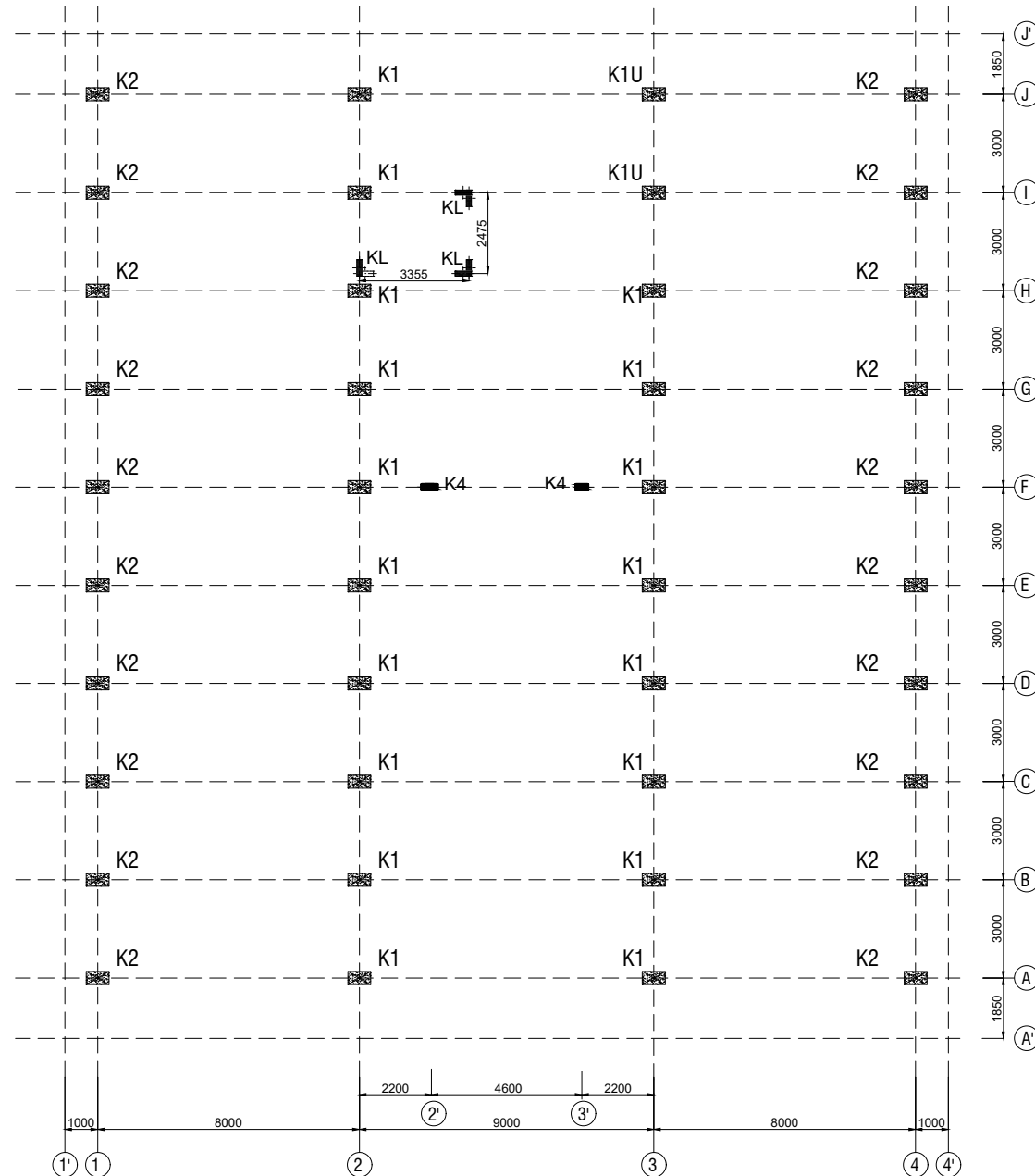
**DENAH
KOLOM
LANTAI 3**

NO. LEMBAR

JML LEMBAR

015B

72



DENAH KOLOM LANTAI 3 (Elevasi +12.00)

NOTASI	KETERANGAN
K1	KOLOM (400x600)
K1U	KOLOM (400x600)
K2	KOLOM (400x600)
K3	KOLOM (400x400)
K4	KOLOM (400x200)
KL	KOLOM (500x150)



PEKERJAAN

**PEMBANGUNAN
LABORATORIUM
FAK. KEDOKTERAN
UII**

LOKASI

KAMPUS TERPADU
JL. Kallurang KM. 14.4 Steman
JOGJAKARTA

JUDUL

As Built Drawing

PENANGGUNG JAWAB

DR. Ir. Luthfi Hasan, MS

PENGARAH

Ir. Ilman Noor, MSCE

dr. Zainuri Sapta Nugraha

PERENCANA

Koordinator :

Noor Cholih Idham, ST, M.Arch, Ph.D

Konstruktur :

Rizaldi Patria, ST

Mekanikal Elektrikal & Plumbing :

Prapta Suharyana, ST, MSi

PELAKSANA

Construction Manager

Muhammad Gupit Robbicahya, ST, MBA

Drafter :

Nila Kamala Sari, ST

NAMA GAMBAR

SKALA

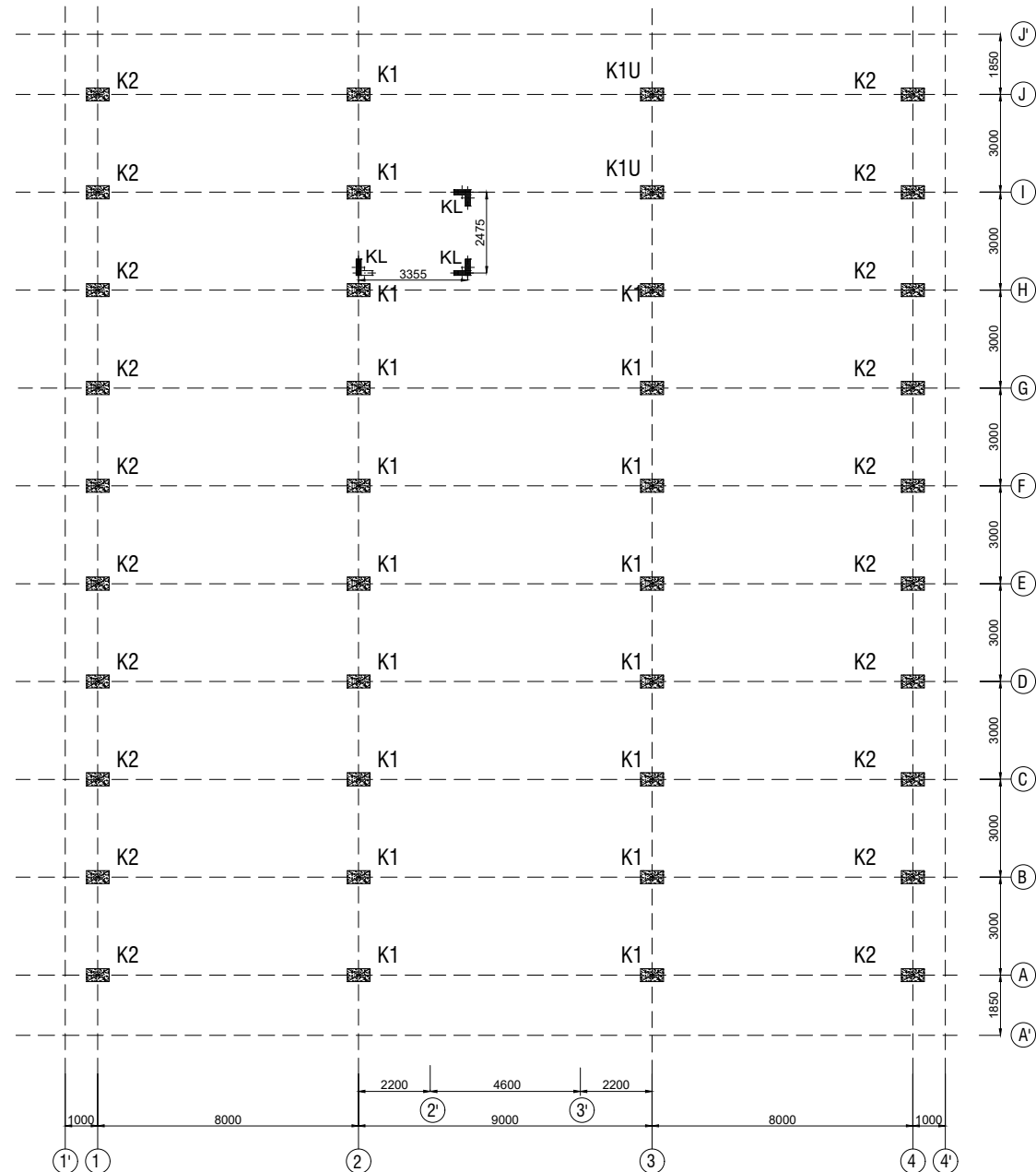
**DENAH
KOLOM
LANTAI 4**

NO. LEMBAR

JML LEMBAR

015C

72



DENAH KOLOM LANTAI 4 (Elevasi +15.6)

NOTASI	KETERANGAN
K1	KOLOM (400x600)
K1U	KOLOM (400x600)
K2	KOLOM (400x600)
K3	KOLOM (400x400)
KL	KOLOM (500x150)



PEKERJAAN

**PEMBANGUNAN
LABORATORIUM
FAK. KEDOKTERAN
UII**

LOKASI

KAMPUS TERPADU
Jl. Kallurang KM. 14.4 Steman
JOGJAKARTA

JUDUL

As Built Drawing

PENANGGUNG JAWAB

DR. Ir. Luthfi Hasan, MS

PENGARAH

Ir. Ilman Noor, MSCE

dr. Zainuri Sapta Nugraha

PERENCANA

Koordinator :

Noor Choliz Idham, ST, M.Arch, Ph.D

Konstruktork :

Rizaldi Patria, ST

Mekanikal Elektrikal & Plumbing :

Prapta Suharyana, ST, MSI

PELAKSANA

Construction Manager

Muhammad Gupit Robbicahya, ST. MBA

Drafter :

Nila Kamala Sari, ST

NAMA GAMBAR

SKALA

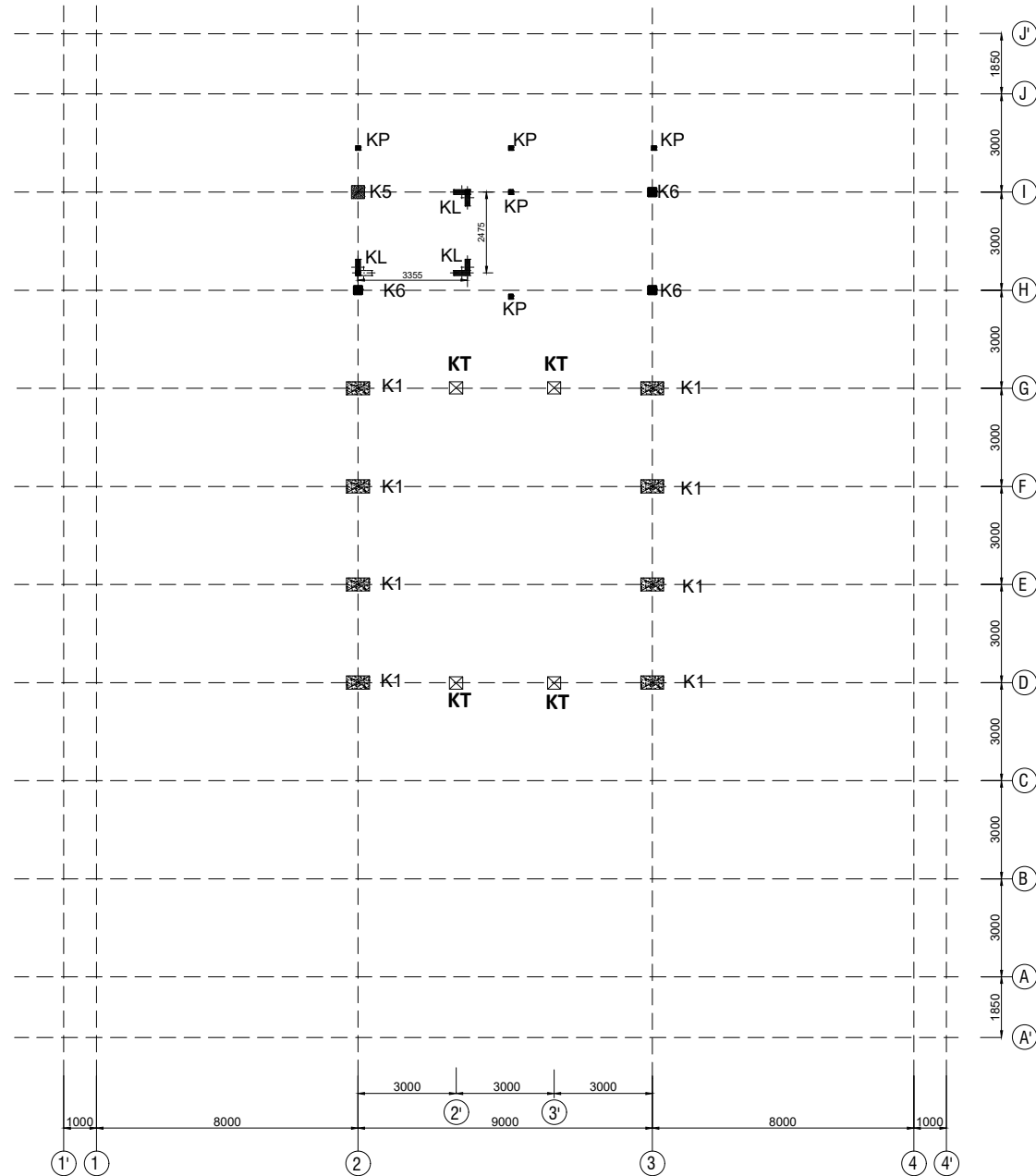
**DENAH
KOLOM
LANTAI 5**

NO. LEMBAR

JML LEMBAR

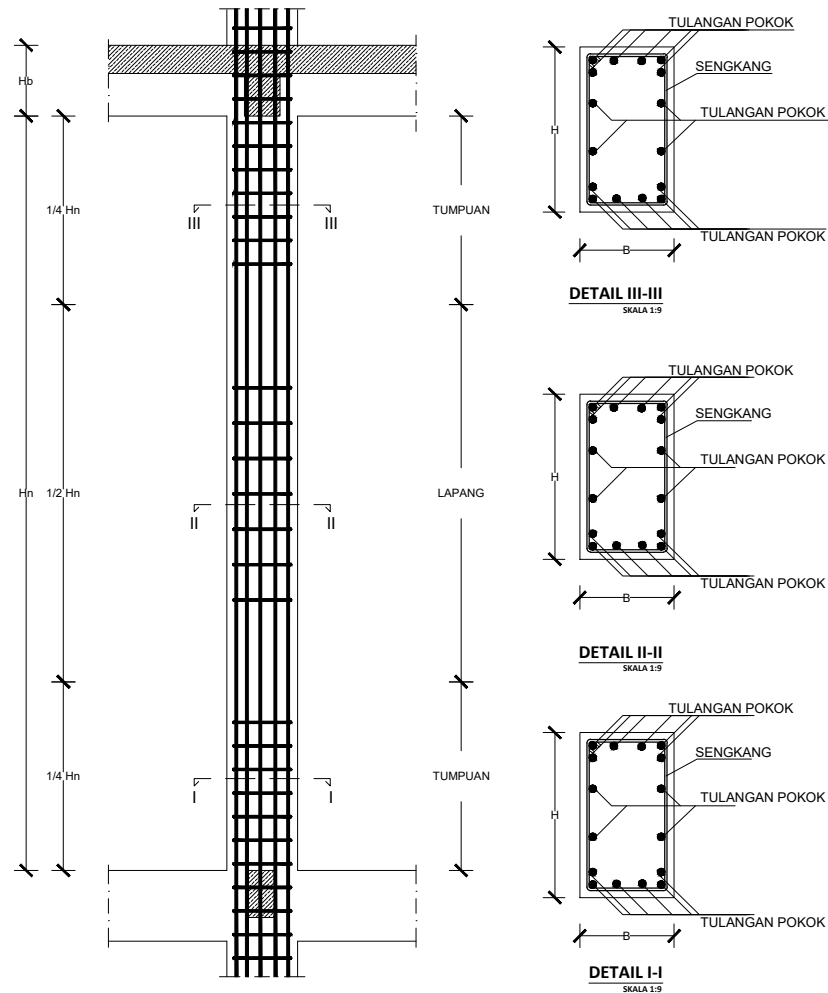
016

72



DENAH KOLOM ATAP (Elevasi + 18.90)

NOTASI	KETERANGAN
K1	KOLOM (400x600)
KL	KOLOM (500x150)
KT	KOLOM (375x400)
K6	KOLOM (200x200)
K5	KOLOM (400x400)
KP	KOLOM (150x150)



***KETERANGAN**

**DETAIL PEMBESIAN
PENULANGAN KOLOM
ADA PADA TABEL
PENULANGAN**

DATA BAHAN

fy Deform : 400 MPa
fy Polos : 240 MPa
f'c : 20 MPa



PEKERJAAN

**PEMBANGUNAN
LABORATORIUM
FAK. KEDOKTERAN
UII**

LOKASI

KAMPUS TERPADU
Jl. Kallurang KM. 14.4 Steman
JOGJAKARTA

JUDUL

As Built Drawing

PENANGGUNG JAWAB

DR. Ir. Luthfi Hasan, MS

PENGARAH

Ir. Ilman Noor, MSCE

dr. Zainuri Sapta Nugraha

PERENCANA

Koordinator :

Noor Cholish Idham, ST, M. Arch, Ph. D

Konstruktor :

Rizaldi Patria, ST

Mekanikal Elektrikal & Plumbing :

Prapta Suharyana, ST, MSi

PELAKSANA

Construction Manager

Muhammad Gupit Robbichahya, ST, MBA

Drafter :

Nila Kamala Sari, ST

NAMA GAMBAR

SKALA

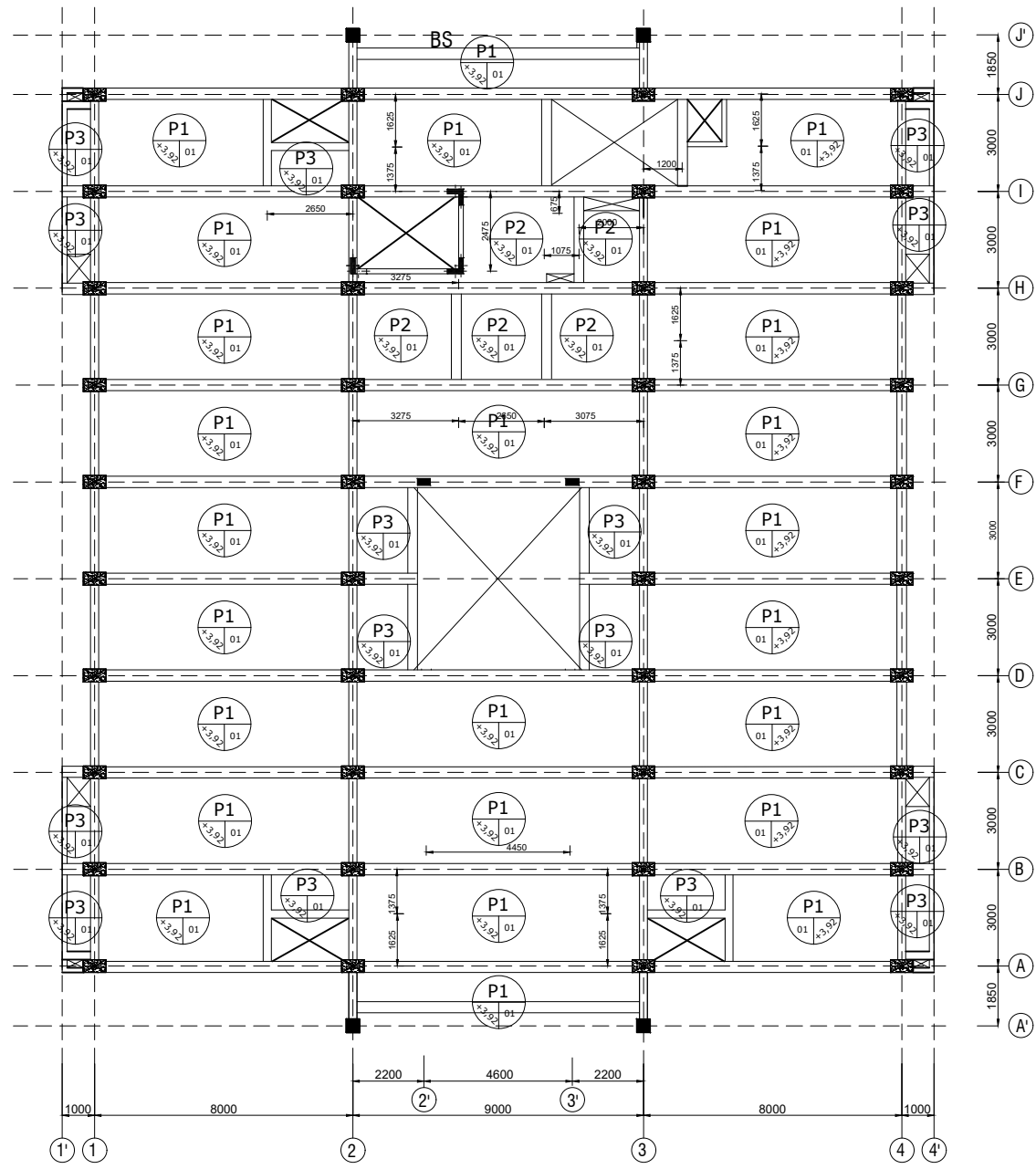
**DENAH
PLAT LANTAI 2**

NO. LEMBAR

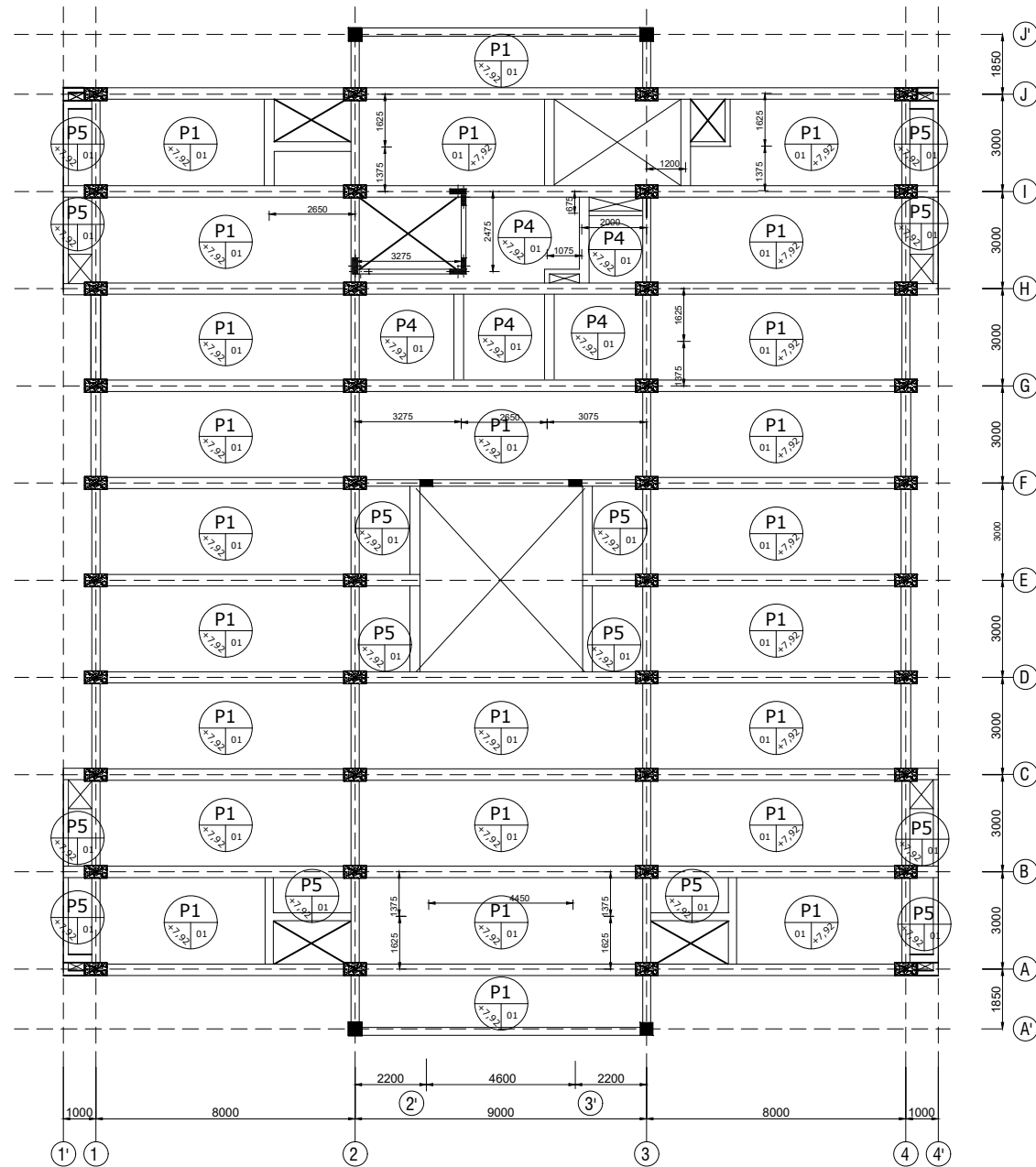
JML LEMBAR

045

72



DENAH PELAT LANTAI 2 (Elevasi + 3.92)



DENAH PELAT LANTAI 3 (Elevasi +7.92)



PEKERJAAN

**PEMBANGUNAN
LABORATORIUM
FAK. KEDOKTERAN
UII**

LOKASI

KAMPUS TERPADU
Jl. Kallurang KM. 14.4 Steman
JOGJAKARTA

JUDUL

As Built Drawing

PENANGGUNG JAWAB

DR. Ir. Luthfi Hasan, MS

PENGARAH

Ir. Ilman Noor, MSCE

dr. Zainuri Sapta Nugraha

PERENCANA

Koordinator :

Noor Choliss Idham, ST, M.Arch, Ph.D

Konstruktor :

Rizaldi Patria, ST

Mekanikal Elektrikal & Plumbing :

Prapta Suharyana, ST, MSi

PELAKSANA

Construction Manager

Muhammad Gupit Robbicahya, ST, MBA

Drafter :

Nila Kamala Sari, ST

NAMA GAMBAR

SKALA

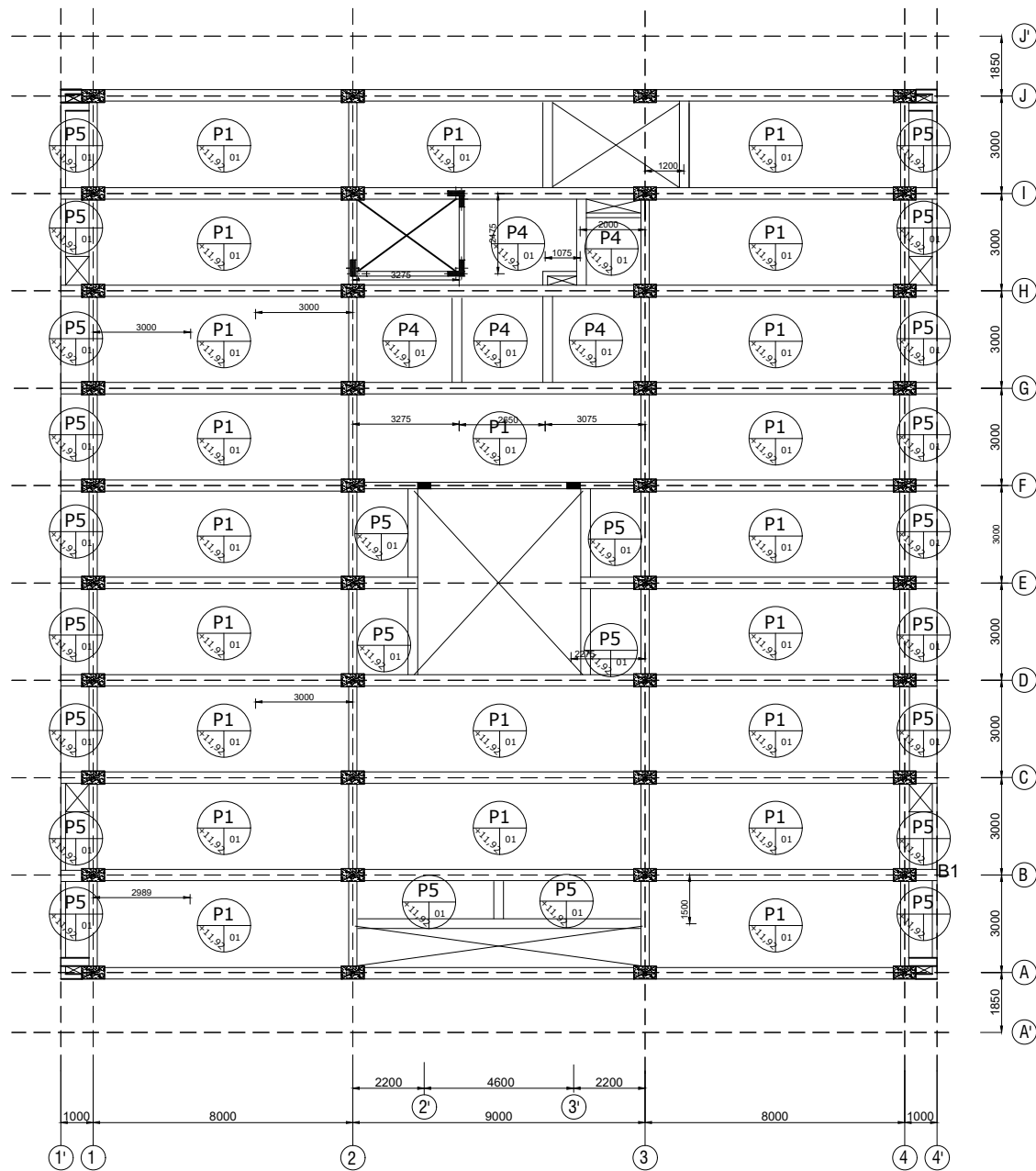
**DENAH
PLAT LANTAI 3**

NO. LEMBAR

JML LEMBAR

046

72



DENAH PELAT LANTAI 4 (Elevasi +11.92)



PEKERJAAN

**PEMBANGUNAN
LABORATORIUM
FAK. KEDOKTERAN
UII**

LOKASI

KAMPUS TERPADU
Jl. Kallurung Km. 14.4 Steman
JOGJAKARTA

JUDUL

As Built Drawing

PENANGGUNG JAWAB

DR. Ir. Luthfi Hasan, MS

PENGARAH

Ir. Ilman Noor, MSCE

dr. Zainuri Sapta Nugraha

PERENCANA

Koordinator :

Noor Cholih Idham, ST, M. Arch, Ph. D

Konstruktor :

Rizaldi Patria, ST

Mekanikal Elektrikal & Plumbing :

Prapta Suharyana, ST, MSi

PELAKSANA

Construction Manager

Muhammad Gupit Robbichahya, ST, MBA

Drafter :

Nila Kamala Sari, ST

NAMA GAMBAR

SKALA

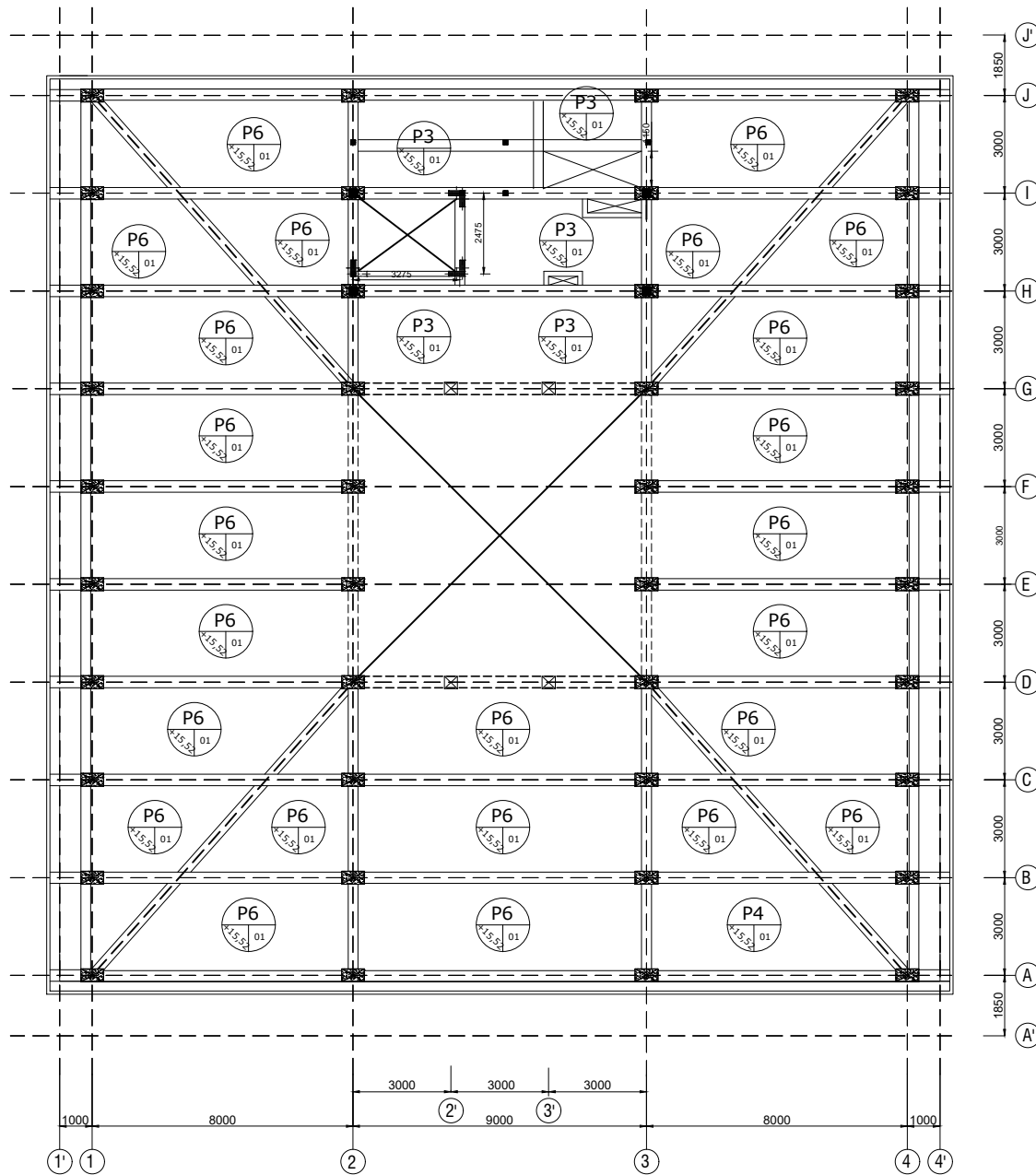
**DENAH
PLAT LANTAI 4**

NO. LEMBAR

JML LEMBAR

047

72



DENAH PELAT ATAP (Elevasi Tepi+15.70)

DENAH PELAT ATAP (Elevasi Tengah +16.33)



PEKERJAAN

**PEMBANGUNAN
LABORATORIUM
FAK. KEDOKTERAN
UII**

LOKASI

KAMPUS TERPADU
Jl. Kallurang KM. 14.4 Steman
JOGJAKARTA

JUDUL

As Built Drawing

PENANGGUNG JAWAB

DR. Ir. Luthfi Hasan, MS

PENGARAH

Ir. Ilman Noor, MSCE

dr. Zainuri Sapta Nugraha

PERENCANA

Koordinator :

Noor Choliss Idham, ST, M. Arch, Ph. D

Konstruktor :

Rizaldi Patria, ST

Mekanikal Elektrikal & Plumbing :

Prapta Suharyana, ST, MSi

PELAKSANA

Construction Manager

Muhammad Gupit Robbichaya, ST. MBA

Drafter :

Nila Kamala Sari, ST

NAMA GAMBAR

SKALA

**DENAH
PLAT ATAP**

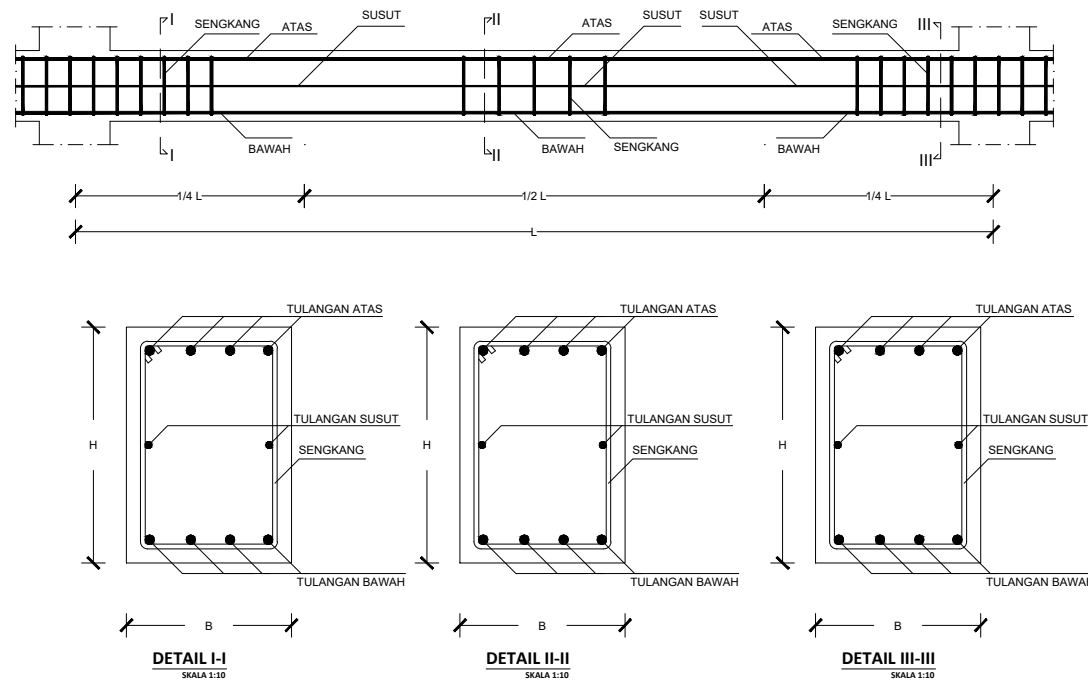
NO. LEMBAR

048

JML LEMBAR

72

DETAIL BALOK DAN SLOOF *



***KETERANGAN**

**DETAIL PEMBESIAN
PENULANGAN SLOOF
ADA PADA TABEL
PENULANGAN**

DATA BAHAN

**fy Deform : 400 MPa
fy Polos : 240 MPa
f'c : 20 MPa**