

TUGAS AKHIR

EVALUASI KINERJA SEISMIC STRUKTUR GEDUNG BETON BERTULANG 6 LANTAI DENGAN DELATASI MENGUNAKAN ANALISIS STATIK NONLINIER (*PUSHOVER*)

**(Studi Kasus : Gedung Rumah Sakit di Kabupaten
Karawang, Jawa Barat)**

SEISMIC PERFORMANCE EVALUATION OF A 6-STORY REINFORCED CONCRETE BUILDING STRUCTURE WITH SEPARATION JOINTS USING NONLINEAR STATIC (PUSHOVER) ANALYSIS

***(Case Study: Hospital Building in Karawang Regency,
West Java)***

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



**Kahfi Natakusuma
21511066**

**PROGRAM STUDI TEKNIK SIPIL
FAKULTAS TEKNIK SIPIL DAN PERENCANAAN
UNIVERSITAS ISLAM INDONESIA
2026**

LEMBAR PENGESAHAN

EVALUASI KINERJA SEISMİK STRUKTUR GEDUNG BETON BERTULANG 6 LANTAI DENGAN DELATASI MENGUNAKAN ANALISIS STATIK NONLINIER (PUSHOVER)

(Studi Kasus : Gedung Rumah Sakit di Kabupaten
Karawang, Jawa Barat)

SEISMIC PERFORMANCE EVALUATION OF A 6-STORY REINFORCED CONCRETE BUILDING STRUCTURE WITH SEPARATION JOINTS USING NONLINEAR STATIC (PUSHOVER) ANALYSIS

(Case Study: Hospital Building in Karawang Regency,
West Java)

Disusun Oleh

Kahfi Natakusuma
21511066

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

Diuji pada tanggal 20 Januari 2026
Oleh Dewan Penguji

Pembimbing

Jafar, S.T., MURP., M.T.

NIK : 185111305

21/01 2026

Penguji I

Ir. Yunalia Muntafi S.T., M.T., PhD.
(Eng)., IPM

NIK : 095110101

Penguji II

Astriaana Hardawati, S.T., M.Eng.

NIK : 165111301

21-1-26

Mengesahkan,

Ketua Program Studi Teknik Sipil



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

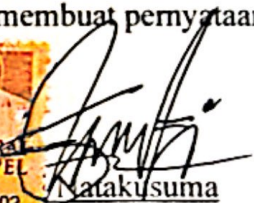
22/1/26

PERNYATAAN BEBAS PLAGIASI

Saya dengan penuh kesadaran menyatakan bahwa laporan Tugas Akhir ini saya susun sebagai salah satu syarat kelulusan program Sarjana di Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Islam Indonesia, merupakan hasil karya saya sendiri. Setiap kutipan atau referensi dari sumber lain telah dicantumkan dengan jelas sesuai dengan kaidah dan etika penulisan ilmiah. Jika di kemudian hari terbukti bahwa laporan ini mengandung unsur plagiasi atau bukan sepenuhnya hasil karya saya, saya siap menerima konsekuensi, termasuk pencabutan gelar akademik, sesuai dengan aturan yang berlaku.

Yogyakarta, 23 Desember 2025

Yang membuat pernyataan,



Natakusuma
21511066

KATA PENGANTAR

Bismillahirrahmanirrahiim.

Assalamu'alaikum Warahmatullahi Wabarakatuh,

Puji syukur penulis panjatkan ke hadirat Allah *Subhanahu wa Ta'ala* atas segala limpahan rahmat dan hidayah-Nya, sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir yang berjudul “Evaluasi Kinerja Seismik Struktur Gedung Beton Bertulang 6 Lantai Dengan Delatasi Menggunakan Analisis Statik Nonlinier (*Pushover*)” dengan baik. Tugas Akhir ini disusun sebagai salah satu syarat untuk menyelesaikan pendidikan jenjang Strata Satu (S1) pada Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Islam Indonesia.

Dalam proses penyusunan Tugas Akhir ini, penulis menghadapi berbagai kendala dan tantangan. Namun, berkat bimbingan, arahan, dukungan, serta bantuan dari berbagai pihak, alhamdulillah Tugas Akhir ini dapat diselesaikan tepat waktu. Oleh karena itu, penulis ingin menyampaikan ucapan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada :

1. Ibu Ir. Yunalia Muntafi, S.T., M.T., Ph.D.(Eng)., IPM. selaku Ketua Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Islam Indonesia sekaligus Dosen Penguji I atas saran dan masukannya..
2. Bapak Jafar, S.T., MURP., M.T. selaku Dosen Pembimbing Tugas Akhir. Terima kasih atas bimbingan, saran, nasihat, motivasi dan dorongan yang telah diberikan kepada saya selama proses penyusunan Tugas Akhir ini..
3. Ibu Astriana Hardawati, S.T., M.Eng. selaku Dosen Penguji II dalam Tugas Akhir saya atas saran dan masukannya.
4. Bapak Ir. Vendie Abma, S.T., M.T., IPM. selaku Dosen Pembimbing Akademik untuk motivasi, saran, dan bimbingan selama masa kuliah saya.
5. Kedua orang tua saya Bapak Asep Syamsudin, S.T. dan Ibu Shinta Widyastuti yang selalu mendoakan, menasihati, dan memberikan dukungan material kepada saya. Serta kedua adik saya Maulida Sekar Ivory dan Azalia Putri

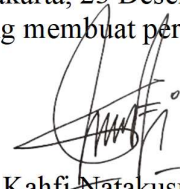
Leilani yang selalu memberikan semangat untuk menyelesaikan Tugas Akhir saya.

6. Seluruh teman dan sahabat seperjuangan saya di Keluarga Mahasiswa Teknik Sipil Universitas Islam Indonesia terkhusus angkatan 2021 yang memberikan banyak pengalaman dan dukungan selama saya berkuliah.

Penulis berharap Tugas Akhir ini memiliki manfaat bagi berbagai pihak yang membacanya. Namun, penulis menyadari bahwa Tugas Akhir ini jauh dari kata sempurna. Oleh karena itu, penulis memohon maaf dan berharap Tugas Akhir ini bisa dijadikan referensi untuk dikembangkan menjadi lebih baik lagi..

Wassalamu 'alaikum Warahmatullahi Wabarakatuh.

Yogyakarta, 23 Desember 2025
Yang membuat pernyataan,



Kahfi Natakusuma
21511066

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
LEMBAR PENGESAHAN	ii
LEMBAR PENGESAHAN	iii
PERNYATAAN BEBAS PLAGIASI	iv
KATA PENGANTAR	v
DAFTAR ISI	vii
DAFTAR TABEL	xi
DAFTAR GAMBAR	xiii
ABSTRAK	xviii
<i>ABSTRACT</i>	<i>xix</i>
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1. Latar Belakang	1
1.2. Rumusan Masalah	6
1.3. Tujuan Penelitian	6
1.4. Manfaat Penelitian	6
1.5. Batasan Penelitian	7
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	9
2.1. Penelitian Terdahulu	9
2.1.1. Evaluasi Kinerja Bangunan	9
2.1.2. Sendi Plastis	15
2.2. Perbandingan Substansi Penelitian	15
2.3. Keaslian Penelitian	18

BAB III LANDASAN TEORI	19
3.1. Konsep Bangunan Tahan Gempa	19
3.2. Evaluasi Berbasis Kinerja (<i>Performance Based Seismic Evaluation</i>)	20
3.3. Pembebanan Struktur	21
3.3.1. Beban Mati	21
3.3.2. Beban Hidup	21
3.3.3. Beban Gempa	21
3.3.4. Kombinasi Pembebanan	22
3.4. Ketentuan Perencanaan Beban Gempa Berdasarkan SNI 1726:2019	22
3.4.1. Penentuan Nilai Spektral Desain	22
3.4.2. Kategori Risiko Bangunan dan Faktor Keutamaan	26
3.4.3. Kategori Desain Seismik	29
3.4.4. Periode Fundamental Struktur	30
3.4.5. Koefisien Respon Seismik	32
3.4.6. Gaya Gempa Lateral Ekuivalen	34
3.5. Respon Spektrum Desain	35
3.6. Analisis Statik Nonlinier <i>Pushover</i>	37
3.7. Metode <i>Capacity Spectrum</i> ATC-40	38
3.7.1. Spektrum Permintaan (<i>Demand Spectrum</i>) Format ADRS	39
3.7.2. Spektrum Kapasitas (<i>Capacity Spectrum</i>) Format ADRS	40
3.7.3. Titik Kinerja (<i>Performance Point</i>)	42
3.8. Level Kinerja Struktur Menurut ATC-40	45
3.9. Sendi Plastis (<i>Hinge</i>)	47

BAB IV METODE PENELITIAN	49
4.1. Objek Penelitian	49
4.2. Data Teknis	52
4.2.1. Spesifikasi Material	52
4.2.2. Dimensi Elemen Struktur	52
4.2.3. Denah Elemen Struktur	57
4.3. Prosedur Penelitian	72
4.4. Bagan Alir Penelitian	74
BAB V ANALISIS DAN PEMBAHASAN	76
5.1. Permodelan Struktur	76
5.1.1. Pendefinisian Material	76
5.1.2. Pendefinisian Elemen Struktur	80
5.1.3. Penggambaran Model Struktur	87
5.1.4. Pendefinisian Diafragma	94
5.2. Perhitungan Berat Seismik Efektif	95
5.2.1. Beban Mati (<i>Dead Load</i>)	95
5.2.2. Beban Mati Tambahan (<i>SIDL</i>)	99
5.2.3. Beban Hidup (<i>Live Load</i>)	104
5.2.4. Input Beban Gravitasi Pada SAP2000	106
5.2.5. Output Berat Seismik Efektif	109
5.3. Parameter Seismik	111
5.4. Gaya Geser Dasar Statik Ekuivalen	124
5.4.1. Gaya Geser Dasar Metode Manual	124
5.4.2. Gaya Geser Dasar Output Software	125

5.5.	Analisis Statik Nonlinier <i>Pushover</i>	133
5.5.1.	Pusat Massa	133
5.5.2.	Mendefinisikan Pembebanan	135
5.5.3.	Mendefinisikan Sendi Plastis (<i>Plastic Hinge</i>)	137
5.6.	Hasil Analisis dan Pembahasan	141
5.6.1.	Kurva Kapasitas (<i>Capacity Curve</i>)	141
5.6.2.	Titik Kinerja (<i>Performance Point</i>) Berdasarkan ATC-40	156
5.6.3.	Level Kinerja (<i>Performance Level</i>) Berdasarkan ATC-40	171
5.6.4.	Urutan Pembentukan Sendi Plastis	172
BAB VI KESIMPULAN DAN SARAN		185
6.1.	Kesimpulan	185
6.2.	Saran	187
DAFTAR PUSTAKA		188
LAMPIRAN		190

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Perbandingan Substansi Penelitian	16
Tabel 3.1 Klasifikasi Situs	24
Tabel 3.2 Koefisien Situs F_a	25
Tabel 3.3 Koefisien Situs F_v	25
Tabel 3.4 Kategori Risiko Bangunan Gedung Untuk Beban Gempa	26
Tabel 3.5 Faktor Keutamaan Gempa	28
Tabel 3.6 Kategori Desain Seismik Berdasarkan Parameter SD_s	29
Tabel 3.7 Kategori Desain Seismik Berdasarkan Parameter SD_1	29
Tabel 3.8 Parameter Periode Pendekatan C_t dan x	30
Tabel 3.9 Koefisien Batas Atas Periode Yang Dihitung	31
Tabel 3.10 Faktor R , Ω_0 , dan C_d Untuk Sistem Pemikul Gaya Gempa	32
Tabel 3.11 <i>Structural Behaviour Type</i>	44
Tabel 3.12 Batasan Deformasi dan Level Kinerja	46
Tabel 4.1 Tipe dan Dimensi Kolom	53
Tabel 4.2 Tipe dan Dimensi Balok	54
Tabel 4.3 Tipe dan Dimensi Plat	55
Tabel 5.1 Rekapitulasi Self Weight Gedung A dan Gedung B	98
Tabel 5.2 Rekapitulasi Beban Dinding Bata	103
Tabel 5.3 Rekapitulasi Beban Dinding Kaca	104
Tabel 5.4 Rekapitulasi Beban Hidup	105
Tabel 5.5 Rekapitulasi Berat Seismik Efektif	110
Tabel 5.6 Parameter Seismik Gedung A	121
Tabel 5.7 Parameter Seismik Gedung B	123

Tabel 5.8 Partisipasi Massa Ragam Gedung A	130
Tabel 5.9 Partisipasi Massa Ragam Gedung B	131
Tabel 5.10 Gaya Geser Dasar <i>Software</i>	132
Tabel 5.11 Rekapitulasi Gaya Geser Dasar Gedung A	132
Tabel 5.12 Rekapitulasi Gaya Geser Dasar Gedung B	133
Tabel 5.13 Letak Pusat Massa Gedung A	134
Tabel 5.14 Letak Pusat Massa Gedung B	134
Tabel 5.15 <i>Base Shear (V) vs Displacement (D)</i> Arah X Gedung A	143
Tabel 5.16 <i>Base Shear (V) vs Displacement (D)</i> Arah Y Gedung A	144
Tabel 5.17 <i>Base Shear (V) vs Displacement (D)</i> Arah X Gedung B	147
Tabel 5.18 <i>Base Shear (V) vs Displacement (D)</i> Arah Y Gedung B	149
Tabel 5.19 Rasio Gaya Geser Dasar Pada Sistem Ganda	154
Tabel 5.20 Kekakuan Translasi Tingkat Gedung A	155
Tabel 5.21 Kekakuan Translasi Tingkat Gedung B	155
Tabel 5.22 Sa-Sd <i>Capacity vs Demand</i> Arah X Gedung A	159
Tabel 5.23 Sa-Sd <i>Capacity vs Demand</i> Arah Y Gedung A	160
Tabel 5.24 Sa-Sd <i>Capacity vs Demand</i> Arah X Gedung B	163
Tabel 5.25 Sa-Sd <i>Capacity vs Demand</i> Arah Y Gedung B	164
Tabel 5.26 Data Skema Sendi Plastis Arah X Gedung A	173
Tabel 5.27 Data Skema Sendi Plastis Arah Y Gedung A	175
Tabel 5.28 Data Skema Sendi Plastis Arah X Gedung B	178
Tabel 5.29 Data Skema Sendi Plastis Arah Y Gedung B	181

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1 Peta Gempa Jawa Barat Berdasarkan Relokasi Hiposenter	2
Gambar 1.2 Tampilan Bangunan Eksisting	3
Gambar 1.3 Letak Delatasi Pada Gedung	4
Gambar 3.1 Peta Gerak Tanah Seismik Untuk Spektrum Respon 0,2 Detik (S_s)	23
Gambar 3.2 Peta Gerak Tanah Seismik Untuk Spektrum Respon 1,0 Detik (S_1)	23
Gambar 3.3 Peta Transisi Periode Panjang (T_L)	36
Gambar 3.4 Spektrum Respons Desain	36
Gambar 3.5 Konversi Kurva Respon Spektrum Format ADRS	40
Gambar 3.6 Kurva Kapasitas (<i>Capacity Curve</i>)	40
Gambar 3.7 Faktor Partisipasi Modal dan Modal Koefisien Massa	41
Gambar 3.8 Koversi Kurva Kapasitas ke Format ADRS (<i>Capacity Spectrum</i>)	42
Gambar 3.9 Perpotongan Demand Spectrum Dengan Capacity Spectrum	43
Gambar 3.10 Roof Drift dan Roof Drift Ratio	45
Gambar 3.11 Ilustrasi Level Kinerja Bangunan	46
Gambar 3.12 Sway Mechanism for Beam (a) and Column (b)	47
Gambar 4.1 Tampilan Bangunan Eksisting	49
Gambar 4.2 Potongan A (atas) dan B (bawah)	50
Gambar 4.3 Pembagian Gedung A dan Gedung B	51
Gambar 4.4 Detail Potongan Melintang K1-1	53
Gambar 4.5 Detail Potongan Melintang K2-1	53
Gambar 4.6 Detail Potongan Melintang B1-2 dan B1A-2	54
Gambar 4.7 Detail Penulangan Plat S1	55
Gambar 4.8 Detail Penulangan Plat SA	55

Gambar 4.9 Detail Penulangan Shearwall	56
Gambar 4.10 Detail Tangga Tipe 1	57
Gambar 4.11 Denah Kolom dan <i>Shearwall</i> Lantai 1	58
Gambar 4.12 Denah Kolom dan <i>Shearwall</i> Lantai 2	59
Gambar 4.13 Denah Kolom dan <i>Shearwall</i> Lantai 3	60
Gambar 4.14 Denah Kolom dan <i>Shearwall</i> Lantai 4	61
Gambar 4.15 Denah Kolom dan <i>Shearwall</i> Lantai 5	62
Gambar 4.16 Denah Kolom dan <i>Shearwall</i> Lantai 6	63
Gambar 4.17 Denah Kolom dan <i>Shearwall</i> Lantai 7	64
Gambar 4.18 Denah Balok, Pelat, dan Tangga Lantai 2	65
Gambar 4.19 Denah Balok, Pelat, dan Tangga Lantai 3	66
Gambar 4.20 Denah Balok, Pelat, dan Tangga Lantai 4	67
Gambar 4.21 Denah Balok, Pelat, dan Tangga Lantai 5	68
Gambar 4.22 Denah Balok, Pelat, dan Tangga Lantai 6	69
Gambar 4.23 Denah Balok, Pelat, dan Tangga Lantai Atap	70
Gambar 4.24 Denah Balok, Pelat, dan Tangga Lantai Dak Atap	71
Gambar 5.1 Define Material Beton	77
Gambar 5.2 Define Material Baja Tulangan BJTP 280	78
Gambar 5.3 Define Material Baja Tulangan BJTS 420b	79
Gambar 5.4 <i>Define Section Properties</i> Balok	80
Gambar 5.5 <i>Define</i> Tulangan Pada Balok	81
Gambar 5.6 <i>Define Section Properties</i> Kolom	82
Gambar 5.7 <i>Define</i> Tulangan Pada Kolom	83
Gambar 5.8 <i>Define Section Properties</i> Pelat	84
Gambar 5.9 <i>Define</i> Tulangan Pada Pelat	85

Gambar 5.10 <i>Define Section dan Tulangan Pada Shearwall</i>	86
Gambar 5.11 <i>Layer Definition pada Shearwall</i>	87
Gambar 5.12 Penggambaran Elemen Gedung A (1)	88
Gambar 5.13 Penggambaran Elemen Gedung A (2)	88
Gambar 5.14 Penggambaran Elemen Gedung A (3)	89
Gambar 5.15 Penggambaran Elemen Gedung B (1)	90
Gambar 5.16 Penggambaran Elemen Gedung B (2)	90
Gambar 5.17 Penggambaran Elemen Gedung B (3)	91
Gambar 5.18 Model 3D Gedung A (1)	92
Gambar 5.19 Model 3D Gedung A (2)	92
Gambar 5.20 Model 3D Gedung B (1)	93
Gambar 5.21 Model 3D Gedung B (2)	93
Gambar 5.22 <i>Define Diafragma</i>	94
Gambar 5.23 <i>Assign Diafragma</i>	95
Gambar 5.24 <i>Define Load Pattern</i>	106
Gambar 5.25 Input SIDL Pada Pelat	107
Gambar 5.26 Input <i>Live Load</i> Pada Pelat	107
Gambar 5.27 Cek Input Beban Pada Pelat	108
Gambar 5.28 Input SIDL Dinding Pada Balok	108
Gambar 5.29 Cek Input Beban Pada Balok	109
Gambar 5.30 <i>Define Mass Source</i>	110
Gambar 5.31 Parameter Ss dan S1 RSA Ciptakarya	111
Gambar 5.32 <i>Output Crack Period</i> Gedung A	115
Gambar 5.33 <i>Output Crack Period</i> Gedung B	116
Gambar 5.34 <i>Load Pattern</i> Gempa Arah X dan Y	125

Gambar 5.35 Input Parameter Beban Gempa Arah X Gedung A	126
Gambar 5.36 Input Parameter Beban Gempa Arah Y Gedung A	126
Gambar 5.37 Input Parameter Beban Gempa Arah X Gedung B	127
Gambar 5.38 Input Parameter Beban Gempa Arah Y Gedung B	127
Gambar 5.39 Input <i>Load Combination</i>	129
Gambar 5.40 <i>Gravity Nonlinier Case</i>	135
Gambar 5.41 Input Beban <i>Pushover</i>	136
Gambar 5.42 <i>Monitored Displacement</i> Beban <i>Pushover</i>	137
Gambar 5.43 <i>Define Location</i> Sendi Plastis Pada Balok	138
Gambar 5.44 <i>Hinge Data</i> Untuk Balok	138
Gambar 5.45 Sendi Plastis Pada Balok	139
Gambar 5.46 <i>Define Location</i> Sendi Plastis Pada Kolom	140
Gambar 5.47 <i>Hinge Data</i> Untuk Kolom	140
Gambar 5.48 Sendi Plastis Pada Kolom	141
Gambar 5.49 Kurva Kapasitas Arah X Gedung A	142
Gambar 5.50 Kurva Kapasitas Arah Y Gedung A	142
Gambar 5.51 Kurva Kapasitas Arah X Gedung B	146
Gambar 5.52 Kurva Kapasitas Arah Y Gedung B	147
Gambar 5.53 <i>Capacity Curve</i> Gedung A	152
Gambar 5.54 <i>Capacity Curve</i> Gedung B	152
Gambar 5.55 Output <i>Joint Reaction</i>	153
Gambar 5.56 Parameter Untuk <i>Performance Point</i>	158
Gambar 5.57 <i>Performance Point</i> Gedung A Arah X	158
Gambar 5.58 <i>Performance Point</i> Gedung A Arah Y	159
Gambar 5.59 <i>Performance Point</i> Gedung B Arah X	162

Gambar 5.60 <i>Performance Point</i> Gedung B Arah Y	162
Gambar 5.61 <i>Capacity vs Demand Spectrum</i> Arah X Gedung A	167
Gambar 5.62 <i>Capacity vs Demand Spectrum</i> Arah Y Gedung A	168
Gambar 5.63 <i>Capacity vs Demand Spectrum</i> Arah X Gedung B	168
Gambar 5.64 <i>Capacity vs Demand Spectrum</i> Arah Y Gedung B	169
Gambar 5.65 Sendi Plastis Pertama Arah X Gedung A	174
Gambar 5.66 Sendi Plastis Arah X Gedung A	175
Gambar 5.67 Sendi Plastis Pertama Arah Y Gedung A	177
Gambar 5.68 Sendi Plastis Arah Y Gedung A	178
Gambar 5.69 Sendi Plastis Pertama Arah X Gedung B	180
Gambar 5.70 Sendi Plastis Arah X Gedung B	180
Gambar 5.71 Sendi Plastis Pertama Arah Y Gedung B	184
Gambar 5.72 Sendi Plastis Arah Y Gedung B	184

ABSTRAK

Kabupaten Karawang, Jawa Barat, merupakan wilayah dengan tingkat aktivitas seismik yang cukup tinggi sehingga bangunan dengan fungsi vital seperti rumah sakit perlu dievaluasi kinerja seismiknya. Penelitian ini bertujuan mengevaluasi kinerja seismik gedung rumah sakit enam lantai berbahan beton bertulang dengan Sistem Rangka Pemikul Momen Khusus (SRPMK) yang dikombinasikan dengan dinding geser (*shearwall*), yang dirancang berdasarkan SNI 1726:2019. Struktur bangunan terdiri atas dua massa yang dipisahkan oleh delatasi dan dianalisis secara terpisah sebagai Gedung A dan Gedung B.

Pemodelan struktur tiga dimensi dilakukan menggunakan SAP2000 v26 dengan pembebanan mengacu pada SNI 1727:2020. Analisis statik nonlinier *pushover* dilakukan dengan pemberian beban lateral bertahap hingga struktur mencapai kapasitas deformasi maksimum, menghasilkan kurva kapasitas yang menunjukkan hubungan antara gaya geser dasar dan *displacement* atap. Penentuan level kinerja struktur dilakukan menggunakan pendekatan *Capacity Spectrum Method* berdasarkan ATC-40 melalui pemetaan kurva kapasitas dan kurva permintaan dalam format *Acceleration Displacement Response Spectrum* untuk memperoleh *performance point*. Level kinerja ditentukan berdasarkan nilai *displacement* pada saat *performance point* tercapai.

Hasil analisis menunjukkan bahwa Gedung A mencapai level kinerja seismik *Damage Control* pada arah X dengan nilai *maximum total drift* sebesar 0,01225 dan *maximum inelastic drift* sebesar 0,00958, sedangkan pada arah Y level kinerja tidak dapat ditentukan karena *performance point* tidak tercapai. Pada Gedung B, level kinerja seismik *Damage Control* dicapai pada arah Y dengan *maximum total drift* sebesar 0,01185 dan *maximum inelastic drift* sebesar 0,00962. Sementara itu, pada arah X Gedung B tidak mencapai *performance point* karena tidak terjadi perpotongan antara kurva kapasitas dan kurva permintaan seismik.

Kata kunci : Level Kinerja, Analisis *Pushover*, Metode Spektrum Kapasitas, Sistem Rangka Pemikul Momen Khusus, *Shearwall*, Bangunan Rumah Sakit

ABSTRACT

Karawang Regency, West Java, is an area with relatively high seismic activity; therefore, buildings with vital functions such as hospitals require seismic performance evaluation. This study aims to assess the seismic performance of a six-story reinforced concrete hospital building designed with a Special Moment Resisting Frame (SMRF) combined with a shear walls, in accordance with SNI 1726:2019. The building consists of two structural masses separated by an expansion joint and analyzed independently as Building A and Building B.

Three-dimensional structural modeling was conducted using SAP2000 v26, with loading criteria referring to SNI 1727:2020. A nonlinear static pushover analysis was performed by applying incremental lateral loads until the structure reached its maximum deformation capacity. The analysis produced capacity curves illustrating the relationship between base shear force and roof displacement. Seismic performance levels were determined using the Capacity Spectrum Method based on ATC-40 by plotting the capacity curve and demand spectrum in the Acceleration–Displacement Response Spectrum format to obtain the performance point. The performance level was then identified based on the displacement at the performance point.

The results indicate that Building A achieved a Damage Control (DC) performance level in the X direction, with a maximum total drift of 0.01225 and a maximum inelastic drift of 0.00958. However, the performance level in the Y direction could not be determined due to the absence of a performance point. For Building B, the Damage Control (DC) performance level was achieved in the Y direction, with a maximum total drift of 0.01185 and a maximum inelastic drift of 0.00962. Meanwhile, the X-direction performance level could not be determined because no intersection occurred between the capacity and demand curves.

Keywords : *Seismic Performance, Pushover Analysis, Capacity Spectrum Method, Special Moment Resistant Frame, Shearwall, Hospital Building.*

BAB I

PENDAHULUAN

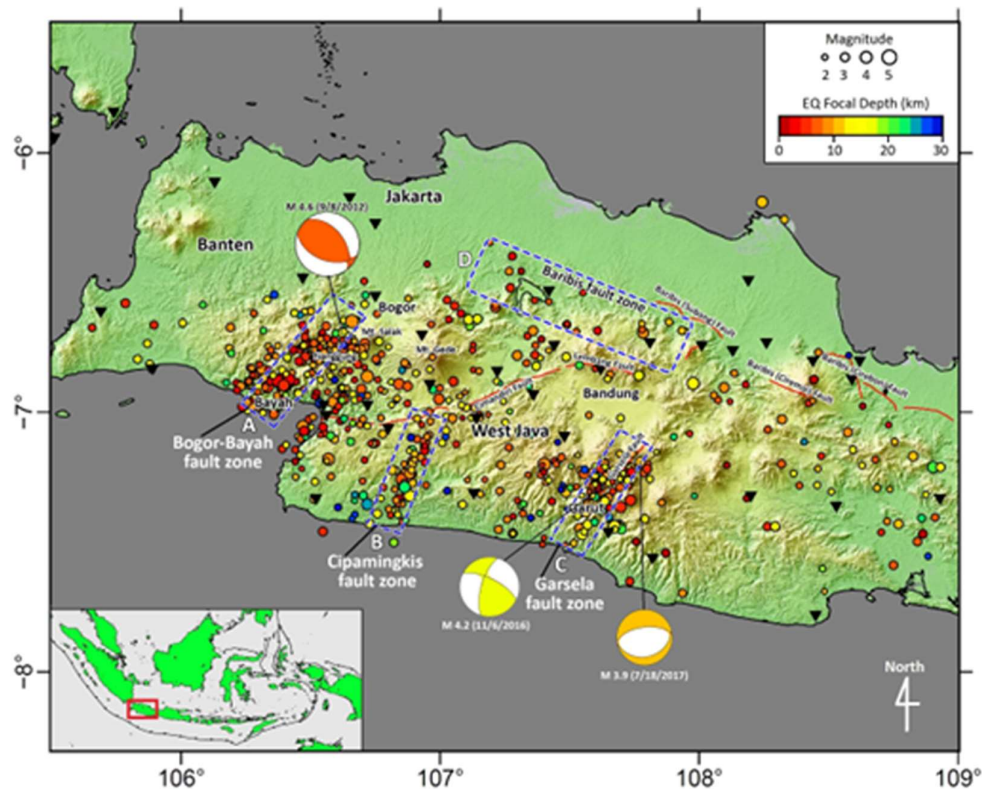
1.1. Latar Belakang

Gempa bumi terbagi menjadi dua jenis, yaitu gempa vulkanik dan gempa tektonik. Gempa vulkanik terjadi akibat aktivitas gunung berapi dimana energi gempa dilepaskan bersamaan dengan letusan-letusan kecil sebelum letusan besar. Sedangkan gempa tektonik merupakan gempa bumi yang terjadi akibat dari pecah atau slipnya massa batuan di lapisan kerak bumi yang melepaskan energi secara mendadak sehingga menimbulkan getaran di permukaan.

Pada bangunan keteknipsipilan baik gedung maupun nongedung, jenis gempa yang memiliki pengaruh terbesar adalah gempa tektonik. Gempa tektonik memiliki magnitudo lebih besar, area terdampak lebih luas, serta potensi kerusakan yang lebih tinggi, sedangkan gempa vulkanik bersifat lebih dangkal dan lokal sehingga dampaknya terbatas di sekitar sumber gempa (Pessina *dkk.*, 2021).

Kabupaten Karawang yang terletak di Provinsi Jawa Barat termasuk daerah dengan potensi gempa tektonik yang tinggi. Penelitian yang dilakukan menggunakan hasil relokasi hiposentrum gempa di wilayah Jawa Barat menunjukkan adanya klaster seismik yang berkaitan dengan beberapa sesar aktif lokal, yaitu Sesar Cipamingkis, Garsela, Baribis, dan Bogor-Bayah. Penelitian ini membuktikan bahwa dengan jaringan seismik BMKG yang lebih rapat, banyak gempa kecil dari sesar-sesar tersebut kini dapat terdeteksi yang menegaskan bahwa aktivitas tektonik di Jawa Barat masih tinggi dan berpotensi menimbulkan gempa merusak di masa depan (Supendi dan Purbayanti, 2023).

Peta gempa berdasarkan relokasi hiposenter untuk daerah Jawa Barat berdasarkan data dari Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika (BMKG) periode 2016 hingga 2020 dan penelitian oleh Supendi *dkk.* (2018) periode 2009 hingga 2015 dapat dilihat pada Gambar 1.1 berikut.



Gambar 1.1 Peta Gempa Jawa Barat Berdasarkan Relokasi Hiposenter

(Sumber : BMKG, 2020 dan Supendi dkk., 2018)

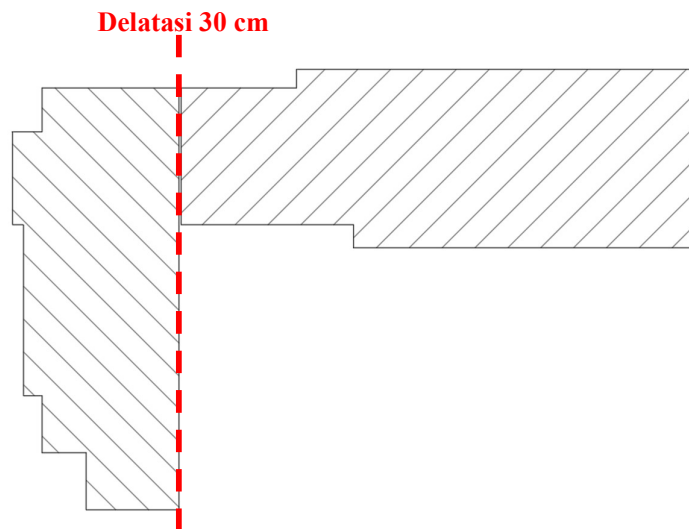
Faktor lain yang membuat gempa bumi menjadi salah satu bencana dengan risiko tinggi adalah waktu dan lokasi terjadinya yang tidak dapat diprediksi secara pasti. Meskipun telah banyak beredar peta wilayah rawan gempa yang dipublikasikan oleh beberapa lembaga seperti Pusat Studi Gempa Nasional (PSGN) dan Badan Standarisasi Nasional (BSN), hal tersebut tetap tidak dapat menjamin kapan, dimana, dan berapa kekuatan gempa yang dapat terjadi di masa depan. Hal ini tentunya menimbulkan kekhawatiran sekaligus tantangan tersendiri bagi bangunan yang berada di kawasan rawan gempa seperti Jawa Barat. Pada prinsipnya bangunan-bangunan ini harus mampu bertahan dan tidak runtuh jika suatu saat gempa terjadi atau terulang kembali.

Untuk mengantisipasi risiko tersebut di masa depan, para insinyur telah menyusun standar yang memuat prosedur serta persyaratan dalam perancangan struktur bangunan tahan gempa. Regulasi ini terus diperbarui agar sejalan dengan perkembangan ilmu, metode, dan teknologi yang semakin akurat dalam menghadapi bencana gempa yang bersifat dinamis dan dapat meningkat seiring waktu. Di Indonesia, hal tersebut diatur dalam Standar Nasional Indonesia (SNI) 1726:2019 tentang Tata Cara Perencanaan Ketahanan Gempa untuk Struktur Bangunan Gedung dan Non Gedung, yang merupakan pembaruan dari SNI 1726:2012.

Sehubungan dengan penjelasan sebelumnya, objek penelitian ini adalah bangunan rumah sakit yang berlokasi di kawasan rawan gempa, tepatnya di Kabupaten Karawang, Jawa Barat, dan dirancang berdasarkan SNI 1726:2019. Denah bangunan berbentuk L (*L shape*) dengan sistem struktur yang digunakan adalah sistem rangka pemikul momen khusus (SRPMK) ditambah *shearwall*. Struktur utama terdiri dari 6 lantai dengan dua massa bangunan yang dipisahkan oleh delatasi selebar 30 cm namun tetap menjadi satu fungsi secara arsitektural. Kedua massa bangunan ini berikutnya disebut sebagai “Gedung A” dan “Gedung B” pada penelitian ini yang akan dianalisis secara terpisah. Bentuk bangunan eksisting serta lokasi delatasi dapat dilihat pada Gambar 1.2 dan 1.3 berikut.



Gambar 1.2 Tampilan Bangunan Eksisting



Gambar 1.3 Letak Delatasi Pada Gedung

Akan tetapi, meskipun bangunan tersebut telah dirancang dan dibangun mengikuti regulasi terbaru masih terdapat kemungkinan resiko kegagalan pada strukturnya. Ada beberapa faktor yang bisa menyebabkan hal ini terjadi, diantaranya kesalahan pada saat perencanaan maupun pelaksanaan (*human error*) dan perubahan desain (mutu material, tulangan terpasang, posisi dan orientasi, atau dimensi) elemen struktur menyesuaikan kondisi lapangan. Beberapa faktor ini dapat mengakibatkan perilaku struktur pada kondisi pasca-pembangunan berbeda dengan hasil yang diperkirakan pada tahap perencanaan.

Selain itu dalam SNI 1726:2019 Tabel 3, rumah sakit merupakan salah satu fasilitas penting yang termasuk ke dalam kategori risiko IV dengan nilai faktor keutamaan (I_e) tertinggi 1,50. Artinya jika terjadi keruntuhan akibat gempa bumi maka akan menimbulkan dampak yang sangat besar. Dampak ini mencakup tidak hanya kerugian, tetapi juga potensi korban jiwa dari pihak pasien yang sedang dirawat, tenaga kesehatan yang bertugas, hingga masyarakat umum yang berada di lokasi. Lebih jauh lagi, kondisi ini berpotensi menyebabkan kelumpuhan total pada pelayanan kesehatan. Situasi ini sangat kritis karena layanan medis justru sangat dibutuhkan untuk penanganan darurat bagi korban pasca-bencana, sehingga hilangnya fungsi rumah sakit secara otomatis menghambat upaya respons dan pemulihan bencana di daerah ini.

Berdasarkan berbagai faktor dan risiko tersebut serta dampak yang bisa ditimbulkan, maka diperlukan adanya tahapan lanjutan untuk memastikan apakah struktur saat ini masih dalam kinerja yang diharapkan pada saat perencanaan atau tidak jika terjadi gempa. Menurut U.S. *Department of Veterans Affairs* (2013) bagian 2.3 tentang evaluasi pada bangunan eksisting yang mengacu pada ASCE 31-02 untuk fasilitas penting seperti rumah sakit maka evaluasi harus memenuhi level kinerja *Immediate Occupancy* (IO).

Salah satu metode yang umum digunakan untuk mengetahui level kinerja suatu struktur bangunan terhadap gempa adalah melalui metode analisis *pushover*. Analisis *pushover* merupakan analisis statik nonlinier yang berguna untuk mengetahui perilaku keruntuhan suatu struktur. Analisis dilakukan dengan memberikan beban lateral statik pada pusat massa setiap lantai, yang kemudian secara bertahap ditingkatkan 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-elastik yang besar sampai mencapai kondisi (Pranata dan Simanta, 2006).

Output dari analisis *pushover* akan didapatkan kurva kapasitas yang menunjukkan hubungan antara gaya geser dasar (*base shear*) dan perpindahan atap (*displacement*) akibat beban gempa lateral yang diberikan pada struktur. 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 ujung-ujung struktur balok atau kolom bangunan. Kemudian dari kurva kapasitas bisa ditentukan level 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*). Ada 4 level kinerja struktur menurut kriteria ATC-40 yaitu *Immediate Occupancy* (IO), *Damage Control* (DC), *Life Safety* (LS), dan *Structural Stability* (SS) sebelum akhirnya bangunan runtuh total (*Totally Collapse*).

Penelitian ini diharapkan dapat memberikan gambaran mengenai kinerja struktur gedung rumah sakit yang berlokasi di Kabupaten Karawang. Pemahaman terhadap kinerja struktur serta potensi kerusakan yang mungkin terjadi merupakan langkah awal dalam upaya mitigasi bencana, khususnya untuk mengurangi potensi kerugian yang ditimbulkan akibat gempa bumi. Melalui hasil analisis tersebut, dapat ditentukan langkah-langkah tindak lanjut yang diperlukan, seperti perencanaan dan pelaksanaan upaya perkuatan struktur, agar gedung memiliki tingkat keamanan dan ketahanan yang memadai sebelum terjadinya gempa.

1.2. Rumusan Masalah

1. Bagaimana bentuk kurva kapasitas dan letak titik kinerja (*performance point*) arah X dan Y untuk masing-masing gedung A dan gedung B ?
2. Berapa nilai deformasi lateral yang terjadi ketika mencapai titik kinerja pada masing-masing gedung A dan gedung B ?
3. Apa level kinerja yang sesuai bagi gedung A dan B jika terjadi gempa ?

1.3. Tujuan Penelitian

1. Menggambarkan kurva kapasitas dan menentukan titik kinerja (*performance point*) pada masing-masing gedung A dan gedung B.
2. Mengetahui nilai deformasi lateral yang terjadi pada titik kinerja masing-masing gedung A dan gedung B.
3. Menentukan level kinerja struktur yang sesuai menurut ATC-40 jika terjadi gempa untuk masing-masing gedung A dan gedung B.

1.4. Manfaat Penelitian

Manfaat dari penelitian ini antara lain adalah sebagai berikut ini.

1. Manfaat teoritis
Sebagai tambahan referensi di bidang perencanaan struktur bangunan tahan gempa terutama dalam memahami perilaku struktur gedung bertingkat yang merupakan inti dari ilmu perancangan dalam rekayasa struktur.

2. Manfaat praktis

Sebagai rekomendasi evaluasi terhadap struktur bangunan gedung rumah sakit ini dan gedung-gedung eksisting lainnya yang serupa atau berada pada daerah yang sama yang berpotensi mengalami kerusakan akibat beban gempa mendatang terkait dengan perilaku sistem struktur. Diharapkan penelitian ini dapat menjadi salah satu referensi kaitannya dalam perbaikan, perkuatan, dan rehabilitasi.

1.5. Batasan Penelitian

Dalam penelitian diperlukan batasan untuk memperjelas fokus dan ruang lingkup penelitian sehingga tidak terjadi kesalahpahaman. Berikut beberapa batasan yang ditetapkan pada penelitian ini.

1. Objek penelitian merupakan bangunan eksisting dengan menggunakan data yang diperoleh dari dokumen *Asbuilt Drawing*.
2. Fungsi bangunan sebagai rumah sakit dengan jumlah 6 lantai utama.
3. Struktur utama menggunakan material beton bertulang dengan sistem rangka pemikul momen khusus (SRPMK) ditambah dinding geser (*shearwall*).
4. Jenis tanah merupakan tanah lunak dengan kelas situs SE berdasarkan hasil *soil investigation* pada lokasi proyek.
5. Permodelan struktur dalam 3 dimensi menggunakan software SAP2000 v26 secara terpisah untuk masing-masing gedung A dan B dikarenakan terdapat delatasi pada as 4-4' selebar 30 cm.
6. Tangga dihitung dan dimodelkan dalam analisis, sementara lift tidak diperhitungkan.
7. Beban yang dihitung meliputi beban mati, beban hidup, dan beban gempa. Beban angin dan hujan diabaikan.
8. Analisis hanya dilakukan untuk struktur atas dan pondasi dimodelkan sebagai *constraint* dengan perilaku jepit.
9. Metode analisis menggunakan analisis statik nonlinier *pushover* dengan bantuan software SAP2000 v26 untuk memperoleh kurva kapasitas dan titik kinerja.

10. Pemeriksaan kinerja hanya berdasarkan evaluasi tahap 3 (analisis nonlinier) dengan metode spektrum kapasitas (CSM) sesuai ATC-40. Evaluasi tahap 1 (*screening*) dan tahap 2 (analisis linier) tidak dilakukan.
11. Tidak memperhitungkan efek ketidakberaturan bangunan.
12. Tidak meninjau aspek ekonomis, estetika, dan arsitektural bangunan.
13. Peraturan yang digunakan pada penelitian ini sebagai berikut :
 - a. Badan Standarisasi Nasional (2019), SNI 1726-2019 Tata Cara Perencanaan Ketahanan Gempa Untuk Struktur Bangunan Gedung dan Non Gedung.
 - b. Badan Standardisasi Nasional (2020), SNI 1727-2020 Beban Desain Minimum dan Kriteria Terkait Untuk Bangunan Gedung dan Struktur Lain.
 - c. *Applied Technology Council* (ATC-40) 1996, *Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings*. Volume 1. Redwood City, California.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Penelitian Terdahulu

Pada sub bab ini berisi beberapa studi terkait dari berbagai sumber yang pernah dilakukan sebelumnya beserta hasilnya sebagai bahan referensi dan perbandingan bagi penelitian yang akan dilakukan.

Berikut adalah ringkasan mengenai penelitian-penelitian terdahulu yang berkaitan dengan penelitian yang akan dilakukan.

2.1.1. Evaluasi Kinerja Bangunan

Ada beberapa penelitian yang membahas mengenai evaluasi kinerja bangunan dengan metode analisis nonlinear *pushover*. Sebagai referensi berikut diantaranya.

1. Aranta dan Irawati (2025)

Objek penelitian ini adalah desain struktural gedung rumah sakit rawat inap 10 lantai (9 lantai ditambah 1 lantai basement) yang berlokasi di Kota Magelang. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi kinerja struktur hasil desain yang sebelumnya telah dirancang menggunakan metode analisis linear dinamik. Evaluasi ini secara khusus dilakukan untuk memverifikasi apakah target kinerja *Immediate Occupancy* (IO) pada level seismik BSE-1N dan *Life Safety* (LS) pada level seismik BSE-2N dapat tercapai, mengingat pentingnya fungsi bangunan rumah sakit dan kondisi wilayah Indonesia yang rawan gempa.

Penelitian ini menggunakan metode analisis nonlinear statik atau *pushover analysis* berdasarkan standar ASCE 41-17. Prosedur evaluasi diawali dengan pemodelan geometri struktur menggunakan perangkat lunak ETABS yang dilengkapi dengan parameter nonlinear pada material (tipe Mander untuk beton), penampang, dan elemen (sendi plastis). Beban lateral diberikan dalam empat arah (X positif, X negatif, Y positif, dan Y negatif) dengan menggunakan displacement control hingga mencapai 150% dari target

displacement. Kriteria evaluasi yang digunakan adalah *Basic Performance Objective Equivalent to New Building Standards* (BPON).

Hasil yang diperoleh sebagai berikut :

- a. Struktur gedung tidak sepenuhnya memenuhi target kinerja karena kurva kapasitas berhenti sebelum mencapai target displacement pada arah +X dan -Y saat dibebani level seismik BSE-2N.
- b. Kapasitas displacement maksimal struktur pada arah +X dan -Y lebih kecil daripada displacement yang terjadi akibat gempa BSE-2N, sehingga target *Life Safety* tidak tercapai pada arah tersebut.
- c. Pada level elemen, ditemukan beberapa titik sendi plastis yang kinerjanya melebihi batas yang disyaratkan (melebihi IO pada BSE-1N dan melebihi LS pada BSE-2N), yang berarti struktur belum memenuhi target kinerja elemen secara keseluruhan.
- d. Analisis menunjukkan bahwa rasio kekuatan elastis melebihi rasio kekuatan maksimum sehingga syarat utama evaluasi berdasarkan ASCE 41-17 tidak terpenuhi.

Kesimpulan penelitian ini adalah struktur gedung rumah sakit tersebut belum memenuhi level kinerja *Immediate Occupancy* dan *Life Safety* yang disyaratkan oleh ASCE 41-17 dan RSNI terkait, sehingga perlu untuk melakukan optimasi desain melalui pembesaran dimensi atau penambahan tulangan, serta melakukan analisis lebih lanjut menggunakan metode nonlinear dinamik (*Time History*).

2. Erizal, Arrafi dan Mentari (2024)

Objek penelitian ini adalah struktur beton bertulang Menara Sabilulungan 99 yang berlokasi di Kabupaten Bandung, wilayah dengan tingkat kerawanan gempa tinggi. Struktur menara menggunakan sistem rangka pemikul momen dan dianalisis sebagai bangunan eksisting. Tujuan penelitian adalah mengevaluasi kinerja seismik struktur terhadap beban gempa dengan pendekatan *performance-based engineering* guna mengetahui tingkat kinerja struktur, kapasitas deformasi, serta daktilitas struktur saat mengalami gempa rencana.

Penelitian dilakukan secara analitis numerik menggunakan metode analisis statis nonlinear pushover berbasis perangkat lunak ETABS. Beban gempa ditentukan dari respons spektrum sesuai SNI 1726:2019 dengan parameter gempa MCER Peta Gempa Indonesia 2017. Pemodelan struktur mengacu pada *as-built drawing*. Analisis meliputi analisis modal untuk memastikan rasio partisipasi massa, penentuan kurva pushover arah x dan y, serta evaluasi kinerja struktur menggunakan ATC-40, FEMA 356, FEMA 440, dan ASCE 41. Target perpindahan ditentukan dengan *Displacement Coefficient Method* (DCM), sedangkan daktilitas dihitung dari rasio deformasi ultimit dan deformasi leleh. Hasil penelitian ini sebagai berikut :

- a. Rasio partisipasi massa struktur melebihi 90% pada ragam getar ke-9 untuk arah x dan y. Target perpindahan atap untuk arah x sebesar 596,36 mm dengan gaya geser dasar 10.402,90 kN, sementara arah y sebesar 601,83 mm dengan gaya geser dasar 10.178,88 kN
- b. Perpindahan leleh terjadi pada arah x sebesar 443,29 mm dan arah y: 355,94 mm.
- c. Tingkat kinerja struktur berdasarkan ATC-40 dan FEMA 356 adalah *Life Safety* (LS) untuk kedua arah.
- d. Nilai daktilitas struktur arah x = 1,70 (daktilitas rendah) dan arah y = 2,24 (daktilitas sedang). Sendi plastis dominan terbentuk pada elemen balok, menunjukkan konsep strong column–weak beam terpenuhi.

Kesimpulan yang diperoleh pada penelitian ini adalah Struktur Menara Sabilulungan 99 memiliki kinerja seismik pada tingkat *Life Safety*, sesuai dengan persyaratan bangunan eksisting kategori risiko II. Struktur mampu menahan gempa rencana tanpa mengalami keruntuhan, dengan daktilitas rendah pada arah x dan daktilitas sedang pada arah y.

3. Zebua *dkk.* (2023)

Objek penelitian ini adalah struktur gedung Rumah Sakit Rujukan Regional Cut Nyak Dhien Meulaboh, Aceh, yang terdiri dari 3 lantai. Penelitian ini bertujuan untuk menentukan kriteria tingkat kinerja struktur gedung tersebut setelah mengalami perubahan elemen struktural selama masa konstruksi. Evaluasi dilakukan untuk memastikan ketahanan bangunan terhadap intensitas gempa tinggi di wilayah Aceh serta memverifikasi apakah desain tersebut memenuhi standar bangunan tahan gempa yang berlaku di Indonesia.

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif dengan metode analisis nonlinear statik atau *pushover analysis* berdasarkan pedoman ATC-40. Analisis dilakukan menggunakan perangkat lunak ETABS untuk memodelkan struktur rangka pemikul momen khusus (SRPMK) dengan tambahan dinding geser (*shear wall*) setebal 25 cm. Prosedur evaluasi meliputi pemodelan beban mati, beban hidup, dan beban gempa sesuai SNI 1726-2019, yang kemudian dilanjutkan dengan pengamatan mekanisme sendi plastis pada elemen balok dan kolom untuk menentukan level kinerja pasca-gempa.

Hasil penelitian ini sebagai berikut :

- a. Seluruh lantai memenuhi kriteria izin dengan simpangan terbesar sebesar 22,00 mm, masih di bawah ambang batas yang disyaratkan yaitu 34,62 mm.
- b. Distribusi sendi plastis menunjukkan bahwa pelelehan dimulai pada elemen balok kemudian diikuti oleh kolom, sehingga memenuhi prinsip desain Strong Column-Weak Beam (SCWB).
- c. Hasil analisis menunjukkan nilai perpindahan (*displacement*) pada arah x sebesar 163,819 mm dan pada arah y sebesar 105,741 mm.
- d. Berdasarkan parameter ATC-40, struktur gedung masuk dalam kategori *Immediate Occupancy* (IO) baik untuk arah-x maupun arah-y

Gedung rumah sakit ini dikategorikan aman karena memenuhi syarat simpangan antar lantai SNI 1726-2019 dan memiliki level kinerja *Immediate Occupancy* (IO). Hal ini menunjukkan bahwa jika terjadi gempa, kerusakan hanya terbatas pada elemen non-struktural, risiko kegagalan struktur rendah, dan gedung tetap dapat segera difungsikan kembali.

4. Prasetya, Wirakusuma dan Sarya (2022)

Objek penelitian ini adalah Gedung Graha Wiyata Universitas 17 Agustus 1945 (UNTAG) Surabaya, sebuah gedung perkuliahan 10 lantai dari beton bertulang yang dibangun pada tahun 1988-1990 dan dirancang berdasarkan peraturan gempa lama (SNI 1983). Tujuan penelitian adalah mengevaluasi level kinerja seismik bangunan eksisting terhadap beban gempa berdasarkan SNI 1726:2019, guna mengetahui kemampuan struktur dalam menahan gempa rencana serta memastikan tingkat keamanan dan fungsionalitas bangunan.

Penelitian dilakukan secara analitis numerik menggunakan analisis nonlinier statis pushover dengan bantuan perangkat lunak SAP2000 v21. Beban struktur meliputi beban mati dan hidup berdasarkan SNI 1727:2013, serta beban gempa berdasarkan SNI 1726:2019 dengan respons spektrum wilayah Surabaya pada kondisi tanah lunak. Penentuan target perpindahan dan level kinerja struktur dilakukan menggunakan *Capacity Spectrum Method* mengacu pada ATC-40, dengan evaluasi berdasarkan nilai *drift ratio* dan titik kinerja (*performance point*).

Hasil penelitian ini sebagai berikut :

- a. Untuk arah x gaya geser maksimum sebesar 1.616.120 kg dengan perpindahan maksimum 0,399 m. Sementara arah y gaya geser maksimum 6.036.499 kg dengan perpindahan maksimum 0,115 m
- b. Nilai drift ratio arah x = 0,007 dan arah y = 0,0027
- c. Sendi plastis pertama terbentuk pada elemen balok, sesuai konsep *strong column-weak beam*. Kondisi sendi plastis pada titik kinerja menunjukkan tidak terjadi kerusakan struktural signifikan.
- d. Berdasarkan kriteria ATC-40, level kinerja struktur pada kedua arah adalah *Immediate Occupancy* (IO).

Kesimpulan yang diperoleh yaitu Gedung Graha Wiyata UNTAG Surabaya memiliki kinerja seismik pada level *Immediate Occupancy* (IO), yang menunjukkan bahwa struktur tetap aman, tidak mengalami kerusakan berarti, dan dapat langsung difungsikan kembali setelah gempa rencana berdasarkan SNI 1726:2019.

5. Kurniawati *dkk.* (2021)

Objek penelitian ini adalah Gedung B Rumah Sakit Umum Muhammadiyah Metro, sebuah bangunan berlantai 7 dengan satu lantai basement yang berlokasi di Kota Metro, Lampung. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi kinerja seismik gedung tersebut guna menentukan titik kinerja (*performance point*) dan kriteria level kinerja menggunakan analisis pushover dengan *Capacity Spectrum Method* (CSM). Evaluasi ini dianggap penting karena adanya pemutakhiran standar gempa dari SNI 1726:2012 ke SNI 1726:2019 yang menyebabkan peningkatan nilai percepatan gempa rencana di lokasi tersebut.

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif dengan melakukan simulasi pada model struktur 3D menggunakan perangkat lunak ETABS. Metode analisis yang diterapkan adalah *Nonlinear Static Pushover Analysis* dengan prosedur *Capacity Spectrum Method* (CSM) serta *Equivalent Linearization* sesuai pedoman FEMA-440 dan ATC-40. Pembebanan struktur, termasuk beban mati, hidup, dan gempa, dihitung berdasarkan standar SNI 1727-2020 dan SNI 1726-2019. Penentuan level kinerja akhir didasarkan pada batasan rasio *drift* atap yang ditetapkan dalam dokumen ATC-40.

Hasil penelitian ini sebagai berikut :

- a. Hasil analisis menunjukkan nilai perpindahan (*displacement*) sebesar 446,082 mm pada arah x dan 91,851 mm pada arah y.
- b. Berdasarkan parameter ATC-40, gedung ini memiliki level kinerja *Damage Control* untuk arah x dan *Immediate Occupancy* (IO) untuk arah y.
- c. Sendi plastis mulai terbentuk pada step 31 yang diawali pada elemen balok di lantai 1. Meskipun mengalami kerusakan, struktur menunjukkan perilaku daktail parsial yang mencegah keruntuhan total.
- d. Nilai *displacement* yang terbentuk masih di bawah batas izin (*displacement limit*) sebesar 620 mm (2% dari total tinggi gedung), sehingga secara umum kinerja perpindahan gedung dinilai baik.

2.1.2. Sendi Plastis

Penelitian oleh Rahmantyo dan Andayani (2019) ini menggunakan 5 model bangunan beton bertulang 20 lantai dengan tinggi dan luasan yang sama tetapi dengan konfigurasi denah yang berbeda-beda (persegi panjang, T, L, U, dan H). Metode analisis yang digunakan adalah nonlinear *Time History* dengan bantuan *software* ETABS.

Kondisi sendi plastis ditinjau pada dua tahap. Tahapan pertama dimulai dari peristiwa terjadinya keruntuhan pada struktur akibat rekaman gempa asli. Analisis pada tahap pertama akan menunjukkan mekanisme keruntuhan bangunan dan jumlah sendi plastis yang terjadi pada tiap elemen struktur. Tahapan kedua menunjukkan kondisi sendi plastis pada seluruh elemen struktur saat dibebani rekaman gempa sintesis. Kondisi sendi plastis yang ditinjau terbagi atas sendi plastis pada balok dan sendi plastis pada dinding geser.

Hasil analisis menunjukkan bahwa nilai *story drift* dan kondisi sendi plastis pada level kinerja *Collapse Prevention* (CP) adalah :

1. Denah persegi panjang, *story drift* 0,59% dan jumlah sendi plastis 8 buah.
2. Denah H, *story drift* 1,58% dan jumlah sendi plastis 23 buah.
3. Denah L, *story drift* 2,41% dan jumlah sendi plastis 30 buah.
4. Denah U, *story drift* 4,59% dan jumlah sendi plastis 35 buah.
5. Denah T, *story drift* 5,8% dan jumlah sendi plastis 58 buah.

Gedung bentuk T merupakan gedung dengan performa yang paling buruk karena mengalami kondisi sendi plastis *collapse prevention* yang terbanyak dibandingkan dengan denah bangunan lain.

2.2. Perbandingan Substansi Penelitian

Dari ringkasan penelitian-penelitian terdahulu dapat dibuat rangkuman perbandingan dengan penelitian yang akan dilakukan penulis untuk menunjukkan perbedaan baik dari objek, peraturan yang digunakan, dan metode penelitian. Rangkuman disajikan dalam tabel 2.1 berikut.

Tabel 2.1 Perbandingan Substansi Penelitian

Parameter	Penelitian Terdahulu			Penelitian Yang Dilakukan
Peneliti	Aranta dan Irawati (2025)	Erizal, Arrafi dan Mentari (2024)	Zebua dkk. (2023)	
Judul Penelitian	Evaluasi Kinerja Struktur Pada Desain Struktural Gedung Rumah Sakit Dengan Metode Pushover	Evaluasi Kinerja Seismik Struktur Menara Sabilulungan 99 Kabupaten Bandung dengan Metode Analisis Statis Nonlinear Pushover	<i>Evaluation Of Seismic Performance Of Hospital Building Using Pushover Analysis Based On Atc-40</i>	Evaluasi Kinerja Seismik Struktur Gedung Beton Bertulang Sistem Rangka-Ganda Dengan Analisis Statik Nonlinier (<i>Pushover</i>)
Objek Penelitian	Gedung rumah sakit rawat inap 10 lantai	Menara Sabilulungan 99 yang berlokasi di Kabupaten Bandung	Struktur gedung Rumah Sakit Rujukan Regional Cut Nyak Dhien Meulaboh, Aceh, yang terdiri dari 3 lantai	Struktur gedung rumah sakit 6 lantai dengan 2 massa bangunan
Peraturan Digunakan	SNI 1726:2019 SNI 1727:2020 SNI 2847:2019 ASCE 41-17:2017 ASCE 7-16:2016	ASCE 41-17:2017 ATC-40:1997 SNI 1726:2019 FEMA 356:2000 FEMA 440:2005	SNI 1726:2019 ATC-40:1997	SNI 1726:2019 SNI 1727:2020 ATC-40:1997

Lanjutan Tabel 2.1 Perbandingan Substansi Penelitian

Tujuan Penelitian	Memverifikasi apakah target kinerja Immediate Occupancy (IO) pada level seismik BSE-1N dan Life Safety (LS) pada level seismik BSE-2N dapat tercapai	Mengevaluasi kinerja seismik struktur terhadap beban gempa dengan pendekatan <i>performance-based engineering</i> guna mengetahui tingkat kinerja struktur saat mengalami gempa rencana	Menentukan kriteria tingkat kinerja struktur gedung tersebut setelah mengalami perubahan elemen struktural selama masa konstruksi serta memverifikasi apakah desain telah memenuhi standar.	Menggambar kurva kapasitas dan titik kinerja (<i>performance point</i>), serta menentukan level kinerja yang sesuai bagi objek penelitian.
Metode Penelitian	Metode analisis nonlinear statik atau <i>pushover analysis</i> berdasarkan standar ASCE 41-17	Analisis pushover serta evaluasi kinerja struktur menggunakan ATC-40, FEMA 356, FEMA 440, dan ASCE 41. Target perpindahan ditentukan dengan <i>Displacement Coefficient Method</i> (DCM).	Pendekatan kuantitatif dengan metode analisis nonlinear statik atau <i>pushover analysis</i> berdasarkan pedoman ATC-40.	Analisis pushover dengan metode <i>capacity spectrum</i> prosedur B ATC-40 untuk titik kinerja, menentukan level kinerja sesuai ATC-40 berdasarkan nilai deformasi lateral.

2.3. Keaslian Penelitian

Berdasarkan rangkuman pada tabel 2.1, penelitian mengenai kinerja seismik bangunan telah sering dilakukan dengan menggunakan metode *pushover*. Adapun yang menjadi pembeda adalah bangunan yang ditinjau, peraturan acuan, tujuan penelitian, hingga metode yang digunakan. Berdasarkan hal tersebut, beberapa poin pembeda dari penelitian sebelumnya yang dapat menegaskan keaslian penelitian ini dan bukan merupakan karya plagiasi diuraikan sebagai berikut :

1. Data yang digunakan bersumber dari dokumen *Asbuilt Drawing* proyek dan merupakan bangunan nyata.
2. Penelitian ini meninjau 1 gedung menjadi 2 bagian dikarenakan adanya delatasi struktur, sehingga tahapan analisis dilakukan 2 kali.
3. Peraturan yang digunakan merupakan peraturan terbaru yaitu SNI 1726:2019 sebagai pembaruan dari SNI 1726:2012 dan SNI 1727:2020 sebagai pembaruan dari SNI 1727:2013.

Dari uraian diatas maka disimpulkan bahwa penelitian ini dapat dipertanggungjawabkan keasliannya

BAB III

LANDASAN TEORI

3.1. Konsep Bangunan Tahan Gempa

Pada latar belakang sebelumnya telah dijelaskan bahwa jenis gempa bumi yang banyak diperhitungkan dalam analisis maupun desain struktur bangunan gedung dan non-gedung adalah gempa tektonik karena berpotensi lebih merusak. Untuk mengantisipasi hal tersebut, maka berbagai persyaratan harus dipenuhi untuk memastikan bangunan mampu menahan gaya lateral ketika terjadi gempa. Di Indonesia persyaratan ini diatur dalam SNI 1726-2019.

Bangunan tahan gempa adalah bangunan yang mampu bertahan dan tidak mengalami keruntuhan jika terjadi gempa. Tujuan utama bangunan tahan gempa adalah menghindari korban jiwa saat gempa dan meminimalisir biaya apabila diperlukan rehabilitasi. Desain bangunan tahan gempa disamping memperhitungkan kekuatan gempa dan performa bangunan, juga memperhitungkan sisi ekonomis pembangunannya. Mendesain bangunan yang sangat kuat hingga tidak mengalami kerusakan apapun ketika terjadi gempa besar akan sulit direalisasikan karena butuh biaya yang mahal. Oleh karena itu, dalam mendesain bangunan tahan gempa, struktur bangunan masih dibolehkan mengalami kerusakan tetapi masih dalam persyaratan yang ditentukan.

1. Pada gempa kecil (*light*, atau *minor earthquake*) yang sering terjadi, maka struktur utama bangunan tidak boleh rusak dan harus berfungsi dengan baik. Kerusakan kecil pada komponen non-struktur masih dibolehkan.
2. Pada gempa menengah (*moderate earthquake*) yang cukup jarang terjadi, maka struktur utama bangunan boleh rusak/retak ringan tetapi masih mungkin untuk diperbaiki. Kerusakan pada komponen non-struktur dibolehkan asalkan dapat diganti dengan yang baru.
3. Pada gempa kuat (*strong earthquake*) yang jarang terjadi dan gempa besar (*great earthquake*), struktur bangunan boleh mengalami kerusakan tetapi tidak boleh sampai kondisi runtuh total (*totally collapse*).

3.2. Evaluasi Berbasis Kinerja (*Performance Based Seismic Evaluation*)

Pada awalnya, perencanaan dan evaluasi struktur bangunan tahan gempa lebih banyak didasarkan pada pendekatan berbasis gaya (*Force Based Design*), yang berorientasi pada kemampuan elemen struktur dalam menahan beban gempa minimum sesuai ketentuan, seperti yang tercantum dalam SNI 1726:2002. Meskipun efektif untuk memastikan kekuatan struktur, metode ini memiliki keterbatasan karena tidak memberikan gambaran yang memadai mengenai perilaku struktur setelah melewati batas elastisnya. Pengalaman dari berbagai gempa besar pada dekade 1990-an, seperti gempa Northridge (1994) di Amerika Serikat dan gempa Kobe (1995) di Jepang, menunjukkan bahwa struktur yang memenuhi persyaratan kekuatan pun masih bisa mengalami kerusakan berat atau kehilangan fungsi. Kondisi tersebut mendorong para ahli rekayasa gempa untuk mengadopsi paradigma baru yang menitikberatkan pada hasil kinerja struktur, yakni *Performance Based Seismic Evaluation* (PBSE).

Perkembangan PBSE ditandai dengan perumusan sasaran kinerja yang eksplisit. Tidak lagi hanya berfokus pada pencegahan keruntuhan, pendekatan ini menetapkan bahwa bangunan harus mencapai tingkat kerusakan tertentu pada tingkat bahaya gempa yang berbeda. Salah satu pelopor utama dalam konsep ini adalah SEAOC Vision 2000 (1995), yang memperkenalkan hubungan antara tingkat kinerja struktur seperti *Immediate Occupancy* (IO), *Life Safety* (LS), dan *Collapse Prevention* (CP) dengan tingkat bahaya gempa yakni gempa sering, jarang, dan sangat jarang. Sejalan dengan hal tersebut, Fajfar (2000) menyatakan bahwa tujuan utama desain berbasis kinerja adalah memastikan struktur mencapai tingkat kinerja yang direncanakan ketika terpapar tingkat bahaya gempa tertentu. Dengan demikian, fokus perencanaan beralih dari pendekatan berbasis gaya menuju pendekatan berbasis perpindahan atau deformasi struktur.

3.3. Pembebanan Struktur

Penelitian ini memperhitungkan 3 jenis beban yang berdampak pada struktur yaitu beban mati, beban hidup, dan beban gempa dengan mengacu pada SNI 1727-2020.

3.3.1. Beban Mati

Menurut SNI 1727-2020, 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 dan struktural lainnya serta peralatan layan terpasang lain termasuk berat derek dan sistem pengangkut material. Rincian lebih detail mengenai komponen beban mati termasuk beban mati tambahan (SIDL) akan diuraikan pada Bab 5 tentang perhitungan komponen massa bangunan dan berat seismik efektif.

3.3.2. Beban Hidup

Menurut SNI 1727-2020, beban hidup adalah beban yang diakibatkan oleh pengguna dan penghuni bangunan gedung atau struktur lain yang tidak termasuk beban konstruksi dan beban lingkungan, seperti beban angin, beban hujan, beban gempa, beban banjir, atau beban mati. Untuk analisis, beban hidup yang digunakan disesuaikan dengan fungsi ruangan dan fungsi bangunan sebagai rumah sakit. Rincian lebih detail mengenai komponen beban hidup akan diuraikan pada Bab 5 tentang perhitungan komponen massa bangunan dan berat seismik efektif.

3.3.3. Beban Gempa

Beban gempa adalah beban dinamik yang bersifat sementara (tidak selalu ada pada struktur) dan bekerja dengan besaran yang berubah-ubah menurut waktu. Penelitian ini memperhitungkan beban gempa dari gempa rencana berdasarkan ketentuan dari SNI 1726-2019 yang menetapkan gempa rencana sebagai gempa dengan kemungkinan terlampaui besarnya sebesar 2% selama umur struktur bangunan 50 tahun. Penentuan beban gempa berdasarkan SNI 1726:2019 akan diuraikan lebih detail pada Bab 5.

3.3.4. Kombinasi Pembebanan

Load combination Adalah gabungan berbagai jenis beban seperti beban mati, beban hidup, dan beban gempa untuk mensimulasikan kondisi paling kritis yang mungkin dialami struktur, sehingga analisis mampu mencerminkan situasi nyata secara aman dan realistis. Berdasarkan SNI 1726:2019 untuk kombinasi pembebanan dengan metode ultimit yang digunakan sebagai berikut.

$$1. \quad 1,4D \quad (3.1)$$

$$2. \quad 1,2D + 1,6L \quad (3.2)$$

$$3. \quad 1,2D + E_v + E_h + L \quad (3.3)$$

$$4. \quad 0,9D - E_v + E_h \quad (3.4)$$

Dimana,

D = Beban mati sesuai subsubbab 3.3.1

L = Beban hidup sesuai subsubbab 3.3.2

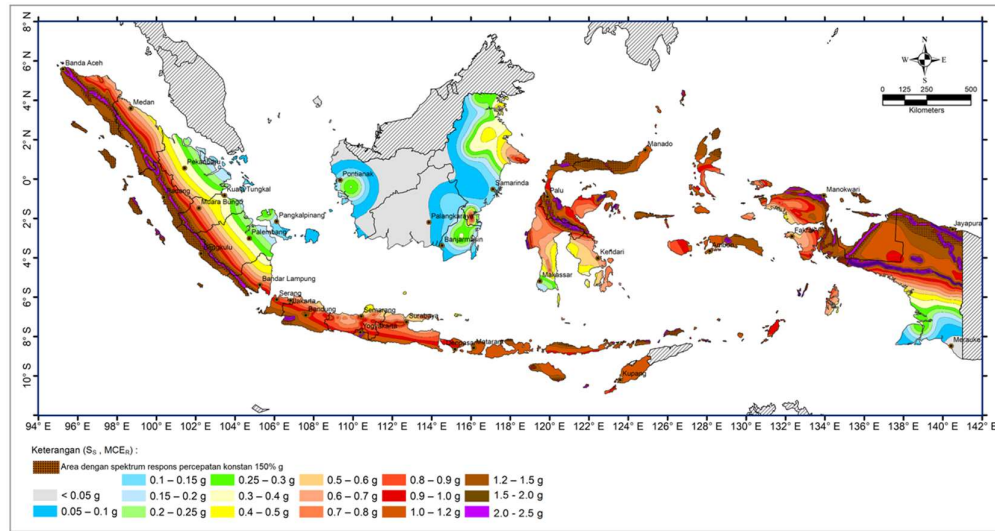
E = Beban gempa sesuai subsubbab 3.3.3 dan subbab 3.4

3.4. Ketentuan Perencanaan Beban Gempa Berdasarkan SNI 1726:2019

Dalam penelitian ini, salah satu acuan yang digunakan dalam perencanaan struktur bangunan gedung tahan gempa adalah SNI 1726-2019. Penjelasan mengenai ketentuan dalam perencanaan beban gempa dijelaskan sebagai berikut.

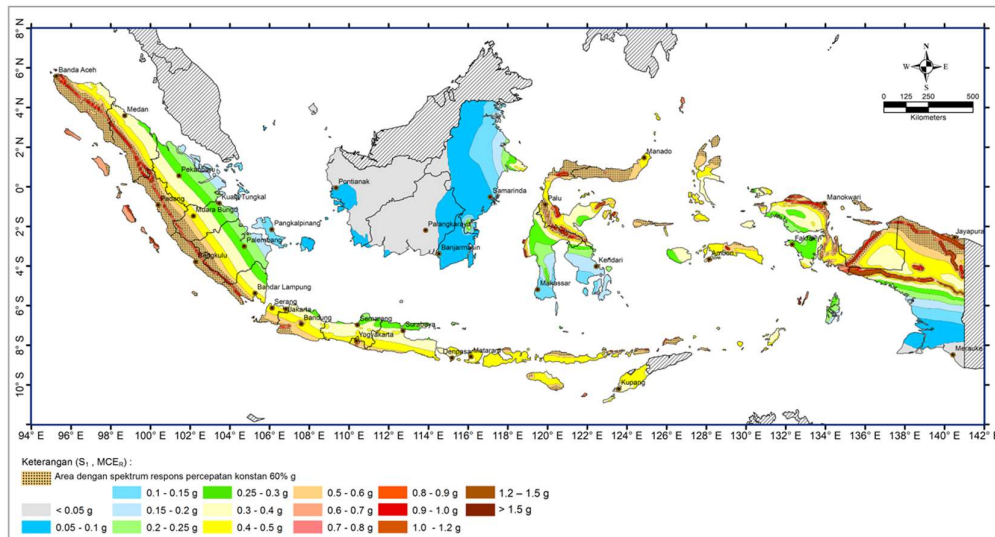
3.4.1. Penentuan Nilai Spektral Desain

Tahap awal respon spektral ditentukan sesuai lokasi tinjauan melalui peta gerak tanah seismik. Perbedaan karakteristik tanah dan kemungkinan terjadinya gempa pada setiap wilayah menyebabkan respon spektral untuk setiap daerah juga berbeda-beda. Diperlukan parameter S_s (percepatan batuan dasar pada periode pendek 0,2 detik) dan S_1 (percepatan batuan dasar pada periode 1 detik) yang nilainya dapat dilihat dari peta gerak tanah seismik pada SNI 1726-2019 seperti pada gambar 3.1 dan 3.2 berikut.



Gambar 3.1 Peta Gerak Tanah Seismik Untuk Spektrum Respon 0,2 Detik (S_s)

(Sumber : SNI 1726:2019, 2019)



Gambar 3.2 Peta Gerak Tanah Seismik Untuk Spektrum Respon 1,0 Detik (S_1)

(Sumber : SNI 1726:2019, 2019)

Berikutnya untuk respon spektral percepatan gempa di permukaan tanah ditentukan dengan faktor amplifikasi seismik yang meliputi faktor amplifikasi getaran terkait percepatan pada periode pendek 0,2 detik (F_a) dan faktor amplifikasi terkait percepatan yang mewakili getaran pada periode 1 detik (F_v). Nilai koefisien F_a dan F_v bisa diperoleh berdasarkan hubungan antara kelas situs dengan parameter respon spektral percepatan gempa (S_s dan S_1). Adapun klasifikasi situs menurut SNI 1726-2019 disajikan pada tabel 3.1 berikut.

Tabel 3.1 Klasifikasi Situs

Kelas Situs	$\bar{V}_s$ (m/detik)	$\bar{N}$ atau $\bar{N}_{ch}$	$\bar{S}_u$ (kPa)
SA (batuan keras)	>1500	-	-
SB (batuan)	750 sampai 1500	-	-
SC (tanah keras, sangat padat dan batuan lunak)	350 sampai 750	>50	≥ 100
SD (tanah sedang)	175 sampai 350	15 sampai 50	50 sampai 100
SE (tanah lunak)	<175	<15	<50
	Atau setiap profil tanah yang mengandung lebih dari 3m tanah dengan karakteristik sebagai berikut : 1. Indeks plastisitas, $PI > 20$ 2. Kadar air, $w > 40\%$ 3. Kuat geser niralir, $\bar{S}_u < 25$ kPa		
SF (tanah khusus, yang membutuhkan investigasi geoteknik spesifik dan analisis respons spesifik-situs)	Setiap profil pada lapisan tanah yang memiliki salah satu atau lebih dari karakteristik berikut : - Rawan dan berpotensi gagal atau runtuh akibat beban gempa seperti mudah likuifaksi, lempung sangat sensitif, tanah tersedimentasi lemah - Lempung sangat organik dan/atau gambut (ketebalan $H > 3m$) - Lempung berplastisitas sangat tinggi (ketebalan $H > 7,5$ m dengan indeks plastisitas $PI > 75$) Lapisan lempung lunak/setengah teguh dengan ketebalan $H > 35m$ dengan $\bar{S}_u < 50$ kPa		

Sumber : SNI 1726:2019 (2019)

Nilai koefisien situs F_a dan F_v berdasarkan hubungan respon spektral terpetakan dan kelas situsnya disajikan dalam tabel 3.2 dan tabel 3.3 berikut.

Tabel 3.2 Koefisien Situs F_a

Kelas Situs	Parameter respon spektral percepatan gempa maksimum yang dipertimbangkan risiko-tertarget (MCE_R) terpetakan pada periode pendek, $T=0,2$ detik, S_s					
	$S_s \leq 0,25$	$S_s = 0,5$	$S_s = 0,75$	$S_s = 1,0$	$S_s = 1,25$	$S_s \geq 1,5$
SA	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
SB	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9
SC	1,3	1,3	1,2	1,2	1,2	1,2
SD	1,6	1,4	1,2	1,1	1,0	1,0
SE	2,4	1,7	1,3	1,1	0,9	0,8
SF	$SS^{(a)}$					

Sumber : SNI 1726:2019 (2019)

Tabel 3.3 Koefisien Situs F_v

Kelas Situs	Parameter respon spektral percepatan gempa maksimum yang dipertimbangkan risiko-tertarget (MCE_R) terpetakan pada periode 1 detik, S_1					
	$S_1 \leq 0,25$	$S_1 = 0,5$	$S_1 = 0,75$	$S_1 = 1,0$	$S_1 = 1,25$	$S_1 \geq 1,5$
SA	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
SB	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
SC	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,4
SD	2,4	2,2	2,0	1,9	1,8	1,7
SE	4,2	3,3	2,8	2,4	2,2	2,0
SF	$SS^{(a)}$					

Sumber : SNI 1726:2019 (2019)

Parameter respon spektral percepatan pada periode pendek 0,2 detik (S_{MS}) dan periode 1 detik (S_{M1}) yang disesuaikan dengan pengaruh klasifikasi situs dapat diketahui menggunakan persamaan 3.5 dan 3.6 berikut.

$$S_{MS} = F_a \cdot S_s \quad (3.5)$$

$$S_{M1} = F_v \cdot S_1 \quad (3.6)$$

Keterangan :

S_{MS} = Spektral percepatan periode pendek 0,2 detik

S_{M1} = Spektral percepatan periode 1 detik

Beikutnya menghitung nilai parameter percepatan spektral desain yang akan digunakan untuk membuat respon spektrum desain menggunakan persamaan 3.7 dan 3.8 berikut.

$$S_{DS} = \frac{2}{3} \cdot S_{MS} \quad (3.7)$$

$$S_{D1} = \frac{2}{3} \cdot S_{M1} \quad (3.8)$$

Keterangan :

S_{DS} = Spektral percepatan desain periode pendek 0,2 detik

S_{D1} = Spektral percepatan desain periode 1 detik

3.4.2. Kategori Risiko Bangunan dan Faktor Keutamaan

Perencanaan beban gempa untuk bangunan gedung menggunakan gempa rencana yaitu gempa dengan kemungkinan terlampaui besarnya selama umur struktur 50 tahun adalah sebesar 2%. Pengaruh gempa rencana pada berbagai kategori resiko bangunan gedung harus dikalikan dengan faktor keutamaan gempa (I_e). Nilai faktor keutamaan dapat ditentukan berdasarkan kategori risiko bangunan yang dapat dilihat pada tabel 3.4 berikut.

Tabel 3.4 Kategori Risiko Bangunan Gedung Untuk Beban Gempa

Jenis Pemanfaatan	Kategori Risiko
Gedung dan nongedung yang memiliki risiko rendah terhadap jiwa manusia pada saat terjadi kegagalan, termasuk, tapi tidak dibatasi untuk, antara lain - Fasilitas pertanian, perkebunan, perternakan, dan perikanan - Fasilitas sementara - Gudang penyimpanan - Rumah jaga dan struktur kecil lainnya	I

Lanjutan Tabel 3.4 Kategori Risiko Bangunan Gedung Untuk Beban Gempa

Jenis Pemanfaatan	Kategori Risiko
Semua gedung dan struktur lain, kecuali yang termasuk dalam kategori risiko I,III,IV, termasuk, tapi tidak dibatasi untuk: - Perumahan - Rumah toko dan rumah kantor - Pasar - Gedung perkantoran - Gedung apartemen/ rumah susun - Pusat perbelanjaan/ mall - Bangunan industri - Fasilitas manufaktur - Pabrik	II
Gedung dan nongedung yang memiliki risiko tinggi terhadap jiwa manusia pada saat terjadi kegagalan, termasuk, tapi tidak dibatasi untuk: - Bioskop - Gedung pertemuan - Stadion - Fasilitas kesehatan yang tidak memiliki unit bedah dan unit gawat darurat - Fasilitas penitipan anak - Penjara - Bangunan untuk orang jompo Gedung dan nongedung, tidak termasuk kedalam kategori risiko IV, yang memiliki potensi untuk menyebabkan dampak ekonomi yang besar dan/atau gangguan massal terhadap kehidupan masyarakat sehari-hari bila terjadi kegagalan, termasuk, tapi tidak dibatasi untuk: - Pusat pembangkit listrik biasa - Fasilitas penanganan air - Fasilitas penanganan limbah - Pusat telekomunikasi Gedung dan nongedung yang tidak termasuk dalam kategori risiko IV, (termasuk, tetapi tidak dibatasi untuk fasilitas manufaktur, proses, penanganan, penyimpanan, penggunaan atau tempat pembuangan bahan bakar berbahaya, bahan kimia berbahaya, limbah berbahaya, atau bahan yang mudah meledak) yang mengandung bahan beracun atau peledak di mana jumlah kandungan bahannya melebihi nilai batas yang disyaratkan oleh instansi yang berwenang dan cukup menimbulkan bahaya bagi masyarakat jika terjadi kebocoran.	III

Lanjutan Tabel 3.4 Kategori Risiko Bangunan Gedung Untuk Beban Gempa

Gedung dan nongedung yang dikategorikan sebagai fasilitas yang penting, termasuk, tetapi tidak dibatasi untuk: - Bangunan-bangunan monumental - Gedung sekolah dan fasilitas pendidikan - Rumah ibadah - Rumah sakit dan fasilitas kesehatan lainnya yang memiliki fasilitas bedah dan unit gawat darurat - Fasilitas pemadam kebakaran, ambulans, dan kantor polisi, serta garasi kendaraan darurat - Tempat perlindungan terhadap gempa bumi, tsunami, angin badai, dan tempat perlindungan darurat lainnya - Fasilitas kesiapan darurat, komunikasi, pusat operasi dan fasilitas lainnya untuk tanggap darurat - Pusat pembangkit energi dan fasilitas publik lainnya yang dibutuhkan pada saat keadaan darurat - Struktur tambahan (termasuk menara telekomunikasi, tangki penyimpanan bahan bakar, menara pendingin, struktur stasiun listrik, tangki air pemadam kebakaran atau struktur rumah atau struktur pendukung air atau material atau peralatan pemadam kebakaran) yang disyaratkan untuk beroperasi pada saat keadaan darurat Gedung dan nongedung yang dibutuhkan untuk mempertahankan fungsi struktur bangunan lain yang masuk ke dalam kategori risiko IV.	IV
--	----

Sumber : SNI 1726:2019 (2019)

Berikutnya faktor keutamaan gempa ditentukan berdasarkan kategori risiko bangunan sebelumnya pada tabel 3.4. Faktor keutamaan adalah suatu faktor yang memperhitungkan tingkat risiko terhadap keselamatan jiwa, kesehatan, dan kesejahteraan terkait kerusakan atau kehilangan fungsi bangunan. Nilai faktor keutamaan (I_e) akan digunakan sebagai faktor pengali dalam perhitungan beban gempa. Nilai faktor keutamaan gempa dapat dilihat pada tabel 3.5 dibawah ini.

Tabel 3.5 Faktor Keutamaan Gempa

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

3.4.3. Kategori Desain Seismik

Struktur harus ditetapkan memiliki suatu Kategori Desain Seismik (KDS) sesuai SNI 1726-2019 pasal 6.5. Ketentuan yang ditetapkan pada pasal tersebut terkait kategori desain seismik sebagai berikut :

1. Struktur dengan kategori resiko I, II, atau III dengan $S_1 \geq 0,75$ ditetapkan sebagai struktur dengan kategori desain seismik E.
2. Struktur dengan kategori resiko IV dengan $S_1 \geq 0,75$ ditetapkan sebagai struktur dengan kategori desain seismik F.

Selain dari ketentuan diatas, kategori desain seismik untuk struktur lainnya dapat ditentukan berdasarkan kategori resiko bangunan dengan nilai respon spektral percepatan desainnya (S_{DS} dan S_{D1}) seperti yang dapat dilihat pada tabel 3.6 dan tabel 3.7 berikut ini.

Tabel 3.6 Kategori Desain Seismik Berdasarkan Parameter S_{DS}

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

Sumber : SNI 1726:2019 (2019)

Tabel 3.7 Kategori Desain Seismik Berdasarkan Parameter S_{D1}

Nilai S_{D1}	Kategori Resiko	
	I atau II atau III	IV
$S_{D1} < 0,067$	A	A
$0,067 \leq S_{D1} < 0,133$	B	C
$0,133 \leq S_{D1} < 0,20$	C	D
$0,20 \leq S_{D1}$	D	D

Sumber : SNI 1726:2019 (2019)

3.4.4. Periode Fundamental Struktur

Periode fundamental struktur (T) adalah waktu yang diperlukan untuk menempuh satu putaran lengkap dari suatu getaran ketika terganggu dari posisi keseimbangan statis hingga kembali ke posisi aslinya yang bergantung pada massa dan kekakuan tanpa dipengaruhi oleh gaya luar.

Untuk menghitung nilai periode fundamental pendekatan (T_a) dibutuhkan parameter periode pendekatan C_t dan x berdasarkan tipe struktur yang digunakan. Nilai parameter C_t dan x dapat dilihat pada tabel 3.8 berikut.

Tabel 3.8 Parameter Periode Pendekatan C_t dan x

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

Sumber : SNI 1726:2019 (2019)

Demikian nilai periode fundamental pendekatan (T_a) dalam detik dapat dihitung dengan persamaan 3.9 berikut.

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

Dengan :

h_n = Ketinggian struktur diatas dasar sampai tingkat tertinggi struktur (m)

Pada struktur yang memiliki ketinggian tidak lebih dari 12 tingkat (≤ 12 tingkat) dengan sistem pemikul gaya seismiknya terdiri dari rangka pemikul momen yang seluruhnya beton atau seluruhnya baja dan rata-rata tinggi tingkatnya minimal 3m, maka periode fundamental pendekatan (T_a) dalam detik dibolehkan menggunakan alternatif persamaan 3.10 berikut.

$$T_a = 0,1 \cdot N \quad (3.10)$$

Dengan :

N = Jumlah tingkat struktur

Periode fundamental (T) tidak boleh melebihi hasil perkalian antara periode fundamental pendekatan (T_a) dengan koefisien batas atas (C_u). Nilai koefisien batas atas dapat dilihat pada tabel 3.9 berikut.

Tabel 3.9 Koefisien Batas Atas Periode Yang Dihitung

Parameter percepatan respon 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 1726:2019 (2019)

Dengan demikian, dapat ditentukan nilai periode pendekatan maksimum (T_{max}) dalam detik dengan persamaan 3.11 berikut.

$$T_{max} = T_a \cdot C_u \quad (3.11)$$

Untuk mendapatkan nilai periode getar dengan metode yang lebih akurat, dapat dilakukan permodelan struktur menggunakan *software* analisis seperti SAP2000 atau ETABS. Output yang dihasilkan adalah nilai periode getar hasil

analisis komputer (T_C) yang akan dibandingkan dengan nilai periode fundamental pendekatan (T_a) dan nilai periode pendekatan maksimum (T_{max}) dengan mengikuti persyaratan berikut :

Jika $T_C > T_{max}$, maka $T = T_{max}$

Jika $T_a < T_C < T_{max}$, maka $T = T_C$

Jika $T_C < T_a$, maka $T = T_a$

Dimana :

T = Periode getar fundamental struktur yang digunakan (detik)

3.4.5. Koefisien Respon Seismik

Perhitungan koefisien respon seismik membutuhkan faktor penting yaitu koefisien modifikasi respon (R) yang disesuaikan dengan sistem pemikul gaya gempa untuk struktur yang didesain. Nilai faktor R bersama dengan faktor kuat lebih sistem (Ω_0), dan faktor pembesaran defleksi (C_d) dapat dilihat pada tabel 3.10 dibawah ini.

Tabel 3.10 Faktor R , Ω_0 , dan C_d Untuk Sistem Pemikul Gaya Gempa

Sistem Pemikul Gaya Seismik	Koefisien Modifikasi Respon, R	Faktor Kuat Lebih Sistem, Ω_0	Faktor Pembesaran Defleksi, C_d
C. Sistem Rangka Pemikul Momen			
5.Rangka beton bertulang pemikul momen khusus	8	3	$5\frac{1}{2}$
6.Rangka beton bertulang pemikul momen menengah	5	3	$4\frac{1}{2}$
7.Rangka beton bertulang pemikul momen biasa	3	3	$2\frac{1}{2}$
D. Sistem Ganda Dengan Rangka Pemikul Momen Khusus yang Mampu Menahan Paling Sedikit 25% Gaya Seismik yang Ditetapkan			
3. Dinding geser beton bertulang khusus	7	$2\frac{1}{2}$	$5\frac{1}{2}$
4. Dinding geser beton bertulang biasa	6	$2\frac{1}{2}$	5

Dengan faktor modifikasi respon (R), maka nilai koefisien respon seismik dapat dihitung dengan persamaan 3.12 berikut.

$$C_S = \frac{S_{DS}}{\left(\frac{R}{I_e}\right)} \quad (3.12)$$

Nilai C_S yang dihitung berdasarkan persamaan 3.8 maksimum/tidak melebihi nilai C_S berdasarkan persamaan berikut ini.

$$\text{Untuk } T \leq T_L, C_{S \text{ maks}} = \frac{S_{D1}}{T \left(\frac{R}{I_e}\right)} \quad (3.13)$$

$$\text{Untuk } T > T_L, C_{S \text{ maks}} = \frac{S_{D1} T_L}{T^2 \left(\frac{R}{I_e}\right)} \quad (3.14)$$

Serta minimum/tidak kurang dari nilai C_S berdasarkan persamaan 3.15 berikut ini.

$$C_{S \text{ min}} = 0,044 S_{DS} I_e \geq 0,01 \quad (3.15)$$

Serta untuk struktur dengan nilai $S_1 \geq 0,6g$, maka C_S harus tidak kurang dari persamaan 3.16 berikut ini.

$$C_{S \text{ min}} = \frac{0,5 S_1}{\left(\frac{R}{I_e}\right)} \quad (3.16)$$

Keterangan :

C_S = Koefisien respon seismik ($C_{S \text{ min}} \leq C_S \leq C_{S \text{ maks}}$)

S_{DS} = Spektral percepatan desain periode pendek 0,2 detik

S_{D1} = Spektral percepatan desain periode 1 detik

S_1 = Respon spektral terpetakan periode 1 detik

R = Koefisien modifikasi respon

I_e = Faktor keutamaan gempa

T = Periode fundamental struktur (detik)

3.4.6. Gaya Gempa Lateral Ekuivalen

Gaya lateral yang dihitung mencakup gaya-gaya berikut ini.

1. Gaya Geser Dasar Seismik

Gaya geser dasar seismik (V) dalam arah x atau y dapat dihitung dengan persamaan 3.17 berikut.

$$V = C_s \cdot W \quad (3.17)$$

Dimana :

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

C_s = Koefisien respon seismik yang digunakan

W = Berat bangunan total

2. Gaya Seismik Lateral `

Untuk menghitung gaya seismik lateral (F_x) diperlukan suatu parameter yaitu faktor distribusi vertikal yang ditentukan dengan persamaan berikut.

$$C_{vx} = \frac{W_x h_x^k}{\sum_{i=1}^n W_i h_i^k} \quad (3.18)$$

Dimana :

W_x dan W_i = Berat seismik efektif total struktur pada tingkat i atau x

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

k = Eksponen periode struktur,

dengan syarat nilai k :

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

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

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

Sehingga nilai gaya seismik lateral (F_x) di sebarang tingkat dapat ditentukan dengan persamaan 3.19 berikut.

$$F_x = C_{vx} \cdot V \quad (3.19)$$

3.5. Respon Spektrum Desain

Pada SNI 1726-2019 disebutkan apabila spektrum respon dibutuhkan dan prosedur gerak tanah dari spesifik-situs tidak digunakan, maka kurva spektrum respon desain harus dikembangkan dengan mengikuti ketentuan berikut.

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

$$S_a = S_{DS} \left(0,4 + 0,6 \frac{T}{T_0} \right) \quad (3.20)$$

2. Untuk periode lebih besar dari atau sama dengan T_0 dan lebih kecil dari atau sama dengan T_s , spektrum respon percepatan desain S_a sama dengan S_{DS} .
3. Untuk periode lebih besar dari T_s tetapi lebih kecil dari atau sama dengan T_L , respon spektrum percepatan desain diambil berdasarkan persamaan;

$$S_a = \frac{S_{D1}}{T} \quad (3.21)$$

4. Untuk periode lebih besar dari T_L , respon spektrum percepatan desain S_a diambil berdasarkan persamaan;

$$S_a = \frac{S_{D1} \cdot T_L}{T^2} \quad (3.22)$$

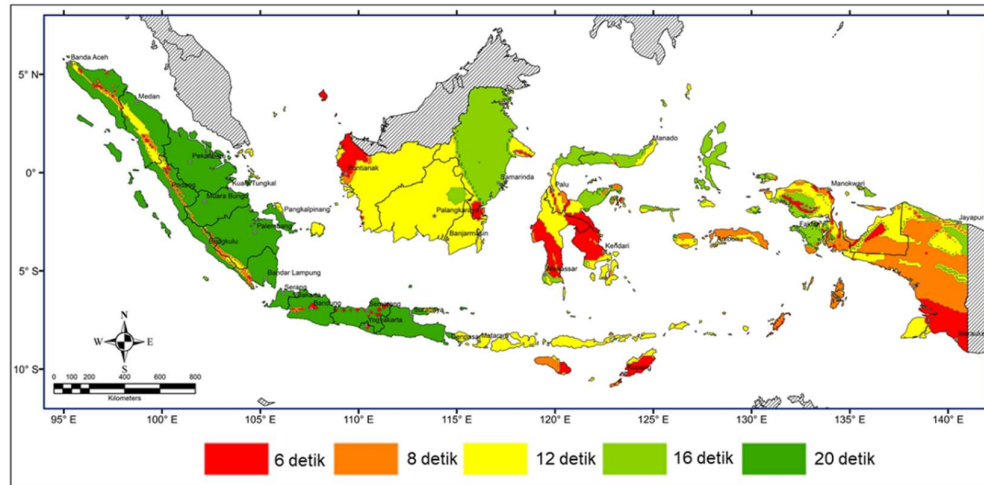
5. Periode puncak awal (T_0) ditentukan dengan persamaan berikut ini.

$$T_0 = 0,2 \frac{S_{D1}}{S_{DS}} \quad (3.23)$$

6. Periode puncak akhir (T_s) ditentukan dengan persamaan berikut ini.

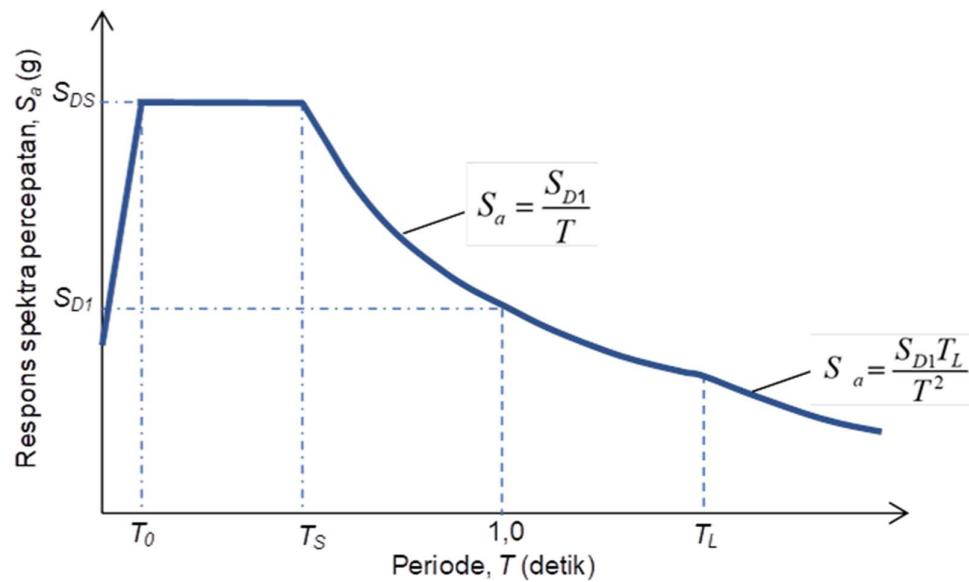
$$T_s = \frac{S_{D1}}{S_{DS}} \quad (3.24)$$

7. Transisi periode panjang (T_L) diambil nilainya berdasarkan T_L terpetakan untuk wilayah indonesia seperti yang ditunjukkan pada gambar 3.3 berikut.



Gambar 3.3 Peta Transisi Periode Panjang (T_L)

(Sumber : SNI 1726-2019, 2019)



Gambar 3.4 Spektrum Respons Desain

(Sumber : SNI 1726-2019, 2019)

3.6. Analisis Statik Nonlinier *Pushover*

Untuk mengimplementasikan konsep berbasis kinerja, berbagai metode analisis nonlinier dikembangkan guna memodelkan perilaku struktur secara lebih realistis hingga mencapai kondisi kerusakan. Panduan dari *Federal Emergency Management Agency* (FEMA), seperti FEMA 273/274 (1997) dan penyempurnaannya, FEMA 356 (2000), menjadi referensi penting dalam penerapan PBSE. Dokumen-dokumen ini memperkenalkan *Nonlinear Static* (Pushover) *Analysis* sebagai alat sederhana namun efektif untuk menentukan kapasitas seismik bangunan.

Analisis pushover adalah suatu analisis statik non-linier dengan asumsi pengaruh gempa rencana terhadap struktur bangunan gedung dianggap sebagai beban-beban statik yang bekerja pada pusat massa masing-masing lantai yang nilainya ditingkatkan secara berangsur-angsur sampai melampaui pembebanan yang menyebabkan terjadinya pelelehan (sendi plastis) pertama pada elemen struktur, kemudian dengan peningkatan beban lebih lanjut mengalami perubahan bentuk pasca-elastik yang besar sampai mencapai kondisi plastik. Outputnya berupa kurva kapasitas (*capacity spectrum*) yang menggambarkan hubungan antara gaya geser dasar dan perpindahan atap bangunan (Chopra dan Goel, 2001).

Menurut ATC-40:8-5 ada beberapa tingkatan/level dalam melakukan analisis *pushover* berdasarkan karakteristik bangunannya, yaitu :

1. Level 1. Memberikan satu beban horizontal terpusat di bagian atap bangunan. Level ini biasa diaplikasikan pada bangunan 1 lantai.
2. Level 2. Memberikan beban lateral pada setiap lantai yang sebanding dengan prosedur tanpa beban terpusat di atap bangunan. Level ini dapat diaplikasikan pada bangunan yang memiliki lebih dari 1 lantai.
3. Level 3. Memberikan beban lateral yang sebanding dengan hasil perkalian antara massa lantai dengan *mode shape* pertama dari model elastis struktur. Kurva kapasitas pada umumnya mewakili respon *mode shape* pertama dari struktur dengan asumsi bahwa mode fundamental getaran adalah respon dominan dari struktur. Hal ini berlaku untuk bangunan dengan periode fundamental hingga ± 1 detik.

4. Level 4. Sama seperti level 3 hingga terjadi kondisi leleh pertama, untuk setiap peningkatan di luar leleh maka beban disesuaikan agar konsisten dengan defleksi. Level ini dapat diperuntukkan untuk bangunan dengan tingkat lemah (*weak story*).
5. Level 5. Serupa dengan level 3 dan 4, tetapi menyertakan efek dari mode getaran yang lebih tinggi dalam menentukan kondisi leleh pada setiap elemen struktur. Level ini dapat diperuntukkan untuk bangunan tinggi atau bangunan dengan ketidakberaturan yang menyebabkan pengaruh signifikan dari mode getaran selain mode fundamental.

Dalam tugas akhir ini analisis *pushover* yang dilakukan sesuai dengan level 4 pada kondisi diatas dimana struktur menerima beban secara bertahap hingga mengalami leleh pertama (*first yield*) pada elemen strukturnya.

3.7. Metode *Capacity Spectrum* ATC-40

Metode spektrum kapasitas adalah sebuah metode analisis statik non-linear yang memberikan representasi terhadap kinerja seismik yang diharapkan (*performance point*) dari sebuah struktur bangunan dari perpotongan antara spektrum kapasitas (*capacity spectrum*) dengan respon spektrum (*demand spectrum*). Outputnya berupa level kinerja dan nilai T_{eff} , B_{eff} .

Dalam ATC-40 volume 1 terdapat tiga prosedur untuk menghitung spektrum kapasitas yaitu prosedur A, B, dan C. Pada tugas akhir ini tahapan analisis dilakukan berdasarkan prosedur B menggunakan analisis *pushover* dengan pertimbangan bahwa prosedur ini sudah *built-in* dalam program SAP2000 sehingga akan memudahkan dalam analisis. Dalam prosedur ini juga didapatkan urutan terjadinya sendi plastis pada struktur yang berguna untuk mengetahui bagian mana saja pada struktur yang rentan dan perlu perhatian lebih.

Beberapa hal yang perlu diketahui terkait prosedur ini menurut ATC-40 sebagai berikut :

1. Metode yang digunakan berupa analisis
2. Asumsi yang digunakan lebih sederhana dari prosedur A (tetapi hasilnya tidak selalu akurat)
3. Metode yang mudah jika menggunakan lembar pemrograman
4. Penerapannya cukup jelas
5. Dibutuhkan pemahaman mendalam terkait asumsi yang digunakan.

Output yang dihasilkan dari metode ini adalah titik kinerja (*performance point*) untuk *base shear* dan *displacement* ($S_a - S_d$).

3.7.1. Spektrum Permintaan (*Demand Spectrum*) Format ADRS

Demand atau permintaan merepresentasikan pergerakan tanah selama gempa yang mempengaruhi struktur bangunan. Pergerakan ini menghasilkan pola perpindahan horizontal yang kompleks pada struktur yang dapat berbeda seiring waktu. Pada analisis non-linear, *demand* digambarkan sebagai estimasi perpindahan atau deformasi yang diharapkan terjadi pada struktur dengan menggunakan total perpindahan lateral sebagai kondisi desain.

Untuk memperoleh titik kinerja, maka diperlukan spektrum permintaan (*demand spectrum*) yang diperoleh dari konversi kurva respon spektrum. Konversi kurva respon spektrum ke format ADRS (*Acceleration-Displacement Response Spectra*) dilakukan dengan menggunakan persamaan berikut.

$$S_d = \frac{T_i^2}{4\pi^2} \cdot S_{a_i} \cdot g \quad (3.25)$$

Atau,

$$T_i = 2\pi \sqrt{\frac{S_{d_i}}{S_{a_i}}} \quad (3.26)$$

Dimana :

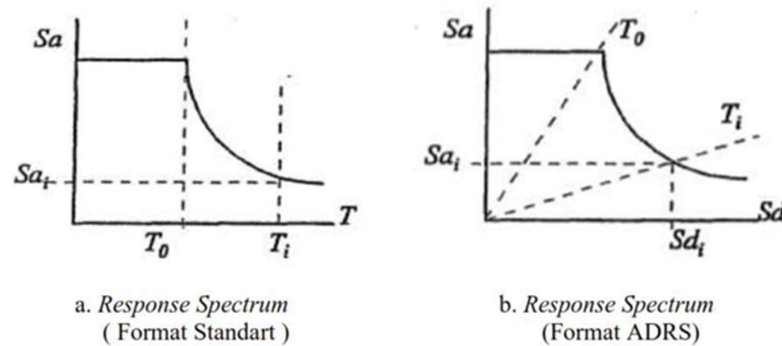
S_{a_i} = Spektral percepatan periode ke-I (g)

S_{d_i} = Spektral perpindahan periode ke-I (m)

T = Periode fundamental (detik)

g = Percepatan gravitasi

Berikut dapat dilihat konversi dari kurva respon spektrum (S_a vs T) menjadi format ADRS (S_a vs S_d) pada gambar 3.5 dibawah ini.

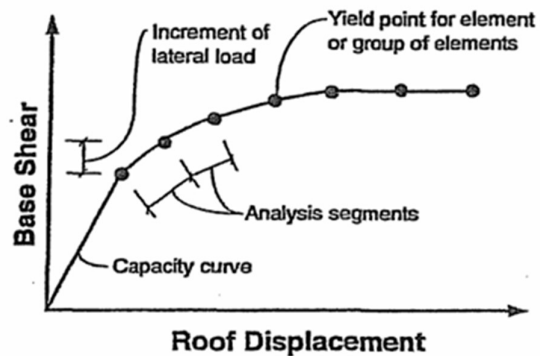


Gambar 3.5 Konversi Kurva Respon Spektrum Format ADRS

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

3.7.2. Spektrum Kapasitas (*Capacity Spectrum*) Format ADRS

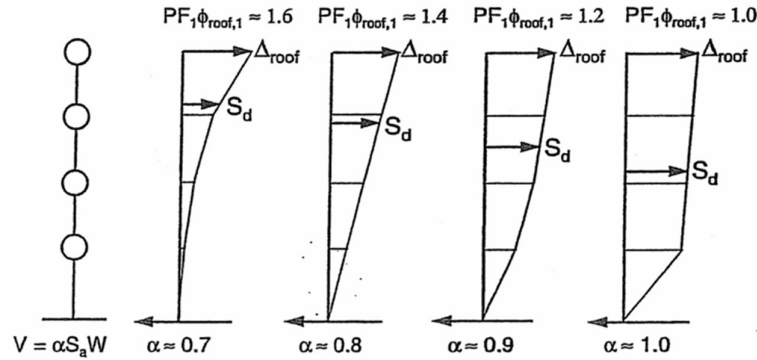
Kurva kapasitas menerangkan tentang hubungan antara base shear dan roof displacement yang diperoleh dari analisis pushover. Untuk lebih jelasnya mengenai kurva kapasitas dapat dilihat pada gambar 3.6 berikut.



Gambar 3.6 Kurva Kapasitas (*Capacity Curve*)

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

Sebelum mengkonversi kurva kapasitas ke dalam format ADRS untuk menjadi spektrum kapasitas maka terlebih dahulu dipahami tentang hubungan faktor partisipasi modal, modal koefisien massa, dan perpindahan bangunan. Hubungan ini dapat dilihat pada gambar 3.7 berikut.



Gambar 3.7 Faktor Partisipasi Modal dan Modal Koefisien Massa

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

Pada Gambar 3.7 dapat dilihat 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) melalui persamaan berikut.

$$PF_1 = \left[\frac{\sum_{i=1}^N (W_i \phi_{i1}) / g}{\sum_{i=1}^N (W_i \phi_{i1}^2) / g} \right] \quad (3.27)$$

$$\alpha_1 = \frac{[\sum_{i=1}^N (W_i \phi_{i1}) / g]^2}{[\sum_{i=1}^N W_i / g] [\sum_{i=1}^N (W_i \phi_{i1}^2) / g]} \quad (3.28)$$

Dimana,

PF_1 = Faktor partisipasi modal pada mode pertama

α_1 = Modal koefisien massa pada mode pertama

ϕ_{i1} = Amplitudo mode-1 pada tingkat ke-i

w_i/g = Massa pada tingkat ke-i

Berikutnya untuk meakukan konversi dari kurva kapasitas (*pushover curve*) ke spektrum kapasitas ADRS (*capacity spectrum*) maka setiap titik pada kurva (V dan Δr) dikonversi menggunakan persamaan berikut :

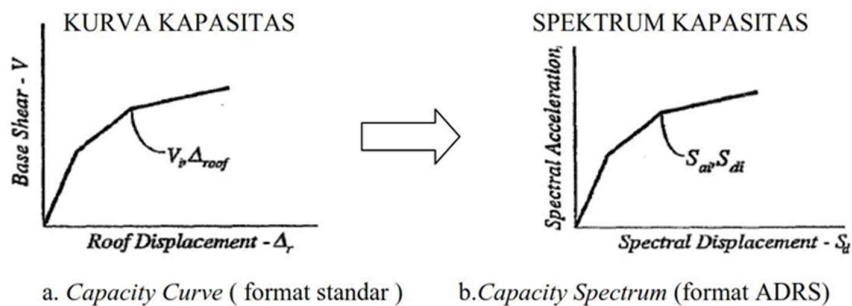
$$S_a = \frac{V/W}{\alpha_1} \quad (3.29)$$

$$S_d = \frac{\Delta r}{PF_1 \theta_1} \quad (3.30)$$

Dimana,

S_a = *Spectral Acceleration* (g)

S_d = *Spectral Displacement* (m)

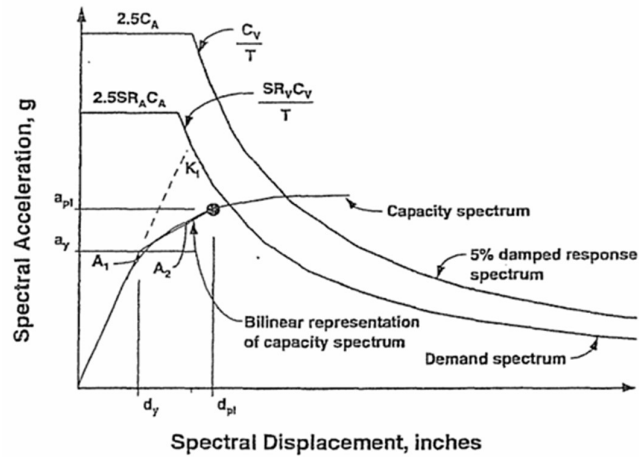


Gambar 3.8 Koversi Kurva Kapasitas ke Format ADRS (*Capacity Spectrum*)

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

3.7.3. Titik Kinerja (*Performance Point*)

Output dari analisis dengan metode ini adalah diperolehnya titik kinerja (*Performance Point*) dari perpotongan antara spektrum permintaan (*demand spectrum*) dengan spektrum kapasitas (*capacity spectrum*) seperti pada gambar 3.9 berikut.



Gambar 3.9 Perpotongan Demand Spectrum Dengan Capacity Spectrum

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

Untuk mengetahui letak titik kinerja ini diperlukan beberapa parameter yang diinput pada program yaitu sebagai berikut.

1. Parameter C_A dan C_V

Parameter ini merupakan konversi dari respon percepatan periode 0,2 detik (S_{MS}) dan periode 1,0 detik (S_{M1}). ATC-40 pasal 4.4.3.1 memberikan persamaan sebagai berikut.

$$C_A = 0,4S_{MS} \quad (3.31)$$

$$C_V = S_{M1} \quad (3.32)$$

Dimana,

S_{MS} = Spektral percepatan periode pendek 0,2 detik

S_{M1} = Spektral percepatan periode 1,0 detik

2. Tipe Perilaku Struktur (*Structural Behaviour Type*)

Parameter ini ditentukan sesuai peruntukan bangunan apakah tergolong bangunan baru atau tidak. Pengelompokan ini dapat dilihat pada Tabel 3.11 berikut.

Tabel 3.11 Structural Behaviour Type

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

Sumber : Tavo dan Wijaya (2018)

3. Tingkat Redaman (*Damping Parameter*)

Redaman yang terjadi pada struktur ketika gempa pada kondisi inelastik dapat diketahui dari redaman *viscous* yang melekat pada struktur dan redaman histeretik. Nilai redaman histeretik ini dapat mewakili redaman *viscous* ekuivalen. Redaman *viscous* ekuivalen yang terjadi pada struktur dapat ditentukan dengan persamaan berikut.

$$\beta_{eq} = \beta_0 + 0,05 \quad (3.33)$$

Dimana,

β_{eq} = Redaman viscous ekuivalen

β_0 = Redaman histeretik yang mewakili redaman viscous ekuivalen

0,05 = Redaman awal yang melekat pada struktur (*inherent damping*)

Pada program SAP2000 nilai redaman *viscous* ekuivalen ini akan dihitung otomatis oleh program sehingga parameter yang diinput hanya redaman awal yang melekat pada struktur (*inherent damping*) sebesar 5%.

Perpotongan dari kedua spektrum ini merepresentasikan dua kondisi, yaitu :

1. Dari sisi spektrum kapasitas, *performance point* mewakili kekuatan struktur pada nilai *displacement* tertentu hingga mencapai *displacement* maksimum.
2. Dari sisi spektrum *demand*, *performance point* menunjukkan bahwa struktur mampu menerima beban sesuai dengan yang diharapkan.

3.8. Level Kinerja Struktur Menurut ATC-40

Level kinerja bangunan dapat ditentukan berdasarkan nilai *drift ratio* maksimum pada saat tercapai *displacement* maksimum (δ_t). Pada analisis metode spektrum kapasitas, nilai *displacement* (δ_t) diperoleh ketika struktur mencapai titik kinerja (*performance point*). Nilai *drift ratio* maksimum dapat dihitung dengan persamaan berikut.

$$\text{Drift ratio maksimum total} = \frac{\delta_t}{H} \quad (3.34)$$

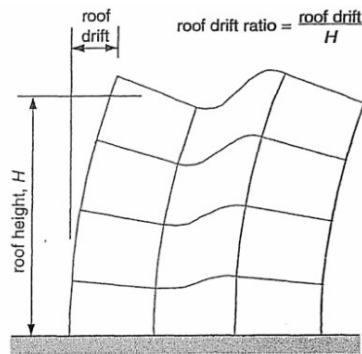
$$\text{Drift ratio inelastik maksimum} = \frac{\delta_t - \delta_1}{H} \quad (3.35)$$

Dimana :

δ_t = *Displacement* pada saat *performance point* (m)

δ_1 = *Displacement* saat terjadi leleh pertama (m)

H = Tinggi bangunan (m)



Gambar 3.10 Roof Drift dan Roof Drift Ratio

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

ATC-40 tabel 11-2 dalam subbab 11.3 memberikan batasan untuk deformasi lateral yang terjadi pada saat tercapainya *performance point* berdasarkan nilai *drift* dan *inelastic drift* maksimum. Nilai ini dapat digunakan untuk menentukan level kinerja pada struktur bangunan. Adapun batasan untuk deformasi menurut ATC-40 dapat dilihat pada Tabel 3.12 berikut.

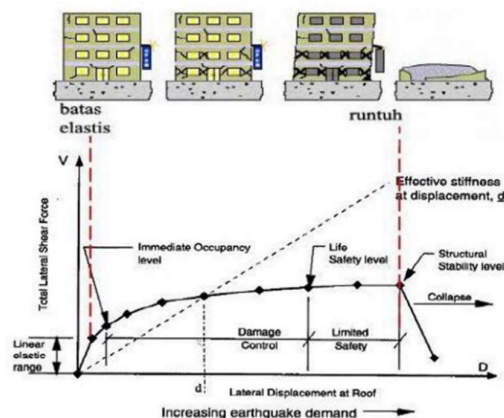
Tabel 3.12 Batasan Deformasi dan Level Kinerja

Parameter	Performance Level			
	Immediate Occupancy	Damage Control	Life Safety	Structural Stability
Maximum Total Drift	0,01	0,01 to 0,02	0,02	$0,33 \frac{V_i}{P_i}$
Maximum Inelastic Drift	0,005	0,005 to 0,015	no limit	no limit

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

Penjelasan mengenai masing-masing level kinerja tersebut sebagai berikut :

1. *Immediate Occupancy* (IO), setelah terjadi gempa bangunan masih aman dan kerusakan pada struktur tidak berarti.
2. *Damage Control* (DC), struktur bangunan masih mampu menahan gempa dengan beberapa kerusakan kecil yang masih dapat diperbaiki.
3. *Life Safety* (LS), Bangunan mengalami kerusakan tetapi tidak diperkenankan mengalami keruntuhan yang menyebabkan korban jiwa. Setelah terjadi gempa maka bangunan dapat berfungsi kembali setelah dilakukan perbaikan.
4. *Structural Stability* (SS), struktur setelah terjadi gempa mengalami kerusakan parah. Komponen struktur penahan beban gravitasi masih bekerja meskipun keseluruhan kestabilan sudah diambang keruntuhan sebagian atau seluruhnya.



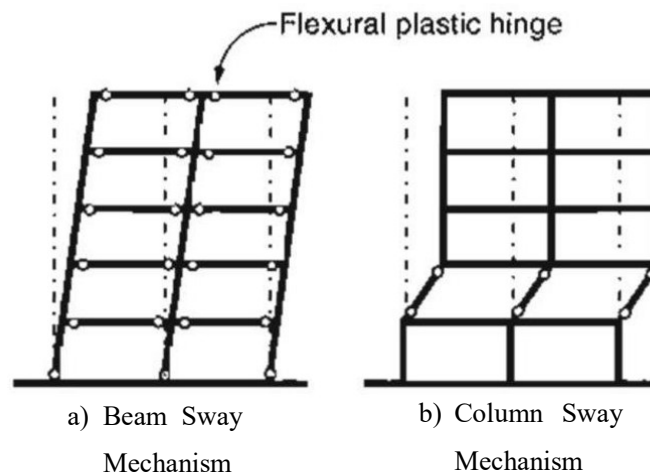
Gambar 3.11 Ilustrasi Level Kinerja Bangunan

3.9. Sendi Plastis (*Hinge*)

Sendi plastis adalah apabila kuat leleh pada suatu titik dalam suatu elemen telah tercapai/terlampaui sehingga kekuatannya sudah tidak bertambah tetapi regangan dapat bertambah, untuk seterusnya di titik tersebut dinamakan sendi plastis karena elemen telah mencapai tegangan atau regangan plastis. (Widodo, 2012)

Sendi plastis merupakan bentuk ketidakmampuan elemen struktur (balok dan kolom) menahan gaya dalam yang bekerja hingga melampaui kemampuan elastik elemen tersebut. Seperti dijelaskan sebelumnya, sendi plastis terjadi ketika struktur menerima beban gempa pada tingkatan/kondisi tertentu yang menimbulkan momen dengan besaran melebihi momen leleh balok atau kolom.

Letak sendi plastis kemudian dikaitkan dengan pola keruntuhan yaitu *column sway mechanism* dan *beam sway mechanism*. Perencanaan suatu bangunan harus sesuai dengan konsep desain “*strong column weak beam*” atau SCWB. Pada konsep ini balok sengaja dibuat sedikit lebih lemah dari kolom. Oleh karena itu ketika terjadi gempa dan level beban terlampaui maka sendi plastis akan terjadi pada ujung-ujung balok dan ujung awal kolom tingkat dasar, menyebabkan struktur akan bergoyang menurut *beam sway mechanism* (gambar 3.12a).



Gambar 3.12 Sway Mechanism for Beam (a) and Column (b)

Ditempat terjadinya sendi plastis tersebut perlu didesain dan dipasang tulangan dengan baik agar menjadi elemen yang daktil. Dengan sifat daktil maka elemen dan struktur akan mampu bertahan pada deformasi inelastik yang besar tanpa adanya penurunan kekuatan yang berarti. Sehingga apabila terjadi gempa yang cukup besar, struktur akan mengalami kerusakan tetapi tidak sampai runtuh total. Dengan konsep SCWB, maka yang runtuh adalah baloknya dahulu. Apabila kolomnya runtuh dahulu, maka struktur akan langsung hancur.

Paulay dan Priestley (1992) konsep sendi plastis untuk desain kapasitas sebagai berikut :

1. Tempat-tempat kemungkinan terjadinya sendi plastis telah ditentukan sejak awal. Hal ini diawali dengan penentuan mekanisme goyangan (*sway mechanism*) dengan struktur yang didesain menurut konsep SCWB.
2. Tempat-tempat terjadinya sendi plastis jangan sampai bersifat getas, tetapi didesain dengan tulangan lentur dan geser sedemikian rupa sehingga menjadi daktil. Join antara balok dan kolom juga didesain sedemikian rupa agar masih dalam kondisi elastik.

BAB IV METODE PENELITIAN

4.1. Objek Penelitian

Objek penelitian ini adalah gedung rumah sakit yang berlokasi di Kabupaten Karawang, Jawa Barat. Bangunan terdiri dari 6 lantai utama dengan bentuk denah L (*L-shape*). Tinggi total bangunan adalah 30 meter dari tanah dasar. Berikut merupakan tampilan dari bangunan ini dapat dilihat pada Gambar 4.1.



Gambar 4.1 Tampilan Bangunan Eksisting

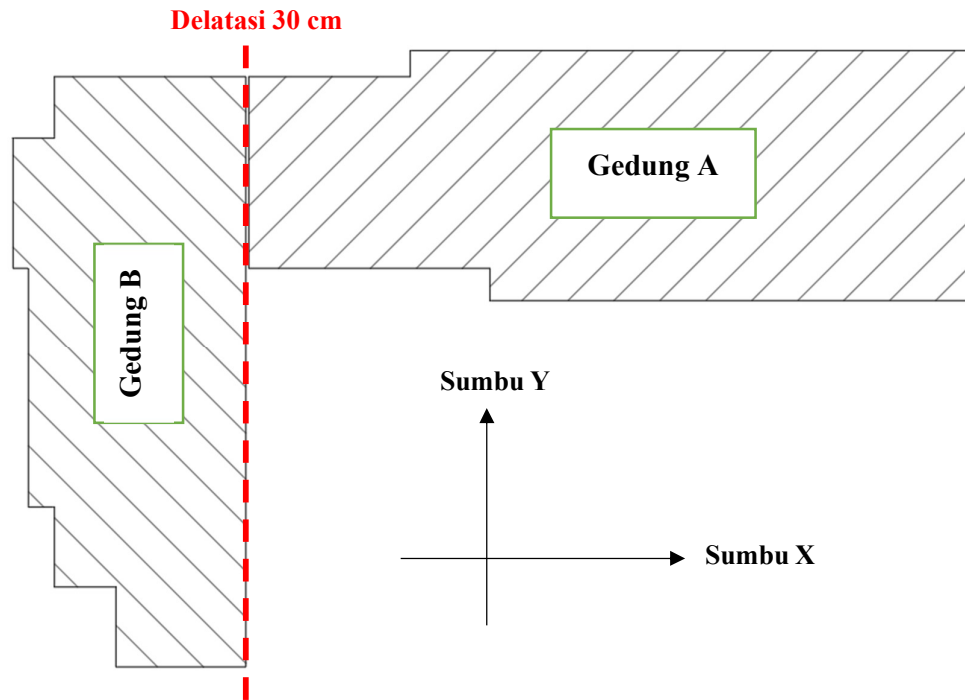
Berikut merupakan gambar potongan dari bangunan ini pada Gambar 4.2.



Gambar 4.2 Potongan A (atas) dan B (bawah)

(Sumber : Dokumen *Asbuilt Drawing*, 2025)

Pada latar belakang sebelumnya telah disebutkan bahwa objek bangunan terdiri dari 2 massa gedung yang dipisahkan oleh delatasi 30 cm. Berikut pembagian dari masing-masing gedung dapat dilihat pada Gambar 4.3.



Gambar 4.3 Pembagian Gedung A dan Gedung B

Kedua massa gedung ini menggunakan sistem struktur yang sama yaitu beton bertulang dengan sistem rangka pemikul momen khusus (SRPMK) ditambah dinding geser (*shearwall*) dengan orientasi penempatan *shearwall* yang berbeda untuk masing-masing gedung.

Berikutnya kedua massa gedung ini akan dianalisis secara terpisah sebagai “Gedung A” dan “Gedung B” untuk mengetahui kinerja masing-masing massa gedung dengan tetap mengacu pada sumbu ortogonal yang sama.

4.2. Data Teknis

Data teknis yang diperlukan untuk analisis pada penelitian ini bersumber dari dokumen *Asbuilt Drawing* sebagai berikut.

4.2.1. Spesifikasi Material

Berikut merupakan spesifikasi material yang digunakan.

1. Beton

- a. Mutu beton, f'_c = 30 Mpa
- b. Modulus elastisitas = $4700\sqrt{f'_c}$ MPa
= $4700\sqrt{30}$ MPa
= 25742,960 Mpa
- c. Berat volume = 2400 kg/m³

2. Baja Tulangan

- a. Mutu baja
 - 1) Diameter ≤ 12 mm : BJTP-280
 - f_y = 280 MPa
 - f_u = 350 MPa
 - 2) Diameter ≥ 13 mm : BJTS-420B
 - f_y = 420 MPa
 - f_u = 525 MPa
- b. Modulus elasisitas = 200000 MPa
- c. Berat volume = 7850 kg/m³

4.2.2. Dimensi Elemen Struktur

Bangunan ini menggunakan dimensi elemen struktur sebagai berikut.

1. Kolom

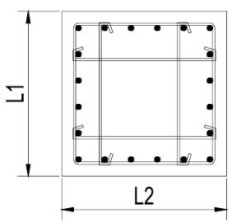
Bangunan ini menggunakan tujuh tipe kolom struktur yang dapat dilihat pada tabel 4.1 berikut.

Tabel 4.1 Tipe dan Dimensi Kolom

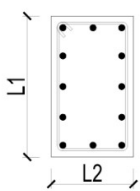
No	Tipe	Dimensi (mm)
1	K1	700 X 700
2	K1A	700 X 700
3	K2	600 X 350
4	K2A	600 x 250
5	K3 (Kolom L)	450 x 250
6	K4	700 x 400
7	K8	300 x 300

Sumber : Dokumen *Asbuilt Drawing* (2025)

Berikut merupakan contoh gambar detail potongan melintang untuk kolom K1 dan K2 pada lantai 1.

		TUL. UTAMA : ○ 20 D 22 ○ – SENGKANG : TUMPUAN : SK. D13-100 LAPANGAN : SK. D13-150 TUL. PENGEKANG : TUMPUAN : TP. D13-100 LAPANGAN : TP. D13-150
TUMPUAN	LAPANGAN	
L1= 700	L2= 700	

Gambar 4.4 Detail Potongan Melintang K1-1

		TUL. UTAMA : ○ 12 D 19 ○ – SENGKANG : TUMPUAN : SK. D10-100 LAPANGAN : SK. D10-150 TUL. PENGEKANG : TUMPUAN : TP. – LAPANGAN : TP. –
TUMPUAN	LAPANGAN	
L1= 600	L2= 350	

Gambar 4.5 Detail Potongan Melintang K2-1

(Sumber : Dokumen *Asbuilt Drawing*, 2025)

2. Balok

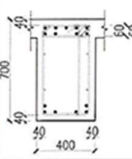
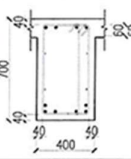
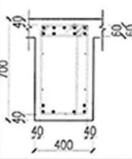
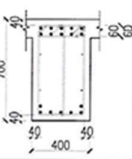
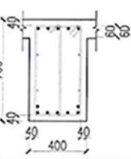
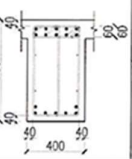
Bangunan ini menggunakan sebelas tipe balok terdiri dari balok induk dan balok anak yang dapat dilihat pada tabel 4.2 berikut.

Tabel 4.2 Tipe dan Dimensi Balok

No	Tipe	Dimensi (mm)
1	B1	400 x 700
2	B1A	400 x 700
3	B2	400 x 700
4	B3	300 x 500
5	BA1	300 x 500
6	BA2	250 x 450
7	BA3	200 x 400
8	B4	300 x 600
9	BC1	400 x 700 / 400 x 500
10	BC2	300 x 500
11	BL	200 x 500

Sumber : Dokumen *Asbuilt Drawing* (2025)

Berikut merupakan contoh gambar detail potongan melintang untuk balok B1 dan B1A pada lantai 2.

TIPE BALOK	B1-2			B1A-2		
LETAK POTONGAN	TUMPUAN KIRI	LAPANGAN	TUMPUAN KANAN	TUMPUAN KIRI	LAPANGAN	TUMPUAN KANAN
PENAMPANG						
DIMENSI	400 X 700			400 X 700		
TULANGAN ATAS	9 D 22	4 D 22	9 D 22	10 D 22	5 D 22	10 D 22
TULANGAN BAWAH	6 D 22	6 D 22	6 D 22	7 D 22	7 D 22	7 D 22
SENGKANG	SK.1,5D10-100	SK.1,5D10-150	SK.1,5D10-100	SK.1,5D10-100	SK.1,5D10-150	SK.1,5D10-100
TUL. MOUNTASE	4 D 10			4 D 10		

Gambar 4.6 Detail Potongan Melintang B1-2 dan B1A-2

(Sumber : Dokumen *Asbuilt Drawing*, 2025)

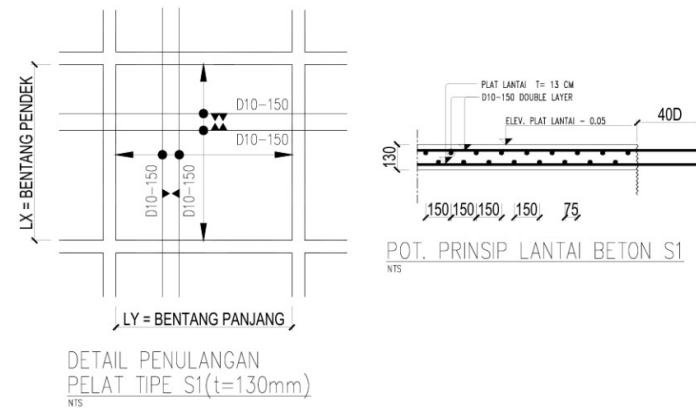
3. Plat Lantai dan Atap

Dimensi dan tipe plat yang digunakan pada bangunan ini sebagai berikut.

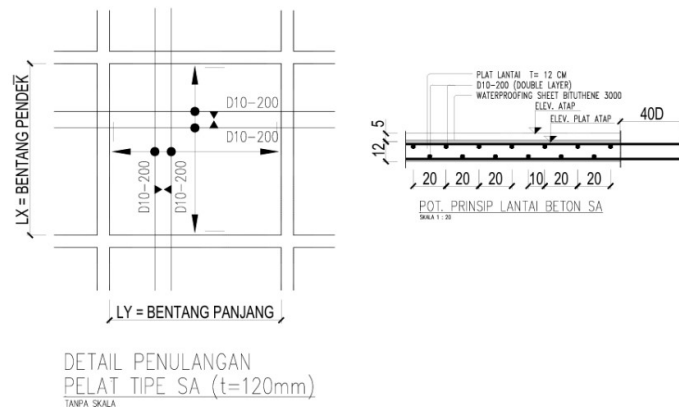
Tabel 4.3 Tipe dan Dimensi Plat

No	Tipe	Tebal (mm)
1	SD (lantai dasar)	150
2	S1 (diatas lantai dasar)	130
3	SA (atap)	120

Contoh gambar detail untuk plat tipe S1 dan SA dapat dilihat pada gambar 4.7 dan 4.8 berikut.



Gambar 4.7 Detail Penulangan Plat S1

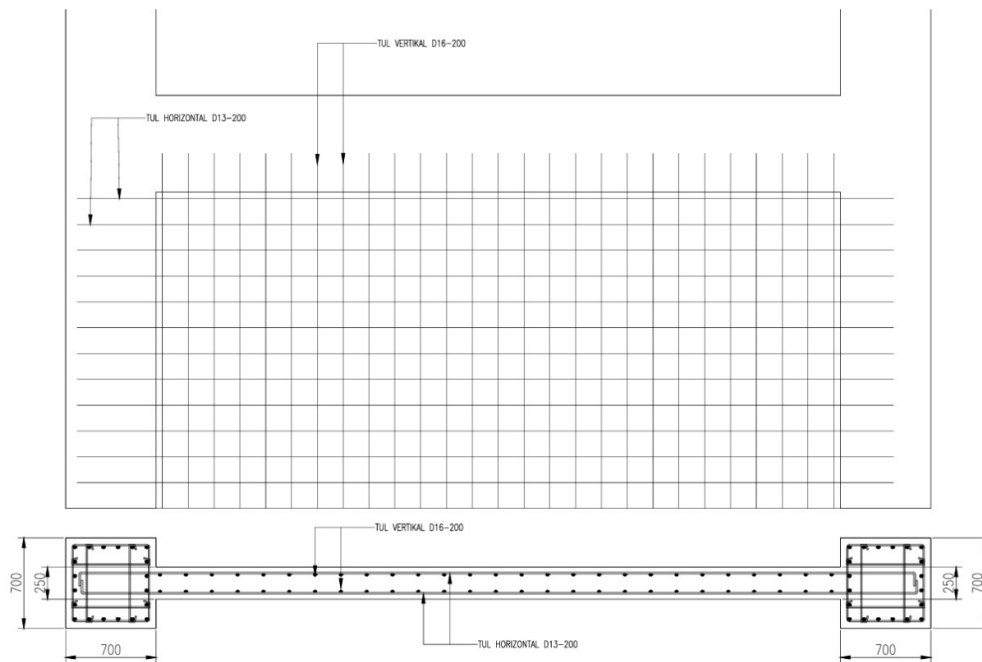


Gambar 4.8 Detail Penulangan Plat SA

(Sumber : Dokumen *Asbuilt Drawing*, 2025)

4. Dinding Geser (*Shearwall*)

Pada bangunan ini terdapat 4 *shear wall* dimana 2 diantaranya terletak di tangga, 1 di lift, dan 1 lagi di sudut bangunan. Setiap *shear wall* memiliki ketebalan yang sama yaitu 25 cm dengan tinggi bervariasi pada setiap lantai. Berikut merupakan contoh gambar detail untuk *shear wall* yang digunakan.

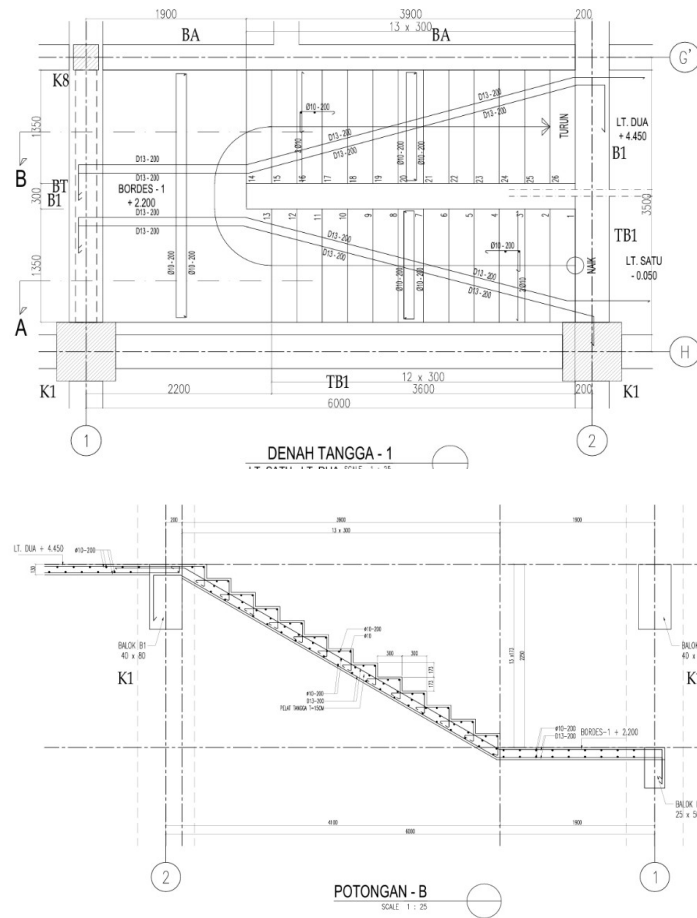


Gambar 4.9 Detail Penulangan Shearwall

(Sumber : Dokumen *Asbuilt Drawing*, 2025)

5. Tangga

Terdapat 3 tangga pada 3 lokasi berbeda dari lantai 1 hingga top atap. Lebar tangga 1,35 m dengan lebar trap 30 cm dan tinggi trap 16,2 hingga 17,3 cm tergantung pada tinggi antar lantai. berikut merupakan contoh gambar detail untuk penulangan tangga 1.

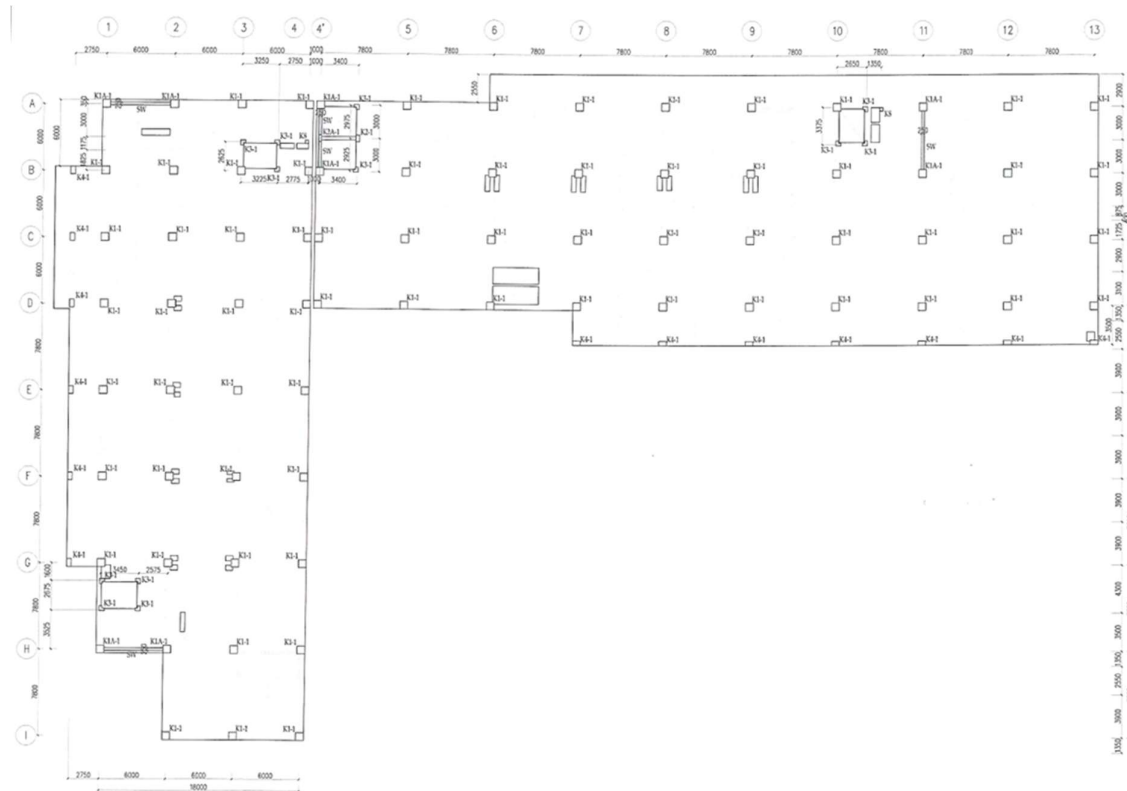


Gambar 4.10 Detail Tangga Tipe 1
(Sumber : Dokumen *Asbuilt Drawing*, 2025)

4.2.3. Denah Elemen Struktur

Denah elemen struktur meliputi denah untuk kolom, balok, plat lantai, tangga, dan penempatan *shearwall* dapat dilihat pada gambar-gambar berikut.

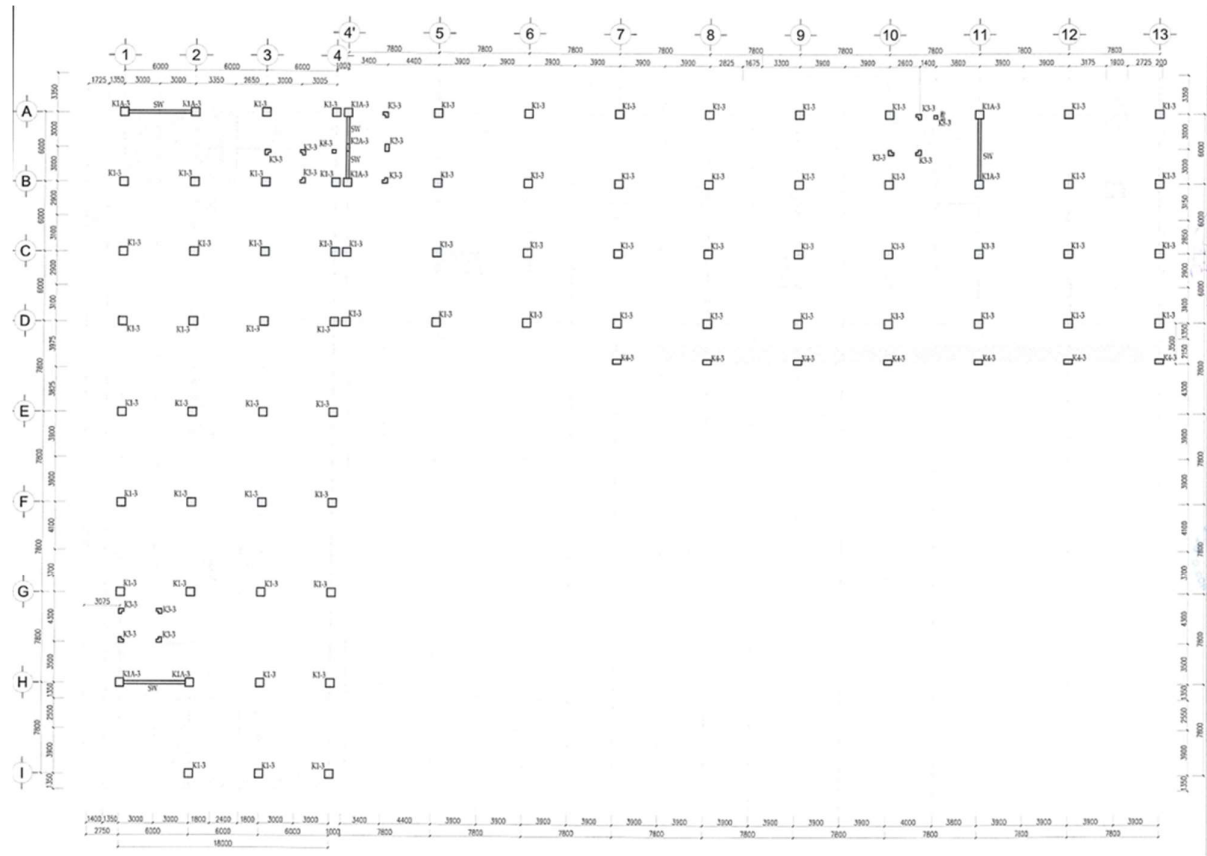
1. Denah Kolom dan Shearwall



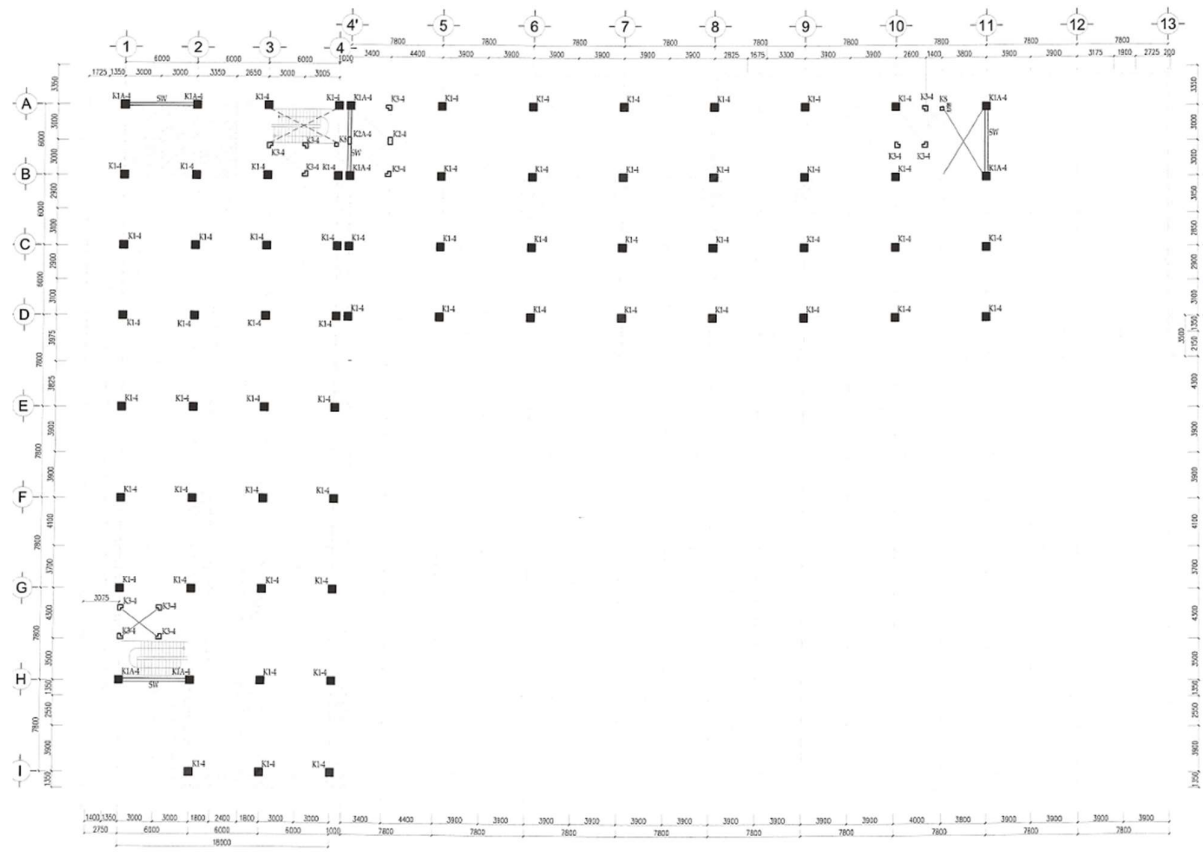
Gambar 4.11 Denah Kolom dan *Shearwall* Lantai 1
(Sumber : Dokumen *Asbuilt Drawing*, 2025)



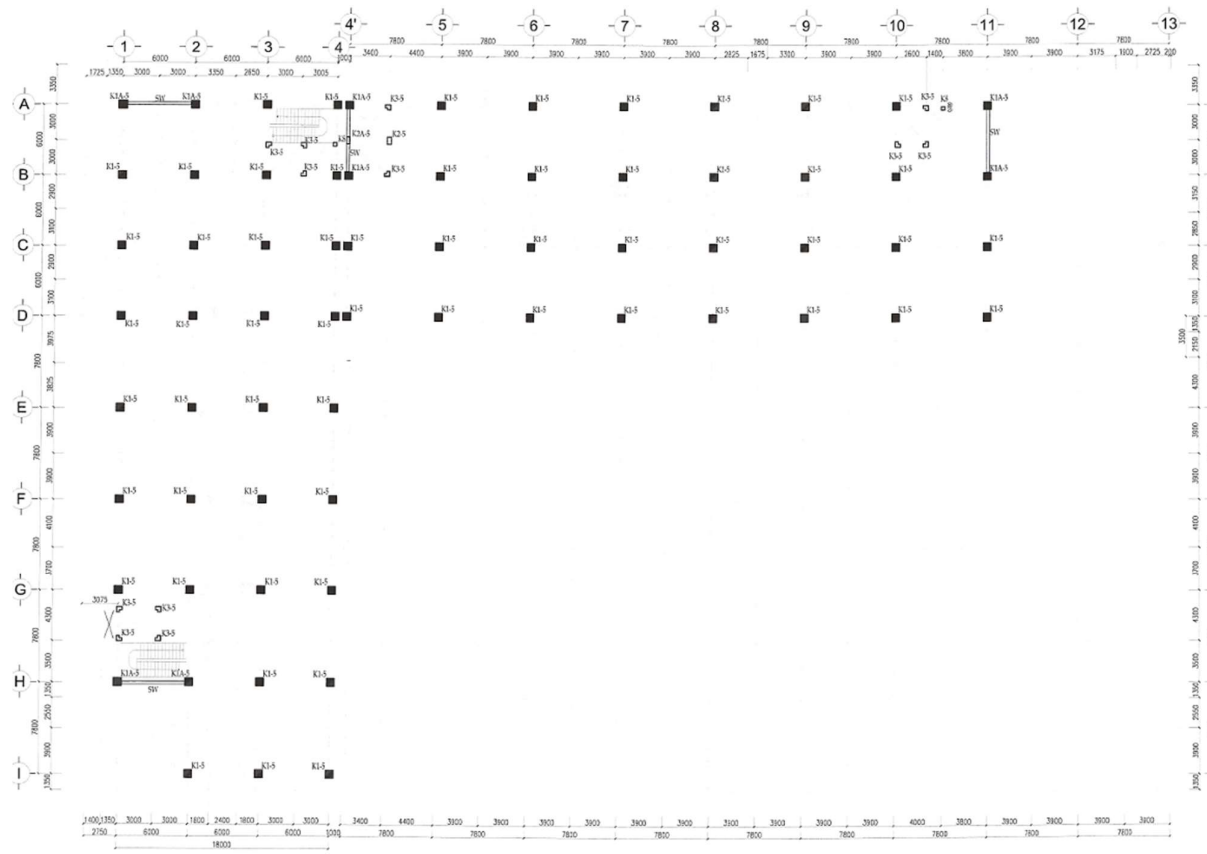
Gambar 4.12 Denah Kolom dan *Shearwall* Lantai 2
(Sumber : Dokumen *Asbuilt Drawing*, 2025)



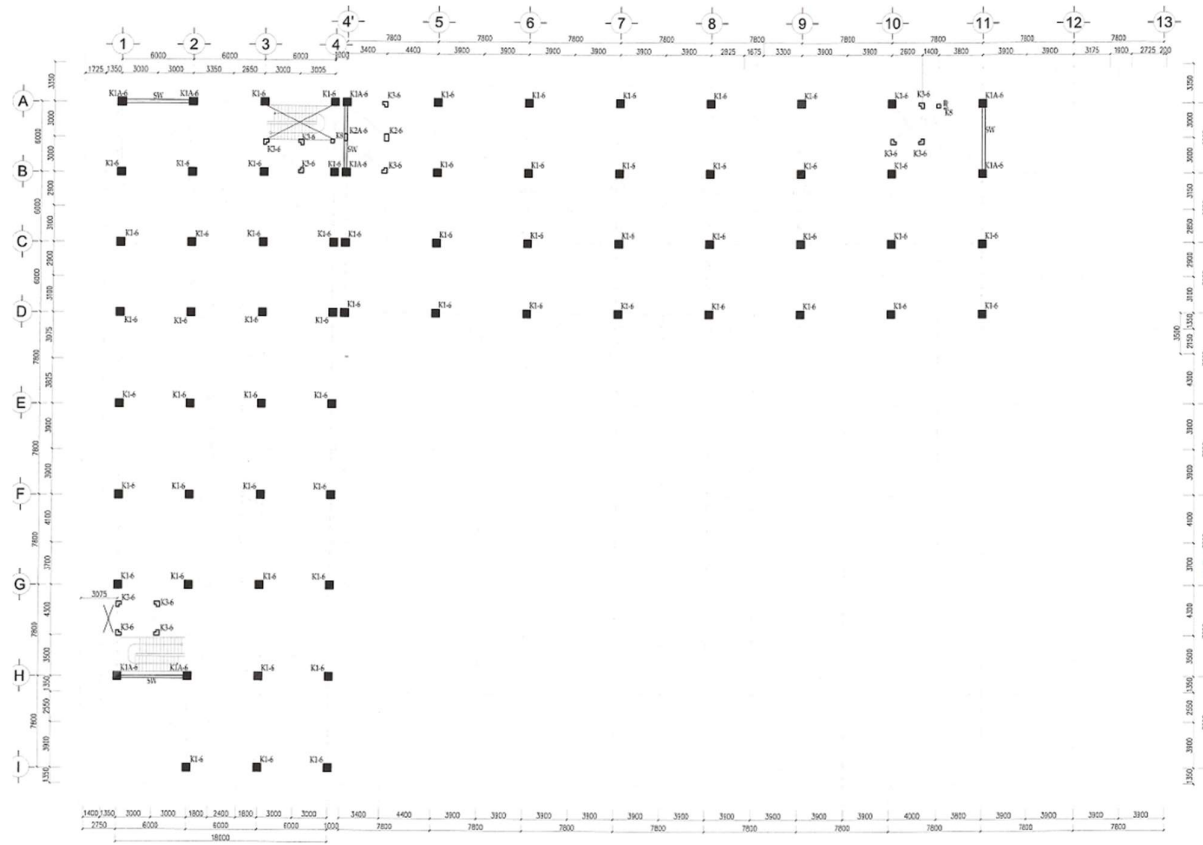
Gambar 4.13 Denah Kolom dan *Shearwall* Lantai 3
(Sumber : Dokumen *Asbuilt Drawing*, 2025)



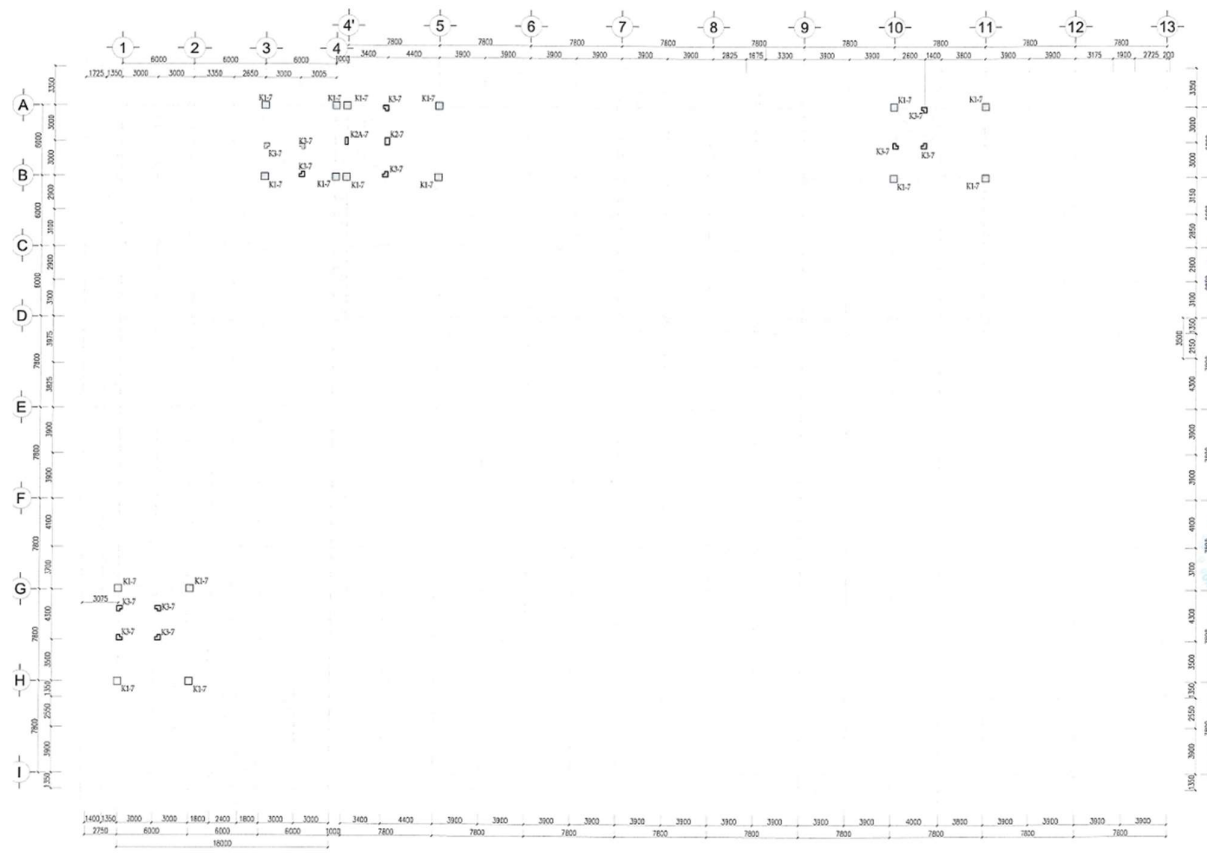
Gambar 4.14 Denah Kolom dan *Shearwall* Lantai 4
(Sumber : Dokumen *Asbuilt Drawing*, 2025)



Gambar 4.15 Denah Kolom dan *Shearwall* Lantai 5
(Sumber : Dokumen *Asbuilt Drawing*, 2025)

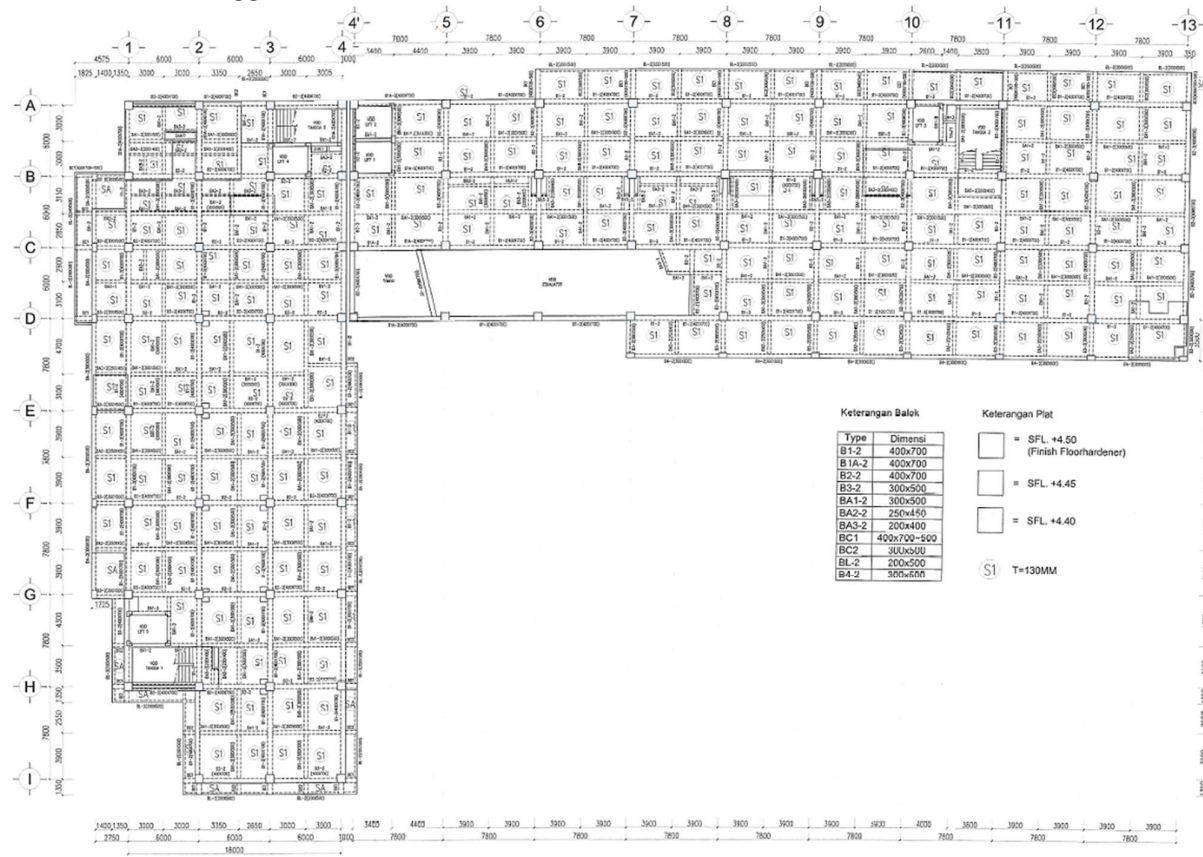


Gambar 4.16 Denah Kolom dan *Shearwall* Lantai 6
 (Sumber : Dokumen *Asbuilt Drawing*, 2025)

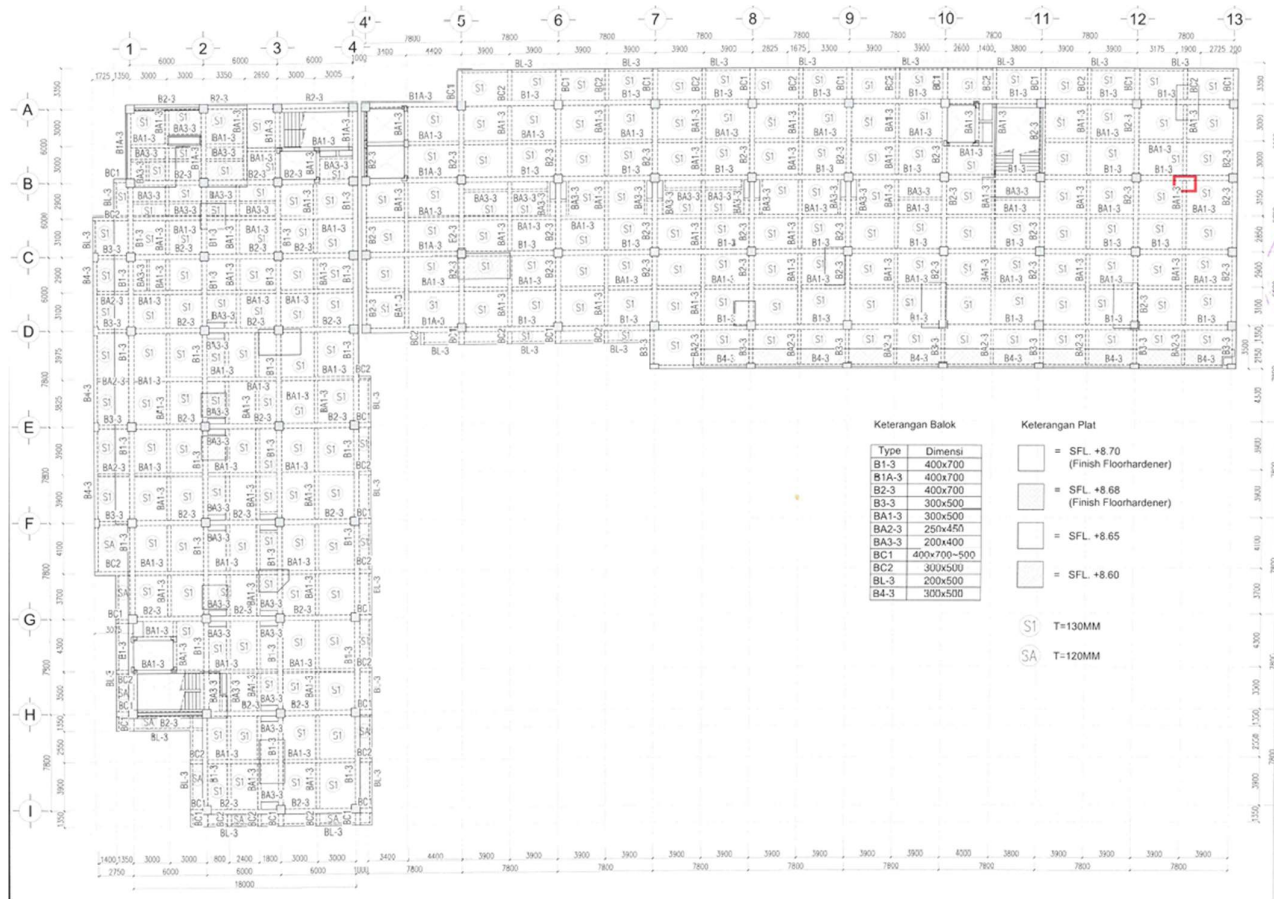


Gambar 4.17 Denah Kolom dan *Shearwall* Lantai 7
(Sumber : Dokumen *Asbuilt Drawing*, 2025)

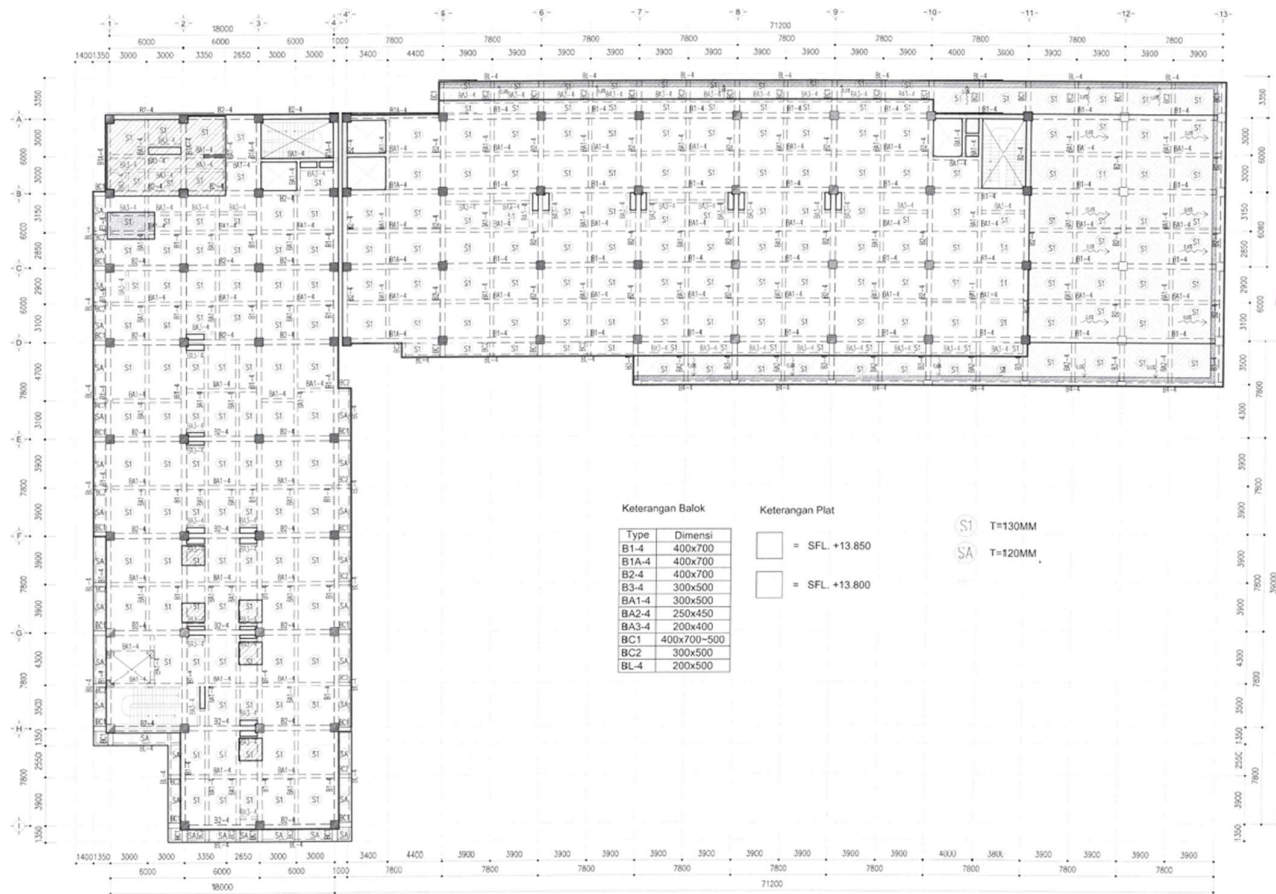
2. Denah Balok, Plat, dan Tangga



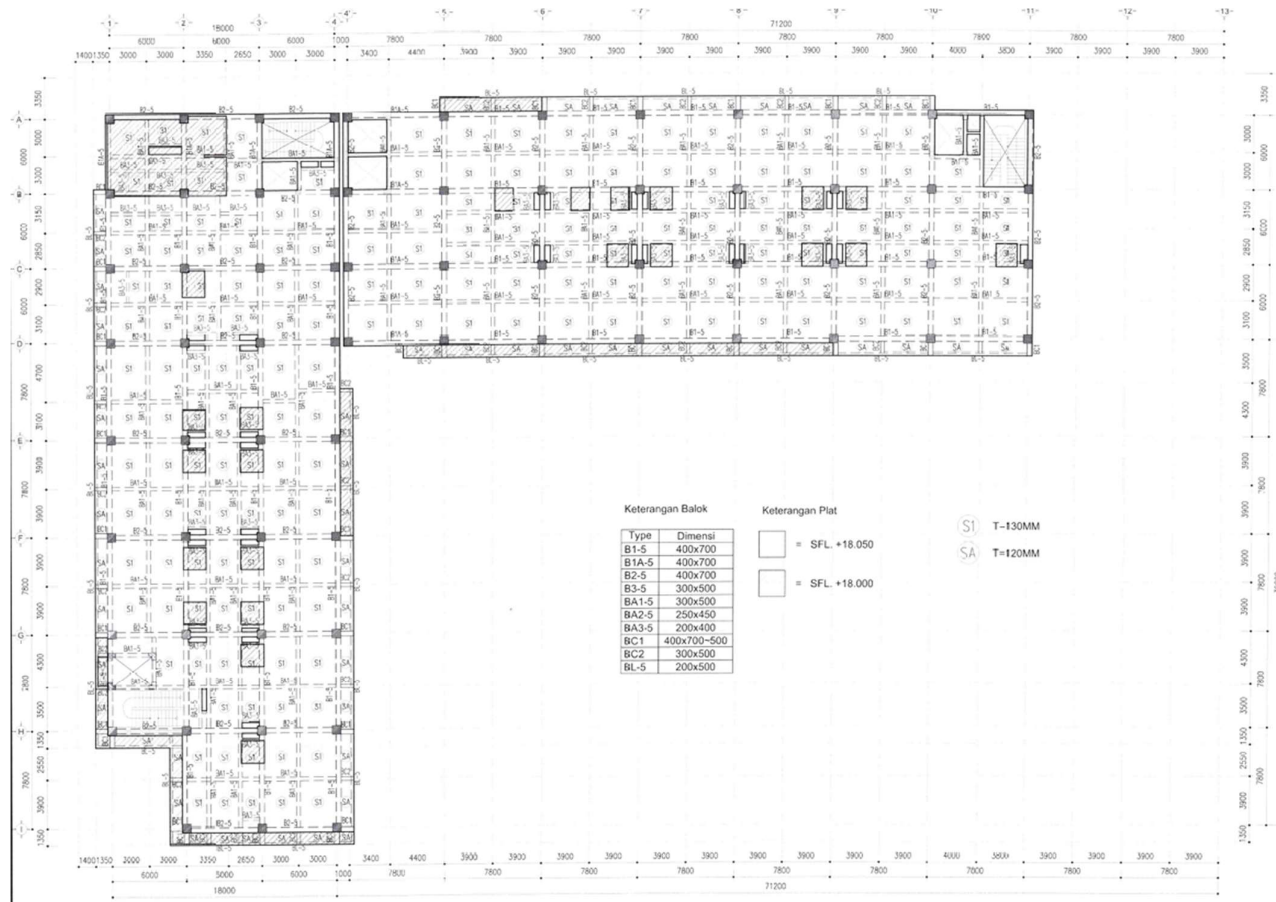
Gambar 4.18 Denah Balok, Pelat, dan Tangga Lantai 2
(Sumber : Dokumen *Asbuilt Drawing*, 2025)



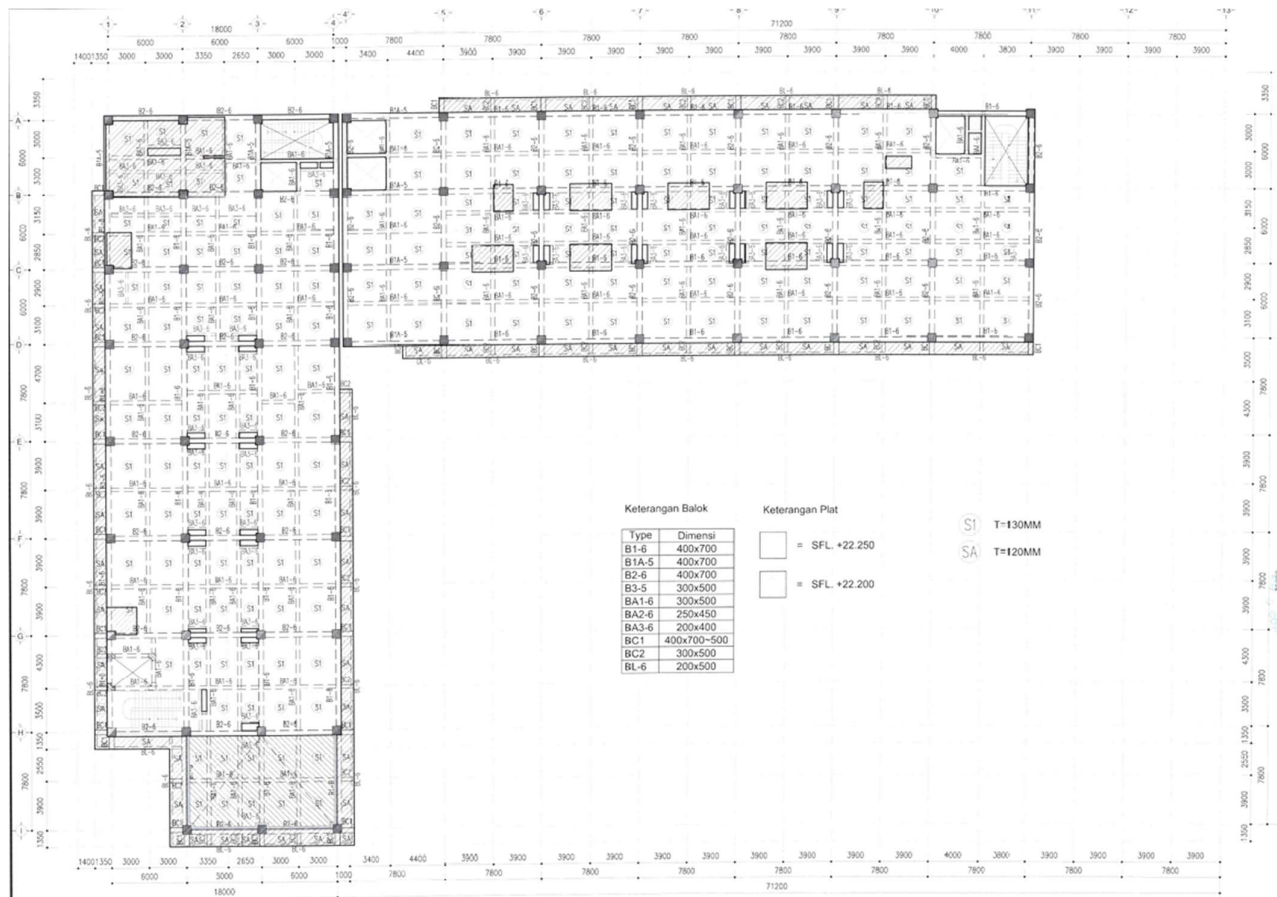
Gambar 4.19 Denah Balok, Pelat, dan Tangga Lantai 3
(Sumber : Dokumen *Asbuilt Drawing*, 2025)



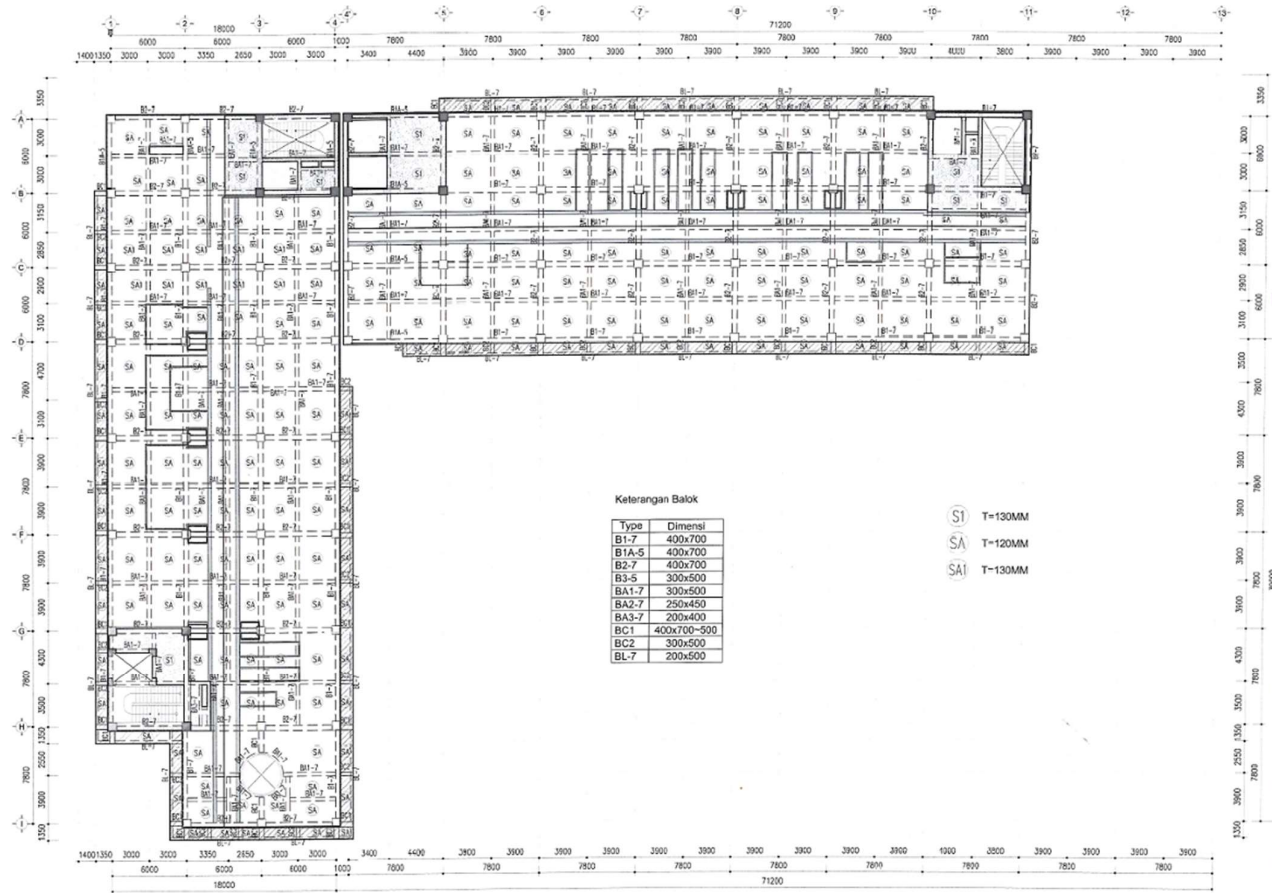
Gambar 4.20 Denah Balok, Pelat, dan Tangga Lantai 4
(Sumber : Dokumen *Asbuilt Drawing*, 2025)



Gambar 4.21 Denah Balok, Pelat, dan Tangga Lantai 5
(Sumber : Dokumen *Asbuilt Drawing*, 2025)



Gambar 4.22 Denah Balok, Pelat, dan Tangga Lantai 6
(Sumber : Dokumen *Asbuilt Drawing*, 2025)



Gambar 4.23 Denah Balok, Pelat, dan Tangga Lantai Atap
 (Sumber : Dokumen *Asbuilt Drawing*, 2025)

4.3. Prosedur Penelitian

Secara umum prosedur penelitian pada tugas akhir ini terdiri dari 4 tahapan, yaitu persiapan, input, analisis, dan output.

1. Tahap Persiapan

Tahap persiapan meliputi studi literatur, pengumpulan data, dan penentuan metode analisis.

a. Studi Literatur

Studi literatur dilakukan dengan mencari referensi dari jurnal ilmiah, tugas akhir, dan buku yang membahas tentang analisis kinerja bangunan menggunakan metode *pushover*. Peraturan yang digunakan untuk tugas akhir ini adalah SNI 1726-2019 untuk perencanaan bangunan tahan gempa, SNI 1727-2020 untuk pembebanan bangunan gedung, dan *Applied Technology Council for Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings* (ATC-40, 1996)..

b. Pengumpulan Data

Data yang digunakan pada tugas akhir ini bersumber dari *Asbuilt Drawing* proyek yang meliputi gambar struktur dan arsitektur.

c. Penentuan Metode

Setelah memperoleh referensi dari berbagai sumber, ditentukan metode analisis yang akan digunakan terkait tujuan awal untuk mengetahui level kinerja bangunan. Metode yang dipilih yaitu metode *capacity spectrum* menggunakan analisis statik nonlinear *pushover*.

2. Tahap Input

Tahap input meliputi perhitungan pembebanan, permodelan struktur dan penentuan respon spektrum.

a. Perhitungan Pembebanan

Pembebanan yang diperhitungkan pada analisis meliputi beban mati, beban hidup, dan beban gempa. Perhitungan dapat dilakukan menggunakan program MS Excel yang kemudian dilanjutkan dengan input pada software analisis.

b. Permodelan Struktur

Struktur dimodelkan secara 3D menggunakan software SAP2000 V.26. Digunakan program ini karena untuk pembebanan pushover (*pushover cases*) lebih banyak pilihan dan lebih detail dari pada pada ETABS 9.6.

c. Penentuan Respon Spektrum

Kurva respon spektrum diperlukan untuk mendapatkan kurva permintaan (*demand curve*) yang berikutnya digunakan menentukan titik kinerja (*performance point*).

3. Tahap Analisis

Tahap analisis meliputi analisis gaya geser statik dan analisis statik nonlinier dengan pushover berdasarkan ATC-40.

a. Analisis Gaya Geser Statik

Setelah input parameter yang diperlukan pada software analisis, perlu di cek partisipasi massa struktur sebesar minimal 90%. Berikutnya diperoleh nilai gaya geser dasar statik ekuivalen untuk arah x dan y.

b. Analisis *Pushover*

Analisis pushover dilakukan dengan menggunakan program SAP2000 V.26 yang sudah *built in* untuk melakukan analisis secara otomatis. Beban statik nonlinier yang diberikan berupa beban gravitasi dan beban gempa berupa beban dorong statik lateral arah X dan Y. Analisis dilakukan masing-masing pada gedung A dan Gedung B.

4. Tahap Output

Output dari hasil analisis ini berupa kurva kapasitas (*capacity curve*) yang menggambarkan karakteristik struktur serta kemampuan deformasinya melalui hubungan antara gaya geser dasar dengan perpindahan atap. Selanjutnya SAP2000 akan otomatis menghitung titik kinerja (*performance point*) berdasarkan kurva kapasitas yang diperoleh dan respon spektrum yang diinput sebelumnya, nilai *displacement* dari *performance point* ini yang digunakan untuk menentukan level kinerja pada pembahasan. Output lainnya adalah mekanisme keruntuhan melalui sendi plastis yang terjadi pada setiap step *pushover*.

5. Tahap Pembahasan

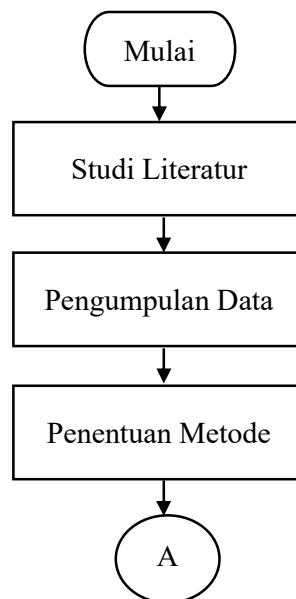
Tahap ini mencakup uraian mengenai karakteristik struktur seperti kekakuan dan kemampuan sistem struktur dalam menahan gaya gempa berdasarkan output bentuk kurva kapasitas yang diperoleh. Selanjutnya penilaian level kinerja dilakukan berdasarkan metode ATC-40 pada subbab 3.8 berdasarkan nilai deformasi lateral yang terjadi ketika *performance point* untuk masing-masing gedung.

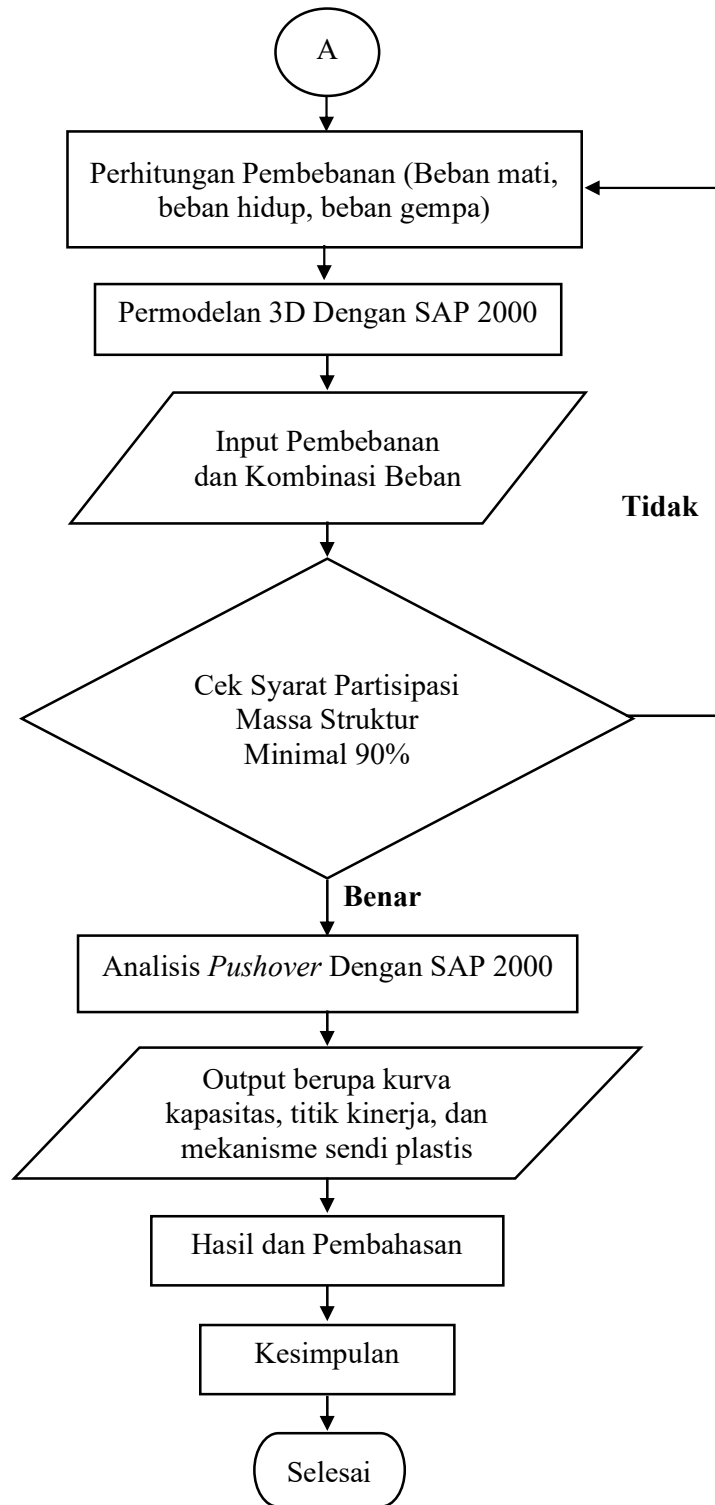
6. Tahap Kesimpulan

Tahap akhir dari penelitian ini adalah mengambil kesimpulan yang tepat bagi masing-masing gedung berdasarkan hasil analisis dan pembahasan. Yaitu berdasarkan karakteristik bangunannya serta level kinerja yang telah ditentukan sebelumnya, apakah bangunan ini mampu bertahan atau tidak ketika terjadi gempa.

4.4. Bagan Alir Penelitian

Alur penelitian secara garis besar disusun pada bagan berikut.





BAB V ANALISIS DAN PEMBAHASAN

5.1. Permodelan Struktur

Tahap awal dalam memulai analisis adalah dengan melakukan permodelan 3D untuk objek penelitian menggunakan software. Penelitian ini menggunakan software SAP2000 v26 untuk memodelkan seluruh struktur atas pada masing-masing Gedung A dan Gedung B. Tahapan dalam permodelan diuraikan lebih lanjut pada subsubbab berikut.

5.1.1. Pendefinisian Material

Material dalam analisis nonlinier menggambarkan perilaku bahan yang tidak mengikuti hubungan tegangan-regangan secara linier, terutama ketika terjadi deformasi besar, perubahan sifat mekanis, atau kerusakan. Pada analisis ini, model material harus dapat merepresentasikan berbagai mekanisme seperti plastisitas serta penurunan kekakuan akibat retak atau peluluhan.

Material utama yang digunakan untuk analisis ini adalah beton dan baja tulangan dengan spesifikasi sesuai subsubbab 4.2.1. Berikut langkah-langkah dalam menginput material pada SAP2000 v26.

1. Beton

Mendefinisikan material beton dilakukan dengan cara klik menu *define > materials > add new material > material type* pilih *concrete > standard* pilih *user >* Pada jendela *material property data* isikan setiap parameter dengan spesifikasi sebagai berikut.

Berat volume	= 23,6 kN/m ³
	= 2,36 x 10 ⁻⁵ N/mm ³
Modulus elastisitas	= 25742,960 MPa
Kuat tekan, f _c	= 30 MPa

Untuk parameter lainnya dapat dibiarkan *default*. Tampilan lebih jelasnya dapat dilihat pada Gambar 5.1 berikut.

The screenshot shows the 'Material Property Data' dialog box with the following fields and values:

- General Data:**
 - Material Name and Display Color: Beton 30 MPa
 - Material Type: Concrete
 - Material Grade: Beton 30 MPa
 - Material Notes: (empty)
- Weight and Mass:**
 - Weight per Unit Volume: 2,356E-05
 - Mass per Unit Volume: 2,403E-09
- Units:** N, mm, C
- Isotropic Property Data:**
 - Modulus Of Elasticity, E: 25742,96
 - Poisson, U: 0,2
 - Coefficient Of Thermal Expansion, A: 9,900E-06
 - Shear Modulus, G: 10726,233
- Other Properties For Concrete Materials:**
 - Specified Concrete Compressive Strength, Fc: 30,
 - Expected Concrete Compressive Strength: 30,
 - ☐ Lightweight Concrete
 - Shear Strength Reduction Factor: (empty)
- ☐ Switch To Advanced Property Display
- Buttons: OK, Cancel

Gambar 5.1 Define Material Beton

2. Baja Tulangan

Mendefinisikan material baja tulangan dilakukan dengan cara klik menu *define* > *materials* > *add new material* > *material type* pilih *rebar* > *standard* pilih *user* > Pada jendela *material property data* isikan setiap parameter dengan spesifikasi sebagai berikut.

a. Baja Tulangan BJTP 280

$$\begin{aligned}\text{Berat volume} &= 76,97 \text{ kN/m}^3 \\ &= 7,697 \times 10^{-5} \text{ N/mm}^3\end{aligned}$$

$$\text{Modulus elastisitas} = 200000 \text{ MPa}$$

$$\text{Kuat leleh, } F_y = 280 \text{ MPa}$$

$$\text{Kuat tarik ultimit, } F_u = 350 \text{ MPa}$$

Berdasarkan FEMA 356 tabel 5-3 maka nilai kuat tarik dan kuat leleh baja tulangan dapat ditingkatkan melalui perkalian dengan faktor skala 1,1.

Sehingga nilai kuat tarik dan kuat leleh *expected* dapat diinput sebagai berikut.

$$\begin{aligned} F_{ye} &= 280 \times 1,1 \\ &= 308 \text{ MPa} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} F_{ue} &= 350 \times 1,1 \\ &= 385 \text{ MPa} \end{aligned}$$

Untuk parameter lainnya dapat dibiarkan *default*. Tampilan lebih jelasnya dapat dilihat pada Gambar 5.2 berikut.

Material Property Data

General Data

Material Name and Display Color: BJTP 280 <= 12mm

Material Type: Rebar

Material Grade: BJTP 280

Material Notes: Modify/Show Notes...

Weight and Mass

Weight per Unit Volume: 7,697E-05

Mass per Unit Volume: 7,849E-09

Units

N, mm, C

Uniaxial Property Data

Modulus Of Elasticity, E: 200000

Poisson, U: 0,3

Coefficient Of Thermal Expansion, A: 1,170E-05

Shear Modulus, G:

Other Properties For Rebar Materials

Minimum Yield Stress, Fy: 280

Minimum Tensile Stress, Fu: 350

Expected Yield Stress, Fye: 308

Expected Tensile Stress, Fue: 385

☐ Switch To Advanced Property Display

OK Cancel

Gambar 5.2 Define Material Baja Tulangan BJTP 280

b. Baja Tulangan BJTS 420b

$$\begin{aligned} \text{Berat volume} &= 76,97 \text{ kN/m}^3 \\ &= 7,697 \times 10^{-5} \text{ N/mm}^3 \end{aligned}$$

$$\text{Modulus elastisitas} = 200000 \text{ MPa}$$

Kuat leleh, $F_y = 420 \text{ MPa}$

Kuat tarik ultimit, $F_u = 525 \text{ MPa}$

Berdasarkan FEMA 356 tabel 5-3 maka nilai kuat tarik dan kuat leleh baja tulangan dapat ditingkatkan melalui perkalian dengan faktor skala 1,1. Sehingga nilai kuat tarik dan kuat leleh *expected* dapat diinput sebagai berikut.

$F_{ye} = 420 \times 1,1$

$= 462 \text{ MPa}$

$F_{ue} = 525 \times 1,1$

$= 577,5 \text{ MPa}$

Untuk parameter lainnya dapat dibiarkan *default*. Tampilan lebih jelasnya dapat dilihat pada Gambar 5.3 berikut.

Material Property Data

General Data

Material Name and Display Color: BJTS 420b >= 13mm

Material Type: Rebar

Material Grade: BJTS 420b

Material Notes: Modify/Show Notes...

Weight and Mass

Weight per Unit Volume: 7,697E-05

Mass per Unit Volume: 7,849E-09

Units

N, mm, C

Uniaxial Property Data

Modulus Of Elasticity, E: 200000

Poisson, U: 0,3

Coefficient Of Thermal Expansion, A: 1,170E-05

Shear Modulus, G:

Other Properties For Rebar Materials

Minimum Yield Stress, F_y : 420

Minimum Tensile Stress, F_u : 525

Expected Yield Stress, F_{ye} : 462

Expected Tensile Stress, F_{ue} : 577,5

☐ Switch To Advanced Property Display

OK Cancel

Gambar 5.3 Define Material Baja Tulangan BJTS 420b

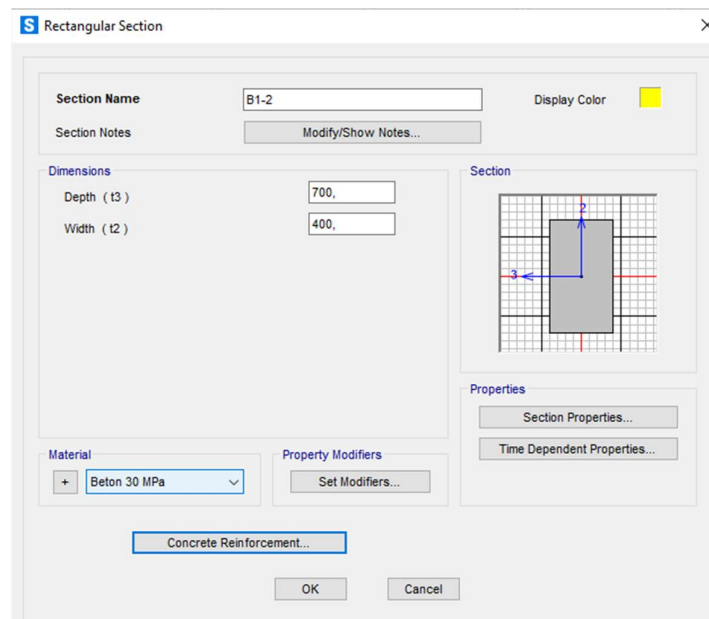
5.1.2. Pendefinisian Elemen Struktur

Elemen struktur yang dimodelkan pada analisis ini mencakup kolom dan balok pada sistem rangka dan *shearwall* serta elemen tambahan yaitu pelat dan tangga. Untuk analisis nonlinier, komponen-komponen utama dimodelkan untuk merepresentasikan perilaku geometri di luar batas elastis seperti hubungan momen-kurvatur, aksial-regangan, degradasi kekakuan, pengaruh $P-\Delta$, hingga pola keruntuhan gabungan.

Dimensi setiap elemen sesuai dengan subsubbab 4.4.2 dengan parameter lebih detail mengacu pada *asbuilt drawing*. Langkah-langkahnya dijelaskan sebagai berikut.

1. Elemen Balok

Mendefinisikan elemen balok dapat dilakukan dengan klik menu *define > section properties > frame sections > add new property > property type* pilih *concrete rectangular* > pada jendela *rectangular section* isikan data yang dibutuhkan sesuai tipe balok yaitu lebar, tinggi, dan material beton. Berikut contoh *Define Section Properties* untuk B1-2 pada Gambar 5.4.



Gambar 5.4 Define Section Properties Balok

Berikutnya untuk mendefinisikan tulangan pada balok dengan cara klik *command* “*concrete reinforcement*” maka akan muncul jendela baru seperti gambar dibawah. Input material untuk *longitudinal bars* (tulangan pokok) dan *confinement bars* (sengkang) lalu centang bagian “*design type beam*”. Pada bagian “*concrete cover to longitudinal rebar center*” isi nilai tebal selimut beton yang digunakan, lalu pada bagian “*reinforcement overrides for ductile beams*” input jumlah luas tulangan atas dan bawah pada bagian tumpuan kiri dan kanan balok, setelah itu klik “ok”. Berikut sebagai contoh input tulangan untuk B1-2 ke SAP2000 pada Gambar 5.5.

Selimut beton	= 40 mm
Tulangan atas tumpuan	= 9D22
	$= 0,25 \times \pi \times (22)^2 \times 9$
	$= 3421,194 \text{ mm}^2$
Tulangan bawah tumpuan	= 6D22
	$= 0,25 \times \pi \times (22)^2 \times 6$
	$= 2280,796 \text{ mm}^2$

S Reinforcement Data

Rebar Material

Longitudinal Bars + BJTS 420b >= 13mm

Confinement Bars (Ties) + BJTS 420b >= 13mm

Design Type

☐ Column (P-M2-M3 Design)

☒ Beam (M3 Design Only)

Concrete Cover to Longitudinal Rebar Center

Top 40,

Bottom 40,

Reinforcement Overrides for Ductile Beams

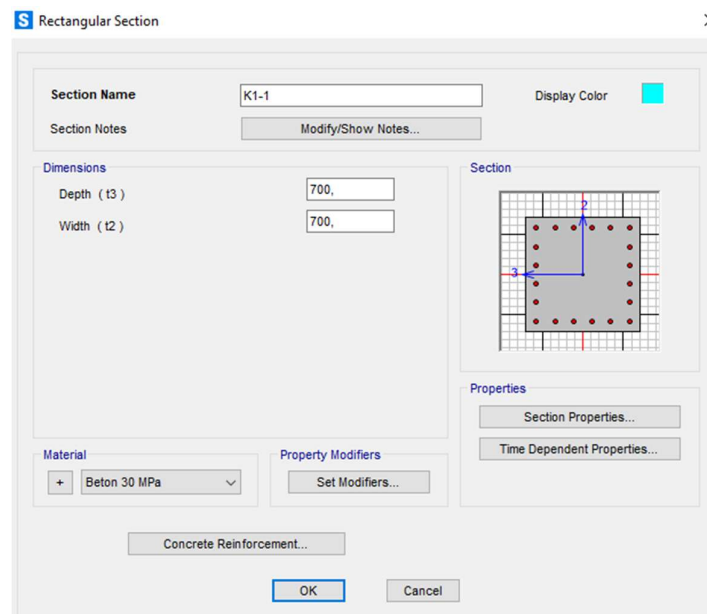
	Left	Right
Top	3421,194	3421,194
Bottom	2280,796	2280,796

OK Cancel

Gambar 5.5 Define Tulangan Pada Balok

2. Elemen Kolom

Mendefinisikan elemen kolom dapat dilakukan dengan klik menu *define > section properties > frame sections > add new property > property type* pilih *concrete rectangular* > pada jendela *rectangular section* isikan data yang dibutuhkan sesuai tipe kolom yaitu panjang, lebar, dan material beton. Berikut contoh *Define Section Properties* untuk K1-1 pada Gambar 5.6.



Gambar 5.6 Define Section Properties Kolom

Berikutnya untuk mendefinisikan tulangan pada kolom dengan cara klik command “*concrete reinforcement*” maka akan muncul jendela baru seperti gambar dibawah. Input material untuk *longitudinal bars* (tulangan pokok) dan *confinement bars* (sengkang) lalu centang bagian “*design type column*”. Pada bagian “*reinforcement configuration*” pilih *rectangular*, dan “*confinement bars*” pilih *ties*. Selanjutnya isikan parameter untuk masing-masing tulangan pokok dan sengkang sesuai data dari *asbuilt drawing*. Terakhir centang bagian “*reinforcement to be checked*” untuk memastikan program memperhitungkan tulangan sebagai bagian dari analisis lalu klik “ok”. Berikut merupakan contoh input penulangan untuk kolom tipe K1-1 seperti pada Gambar 5.7.

Selimut beton = 40 mm
 Tulangan pokok = 20D22
 Tulangan sengkang = D13-100 (tumpuan)
 Jumlah kaki arah X = 4
 Jumlah kaki arah Y = 4

S Reinforcement Data ✕

Rebar Material

Longitudinal Bars + BJTS 420b >= 13mm v

Confinement Bars (Ties) + BJTS 420b >= 13mm v

Design Type

☒ Column (P-M2-M3 Design)
☐ Beam (M3 Design Only)

Reinforcement Configuration

☒ Rectangular
☐ Circular

Confinement Bars

☒ Ties
☐ Spiral

Longitudinal Bars - Rectangular Configuration

Clear Cover for Confinement Bars 40,

Number of Longit Bars Along 3-dir Face 6

Number of Longit Bars Along 2-dir Face 6

Longitudinal Bar Size + 22d v

Confinement Bars

Confinement Bar Size + 13d v

Longitudinal Spacing of Confinement Bars 100,

Number of Confinement Bars in 3-dir 4

Number of Confinement Bars in 2-dir 4

Check/Design

☒ Reinforcement to be Checked
☐ Reinforcement to be Designed

OK
Cancel

Gambar 5.7 Define Tulangan Pada Kolom

3. Elemen Pelat

Mendefinisikan elemen pelat dapat dilakukan dengan klik menu *define > section properties > area sections > section type* pilih *shell > add new section > type* pilih *shell-thin >* pada bagian “*thickness*” isikan tebal plat di kotak dialog *membrane* dan *bending*. Berikutnya input material beton yang digunakan. Berikut contoh *Define Section* pelat lantai PL1 pada Gambar 5.8.

Gambar 5.8 Define Section Properties Pelat

Berikutnya untuk mendefinisikan tulangan pada pelat dengan cara klik command “*modify shell parameters*” maka akan muncul jendela baru seperti gambar dibawah. Input material tulangan pada kotak dialog “*rebar material*” lalu centang opsi “*two layers*”. Selanjutnya isikan jarak masing-masing layer terhadap selimut beton. Lakukan langkah yang sama untuk pelat atap, pelat tangga, dan pelat bordes. Berikut merupakan contoh input parameter tulangan untuk PL1 seperti pada Gambar 5.9.

Concrete Shell Section Design Parameters

Section Name: ASEC1

Rebar Material: BJTS 420b >= 13mm

Rebar Layout Options:

- ☐ Default - 10% of shell thickness for top and
- ☐ One Layer - at the middle of the shell section
- ☒ Two Layers

Cover to Centroid of Steel:

Top Bar - Direction 1	25,
Top Bar - Direction 2	35,
Bottom Bar - Direction 1	25,
Bottom Bar - Direction 2	35,

OK Cancel

Gambar 5.9 Define Tulangan Pada Pelat

4. Elemen Dinding Geser (*Shearwall*) dan *Boundary Element*

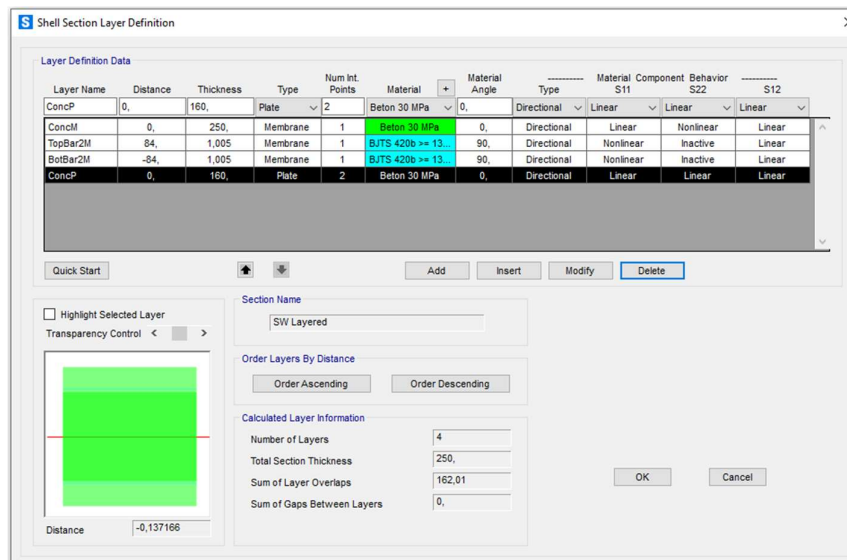
Mendefinisikan elemen *shearwall* dan *boundary element* (kolom di tepi *shearwall*) dapat dilakukan dengan klik menu *define > section properties > area sections > section type* pilih *shell > add new section > type* pilih *shell-layered/nonlinier* untuk memodelkan perilaku nonlinier.

Berikutnya akan muncul kotak dialog seperti pada gambar 5.10 yang berisi data *properties* untuk diinput. Input tebal *shearwall* serta material beton dan tulangan yang digunakan lalu checklist opsi “*two layers*“. Input diameter dan spasi tulangan vertikal (arah sumbu 2) dan tulangan horizontal (arah sumbu 1). Selanjutnya bagian “*in-plane element component behavior*“ pilih “*S22 nonlinier*“ untuk mendefinisikan perilaku nonlinier pada tulangan vertikal. Klik “ok“ maka akan muncul tampilan seperti pada gambar 5.11.

Gambar 5.10 Define Section dan Tulangan Pada Shearwall

Gambar 5.11 menunjukkan pembagian layer pada shearwall dengan rincian sebagai berikut :

- Layer pertama ConcM menggambarkan beton sebagai *membrane* yang hanya menahan gaya sejajar permukaan (*in-plane*) dengan perilaku nonlinier secara vertikal (arah sumbu 2).
- Layer kedua TopBar2M menggambarkan tulangan vertikal lapis pertama sebagai *membrane* dan berperilaku nonlinier terhadap arah horizontalnya (arah sumbu 1)
- Layer ketiga BotBar2M menggambarkan tulangan vertikal lapis kedua sebagai *membrane* dan berperilaku nonlinier terhadap arah horizontalnya (arah sumbu 1)
- Layer ketiga ConcP menggambarkan beton sebagai *plate* yang menahan gaya tegak lurus permukaan (*out-of-plane*) dengan perilaku linier/elastik.



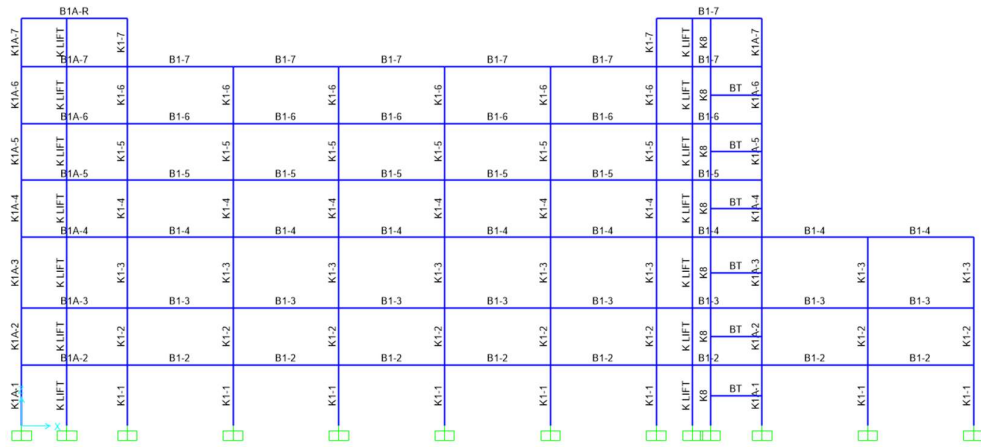
Gambar 5.11 Layer Definition pada Shearwall

5.1.3. Penggambaran Model Struktur

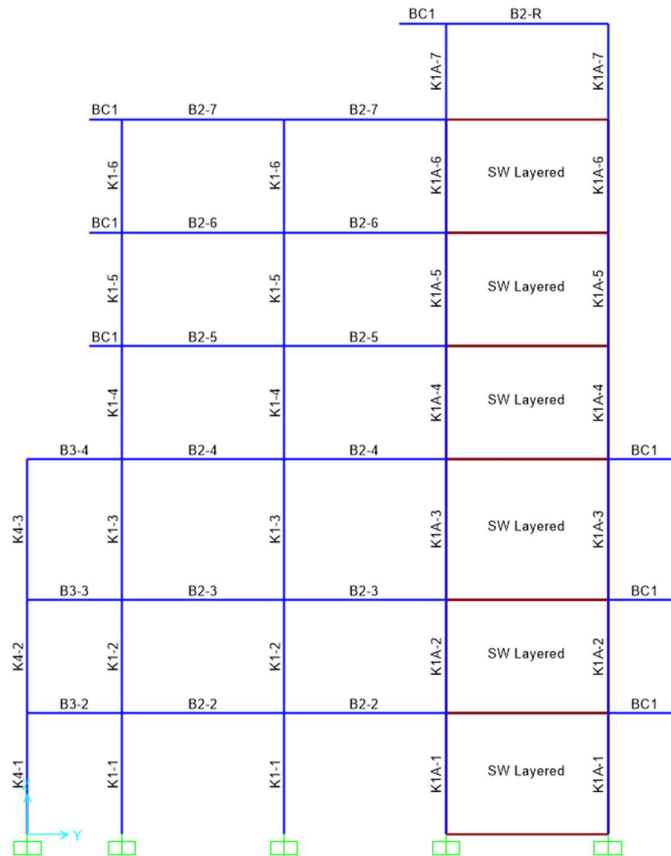
Setelah define material dan elemen struktur sudah dilakukan, maka tahap selanjutnya adalah melakukan penggambaran. Masing-masing elemen digambar sesuai tipenya mengikuti denah struktur pada dokumen *asbuilt drawing*. Beberapa hal yang perlu diperhatikan pada tahap ini antara lain :

1. Pastikan elevasi antar lantai sudah benar sesuai dengan *asbuilt drawing*. Pada penelitian ini digunakan elevasi *floor-to-floor* dari SFL (*structural finish level*).
2. Pastikan ukuran grid utama yaitu as-as olom sama dengan denah struktur. Beberapa grid lain boleh ditambahkan jika perlu.
3. Pastikan setiap elemen memiliki titik pertemuan yang sama (berada dalam 1 label yang sama), terutama pada bagian pertemuan balok-kolom-pelat.
4. Pastikan tidak ada elemen yang saling bertumpuk (*overlapping*) karena dapat mempengaruhi hasil analisis.
5. Bagian *base* (elevasi 0) di *assign* dengan *constraint fixed*/jepit.

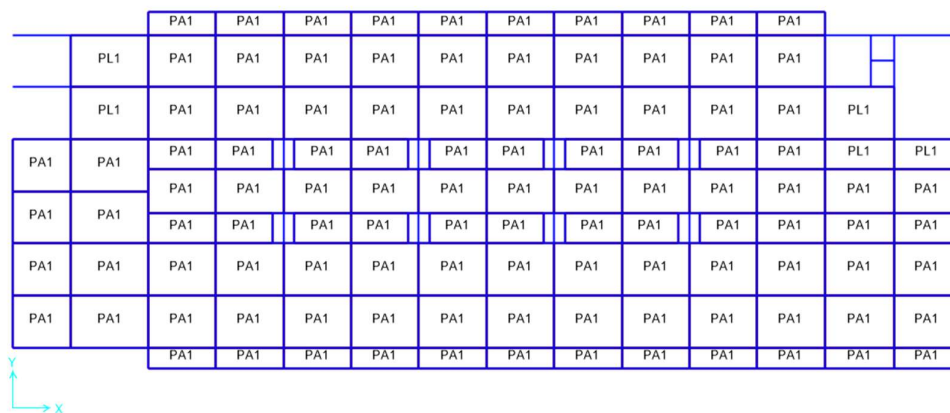
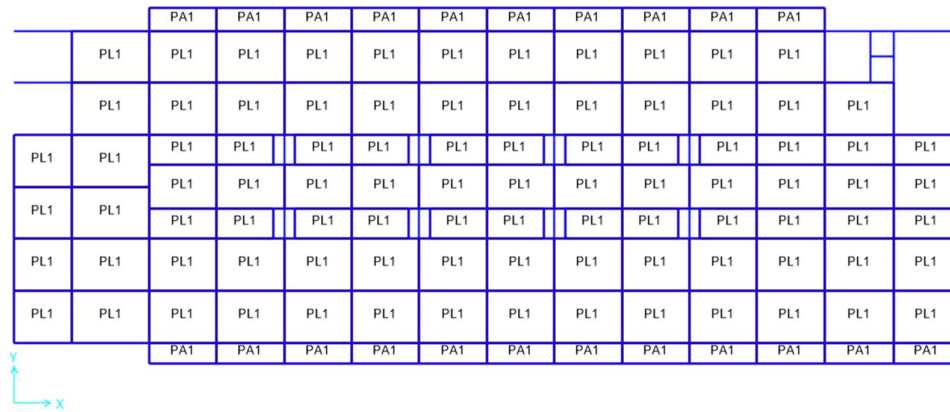
Hasil permodelan setiap elemen untuk masing-masing Gedung A dan Gedung B dapat dilihat pada Gambar 5.12 hingga 5.17 berikut.



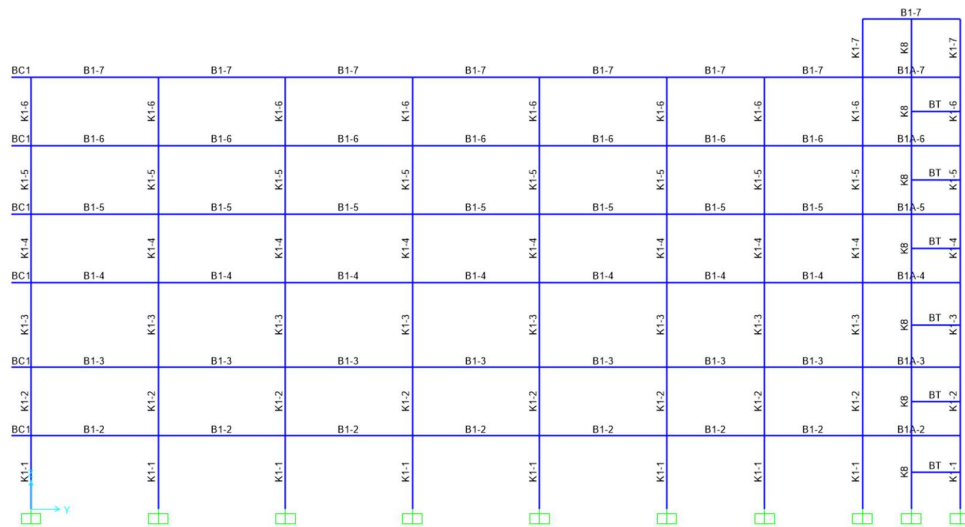
Gambar 5.12 Penggambaran Elemen Gedung A (1)



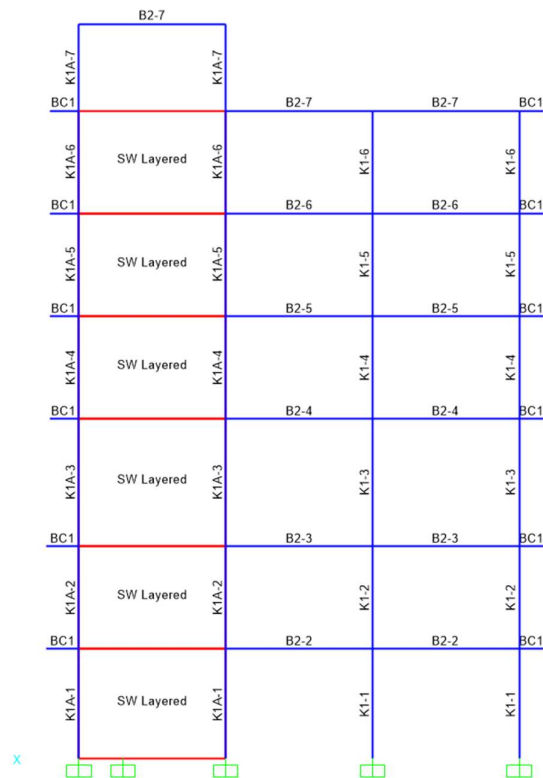
Gambar 5.13 Penggambaran Elemen Gedung A (2)



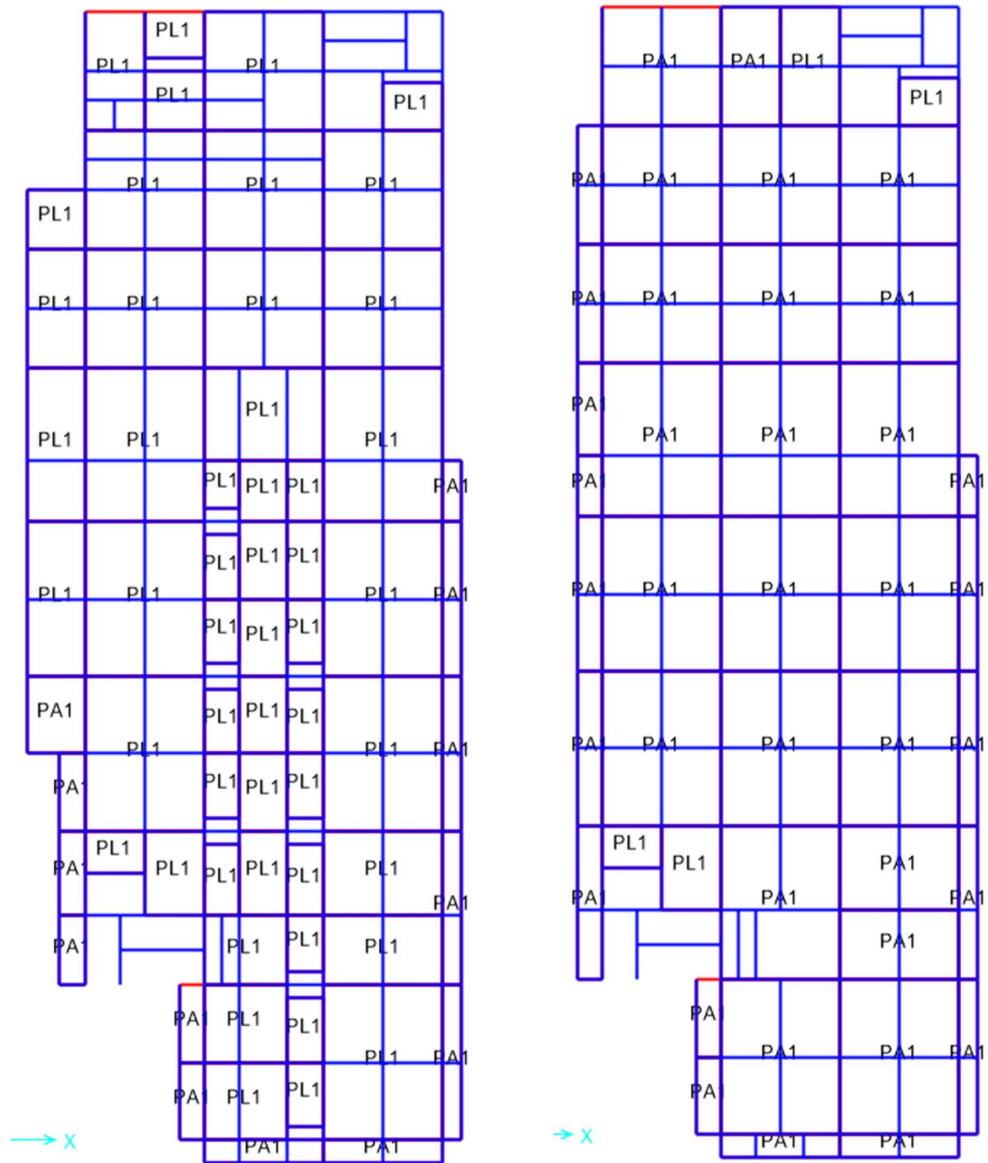
Gambar 5.14 Penggambaran Elemen Gedung A (3)



Gambar 5.15 Penggambaran Elemen Gedung B (1)

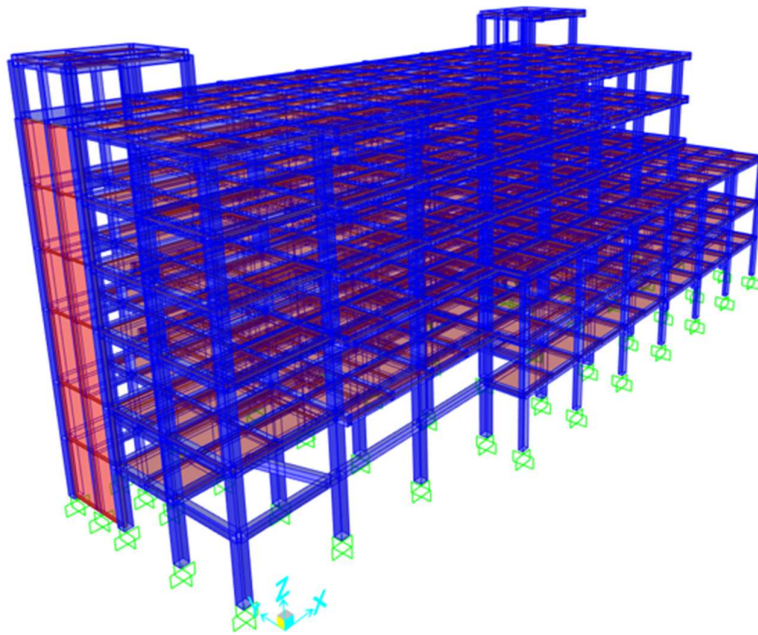


Gambar 5.16 Penggambaran Elemen Gedung B (2)

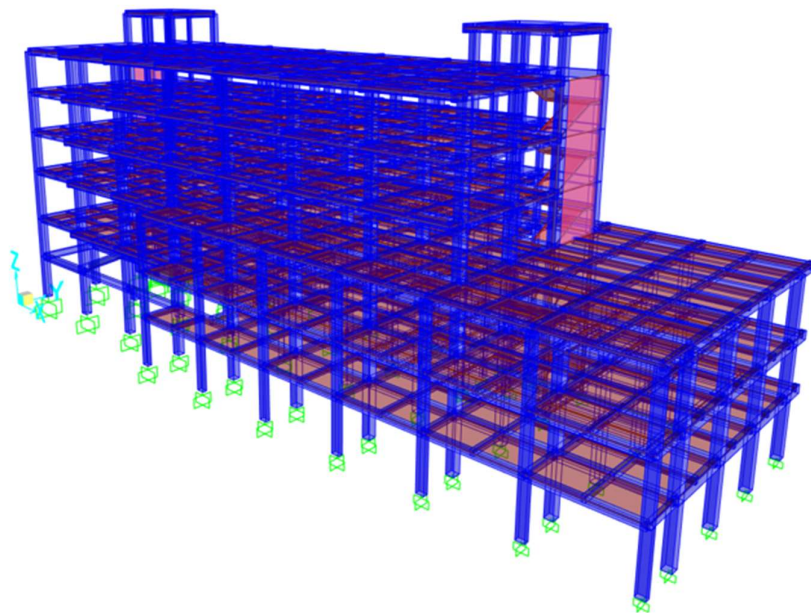


Gambar 5.17 Penggambaran Elemen Gedung B (3)

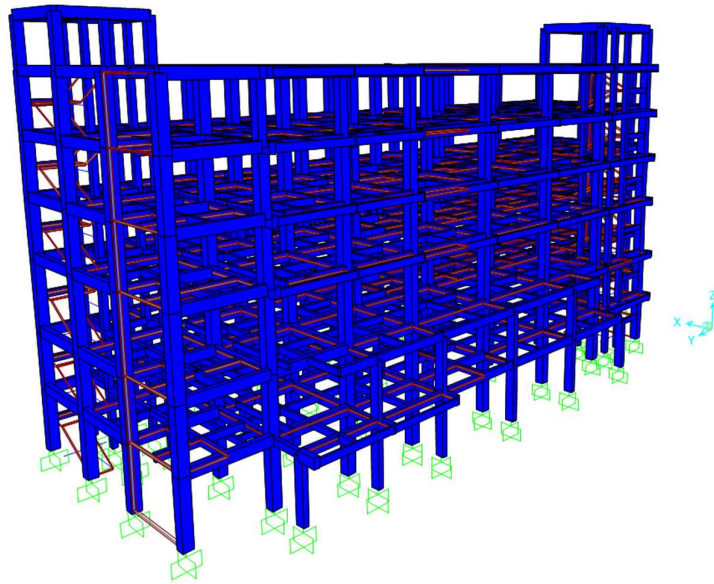
Model 3D dari masing-masing gedung dapat dilihat pada Gambar 5.18 hingga Gambar 5.21 berikut.



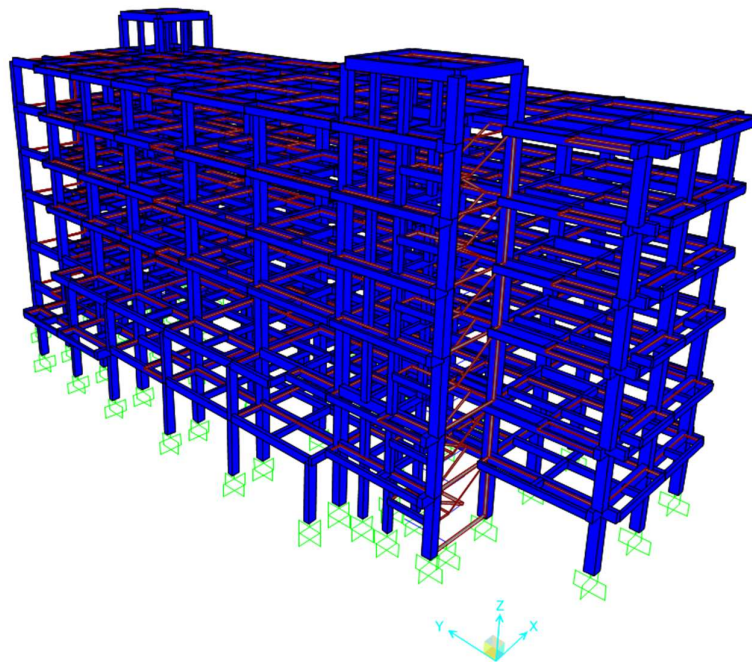
Gambar 5.18 Model 3D Gedung A (1)



Gambar 5.19 Model 3D Gedung A (2)



Gambar 5.20 Model 3D Gedung B (1)



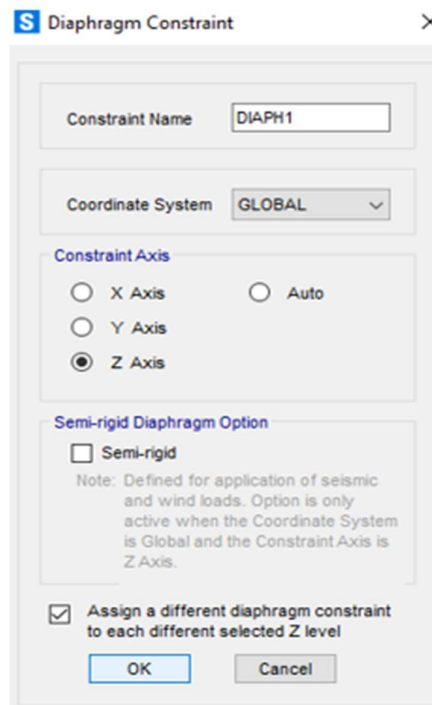
Gambar 5.21 Model 3D Gedung B (2)

5.1.4. Pendefinisian Diafragma

Langkah berikutnya yang perlu dilakukan adalah mendefinisikan diafragma. Dalam sistem struktur, diafragma merupakan elemen yang menerima gaya lateral (dalam hal ini merupakan pelat) yang bekerja sebagai penghubung untuk memastikan distribusi gaya terjadi secara teratur. Selain itu, diafragma menjaga kestabilan keseluruhan bangunan dengan mempertahankan kesejajaran antar elemen vertikal dan mengontrol deformasi bidang lantai, sehingga analisis serta respons struktur terhadap beban lateral dapat ditentukan dengan lebih akurat.

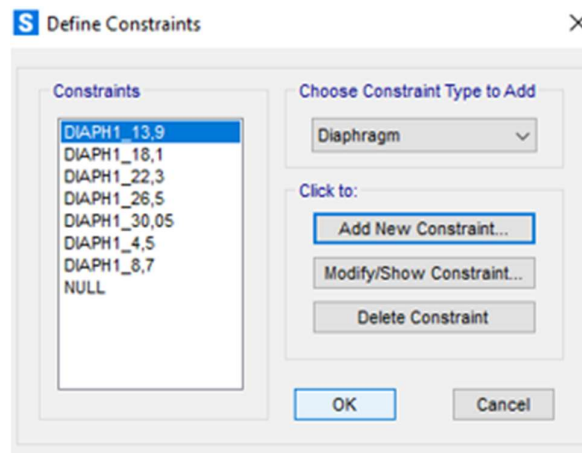
Pada analisis ini, digunakan asumsi permodelan diafragma kaku (*rigid diaphragm*) pada setiap lantai dikarenakan hubungan antara balok-pelat merupakan monolit/dicor bersamaan. Berikut cara *assign* diafragma ke dalam model.

1. Definisikan diafragma yang akan dibuat dengan klik menu *define > joint constraint > type pilih “diaphragm” > add new*.
2. Akan muncul tampilan seperti Gambar 5.22 berikut. Centang bagian “z axis” untuk mendistribusikan diafragma secara vertikal.



Gambar 5.22 Define Diafragma

3. Berikutnya atur tampilan menjadi 2 dimensi tampak atas lalu *select* seluruh elemen pada setiap elevasi lantai (kecuali elevasi bordes)
4. Pilih menu *assign > joint > constraint >* pilih diafragma yang sudah didefinisikan sebelumnya *> apply*. Hasilnya dapat dicek dengan klik menu *define > joint constraint >* akan muncul daftar diafragma menurut elevasi lantai seperti pada Gambar 5.23.



Gambar 5.23 Assign Diafragma

5.2. Perhitungan Berat Seismik Efektif

Menurut SNI 1726:2019 pasal 7.7.2, berat seismik efektif terdiri dari seluruh beban mati (termasuk beban mati tambahan) dan minimal 25% beban hidup dengan persyaratan apabila beban ruang penyimpanan lebih dari 5% terhadap total berat lantai. Berikut diuraikan perhitungan mengenai beban mati, beban mati tambahan (SIDL), dan beban hidup yang digunakan dalam analisis ini.

5.2.1. Beban Mati (*Dead Load*)

Beban mati yang diperhitungkan dalam analisis ini seperti yang disebutkan pada subsubbab 3.3.1 terdiri dari berat sendiri elemen struktur seperti balok, kolom, pelat lantai, tangga, dan *shearwall*. Nilai beban mati diperoleh dari perkalian berat volume beton bertulang dengan volume total elemen struktur.

Adapun berat volume masing-masing material diambil berdasarkan SNI 1727:2020 Tabel C3.1-2. Berikut contoh perhitungan berat sendiri untuk masing-masing elemen struktur.

1. Kolom

Perhitungan dilakukan untuk kolom tipe K1-1 pada lantai 1 gedung A.

$$\begin{aligned}
 \text{Berat volume beton bertulang} &= 23,6 \text{ kN/m}^3 \\
 \text{Lebar kolom} &= 0,7 \text{ m} \\
 \text{Panjang kolom} &= 0,7 \text{ m} \\
 \text{Tinggi kolom} &= 4,5 \text{ m} \\
 \text{Jumlah kolom} &= 36 \text{ unit} \\
 \text{Berat total} &= 23,6 \text{ kN/m}^3 \times 0,7\text{m} \times 0,7\text{m} \times 4,5\text{m} \times 36 \\
 &= 1873,98 \text{ kN}
 \end{aligned}$$

2. Balok

Perhitungan dilakukan untuk balok tipe B1-2 pada lantai 2 gedung A.

$$\begin{aligned}
 \text{Berat volume beton bertulang} &= 23,6 \text{ kN/m}^3 \\
 \text{Lebar balok} &= 0,4 \text{ m} \\
 \text{Panjang balok} &= 7,8 \text{ m} \\
 \text{Tinggi balok} &= 0,7 \text{ m} \\
 \text{Jumlah balok} &= 32 \text{ unit} \\
 \text{Berat total} &= 23,6 \text{ kN/m}^3 \times 0,4\text{m} \times 7,8\text{m} \times 0,7\text{m} \times 32 \\
 &= 1649,89 \text{ kN}
 \end{aligned}$$

3. Pelat

Perhitungan dilakukan untuk pelat lantai tipe S1 pada lantai 2 gedung A.

$$\begin{aligned}
 \text{Berat volume beton bertulang} &= 23,6 \text{ kN/m}^3 \\
 \text{Lebar pelat} &= 3 \text{ m} \\
 \text{Panjang pelat} &= 3,9 \text{ m} \\
 \text{Tebal pelat} &= 0,13 \text{ m} \\
 \text{Jumlah pelat} &= 89 \text{ unit} \\
 \text{Berat total} &= 23,6 \text{ kN/m}^3 \times 3\text{m} \times 3,9\text{m} \times 0,13\text{m} \times 89 \\
 &= 3195,75 \text{ kN}
 \end{aligned}$$

4. Tangga

Perhitungan dilakukan untuk tangga tipe 3 pada lantai 1 gedung A.

Berat volume beton bertulang = $23,6 \text{ kN/m}^3$

a. Pelat Tangga (2 run)

Lebar pelat = 1,5 m

Panjang pelat = 8,404 m

Tebal pelat = 0,15 m

Jumlah pelat = 1 unit

Berat total = $23,6 \text{ kN/m}^3 \times 1,5\text{m} \times 8,404\text{m} \times 0,15\text{m} \times 1$
 = 44,64 kN

b. Pelat Bordes

Lebar pelat = 1,7 m

Panjang pelat = 3,525 m

Tebal pelat = 0,15 m

Jumlah pelat = 1 unit

Berat total = $23,6 \text{ kN/m}^3 \times 1,7\text{m} \times 3,525\text{m} \times 0,15\text{m} \times 1$
 = 21,22 kN

c. Balok Tangga

Lebar balok = 0,25 m

Panjang balok = 3,8 m

Tinggi balok = 0,45 m

Jumlah balok = 1 unit

Berat total = $23,6 \text{ kN/m}^3 \times 0,25\text{m} \times 3,8\text{m} \times 0,45\text{m} \times 1$
 = 10,09 kN

Berat total tangga = $44,64 \text{ kN} + 21,22 \text{ kN} + 10,09 \text{ kN}$
 = 75,95 kN

5. Dinding Geser (*Shearwall*)

Perhitungan dilakukan untuk *shearwall* pada lantai 1 gedung A.

Berat volume beton bertulang	= 23,6 kN/m ³
Lebar dinding	= 0,25 m
Panjang dinding	= 6 m
Tinggi dinding	= 4,5 m
Jumlah dinding	= 2 unit
Berat total	= 23,6 kN/m ³ x 0,25m x 6m x 4,5m x 2
	= 318,70 kN

Perhitungan berikutnya dilakukan dengan cara yang sama untuk setiap lantai pada Gedung A dan Gedung B. Pada SAP2000 beban mati akan dikalkulasi otomatis oleh program sebagai berat sendiri elemen struktur. Untuk mengeluarkan output berat sendiri perlantai pada SAP2000 maka sebelumnya setiap lantai perlu didefinisikan sebagai *group* dikarenakan SAP tidak memiliki fitur otomatis untuk memunculkan total berat perlantai. Berikutnya *run analysis > display > show table > model definition > other definition > group data > masses and weights*. Berat sendiri yang terhitung bersumber dari *load pattern "Dead Load"*. Rekapitulasi perhitungan berat sendiri seluruh elemen struktur disajikan pada Tabel 5.1 berikut.

Tabel 5.1 Rekapitulasi Self Weight Gedung A dan Gedung B

Lantai	Gedung A (kN)	Gedung B (kN)
FR1	11.051,81	10.326,39
FR2	12.789,25	10.017,15
FR3	13.459,63	10.256,08
FR4	9.319,71	9.695,88
FR5	9.319,71	9.695,88
FR6	9.117,42	9.231,20
FR7	1.242,90	1.054,51
Total	66.300,41	60.277,07

5.2.2. Beban Mati Tambahan (*SIDL*)

Beban mati tambahan yang digunakan pada analisis ini terdiri atas beban dinding (dinding bata dan dinding kaca), beban finishing lantai dan plafon, serta komponen MEP. Adapun berat volume masing-masing material diambil berdasarkan SNI 1727:2020 Tabel C3.1-1 dan C3.1-2. Berikut merupakan perhitungan beban mati tambahan yang akan diinput sebagai beban gravitasi.

1. Pelat Lantai

- a. Partisi $= 0,72 \text{ kN/m}^2$
- b. Pasir
 - Berat volume $= 1600 \text{ kg/m}^3$
 - Tebal $= 0,02 \text{ m}$
 - Berat pasir $= 1600 \text{ kg/m}^3 \times 0,02\text{m}$
 $= 32 \text{ kg/m}^2$
 $= 0,31 \text{ kN/m}^2$
- c. Spesi
 - Berat volume $= 2100 \text{ kg/m}^3$
 - Tebal $= 0,02 \text{ m}$
 - Berat spesi $= 2100 \text{ kg/m}^3 \times 0,02\text{m}$
 $= 42 \text{ kg/m}^2$
 $= 0,41 \text{ kN/m}^2$
- d. Keramik
 - Berat volume $= 2400 \text{ kg/m}^3$
 - Tebal $= 0,01 \text{ m}$
 - Berat keramik $= 2400 \text{ kg/m}^3 \times 0,01\text{m}$
 $= 24 \text{ kg/m}^2$
 $= 0,24 \text{ kN/m}^2$
- e. Plafon + Rangka $= 0,48 \text{ kN/m}^2$
- f. MEP $= 0,19 \text{ kN/m}^2$

Berdasarkan SNI 1727:2020 pasal 4.3.2 untuk fungsi ruangan yang memiliki beban hidup $\geq 3,83 \text{ kN/m}^2$, maka beban partisi tidak perlu disertakan sehingga total beban mati tambahan pada pelat lantai sebagai berikut.

SIDL pelat lantai dengan partisi = $2,35 \text{ kN/m}^2$

SIDL pelat lantai tanpa partisi = $1,63 \text{ kN/m}^2$

2. Pelat Atap

a. Spesi

Berat volume = 2100 kg/m^3

Tebal = $0,03 \text{ m}$

Berat spesi = $2100 \text{ kg/m}^3 \times 0,03 \text{ m}$
 $= 63 \text{ kg/m}^2$
 $= 0,62 \text{ kN/m}^2$

b. Waterproof

Berat volume = 2100 kg/m^3

Tebal = $0,02 \text{ m}$

Berat waterproof = $2100 \text{ kg/m}^3 \times 0,02 \text{ m}$
 $= 42 \text{ kg/m}^2$
 $= 0,41 \text{ kN/m}^2$

c. Plafon + Rangka = $0,48 \text{ kN/m}^2$

d. MEP = $0,19 \text{ kN/m}^2$

Sehingga total beban mati tambahan pada pelat atap merupakan penjumlahan dari berat masing-masing komponen sebagai berikut.

SIDL pelat atap = $1,70 \text{ kN/m}^2$

3. Tangga

a. Anak Tangga

Berat volume = 2400 kg/m^3

Tebal = $0,14 \text{ m}$

Berat anak tangga = $2400 \text{ kg/m}^3 \times 0,14 \text{ m}$
 $= 336 \text{ kg/m}^2$
 $= 3,30 \text{ kN/m}^2$

b. Pasir

$$\begin{aligned}
 \text{Berat volume} &= 1600 \text{ kg/m}^3 \\
 \text{Tebal} &= 0,02 \text{ m} \\
 \text{Berat pasir} &= 1600 \text{ kg/m}^3 \times 0,02 \text{ m} \\
 &= 32 \text{ kg/m}^2 \\
 &= 0,31 \text{ kN/m}^2
 \end{aligned}$$

c. Spesi

$$\begin{aligned}
 \text{Berat volume} &= 2100 \text{ kg/m}^3 \\
 \text{Tebal} &= 0,02 \text{ m} \\
 \text{Berat spesi} &= 2100 \text{ kg/m}^3 \times 0,02 \text{ m} \\
 &= 42 \text{ kg/m}^2 \\
 &= 0,41 \text{ kN/m}^2
 \end{aligned}$$

d. Keramik

$$\begin{aligned}
 \text{Berat volume} &= 2400 \text{ kg/m}^3 \\
 \text{Tebal} &= 0,01 \text{ m} \\
 \text{Berat keramik} &= 2400 \text{ kg/m}^3 \times 0,01 \text{ m} \\
 &= 24 \text{ kg/m}^2 \\
 &= 0,24 \text{ kN/m}^2
 \end{aligned}$$

Sehingga total beban mati tambahan pada pelat tangga merupakan penjumlahan dari berat masing-masing komponen sebagai berikut.

$$\text{SIDL pelat tangga} = 4,26 \text{ kN/m}^2$$

4. Bordes

a. Pasir

$$\begin{aligned}
 \text{Berat volume} &= 1600 \text{ kg/m}^3 \\
 \text{Tebal} &= 0,02 \text{ m} \\
 \text{Berat pasir} &= 1600 \text{ kg/m}^3 \times 0,02 \text{ m} \\
 &= 32 \text{ kg/m}^2 \\
 &= 0,31 \text{ kN/m}^2
 \end{aligned}$$

b. Spesi

$$\begin{aligned}
 \text{Berat volume} &= 2100 \text{ kg/m}^3 \\
 \text{Tebal} &= 0,02 \text{ m}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Berat spesi} &= 2100 \text{ kg/m}^3 \times 0,02 \text{ m} \\
 &= 42 \text{ kg/m}^2 \\
 &= 0,41 \text{ kN/m}^2
 \end{aligned}$$

c. Keramik

$$\begin{aligned}
 \text{Berat volume} &= 2400 \text{ kg/m}^3 \\
 \text{Tebal} &= 0,01 \text{ m} \\
 \text{Berat keramik} &= 2400 \text{ kg/m}^3 \times 0,01 \text{ m} \\
 &= 24 \text{ kg/m}^2 \\
 &= 0,24 \text{ kN/m}^2
 \end{aligned}$$

Sehingga total beban mati tambahan pada pelat bordes merupakan penjumlahan dari berat masing-masing komponen sebagai berikut.

$$\text{SIDL pelat bordes} = 0,96 \text{ kN/m}^2$$

5. Dinding Bata

a. Bata Ringan

$$\begin{aligned}
 \text{Berat volume} &= 900 \text{ kg/m}^3 \\
 \text{Tebal} &= 0,1 \text{ m} \\
 \text{Berat dinding bata} &= 900 \text{ kg/m}^3 \times 0,1 \text{ m} \\
 &= 90 \text{ kg/m}^2 \\
 &= 0,88 \text{ kN/m}^2
 \end{aligned}$$

b. Plesteran

Sesuai dengan SNI 1727:2020 untuk komponen dinding maka berat plesteran perlu ditambahkan $0,24 \text{ kN/m}^2$ untuk setiap permukaan. Untuk plesteran 2 sisi maka berat plesteran sebagai berikut.

$$\begin{aligned}
 \text{Berat plesteran} &= 2 \times 0,24 \text{ kN/m}^2 \\
 &= 0,48 \text{ kN/m}^2
 \end{aligned}$$

Sehingga total beban dinding sebagai beban mati tambahan sebagai berikut.

$$\text{SIDL dinding bata} = 1,36 \text{ kN/m}^2$$

Beban dinding tersebut masih dalam satuan kN/m^2 sehingga perlu dikonversi menjadi satuan kN/m untuk diinput sebagai beban terdistribusi merata pada software. Konversi dilakukan dengan mengalikan SIDL dinding dengan tinggi dinding. Contoh perhitungan untuk beban dinding lantai 2 sebagai berikut.

$$\begin{aligned}
 \text{SIDL dinding} &= 1,36 \text{ kN/m}^2 \\
 \text{Tinggi lantai} &= 4,2 \text{ m} \\
 \text{Tinggi balok rerata} &= 0,568 \text{ m} \\
 \text{Tinggi dinding} &= \text{Tinggi lantai} - \text{Tinggi balok} \\
 &= 4,2 \text{ m} - 0,57 \text{ m} \\
 &= 3,63 \text{ m} \\
 \text{Berat dinding bata} &= \text{SIDL} \times \text{Tinggi dinding} \\
 &= 1,36 \text{ kN/m}^2 \times 3,63 \text{ m} \\
 &= 4,95 \text{ kN/m}
 \end{aligned}$$

Rekapitulasi perhitungan beban dinding untuk setiap lantai dapat dilihat pada Tabel 5.2 berikut.

Tabel 5.2 Rekapitulasi Beban Dinding Bata

Lt.	Tinggi Lantai (m)	Tinggi Balok (m)	Tinggi Dinding (m)	Berat (kg/m)	Berat (kN/m)
1	4,2	0,57	3,63	504,57	4,95
2	5,2	0,57	4,63	643,50	6,31
3	4,2	0,57	3,63	504,57	4,95
4	4,2	0,57	3,63	504,57	4,95
5	4,2	0,57	3,63	504,57	4,95
6	3,55	0,57	2,98	414,26	4,06

6. Dinding Kaca

a. Kaca 10 mm

$$\begin{aligned}
 \text{Berat volume} &= 2550 \text{ kg/m}^3 \\
 \text{Tebal} &= 0,01 \text{ m} \\
 \text{Berat dinding kaca} &= 2550 \text{ kg/m}^3 \times 0,01 \text{ m} \\
 &= 25,5 \text{ kg/m}^2 \\
 &= 0,25 \text{ kN/m}^2
 \end{aligned}$$

b. Frame dan Filler = 0,15 kN/m²

Sehingga total beban dinding sebagai beban mati tambahan sebagai berikut.

$$\text{SIDL dinding kaca} = 0,4 \text{ kN/m}^2$$

Contoh perhitungan konversi menjadi beban terdistribusi merata untuk dinding kaca pada lantai 2 sebagai berikut.

$$\begin{aligned}
 \text{Tinggi lantai} &= 4,2 \text{ m} \\
 \text{Tinggi balok rerata} &= 0,568 \text{ m} \\
 \text{Tinggi dinding} &= \text{Tinggi lantai} - \text{Tinggi balok} \\
 &= 4,2 \text{ m} - 0,57 \text{ m} \\
 &= 3,63 \text{ m} \\
 \text{Berat dinding kaca} &= \text{SIDL} \times \text{Tinggi dinding} \\
 &= 0,4 \text{ kN/m}^2 \times 3,63 \text{ m} \\
 &= 1,45 \text{ kN/m}
 \end{aligned}$$

Rekapitulasi perhitungan beban dinding untuk setiap lantai dapat dilihat pada Tabel 5.3 berikut.

Tabel 5.3 Rekapitulasi Beban Dinding Kaca

Lt.	Tinggi Lantai (m)	Tinggi Balok (m)	Tinggi Dinding (m)	Berat (kg/m)	Berat (kN/m)
1	4,2	0,57	3,63	148,14	1,45
2	5,2	0,57	4,63	188,93	1,85
3	4,2	0,57	3,63	148,14	1,45
4	4,2	0,57	3,63	148,14	1,45
5	4,2	0,57	3,63	148,14	1,45
6	3,55	0,57	2,98	121,63	1,19

5.2.3. Beban Hidup (*Live Load*)

Beban hidup seperti yang disebutkan pada subsubbab 3.3.2 ditentukan berdasarkan fungsi ruangan yang nilainya diinput pada software sebagai beban terdistribusi merata pada pelat. Nilai beban hidup yang digunakan diambil berdasarkan SNI 1727:2020 Tabel 4.3.1 dan C4.3-1. Untuk Gedung A dan Gedung B memiliki karakteristik ruangan yang serupa sehingga nilai beban hidup yang digunakan dapat dirangkum pada Tabel 5.4 berikut.

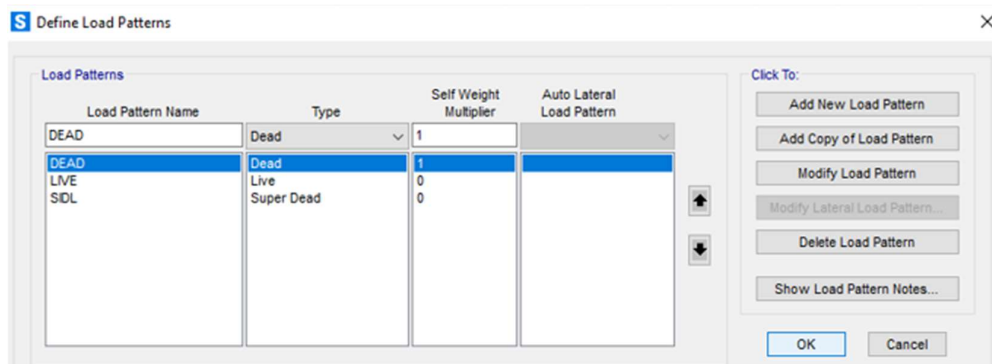
Tabel 5.4 Rekapitulasi Beban Hidup

No	Fungsi Ruang	Q Live (kN/m ²)	Q SIDL (kN/m ²)	Klasifikasi
1	Koridor di atas lantai pertama	3,83	1,63	Koridor lantai lain
2	Toilet, spoel hoek	2,87	2,35	Toilet Rooms
3	Ruang Tunggu	4,79	1,63	Kursi dapat dipindahkan
4	Nurse station, Klinik, R. Konsul, R. Dokter, Terapi	2,4	2,35	Kantor
5	Retail, apotek, penyerahan obat	3,59	2,35	Toko eceran
6	Ruang operasi, laboratorium	2,87	2,35	R. Operasi dan Laboratorium
7	Ruang HCU, ICU, Ranap	1,92	2,35	Ruang pasien
8	Rekam medik, gudang, depo	6	1,63	Gudang ringan
9	Gymnasium, Playground	4,79	1,63	Tempat berkumpul lainnya
10	Roof garden	4,79	1,70	Atap vegetasi tempat berkumpul
11	Atap dak	0,96	1,70	Atap datar
12	Tangga	4,79	2,84	Tangga dan jalan keluar
13	Bores	4,79	0,96	Tangga dan jalan keluar

Berdasarkan ketentuan pada SNI 1726:2019 pasal 7.7.2 dimana jika terdapat ruang penyimpanan (pada penelitian ini adalah ruangan yang termasuk klasifikasi gudang ringan) dengan berat lebih dari 5% terhadap berat total lantai, maka beban hidup perlu disertakan sebagai berat seismik efektif sekurangnya 25%. Pada penelitian ini beban ruang penyimpanan tidak lebih dari 5% sehingga beban hidup tidak perlu disertakan sebagai berat seismik efektif.

5.2.4. Input Beban Gravitasi Pada SAP2000

Di SAP2000 nilai beban gravitasi (beban mati tambahan dan beban hidup) diinput sebagai distributed load pada elemen balok dan pelat. Sebelumnya perlu mendefinisikan load pattern dengan cara *define > load patterns > Type* pilih “Live” dengan *multiplier 0 > add*. Lakukan cara yang sama untuk type “super dead” Berikut tampilan load patterns pada SAP.

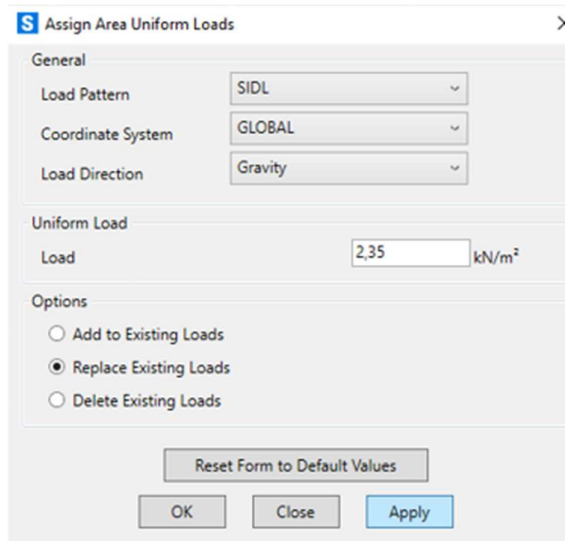


Gambar 5.24 Define Load Pattern

Berikut merupakan tahapan input beban pada setiap elemen.

1. Input Beban Pada Pelat

Beban gravitasi yang diinput pada pelat meliputi beban SIDL pelat dan Live Load sesuai fungsi ruang yang ditopang pelat. Caranya dengan *select* elemen pelat yang ingin di *assign > assign > area load > uniform(shell) > load pattern* pilih *SIDL* > pada kotak dialog “uniform load” input nilai SIDL yang sudah ditentukan sebelumnya. Lakukan langkah yang sama untuk load pattern “LIVE”. Hal yang sama juga berlaku untuk pelat atap, pelat tangga, dan pelat bordes.



S Assign Area Uniform Loads [X]

General

Load Pattern: SIDL

Coordinate System: GLOBAL

Load Direction: Gravity

Uniform Load

Load: 2,35 kN/m²

Options

☐ Add to Existing Loads

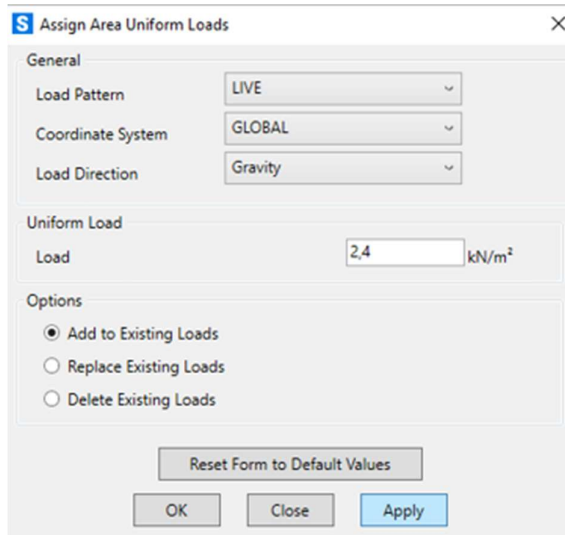
☒ Replace Existing Loads

☐ Delete Existing Loads

Reset Form to Default Values

OK Close Apply

Gambar 5.25 Input SIDL Pada Pelat



S Assign Area Uniform Loads [X]

General

Load Pattern: LIVE

Coordinate System: GLOBAL

Load Direction: Gravity

Uniform Load

Load: 2,4 kN/m²

Options

☒ Add to Existing Loads

☐ Replace Existing Loads

☐ Delete Existing Loads

Reset Form to Default Values

OK Close Apply

Gambar 5.26 Input *Live Load* Pada Pelat

Untuk mengecek apakah beban sudah terinput atau belum bisa dilakukan dengan klik kanan pada salah satu elemen pelat > *loads*. Akan muncul tampilan seperti pada gambar 5.27 jika beban sudah terinput.

Object Model - Area Information

Location Assignments Loads

Identification

Label: S1

GUID: 2f21b8b5-06c6-40aa-b50b-e2a68e97e6e0

Load Pattern	Value
Uniform Load	LIVE
Coordinate System	GLOBAL
Load Direction	Gravity
Force/Area	2.4
Load Pattern	SIDL
Uniform Load	SIDL
Coordinate System	GLOBAL
Load Direction	Gravity
Force/Area	2.35

Assign Load...

KN, m, C

Reset All

Update Display

Modify Display

OK

Cancel

Double click white background cell to edit item.

Gambar 5.27 Cek Input Beban Pada Pelat

2. Input Beban Pada Balok

Beban gravitasi yang diinput pada balok meliputi beban SIDL untuk dinding bata atau kaca. Caranya dengan *select* elemen balok yang ingin di *assign* > *assign* > *frame load* > *distributed* > *load pattern* pilih *SIDL* > pada kotak dialog “uniform load” input nilai SIDL dinding per-m yang sudah ditentukan sebelumnya.

Assign Frame Distributed Loads

General

Load Pattern: SIDL

Coordinate System: GLOBAL

Load Direction: Gravity

Load Type: Force

Options

☐ Add to Existing Loads

☒ Replace Existing Loads

☐ Delete Existing Loads

Uniform Load: 4.95 kN/m

Trapezoidal Loads

	1.	2.	3.	4.
Relative Distance	0	0.25	0.75	1
Loads	0	0	0	0 kN/m

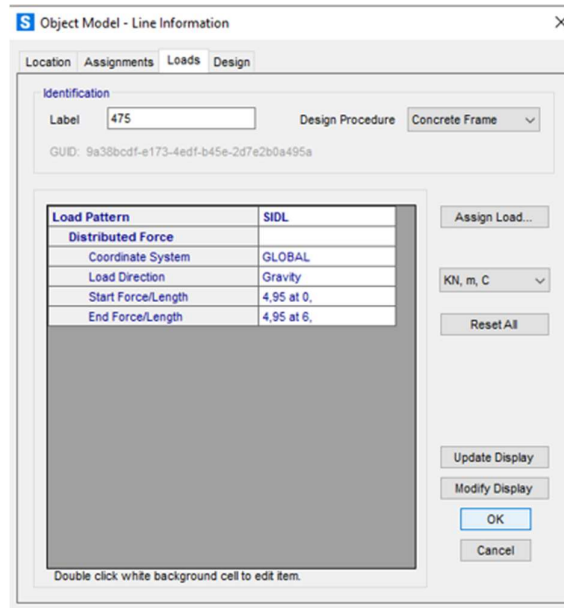
☒ Relative Distance from End-I ☐ Absolute Distance from End-I

Reset Form to Default Values

OK Close Apply

Gambar 5.28 Input SIDL Dinding Pada Balok

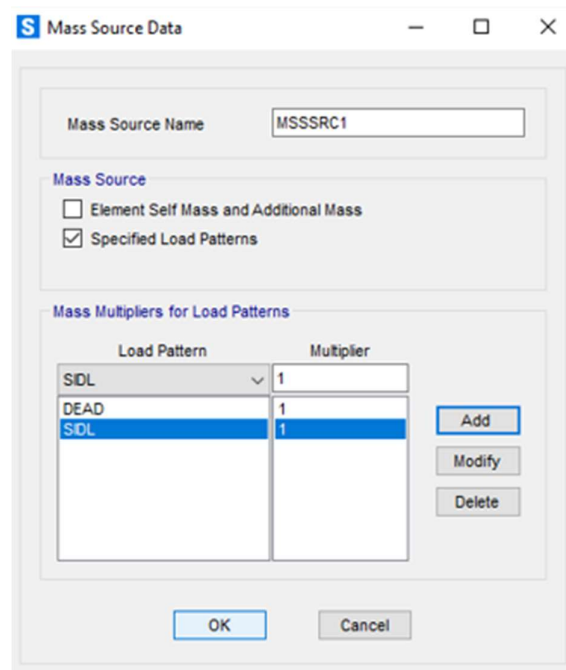
Untuk mengecek apakah beban sudah terinput atau belum bisa dilakukan dengan klik kanan pada salah satu elemen balok > *loads*. Akan muncul tampilan seperti pada gambar 5.29 jika beban sudah terinput.



Gambar 5.29 Cek Input Beban Pada Balok

5.2.5. Output Berat Seismik Efektif

Seperti dijelaskan pada subsubbab sebelumnya, maka berat sesimik efektif yang diperhitungkan untuk menentukan beban gempa hanya terdiri atas beban mati (*dead load*) dan beban mati tambahan (*sidl*). Pada SAP2000 untuk memunculkan output ini maka sebelumnya perlu mendefinisikan sumber massa (*mass source*) yang digunakan. Caranya pilih menu *define > mass source > checklist* kotak “*specified load patterns*” dan unchecklist kotak “*element self mass*” sehingga berat sendiri dihitung sebagai *dead load > add load pattern “DEAD”* dengan *multiplier* 1 dan “*SIDL*” dengan *multiplier* 1 > ok.



Gambar 5.30 Define Mass Source

Untuk menampilkan output berat seismik lakukan *run analysis > display > show tables > analysis results > structure output > base reaction > pilih output case “DEAD” dan “SIDL”*. Berikut merupakan rekapitulasi berat seismik efektif untuk Gedung A dan Gedung B pada Tabel 5.5.

Tabel 5.5 Rekapitulasi Berat Seismik Efektif

Beban	Gedung A (kN)	Gedung B (kN)
Dead Load	66.124,88	59.078,18
SIDL	23.382,81	17.580,61
Total	89.507,69	76.658,79

5.3. Parameter Seismik

Untuk melakukan analisis diperlukan beberapa parameter berdasarkan karakteristik bangunan dan lokasinya. Berikut uraian lebih lanjut untuk penentuan setiap parameter seismik yang digunakan.

1. Penentuan Kelas Situs

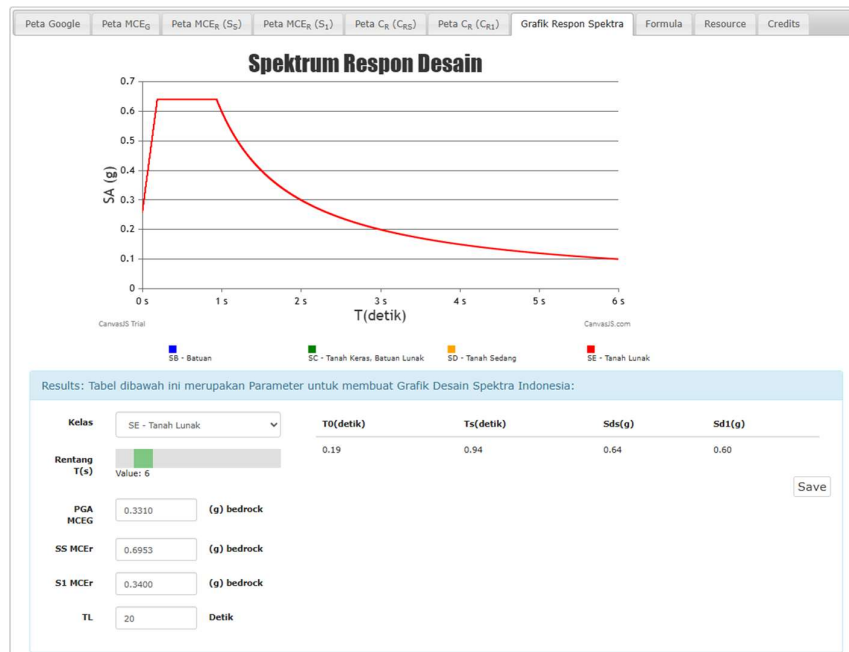
Kelas situs untuk lokasi bangunan ini berdasarkan data hasil penyelidikan tanah dan tabel 3.1 pada subsubbab 3.4.1 yaitu termasuk kategori tanah lunak (SE). Kategori ini berlaku untuk setiap Gedung A dan Gedung B.

2. Penentuan Spektral Desain

Penentuan nilai spektral desain berdasarkan subsubbab 3.4.1 sebagai berikut.

a. Spektral Gempa Periode Pendek dan 1 Detik

Nilai S_s dan S_1 dapat ditentukan menggunakan peta parameter gerak tanah pada SNI 1726:2019 sesuai lokasi bangunan atau dari website resmi Kementerian Pekerjaan Umum yaitu Desain Spektra Indonesia.



Gambar 5.31 Parameter S_s dan S₁ RSA Ciptakarya

(Sumber : Website resmi RSA Ciptakarya Kementerian PU, 2025)

Berdasarkan hasil dari website tersebut sesuai dengan lokasi dan kelas situs bangunan, maka digunakan parameter berikut.

$$S_s = 0,6953 \text{ g}$$

$$S_1 = 0,3400 \text{ g}$$

Nilai ini berlaku untuk setiap Gedung A dan Gedung B.

b. Koefisien Situs Periode Pendek dan 1 Detik

Nilai F_a dan F_v sesuai Tabel 3.2 dan 3.3 pada subsubbab 3.4.1 ditentukan sebagai berikut.

$$F_a = 1,3875$$

$$F_v = 2,6400$$

Nilai ini berlaku untuk setiap Gedung A dan Gedung B.

c. Spektral Percepatan Periode Pendek dan 1 Detik

Nilai S_{Ms} dan S_{M1} sesuai persamaan 3.5 dan 3.6 pada subsubbab 3.4.1 ditentukan sebagai berikut.

$$\begin{aligned} S_{Ms} &= 0,6953 \times 1,3875 \\ &= 0,9647 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} S_{M1} &= 0,3400 \times 2,6400 \\ &= 0,8976 \end{aligned}$$

Nilai ini berlaku untuk setiap Gedung A dan Gedung B.

d. Spektral Desain Periode Pendek dan 1 Detik

Nilai S_{Ds} dan S_{D1} sesuai persamaan 3.7 dan 3.8 pada subsubbab 3.4.1 ditentukan sebagai berikut.

$$\begin{aligned} S_{Ds} &= \frac{2}{3} \times 0,9647 \\ &= 0,6432 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} S_{D1} &= \frac{2}{3} \times 0,8976 \\ &= 0,5984 \end{aligned}$$

Nilai ini berlaku untuk setiap Gedung A dan Gedung B.

3. Kategori Risiko

Sesuai dengan Tabel 3.4 pada subsubbab 3.4.2 untuk fungsi bangunan sebagai rumah sakit maka tergolong kedalam kategori risiko IV. Kategori ini berlaku untuk setiap Gedung A dan Gedung B.

4. Faktor Keutamaan (I_e)

Sesuai dengan Tabel 3.5 pada subsubbab 3.4.2 untuk kategori risiko IV maka bangunan ini memiliki faktor keutamaan (I_e) 1,5. Nilai ini berlaku untuk setiap Gedung A dan Gedung B.

5. Kategori Desain Seismik (KDS)

Sesuai dengan Tabel 3.6 dan 3.7 pada subsubbab 3.4.3 untuk bangunan dengan kategori risiko IV serta memiliki nilai SD_s dan SD_1 berturut-turut adalah 0,6432 dan 0,5984, maka bangunan ini memiliki kategori desain seismik D. Nilai ini berlaku untuk setiap Gedung A dan Gedung B.

6. Periode Struktur

a. Parameter C_t dan X

Nilai C_t dan X sesuai tabel 3.8 subsubbab 3.4.4 ditentukan berdasarkan sistem struktur yang digunakan pada masing-masing arah ortogonal. Nilai C_t dan X untuk masing-masing Gedung A dan Gedung B ditentukan sebagai berikut.

1) Gedung A

Arah X (sistem rangka) :

$$C_t = 0,0466$$

$$X = 0,9$$

Arah Y (sistem ganda) :

$$C_t = 0,0488$$

$$X = 0,75$$

2) Gedung B

Arah X (sistem ganda) :

$$C_t = 0,0488$$

$$X = 0,75$$

Arah Y (sistem rangka) :

$$C_t = 0,0466$$

$$X = 0,9$$

b. Periode Fundamental Pendekatan (T_a)

Nilai T_a ditentukan sesuai persamaan 3.9 pada subsubbab 3.4.4 untuk masing-masing Gedung A dan Gedung B sebagai berikut.

1) Gedung A

Arah X (sistem rangka) :

$$\begin{aligned} T_{aX} &= 0,0466 \times 30,05^{0,9} \\ &= 0,9964 \text{ detik} \end{aligned}$$

Arah Y (sistem ganda) :

$$\begin{aligned} T_{aY} &= 0,0488 \times 30,05^{0,75} \\ &= 0,6263 \text{ detik} \end{aligned}$$

2) Gedung B

Arah X (sistem ganda) :

$$\begin{aligned} T_{aX} &= 0,0488 \times 30,05^{0,75} \\ &= 0,6263 \text{ detik} \end{aligned}$$

Arah Y (sistem rangka) :

$$\begin{aligned} T_{aY} &= 0,0466 \times 30,05^{0,9} \\ &= 0,9964 \text{ detik} \end{aligned}$$

c. Periode Maksimum

Koefisien batas atas (C_u) yang ditentukan berdasarkan nilai SD_1 sesuai tabel 3.9 diambil sebesar 1,4. Nilai ini berlaku untuk setiap Gedung A dan Gedung B. Berikutnya nilai periode maksimum yang dihitung dengan persamaan 3.11 untuk masing-masing gedung sebagai berikut.

1) Gedung A

Arah X (sistem rangka) :

$$\begin{aligned} T_{aX} &= 1,4 \times 0,9964 \\ &= 1,3950 \text{ detik} \end{aligned}$$

Arah Y (sistem ganda) :

$$\begin{aligned} T_a Y &= 1,4 \times 0,6263 \\ &= 0,8769 \text{ detik} \end{aligned}$$

2) Gedung B

Arah X (sistem ganda) :

$$\begin{aligned} T_a X &= 1,4 \times 0,6263 \\ &= 0,8769 \text{ detik} \end{aligned}$$

Arah Y (sistem rangka) :

$$\begin{aligned} T_a Y &= 1,4 \times 0,9964 \\ &= 1,3950 \text{ detik} \end{aligned}$$

d. Periode Software (T_c)

Nilai periode *crack* (T_c) yang diperoleh dari hasil analisis software untuk Gedung A dan Gedung B dapat dilihat melalui menu *display > show table > structure output > modal information > modal participation mass ratio*. Akan muncul kotak dialog seperti berikut.

OutputCase	StepType	StepNum	Period	UX	UY	UZ	SumUX	SumUY	SumUZ	RX
	Text	Unitless	Sec	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless
MODAL	Mode	1	1,410584	0,77487	6,742E-06	1,591E-09	0,77487	6,742E-06	1,591E-09	3,218E-06
MODAL	Mode	2	0,789289	1,463E-05	0,68372	2,122E-06	0,77489	0,68373	2,123E-06	0,20389
MODAL	Mode	3	0,570406	1,641E-06	0,00242	5,711E-06	0,77489	0,68615	7,834E-06	0,00456
MODAL	Mode	4	0,467228	0,12381	9,155E-06	1,427E-06	0,8987	0,68616	9,262E-06	1,778E-07
MODAL	Mode	5	0,27015	0,00014	1,13E-06	0,00089	0,89884	0,68616	0,0009	0,00035
MODAL	Mode	6	0,255842	0,05469	2,523E-05	3,42E-06	0,95354	0,68618	0,0009	4,355E-05
MODAL	Mode	7	0,234785	8,662E-07	1,619E-06	0,00062	0,95354	0,68618	0,00153	0,00025
MODAL	Mode	8	0,233353	6,366E-05	1,227E-05	0,00093	0,9536	0,6862	0,00246	0,00021
MODAL	Mode	9	0,214509	2,254E-05	0,18953	0,00047	0,95362	0,87573	0,00293	0,20257
MODAL	Mode	10	0,195461	8,475E-08	0,00018	0,005	0,95362	0,87591	0,00793	0,00592
MODAL	Mode	11	0,192467	3,368E-06	0,00132	0,00225	0,95363	0,87723	0,01018	0,00663
MODAL	Mode	12	0,184685	3,259E-07	0,0005	0,00256	0,95363	0,87772	0,01274	0,00594
MODAL	Mode	13	0,178315	8,568E-05	0,00019	0,00102	0,95371	0,87792	0,01376	0,00108

Gambar 5.32 Output Crack Period Gedung A

OutputCase	StepType	StepNum	Period Sec	UX	UY	UZ	SumUX	SumUY	SumUZ	RX
MODAL	Mode	1	1,404798	0,00015	0,79668	1,282E-06	0,00015	0,79668	1,282E-06	0,03664
MODAL	Mode	2	1,101199	3,088E-05	6,342E-05	0,00017	0,00018	0,79675	0,00017	0,00024
MODAL	Mode	3	0,783932	0,67351	0,00033	2,882E-05	0,67368	0,79708	0,0002	1,36E-05
MODAL	Mode	4	0,596689	0,03158	0,00013	1,323E-08	0,70526	0,79721	0,0002	4,003E-05
MODAL	Mode	5	0,42089	8,211E-05	0,10841	1,771E-07	0,70534	0,90562	0,0002	0,09261
MODAL	Mode	6	0,259437	3,255E-05	0,00019	7,424E-06	0,70538	0,90581	0,00021	6,695E-05
MODAL	Mode	7	0,243102	3,193E-05	0,05189	1,225E-06	0,70541	0,9577	0,00021	0,01434
MODAL	Mode	8	0,210001	2,961E-06	1,622E-07	0,0003	0,70541	0,9577	0,00051	0,00066
MODAL	Mode	9	0,209804	8,704E-06	3,278E-07	0,00258	0,70542	0,9577	0,00309	0,00542
MODAL	Mode	10	0,209599	5,263E-06	1,759E-05	0,00031	0,70542	0,95771	0,00339	0,00081
MODAL	Mode	11	0,209449	4,374E-06	2,082E-05	0,0002	0,70543	0,95773	0,00359	0,00052
MODAL	Mode	12	0,19191	0,00109	3,797E-05	5,628E-06	0,70652	0,95777	0,00359	6,534E-05
MODAL	Mode	13	0,188596	0,17258	6,62E-06	7,465E-05	0,8791	0,95778	0,00367	0,00016

Gambar 5.33 Output Crack Period Gedung B

Nilai T_c diambil berdasarkan nilai *displacement* dominan pada arah X dan Y. Berikut nilai T_c pada masing-masing gedung.

1) Gedung A

$$T_c X = 1,4106 \text{ detik}$$

$$T_c Y = 0,7893 \text{ detik}$$

2) Gedung B

$$T_c X = 0,7839 \text{ detik}$$

$$T_c Y = 1,4048 \text{ detik}$$

e. Periode Struktur Pakai

Sesuai dengan penjelasan pada subsubbab 3.4.4 maka nilai periode yang telah didapatkan akan dibandingkan untuk memperoleh periode getar pakai.

Berikut penentuan periode getar pakai untuk masing-masing gedung.

1) Gedung A

Arah X

$$T_a X = 0,9964 \text{ detik}$$

$$T_c X = 1,4106 \text{ detik}$$

$$T_{max} X = 1,3950 \text{ detik}$$

Karena $1,4106 > 1,3950$, maka digunakan $T_x = 1,3950 \text{ detik}$

Arah Y

$$T_a Y = 0,6263 \text{ detik}$$

$$T_c Y = 0,7893 \text{ detik}$$

$$T_{\max} Y = 0,8769 \text{ detik}$$

Karena $0,6263 < 0,7893 < 0,8769$, maka digunakan $T_y = 0,7893 \text{ detik}$

2) Gedung B

Arah X

$$T_a X = 0,6263 \text{ detik}$$

$$T_c X = 0,7839 \text{ detik}$$

$$T_{\max} X = 0,8769 \text{ detik}$$

Karena $0,6263 < 0,7839 < 0,8769$, maka digunakan $T_x = 0,7839 \text{ detik}$

Arah Y

$$T_a Y = 0,9964 \text{ detik}$$

$$T_c Y = 1,4048 \text{ detik}$$

$$T_{\max} Y = 1,3950 \text{ detik}$$

Karena $1,4048 > 1,3950$, maka digunakan $T_y = 1,3950 \text{ detik}$

f. Periode Panjang (T_L)

Nilai periode panjang diperoleh dari peta transisi periode panjang seperti pada subbab 3.5 Gambar 3.3 atau melalui website resmi RSA Ciptakarya sesuai lokasi bangunan. Untuk lokasi bangunan ini digunakan nilai periode panjang $T_L = 20 \text{ detik}$

7. Koefisien Respon Seismik

a. Koefisien Modifikasi Respon (R)

Sesuai tabel 3.8 pada subsubbab 3.4.4 nilai R ditentukan berdasarkan jenis sistem struktur pada setiap sumbu ortogonal gedung. Berikut penentuan nilai parameter R untuk masing-masing Gedung A dan Gedung B.

1) Gedung A

$$\text{Arah X (sistem rangka), } R = 8$$

$$\text{Arah Y (sistem ganda), } R = 7$$

2) Gedung B

$$\text{Arah X (sistem ganda), } R = 7$$

$$\text{Arah Y (sistem rangka), } R = 8$$

b. Faktor Pembesaran Defleksi (C_d)

Sesuai tabel 3.8 pada subsubbab 3.4.4 nilai C_d ditentukan berdasarkan jenis sistem struktur pada setiap sumbu ortogonal gedung. Berikut penentuan nilai parameter C_d untuk masing-masing Gedung A dan Gedung B.

1) Gedung A

$$\text{Arah X (sistem rangka), } C_d = 5,5$$

$$\text{Arah Y (sistem ganda), } C_d = 5,5$$

2) Gedung B

$$\text{Arah X (sistem ganda), } C_d = 5,5$$

$$\text{Arah Y (sistem rangka), } C_d = 5,5$$

c. Faktor Kuat Lebih Sistem (Ω_0)

Sesuai tabel 3.8 pada subsubbab 3.4.4 nilai Ω_0 ditentukan berdasarkan jenis sistem struktur pada setiap sumbu ortogonal gedung. Berikut penentuan nilai parameter Ω_0 untuk masing-masing Gedung A dan Gedung B.

1) Gedung A

$$\text{Arah X (sistem rangka), } \Omega_0 = 3$$

$$\text{Arah Y (sistem ganda), } \Omega_0 = 2,5$$

2) Gedung B

$$\text{Arah X (sistem ganda), } \Omega_0 = 2,5$$

$$\text{Arah Y (sistem rangka), } \Omega_0 = 3$$

d. Koefisien Respon Seismik (C_s)

Berikut perhitungan untuk menentukan nilai koefisien C_s dihitung dengan persamaan 3.12 untuk masing-masing arah ortogonal pada setiap gedung.

1) Gedung A

Arah X

$$\begin{aligned} C_s X &= \frac{0,6432}{\left(\frac{8}{1,5}\right)} \\ &= 0,1206 \end{aligned}$$

Arah Y

$$Cs \quad Y = \frac{0,6432}{\left(\frac{7}{1,5}\right)} = 0,1378$$

2) Gedung B

Arah X

$$Cs \quad X = \frac{0,6432}{\left(\frac{7}{1,5}\right)} = 0,1378$$

Arah Y

$$Cs \quad Y = \frac{0,6432}{\left(\frac{8}{1,5}\right)} = 0,1206$$

e. Koefisien Respon Seismik Maksimum (Cs_{max})

Nilai koefisien Cs maksimum ditentukan berdasarkan periode pakai untuk masing-masing arah ortogonal terhadap periode panjangnya. Berikut perhitungan untuk menentukan nilai Cs maksimum.

1) Gedung A

Arah X

$$T_x = 1,3950 \text{ detik}$$

$$T_L = 20 \text{ detik}$$

Karena $T_x < T_L$, maka digunakan perhitungan menurut persamaan 3.13.

$$Cs_{max} = \frac{0,5984}{1,3950 \times \left(\frac{8}{1,5}\right)} = 0,0804$$

Arah Y

$$T_y = 0,7893 \text{ detik}$$

$$T_L = 20 \text{ detik}$$

Karena $T_y < T_L$, maka digunakan perhitungan menurut persamaan 3.13.

$$\begin{aligned} C_s \text{ max} &= \frac{0,5984}{0,7893 \times \left(\frac{7}{1,5}\right)} \\ &= 0,1625 \end{aligned}$$

2) Gedung B

Arah X

$$T_x = 0,7839 \text{ detik}$$

$$T_L = 20 \text{ detik}$$

Karena $T_x < T_L$, maka digunakan perhitungan menurut persamaan 3.13.

$$\begin{aligned} C_s \text{ max} &= \frac{0,5984}{0,7839 \times \left(\frac{7}{1,5}\right)} \\ &= 0,1636 \end{aligned}$$

Arah Y

$$T_y = 1,3950 \text{ detik}$$

$$T_L = 20 \text{ detik}$$

Karena $T_y < T_L$, maka digunakan perhitungan menurut persamaan 3.13.

$$\begin{aligned} C_s \text{ max} &= \frac{0,5984}{1,3950 \times \left(\frac{8}{1,5}\right)} \\ &= 0,0804 \end{aligned}$$

f. Koefisien Respon Seismik Minimum ($C_s \text{ min}$)

Nilai koefisien C_s minimum ditentukan menurut persamaan 3.15 sebagai berikut.

1) Gedung A

$$\begin{aligned} C_s \text{ min} &= 0,044 \times 0,6432 \times 1,5 \\ &= 0,0424 \end{aligned}$$

2) Gedung B

$$\begin{aligned} C_s \text{ min} &= 0,044 \times 0,6432 \times 1,5 \\ &= 0,0424 \end{aligned}$$

g. Koefisien Respon Seismik Pakai (C_s pakai)

Berdasarkan nilai C_s , C_s minimum, dan C_s maksimum yang diperoleh, berikutnya ditentukan nilai C_s yang digunakan dalam analisis. Berikut nilai C_s untuk masing-masing Gedung A dan Gedung B.

1) Gedung A

$$C_s X = 0,0804$$

$$C_s Y = 0,1378$$

2) Gedung B

$$C_s X = 0,1378$$

$$C_s Y = 0,0804$$

Rekapitulasi hasil perhitungan parameter seismik untuk Gedung A dan Gedung B dapat dilihat pada Tabel 5.6 dan 5.7 berikut.

Tabel 5.6 Parameter Seismik Gedung A

Parameter	Notasi	Nilai	Satuan
Kategori resiko bangunan		IV	
Faktor keutamaan	I_e	1,5	
Tinggi struktur	h	30,0500	m
Spektral gempa periode pendek	S_s	0,6953	g
Spektral gempa periode 1 detik	S_1	0,3400	g
Koefisien situs periode pendek	F_a	1,3875	
Koefisien situs periode 1 detik	F_v	2,6400	
Spektrum percepatan periode pendek	$S M_s$	0,9647	
Spektrum percepatan periode 1 detik	$S M_1$	0,8976	
Percepatan spektral desain periode pendek	$S D_s$	0,6432	
Percepatan spektral desain periode 1 detik	$S D_1$	0,5984	
Koefisien resiko terpetakan periode pendek	$C R_s$	0,9500	
Koefisien resiko terpetakan periode 1 detik	$C R_1$	0,9000	
$S D S_r = S D S \times C R S$	$S D S_r$	0,6110	
$S D I_r = S D I \times C R I$	$S D I_r$	0,5386	
Periode puncak awal	T_o	0,1861	Detik
Periode puncak akhir	T_s	0,9304	Detik
Periode Panjang	T_L	20,0000	Detik
Kategori desain seismik	$K D S$	D	

Lanjutan Tabel 5.6 Parameter Seismik Gedung A

Parameter	Notasi	Nilai	Satuan
Koefisien modifikasi respon arah X	R_x	8,0000	
Koefisien modifikasi respon arah Y	R_y	7,0000	
Faktor kuat lebih sistem arah X	Ω_x	3,0000	
Faktor kuat lebih sistem arah Y	Ω_y	2,5000	
Faktor Pembesaran Defleksi arah X	C_{dx}	5,5000	
Faktor Pembesaran Defleksi arah Y	C_{dy}	5,5000	
Parameter periode pendekatan ct arah X	C_{tx}	0,0466	
Parameter periode pendekatan ct arah Y	C_{ty}	0,0488	
Parameter periode pendekatan x arah X	X_x	0,9000	
Parameter periode pendekatan x arah Y	X_y	0,7500	
Koefisien batas atas periode pendekatan	C_u	1,4000	
Periode fundamental pendekatan arah X	$T_{a\ x}$	0,9964	Detik
Periode fundamental pendekatan arah Y	$T_{a\ y}$	0,6263	Detik
Periode getar model SAP2000/Etabs Arah X	$T_{c\ x}$	1,4106	Detik
Periode getar model SAP2000/Etabs Arah Y	$T_{c\ y}$	0,7893	Detik
Periode pendekatan maksimum arah X	$T_{max\ x}$	1,3950	Detik
Periode pendekatan maksimum arah Y	$T_{max\ y}$	0,8769	Detik
Periode pakai arah X	$T_x\ pakai$	1,3950	Detik
Periode pakai arah y	$T_y\ pakai$	0,7893	Detik
Koefisien respon seismik pendekatan arah X	$C_s\ x$	0,1206	
Koefisien respon seismik pendekatan arah Y	$C_s\ y$	0,1378	
Koefisien respon seismik maksimum X	$C_s\ max\ X$	0,0804	
Koefisien respon seismik maksimum Y	$C_s\ max\ Y$	0,1625	
Koefisien respon seismik minimum arah X	$C_s\ min\ X$	0,0424	
Koefisien respon seismik minimum arah Y	$C_s\ min\ Y$	0,0424	
Koefisien respon seismik pakai arah X	$C_s\ pakai\ X$	0,0804	
Koefisien respon seismik pakai arah Y	$C_s\ pakai\ Y$	0,1378	
Eksponen periode struktur arah X	$k\ x$	1,4475	
Eksponen periode struktur arah Y	$k\ y$	1,1446	

Tabel 5.7 Parameter Seismik Gedung B

Parameter	Notasi	Nilai	Satuan
Kategori resiko bangunan		IV	
Faktor keutamaan	Ie	1,5000	
Tinggi struktur	h	30,0500	m
Spektral gempa periode pendek	Ss	0,6953	g
Spektral gempa periode 1 detik	S1	0,3400	g
Koefisien situs periode pendek	Fa	1,3875	
Koefisien situs periode 1 detik	Fv	2,6400	
Spektrum percepatan periode pendek	SMs	0,9647	
Spektrum percepatan periode 1 detik	SM1	0,8976	
Percepatan spektral desain periode pendek	SDs	0,6432	
Percepatan spektral desain periode 1 detik	SD1	0,5984	
Koefisien resiko terpetakan periode pendek	CRs	0,9500	
Koefisien resiko terpetakan periode 1 detik	CR1	0,9000	
SDSr = SDS x CRS	SDSr	0,6110	
SD1r = SD1 x CR1	SD1r	0,5386	
Periode puncak awal	To	0,1861	Detik
Periode puncak akhir	Ts	0,9304	Detik
Periode Panjang	TL	20,0000	Detik
Kategori desain seismik	KDS	D	
Koefisien modifikasi respon arah X	Rx	7,0000	
Koefisien modifikasi respon arah Y	Ry	8,0000	
Faktor kuat lebih sistem arah X	Ω_x	2,5000	
Faktor kuat lebih sistem arah Y	Ω_y	3,0000	
Faktor Pembesaran Defleksi arah X	Cdx	5,5000	
Faktor Pembesaran Defleksi arah Y	Cdy	5,5000	
Parameter periode pendekatan ct arah X	Ctx	0,0488	
Parameter periode pendekatan ct arah Y	Cty	0,0466	
Parameter periode pendekatan x arah X	Xx	0,7500	
Parameter periode pendekatan x arah Y	Xy	0,9000	
Koefisien batas atas periode pendekatan	Cu	1,4000	
Periode fundamental pendekatan arah X	Ta x	0,6263	Detik
Periode fundamental pendekatan arah Y	Ta y	0,9964	Detik
Periode getar model SAP2000/Etabs Arah X	Tc x	0,7839	Detik
Periode getar model SAP2000/Etabs Arah Y	Tc y	1,4048	Detik
Periode pendekatan maksimum arah X	Tmax x	0,8769	Detik
Periode pendekatan maksimum arah Y	Tmax y	1,3950	Detik

Lanjutan Tabel 5.7 Parameter Seismik Gedung B

Parameter	Notasi	Nilai	Satuan
Periode pakai arah X	T _x pakai	0,7839	Detik
Periode pakai arah y	T _y pakai	1,3950	Detik
Koefisien respon seismik pendekatan arah X	C _s x	0,1378	
Koefisien respon seismik pendekatan arah Y	C _s y	0,1206	
Koefisien respon seismik maksimum X	C _s max X	0,1636	
Koefisien respon seismik maksimum Y	C _s max Y	0,0804	
Koefisien respon seismik minimum arah X	C _s min X	0,0424	
Koefisien respon seismik minimum arah Y	C _s min Y	0,0424	
Koefisien respon seismik pakai arah X	C _s pakai X	0,1378	
Koefisien respon seismik pakai arah Y	C _s pakai Y	0,0804	
Eksponen periode struktur arah X	k x	1,1420	
Eksponen periode struktur arah Y	k y	1,4475	

5.4. Gaya Geser Dasar Statik Ekuivalen

Gaya geser dasar statik ekuivalen adalah besaran gaya horizontal total yang bekerja pada dasar struktur akibat gempa, dimana respon struktur terhadap gempa direpresentasikan sebagai satu nilai gaya geser dasar yang kemudian didistribusikan ke tiap tingkat bangunan sesuai massa dan ketinggiannya.

5.4.1. Gaya Geser Dasar Metode Manual

Nilai gaya geser dasar (V) dihitung sesuai persamaan 3.17 pada subsubbab 3.4.6 dengan mengalikan koefisien respon seismik dengan berat sesimik efektif pada masing-masing gedung. Berikut perhitungannya untuk gedung A dan B.

1. Gaya Geser Dasar (V) Gedung A

$$\text{Berat seismik efektif, } W = 89.507,69 \text{ kN}$$

a. Arah X

$$\text{Koefisien respon seismik, } C_s X = 0,0804$$

$$\begin{aligned} \text{Geser dasar statik, } V_x \text{ manual} &= 89.507,69 \text{ kN} \times 0,0804 \\ &= 7.199,12 \text{ kN} \end{aligned}$$

b. Arah Y

$$\text{Koefisien respon seismik, } C_s Y = 0,1378$$

$$\begin{aligned} \text{Geser dasar statik, } V_y \text{ manual} &= 89.507,69 \text{ kN} \times 0,1378 \\ &= 12.335,98 \text{ kN} \end{aligned}$$

2. Gaya Geser Dasar (V) Gedung B

Berat seismik efektif, W = 76658,79 kN

a. Arah X

Koefisien respon seismik, $C_s X$ = 0,1378

Geser dasar statik, V_x manual = 76658,79 kN x 0,1378
= 10.565,14

b. Arah Y,

Koefisien respon seismik, $C_s Y$ = 0,0804

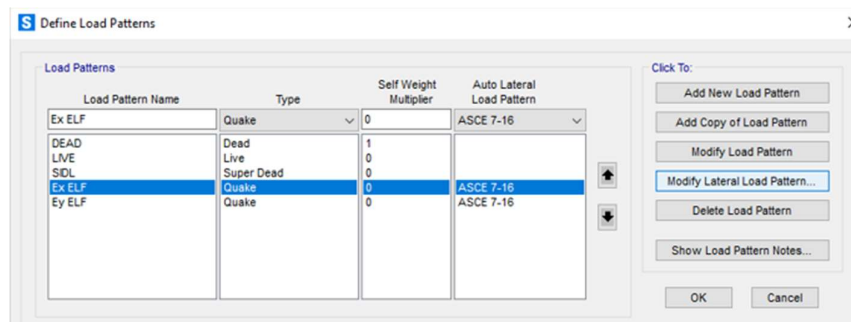
Geser dasar statik, V_y manual = 76658,79 kN x 0,0804
= 6.165,68 kN

5.4.2. Gaya Geser Dasar Output Software

Pada SAP2000 v26 ini nilai base shear dapat dihitung otomatis oleh program. Untuk memunculkannya maka ada beberapa tahapan yang perlu diikuti sebagai berikut.

1. Mendefinisikan *Load Pattern*

Langkah awal adalah mendefinisikan terlebih dulu beban gempa statik untuk arah X dan Y. Caranya klik menu *define > load patterns > Load name* isi “Ex ELF” > *Type* pilih “quake” > *multiplier* 0 > *Auto lateral* pilih ASCE 7-16 > *add new > modify lateral load* > akan muncul jendela baru seperti pada Gambar 5.35. Berikutnya isikan parameter seismik yang sudah ditentukan sebelumnya pada setiap kotak dialog. Lakukan langkah yang sama untuk arah Y.



Gambar 5.34 Load Pattern Gempa Arah X dan Y

ASCE 7-16 Seismic Load Pattern

Load Direction and Diaphragm Eccentricity

☒ Global X Direction
☐ Global Y Direction

Ecc. Ratio (All Diaph.)

Override Diaph. Eccen.

Time Period

☐ Approx. Period Ct (ft), x =
☒ Program Calc Ct (ft), x =
☐ User Defined T =

Lateral Load Elevation Range

☒ Program Calculated
☐ User Specified

Max Z
Min Z

Seismic Coefficients

0.2 Sec Spectral Accel, Ss
1 Sec Spectral Accel, S1
Long-Period Transition Period

Site Class

Site Coefficient, Fa
Site Coefficient, Fv

Calculated Coefficients

SDS = (2/3) * Fa * Ss
SD1 = (2/3) * Fv * S1

Factors

Response Modification, R
System Overstrength, Omega
Deflection Amplification, Cd
Occupancy Importance, I

Gambar 5.35 Input Parameter Beban Gempa Arah X Gedung A

ASCE 7-16 Seismic Load Pattern

Load Direction and Diaphragm Eccentricity

☐ Global X Direction
☒ Global Y Direction

Ecc. Ratio (All Diaph.)

Override Diaph. Eccen.

Time Period

☐ Approx. Period Ct (ft), x =
☒ Program Calc Ct (ft), x =
☐ User Defined T =

Lateral Load Elevation Range

☒ Program Calculated
☐ User Specified

Max Z
Min Z

Seismic Coefficients

0.2 Sec Spectral Accel, Ss
1 Sec Spectral Accel, S1
Long-Period Transition Period

Site Class

Site Coefficient, Fa
Site Coefficient, Fv

Calculated Coefficients

SDS = (2/3) * Fa * Ss
SD1 = (2/3) * Fv * S1

Factors

Response Modification, R
System Overstrength, Omega
Deflection Amplification, Cd
Occupancy Importance, I

Gambar 5.36 Input Parameter Beban Gempa Arah Y Gedung A

ASCE 7-16 Seismic Load Pattern

Load Direction and Diaphragm Eccentricity

☒ Global X Direction
☐ Global Y Direction

Ecc. Ratio (All Diaph.)

Override Diaph. Eccen.

Time Period

☐ Approx. Period Ct (ft), x =
☒ Program Calc Ct (ft), x =
☐ User Defined T =

Lateral Load Elevation Range

☒ Program Calculated
☐ User Specified

Max Z
Min Z

Seismic Coefficients

0.2 Sec Spectral Accel, Ss
1 Sec Spectral Accel, S1
Long-Period Transition Period

Site Class

Site Coefficient, Fa
Site Coefficient, Fv

Calculated Coefficients

SDS = (2/3) * Fa * Ss
SD1 = (2/3) * Fv * S1

Factors

Response Modification, R
System Overstrength, Omega
Deflection Amplification, Cd
Occupancy Importance, I

Gambar 5.37 Input Parameter Beban Gempa Arah X Gedung B

ASCE 7-16 Seismic Load Pattern

Load Direction and Diaphragm Eccentricity

☐ Global X Direction
☒ Global Y Direction

Ecc. Ratio (All Diaph.)

Override Diaph. Eccen.

Time Period

☐ Approx. Period Ct (ft), x =
☒ Program Calc Ct (ft), x =
☐ User Defined T =

Lateral Load Elevation Range

☒ Program Calculated
☐ User Specified

Max Z
Min Z

Seismic Coefficients

0.2 Sec Spectral Accel, Ss
1 Sec Spectral Accel, S1
Long-Period Transition Period

Site Class

Site Coefficient, Fa
Site Coefficient, Fv

Calculated Coefficients

SDS = (2/3) * Fa * Ss
SD1 = (2/3) * Fv * S1

Factors

Response Modification, R
System Overstrength, Omega
Deflection Amplification, Cd
Occupancy Importance, I

Gambar 5.38 Input Parameter Beban Gempa Arah Y Gedung B

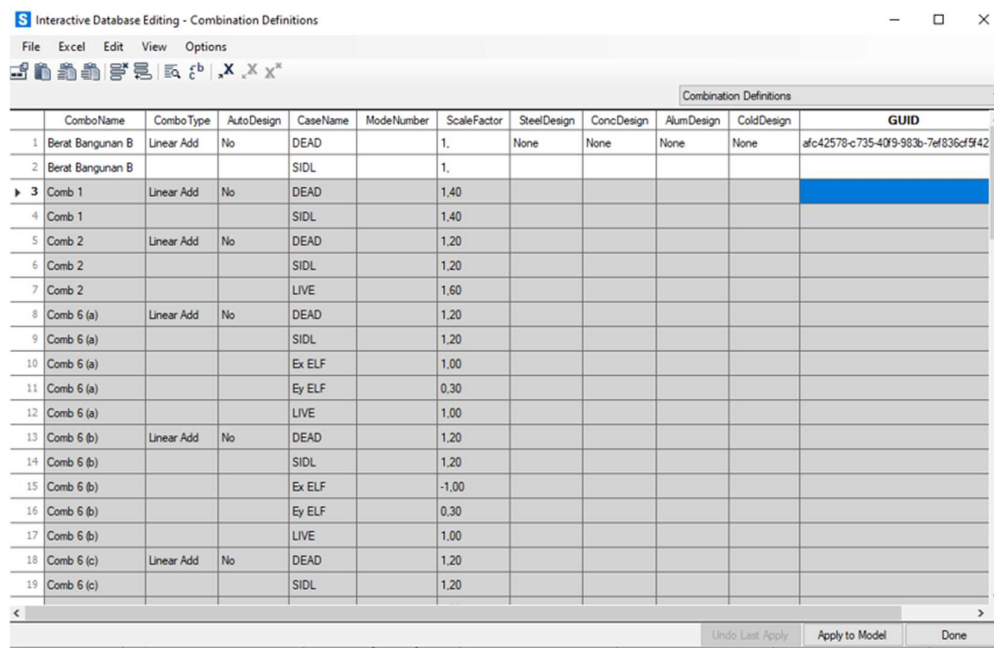
2. Mendefinisikan *Load Combination*

Sesuai dengan subsubbab 3.3.4 pada penelitian ini digunakan kombinasi pembebanan metode ultimit karena pendekatan ini menilai struktur pada kondisi batas, di mana perpindahan plastis, retak, dan pelelehan material harus dapat dimodelkan secara realistis. Metode ultimit memperfaktorkan beban dan mereduksi kekuatan sehingga sesuai dengan tujuan analisis nonlinier yang mengevaluasi kapasitas maksimum struktur.

Tavio & Usman (2018) dalam bukunya “Desain Rekayasa Gempa Berbasis Kinerja” menyebutkan bahwa pengaruh gempa horizontal dan vertikal ($E = p Q_E \pm 0,2 S_{DS} D$) dalam analisis berbasis kinerja dapat diabaikan. Sehingga pada penelitian ini digunakan kombinasi beban sebagai berikut.

- a. $1,4D$
- b. $1,2D + 1,6L$
- c. $1,2D + 1,2SIDL + 1Ex + 0,3Ey + 1L$
- d. $1,2D + 1,2SIDL - 1Ex + 0,3Ey + 1L$
- e. $1,2D + 1,2SIDL + 1Ex - 0,3Ey + 1L$
- f. $1,2D + 1,2SIDL - 1Ex - 0,3Ey + 1L$
- g. $1,2D + 1,2SIDL + 1Ey + 0,3Ex + 1L$
- h. $1,2D + 1,2SIDL - 1Ey + 0,3Ex + 1L$
- i. $1,2D + 1,2SIDL + 1Ey - 0,3Ex + 1L$
- j. $1,2D + 1,2SIDL - 1Ey - 0,3Ex + 1L$
- k. $0,9D + 0,9SIDL + 1Ex + 0,3Ey$
- l. $0,9D + 0,9SIDL - 1Ex + 0,3Ey$
- m. $0,9D + 0,9SIDL + 1Ex - 0,3Ey$
- n. $0,9D + 0,9SIDL - 1Ex - 0,3Ey$
- o. $0,9D + 0,9SIDL + 1Ey + 0,3Ex$
- p. $0,9D + 0,9SIDL - 1Ey + 0,3Ex$
- q. $0,9D + 0,9SIDL + 1Ey - 0,3Ex$
- r. $0,9D + 0,9SIDL - 1Ey - 0,3Ex$

Pada SAP2000 v26 kombinasi pembebanan dapat diinput otomatis dari excel dengan cara klik menu *edit > interactive database > model definition > load pattern definitions > response combinations > file > paste append load combination* yang sudah dibuat sebelumnya > *apply to model*. Hasil input dapat dilihat pada gambar 5.39 berikut.



	ComboName	ComboType	AutoDesign	CaseName	ModeNumber	ScaleFactor	SteelDesign	ConcDesign	AlumDesign	ColdDesign	GUID
1	Berat Bangunan B	Linear Add	No	DEAD		1.	None	None	None	None	afc42578-c735-40f9-983b-7ef836cd5f42
2	Berat Bangunan B			SIDL		1.					
3	Comb 1	Linear Add	No	DEAD		1.40					
4	Comb 1			SIDL		1.40					
5	Comb 2	Linear Add	No	DEAD		1.20					
6	Comb 2			SIDL		1.20					
7	Comb 2			LIVE		1.60					
8	Comb 6 (a)	Linear Add	No	DEAD		1.20					
9	Comb 6 (a)			SIDL		1.20					
10	Comb 6 (a)			Ex ELF		1.00					
11	Comb 6 (a)			Ey ELF		0.30					
12	Comb 6 (a)			LIVE		1.00					
13	Comb 6 (b)	Linear Add	No	DEAD		1.20					
14	Comb 6 (b)			SIDL		1.20					
15	Comb 6 (b)			Ex ELF		-1.00					
16	Comb 6 (b)			Ey ELF		0.30					
17	Comb 6 (b)			LIVE		1.00					
18	Comb 6 (c)	Linear Add	No	DEAD		1.20					
19	Comb 6 (c)			SIDL		1.20					

Gambar 5.39 Input Load Combination

3. Pengecekan Jumlah Ragam Getar

Tahap berikutnya adalah melakukan pengecekan pada jumlah ragam getar untuk memastikan partisipasi massa terpenuhi. SNI 1726:2019 mensyaratkan bahwa partisipasi massa ragam harus memenuhi minimal 90%. Pengecekan dapat dilakukan pada SAP2000 dengan cara *run analysis > display > show table > analysis results > structure output > modal information > modal participating mass ratio*. Nilai “SumUX” dan “SumUY” pada modal terakhir harus mencapai minimal 0,9. Output dari SAP untuk Gedung A dan Gedung B dapat dilihat pada tabel 5.8 dan 5.9 berikut.

Tabel 5.8 Partisipasi Massa Ragam Gedung A

Modal	Periode (detik)	SumUX	SumUY
1	1,410584	0,774870	0,000007
2	0,789289	0,774890	0,683730
3	0,570406	0,774890	0,686150
4	0,467228	0,898700	0,686160
5	0,270150	0,898840	0,686160
6	0,255842	0,953540	0,686180
7	0,234785	0,953540	0,686180
8	0,233353	0,953600	0,686200
9	0,214509	0,953620	0,875730
10	0,195461	0,953620	0,875910
11	0,192467	0,953630	0,877230
12	0,184685	0,953630	0,877720
13	0,178315	0,953710	0,877920
14	0,176853	0,953720	0,877930
15	0,176475	0,953750	0,877970
16	0,174561	0,953750	0,878750
17	0,170818	0,953760	0,879100
18	0,169506	0,953790	0,879120
19	0,169187	0,953920	0,882560
20	0,167265	0,966890	0,883140
↕			
186	0,106466	0,975800	0,919070
187	0,105813	0,975800	0,919160
188	0,105501	0,975800	0,919160
189	0,105033	0,975800	0,919160
190	0,104772	0,975800	0,919180
191	0,104424	0,975800	0,919630
192	0,103903	0,975800	0,919630
193	0,103674	0,975800	0,919670
194	0,103358	0,975800	0,919750
195	0,103243	0,975810	0,919770
196	0,103137	0,975810	0,919770
197	0,103051	0,975810	0,919830
198	0,102379	0,975810	0,919830
199	0,102195	0,975810	0,919910
200	0,101978	0,975810	0,919910

Tabel 5.9 Partisipasi Massa Ragam Gedung B

Modal	Periode (detik)	SumUX	SumUY
1	1,404798	0,000150	0,796680
2	1,101199	0,000180	0,796750
3	0,783932	0,673680	0,797080
4	0,596689	0,705260	0,797210
5	0,420890	0,705340	0,905620
6	0,259437	0,705380	0,905810
7	0,243102	0,705410	0,957700
8	0,210001	0,705410	0,957700
9	0,209804	0,705420	0,957700
10	0,209599	0,705420	0,957710
11	0,209449	0,705430	0,957730
12	0,191910	0,706520	0,957770
13	0,188596	0,879100	0,957780
14	0,186500	0,879240	0,957790
15	0,154372	0,879370	0,972030
16	0,148407	0,896200	0,972080
17	0,133077	0,896230	0,972090
18	0,132148	0,896350	0,972090
19	0,132081	0,909610	0,972100
20	0,129598	0,909640	0,972130
↕			
186	0,066178	0,970590	0,989890
187	0,066131	0,970590	0,989890
188	0,065777	0,970590	0,989890
189	0,065718	0,970600	0,989890
190	0,065582	0,970610	0,989900
191	0,065351	0,970610	0,989900
192	0,065132	0,970920	0,989920
193	0,064978	0,971470	0,989940
194	0,064906	0,971480	0,989940
195	0,064876	0,971680	0,990150
196	0,064750	0,971790	0,990210
197	0,064606	0,971800	0,990210
198	0,064481	0,971810	0,990210
199	0,064242	0,972300	0,990240
200	0,064104	0,972300	0,990240

4. Output Base Reaction

Setelah tahapan sebelumnya terpenuhi maka dapat diambil output untuk gaya geser dasar dengan cara klik menu *display > show tables > structure output > base reaction*. Ambil output gaya geser dasar untuk gempa arah X dan arah Y. Berikut merupakan rekapitulasi nilai gaya geser dasar statik untuk Gedung A dan Gedung B pada Tabel 5.10.

Tabel 5.10 Gaya Geser Dasar Software

Gaya Gempa	Gedung A	Gedung B
Ex ELF	7084,66	10398,12
Ey ELF	12143,22	6066,35

Berikut disajikan perbandingan antara nilai gaya geser dasar (V) statik dari hasil perhitungan manual dan dari software untuk memastikan keakuratan analisis yang dapat dilihat pada Tabel 5.11 dan 5.12.

Tabel 5.11 Rekapitulasi Gaya Geser Dasar Gedung A

Parameter	Notasi	Nilai	Satuan
Berat seismik efektif	W	89507,69	kg
Berat seismik efektif	W	89507,69	kN
Koefisien respon seismik pakai arah X	Cs pakai X	0,0804	
Koefisien respon seismik pakai arah Y	Cs pakai Y	0,1378	
Eksponen periode struktur arah X	k x	1,4475	
Eksponen periode struktur arah Y	k y	1,1446	
Gaya geser dasar seismik manual arah X	Vx Manual	7.199,12	kN
Gaya geser dasar seismik manual arah Y	Vy Manual	12.335,98	kN
Gaya geser dasar seismik Software arah X	Vx C	7.084,66	kN
Gaya geser dasar seismik Software arah Y	Vy C	12.143,22	kN
Manual vs Software	Selisih X	1,62%	
Manual vs Software	Selisih Y	1,59%	

Tabel 5.12 Rekapitulasi Gaya Geser Dasar Gedung B

Parameter	Notasi	Nilai	Satuan
Berat seismik efektif	W	76658,79	kg
Berat seismik efektif	W	76658,79	kN
Koefisien respon seismik pakai arah X	Cs pakai X	0,1378	
Koefisien respon seismik pakai arah Y	Cs pakai Y	0,0804	
Eksponen periode struktur arah X	k x	1,1420	
Eksponen periode struktur arah Y	k y	1,4475	
Gaya geser dasar seismik manual arah X	Vx Manual	10.565,14	kN
Gaya geser dasar seismik manual arah Y	Vy Manual	6.165,68	kN
Gaya geser dasar seismik Software arah X	Vx C	10.398,12	kN
Gaya geser dasar seismik Software arah Y	Vy C	6.066,35	kN
Manual vs Software	Selisih X	1,61%	
Manual vs Software	Selisih Y	1,64%	

Hasil perbandingan menunjukkan selisih yang kecil antara perhitungan manual dengan analisis SAP2000 sehingga dapat disimpulkan bahwa nilai gaya geser dasar yang diperoleh sudah akurat. Analisis selanjutnya akan menggunakan nilai dari software SAP2000.

5.5. Analisis Statik Nonlinier *Pushover*

Analisis *pushover* dilakukan oleh program yang *built in* pada SAP2000 v26. Berikut diuraikan mengenai tahapan dalam analisis.

5.5.1. Pusat Massa

Dalam analisis *pushover* pusat massa merupakan titik representatif pada tiap lantai di mana gaya lateral diterapkan untuk mensimulasikan respons struktur terhadap gaya gempa. Titik ini menggambarkan lokasi rata-rata massa lantai yang secara dinamis dianggap sebagai tempat timbulnya gaya gempa ketika struktur berosilasi.

Letak pusat massa setiap lantai dapat dilihat pada SAP2000 dengan cara *display > show tables > model definition > load pattern definitions > auto seismic load > to horizontal diaphragms*. Berikutnya akan muncul jendela baru yang menampilkan koordinat global dari pusat massa pada masing-masing tingkat diafragma. Pusat massa Gedung A dan Gedung B dapat dilihat pada Tabel 5.13 dan 5.14 berikut.

Tabel 5.13 Letak Pusat Massa Gedung A

Lantai	X (m)	Y (m)	Z (m)
Roof	32,94	17,91	30,05
6	28,58	12,49	26,50
5	28,58	12,49	22,30
4	28,58	12,49	18,10
3	34,87	12,91	13,90
2	34,82	12,98	8,70
1	36,77	13,30	4,50

Tabel 5.14 Letak Pusat Massa Gedung B

Lantai	X (m)	Y (m)	Z (m)
Roof	12,65	30,85	30,05
6	13,36	27,64	26,50
5	13,18	28,24	22,30
4	13,18	28,24	18,10
3	13,13	27,99	13,90
2	13,05	27,84	8,70
1	12,58	30,20	4,50

Letak pusat massa ini dapat dijadikan sebagai titik acuan untuk melakukan kontrol perpindahan/*displacement*. Namun pada penelitian ini, titik kontrol diambil di tepi struktur pada elevasi atap. Untuk Gedung A digunakan Label 24 dan pada Gedung B menggunakan Label 1418 sebagai titik kontrol.

5.5.2. Mendefinisikan Pembebanan

Beban yang diperhitungkan dalam analisis ini mencakup beban gravitasi dan beban lateral. Uraian lebih jelasnya pada subsubbab berikut.

1. Beban Gravitasi Nonlinier

Pada analisis ini, beban gravitasi nonlinier merupakan pembebanan vertikal yang terdiri atas beban mati dan beban mati tambahan yang diterapkan pada awal analisis dan dipertahankan selama proses pembebanan lateral untuk mensimulasikan kondisi kerja struktur yang sebenarnya. Penerapan beban ini penting karena menghasilkan efek P-delta dan interaksi antara beban vertikal dengan respons lateral struktur, sehingga mampu menggambarkan perilaku nonlinier serta penurunan kekakuan yang terjadi ketika struktur mengalami deformasi besar. Pada SAP2000 v26 dapat diinput dengan cara klik menu *define > load case > add new case*. Centang opsi Pada bagian *Load application*, pilih *monitored displacement* searah sumbu 3 (vertikal) pada label yang telah ditentukan sebelumnya. Isikan parameter yang dibutuhkan seperti pada Gambar 5.40 berikut.

Load Case Data - Nonlinear Static

Load Case Name: GRAVITY NLR [Set Def Name] [Modify/Show...]

Initial Conditions: ☒ Zero Initial Conditions - Start from Unstressed State
☐ Continue from State at End of Nonlinear Case [v]
Important Note: Loads from this previous case are included in the current case

Modal Load Case: All Modal Loads Applied Use Modes from Case [MODAL v]

Loads Applied:

Load Type	Load Name	Scale
Load Pattern	DEAD	1,
Load Pattern	DEAD	1,
Load Pattern	SDL	1,

[Add] [Modify] [Delete]

Load Case Type: Static [v] [Design...]

Analysis Type: ☐ Linear ☒ Nonlinear

Geometric Nonlinearity Parameters: ☐ None ☒ P-Delta ☐ P-Delta plus Large Displacements

Mass Source: MSSSRC1 [v]

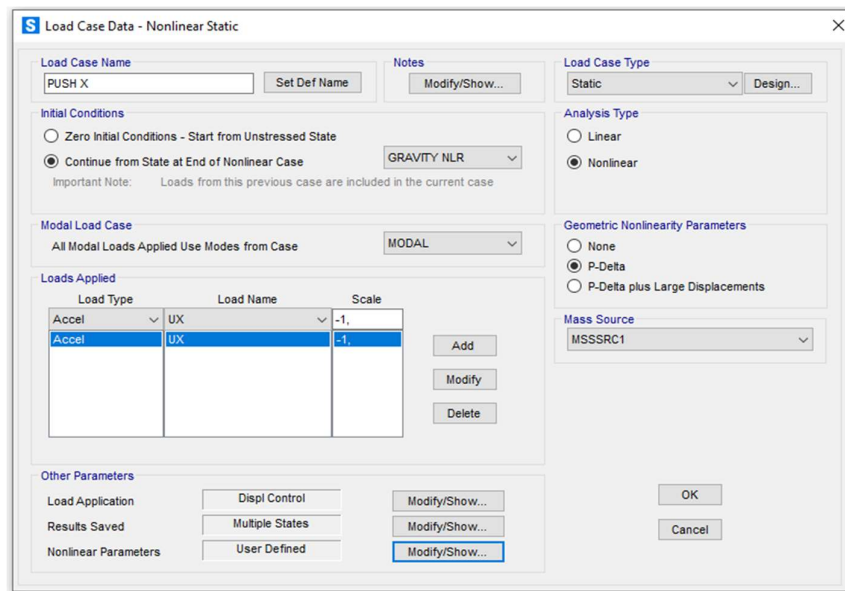
Other Parameters: Load Application: Full Load [Modify/Show...]
 Results Saved: Final State Only [Modify/Show...]
 Nonlinear Parameters: User Defined [Modify/Show...]

[OK] [Cancel]

Gambar 5.40 Gravity Nonlinier Case

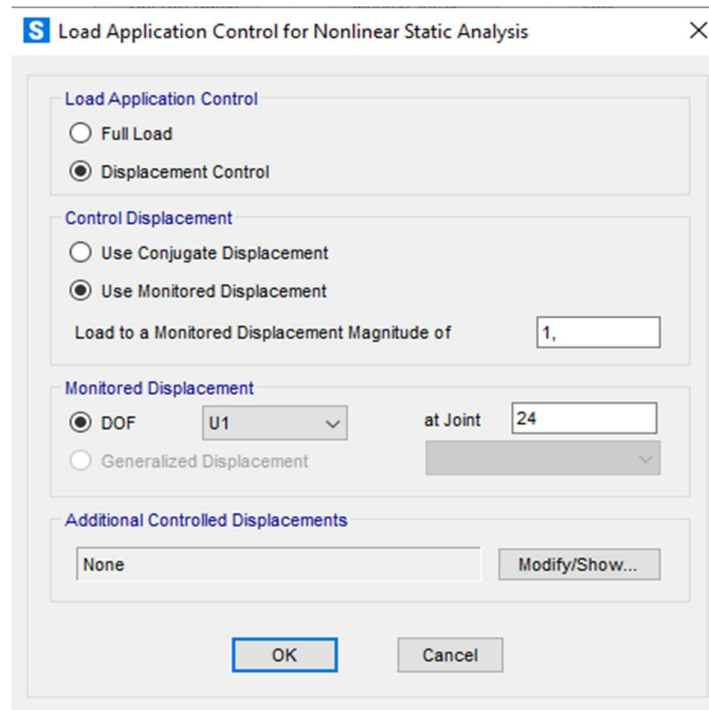
2. Beban Lateral Nonlinier

Beban lateral pushover adalah beban dorong statis yang diterapkan pada pusat massa setiap lantai secara bertahap pada struktur untuk mensimulasikan pengaruh gaya gempa dalam kondisi nonlinier. Pada SAP2000 beban pushover diinput dengan cara klik menu *define > load case > add new case >* lalu isikan parameter yang dibutuhkan untuk analisis. Efek P-Delta perlu ditambahkan karena pada analisis ini besar nilai *displacement* yang terjadi akan terus meningkat seiring pertambahan beban dorong statik pada struktur. Berikut contoh *load case* pushover untuk arah x seperti pada Gambar 5.41. Buat *load case* baru untuk arah Y.



Gambar 5.41 Input Beban *Pushover*

Berikutnya pada bagian *Load Application* klik *modify* untuk menyesuaikan pengaturan pembebanan. Pilih opsi "*displacement control*" dan "*use monitored displacement*" karena analisis ini dilakukan hingga target *displacement* tercapai sehingga program akan otomatis mengkalkulasi gaya yang dibutuhkan untuk mencapai target tersebut. Pada analisis ini nilai *displacement* maksimum yang akan dihitung sebesar 1 meter jika struktur belum runtuh.



Gambar 5.42 Monitored Displacement Beban Pushover

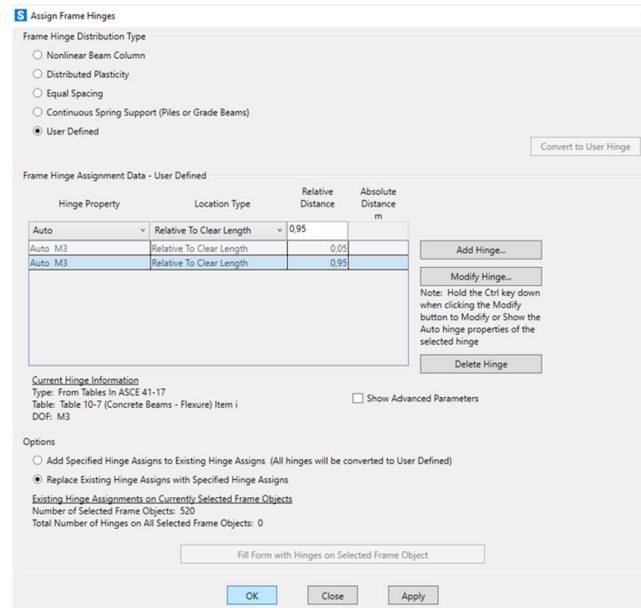
5.5.3. Mendefinisikan Sendi Plastis (*Plastic Hinge*)

Sendi plastis adalah daerah lokal pada elemen struktur tempat terjadinya deformasi plastis setelah momen atau gaya internal melampaui kapasitas elastisnya, sehingga memungkinkan rotasi tanpa menyebabkan kegagalan langsung. Dalam analisis nonlinier, sendi plastis digunakan untuk merepresentasikan perilaku pasca elastis elemen melalui idealisasi hubungan momen-kurvatur atau gaya-regangan.

1. Sendi Plastis Pada Balok

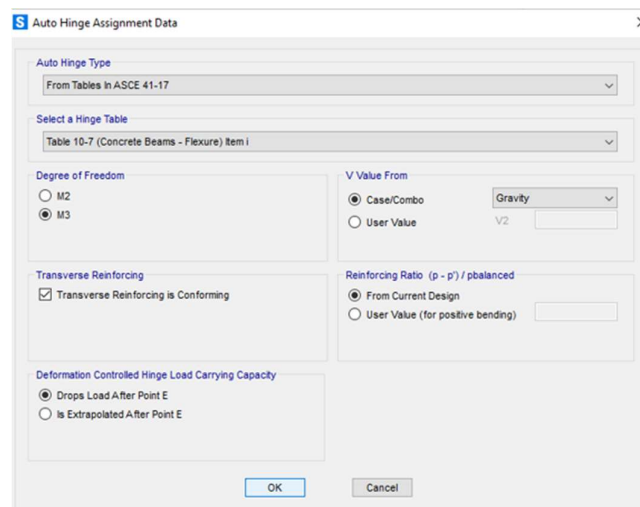
Untuk memodelkan sendi plastis pada balok dilakukan dengan cara berikut.

- a. *Select* seluruh balok induk.
- b. Klik menu *assign > frame > Hinge*. Akan muncul tampilan seperti gambar 5.43 dibawah. Pada opsi "*frame hinge distribution type*" pilih "*user*" untuk menginput letak sendi plastis. Pada bagian "*Relative to clear length*" input nilai 0,05 dan 0,95 yang menandakan sendi plastis terjadi pada area di sekitar 5% (sisi kiri) dan 95% (sisi kanan) dari panjang bantang.



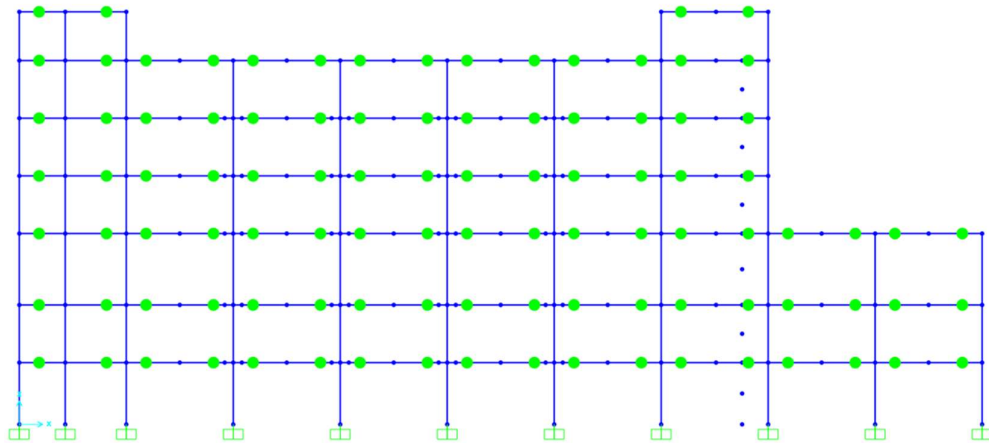
Gambar 5.43 Define Location Sendi Plastis Pada Balok

- c. Klik *add hinge* maka akan muncul tampilan seperti pada gambar 5.44. Opsi “*Select hinge*” pilih *concrete beams* dengan *auto hinge type* mengacu pada ASCE 41-17. Opsi “*Degree of freedom*” pilih M3 dengan “*V value*” dari beban gravitasi nonlinier sebelumnya.



Gambar 5.44 Hinge Data Untuk Balok

- d. Jika seluruh data yang dibutuhkan sudah terisi klik *apply* maka akan muncul tampilan hinge pada bagian ujung-ujung kiri dan kanan balok seperti pada Gambar 5.45 berikut.



Gambar 5.45 Sendi Plastis Pada Balok

2. Sendi Plastis Pada Kolom

Untuk memodelkan sendi plastis pada kolom dilakukan dengan cara berikut.

- a. *Select* seluruh kolom.
- b. Klik menu *assign > frame > Hinge*. Akan muncul tampilan seperti gambar 5.46 dibawah. Pada opsi "*frame hinge distribution type*" pilih "*user*" untuk menginput letak sendi plastis. Pada bagian "*Relative to clear length*" input nilai 0,05 dan 0,95 yang menandakan sendi plastis terjadi pada area di sekitar 5% (ujung bawah) dan 95% (ujung atas) dari tinggi kolom.

Assign Frame Hinges

Frame Hinge Distribution Type

☐ Nonlinear Beam Column

☐ Distributed Plasticity

☐ Equal Spacing

☐ Continuous Spring Support (Piles or Grade Beams)

☒ User Defined

Convert to User Hinge

Frame Hinge Assignment Data - User Defined

Hinge Property	Location Type	Relative Distance	Absolute Distance m
Auto	Relative To Clear Length	0.95	
Auto M3	Relative To Clear Length	0.05	
Auto M3	Relative To Clear Length	0.95	

Add Hinge...

Modify Hinge...

Note: Hold the Ctrl key down when clicking the Modify button to Modify or Show the Auto hinge properties of the selected hinge

Delete Hinge

Current Hinge Information

Type: From Tables in ASCE 41-17

Table: Table 10-7 (Concrete Beams - Flexure) Item i

DOF: M3

Show Advanced Parameters

Options

☐ Add Specified Hinge Assigns to Existing Hinge Assigns (All hinges will be converted to User Defined)

☒ Replace Existing Hinge Assigns with Specified Hinge Assigns

Existing Hinge Assignments on Currently Selected Frame Objects

Number of Selected Frame Objects: 520

Total Number of Hinges on All Selected Frame Objects: 0

Fill Form with Hinges on Selected Frame Object

OK Close Apply

Gambar 5.46 Define Location Sendi Plastis Pada Kolom

- c. Klik *add hinge* maka akan muncul tampilan seperti pada gambar 5.45. Opsi “*Select hinge*” pilih *concrete columns* dengan *auto hinge type* mengacu pada ASCE 41-17. Opsi “*Degree of freedom*” pilih P-M2-M3 dengan “*V value*” dari beban gravitasi nonlinier sebelumnya. Bagian “*failure condition*” pilih “*flexure/shear*”.

Auto Hinge Assignment Data

Auto Hinge Type

From Tables in ASCE 41-13

Select a Hinge Table

Table 10-8 (Concrete Columns)

Degree of Freedom

☐ M2 ☐ P-M2 ☐ Parametric P-M2-M3

☐ M3 ☐ P-M3

☐ M2-M3 ☒ P-M2-M3

Concrete Column Failure Condition

☐ Condition i - Flexure ☐ Condition iv - Development

☒ Condition ii - Flexure/Shear

☐ Condition iii - Shear

Deformation Controlled Hinge Load Carrying Capacity

☒ Drops Load After Point E

☐ Is Extrapolated After Point E

P and V Values From

☒ Case/Combo ☐ User Value

Gravity

V2 V3

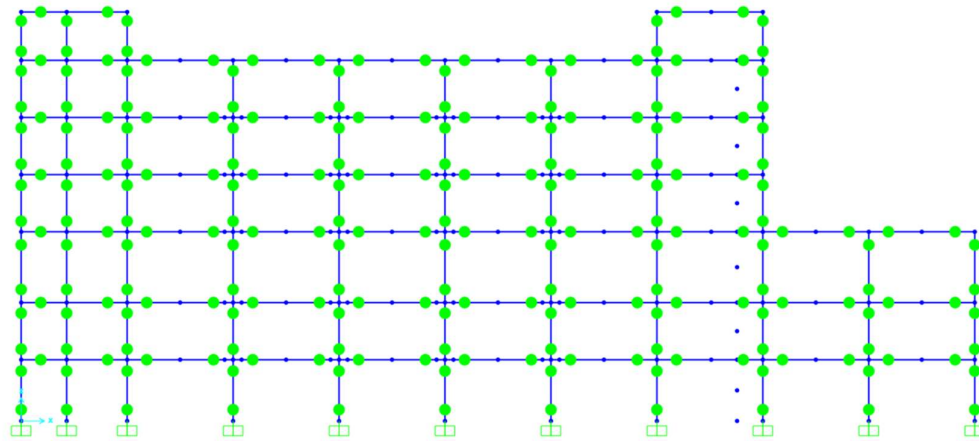
Shear Reinforcing Ratio $p = A_v / (b_w * s)$

☒ From Current Design ☐ User Value

OK Cancel

Gambar 5.47 Hinge Data Untuk Kolom

- d. Jika seluruh data yang dibutuhkan sudah terisi klik *apply* maka akan muncul tampilan hinge pada bagian ujung-ujung atas dan bawah kolom seperti pada Gambar 5.48 berikut.



Gambar 5.48 Sendi Plastis Pada Kolom

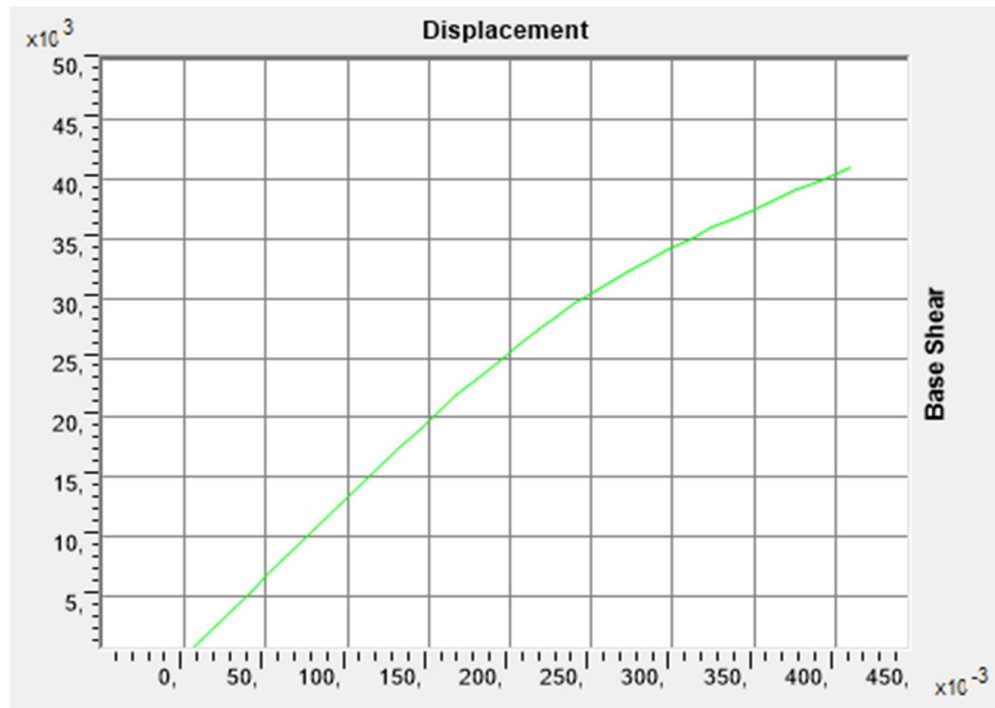
5.6. Hasil Analisis dan Pembahasan

5.6.1. Kurva Kapasitas (*Capacity Curve*)

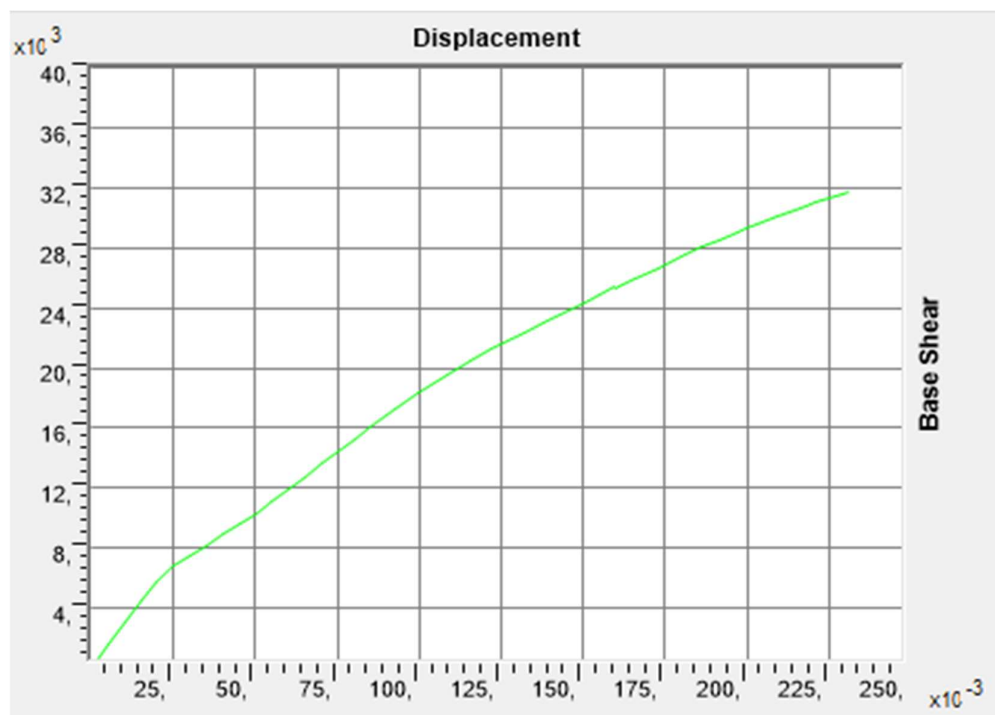
Tahap terakhir adalah melakukan run analysis untuk mendapatkan output berupa kurva kapasitas yang menunjukkan hubungan antara gaya geser dasar (*base shear*) dengan perpindahan lateral (*displacement*) pada atap (label tinjau). Untuk menampilkan kurva ini dapat dilakukan dengan klik menu *display > show static pushover curve*. Berikut merupakan tampilan kurva kapasitas untuk masing-masing Gedung A dan Gedung B.

1. Kurva Kapasitas Gedung A

Tampilan kurva kapasitas untuk Gedung A dapat dilihat pada Gambar 5.49 dan 5.50 sebagai berikut.



Gambar 5.49 Kurva Kapasitas Arah X Gedung A



Gambar 5.50 Kurva Kapasitas Arah Y Gedung A

Detail mengenai nilai gaya geser dasar dan *displacement* yang terjadi pada masing-masing arah dapat dilihat pada Tabel 5.15 dan 5.16 berikut.

Tabel 5.15 Base Shear (*V*) vs Displacement (*D*) Arah X Gedung A

Step	<i>Displacement</i> (m)	<i>Base Shear</i> (kN)
0	0.000008	0.00
1	0.009992	1327.01
2	0.019992	2654.00
3	0.029992	3980.98
4	0.039992	5307.94
5	0.049992	6634.89
6	0.059992	7961.82
7	0.063944	8486.23
8	0.080245	10645.54
9	0.095692	12681.70
10	0.111856	14807.93
11	0.122365	16187.80
12	0.132665	17518.47
13	0.145320	19131.30
14	0.156474	20537.91
15	0.167455	21886.51
16	0.179462	23298.78
17	0.193411	24822.00
18	0.205624	26104.38
19	0.218003	27382.89
20	0.228529	28447.56
21	0.239802	29539.97
22	0.252138	30640.03
23	0.262384	31495.83
24	0.272910	32326.65
25	0.284066	33154.16

Lanjutan Tabel 5.15 *Base Shear (V) vs Displacement (D)* Arah X Gedung A

Step	<i>Displacement (m)</i>	<i>Base Shear (kN)</i>
26	0.296853	34059.18
27	0.310732	35010.12
28	0.324243	35900.20
29	0.336785	36690.80
30	0.350271	37513.13
31	0.365285	38409.36
32	0.376279	39057.21
33	0.390332	39870.85
34	0.409051	40928.04

Tabel 5.16 *Base Shear (V) vs Displacement (D)* Arah Y Gedung A

Step	<i>Displacement (m)</i>	<i>Base Shear (kN)</i>
0	0.000078	0.00
1	0.005078	1545.54
2	0.010078	3092.03
3	0.015078	4583.65
4	0.020078	5810.98
5	0.025078	6793.49
6	0.030078	7491.68
7	0.035078	8197.67
8	0.040078	8903.66
9	0.045078	9609.66
10	0.050078	10315.66
11	0.055078	11075.22
12	0.060078	11909.41
13	0.065078	12765.98
14	0.070078	13625.09
15	0.075078	14471.71
16	0.080078	15292.88

Lanjutan Tabel 5.16 *Base Shear (V) vs Displacement (D)* Arah Y Gedung A

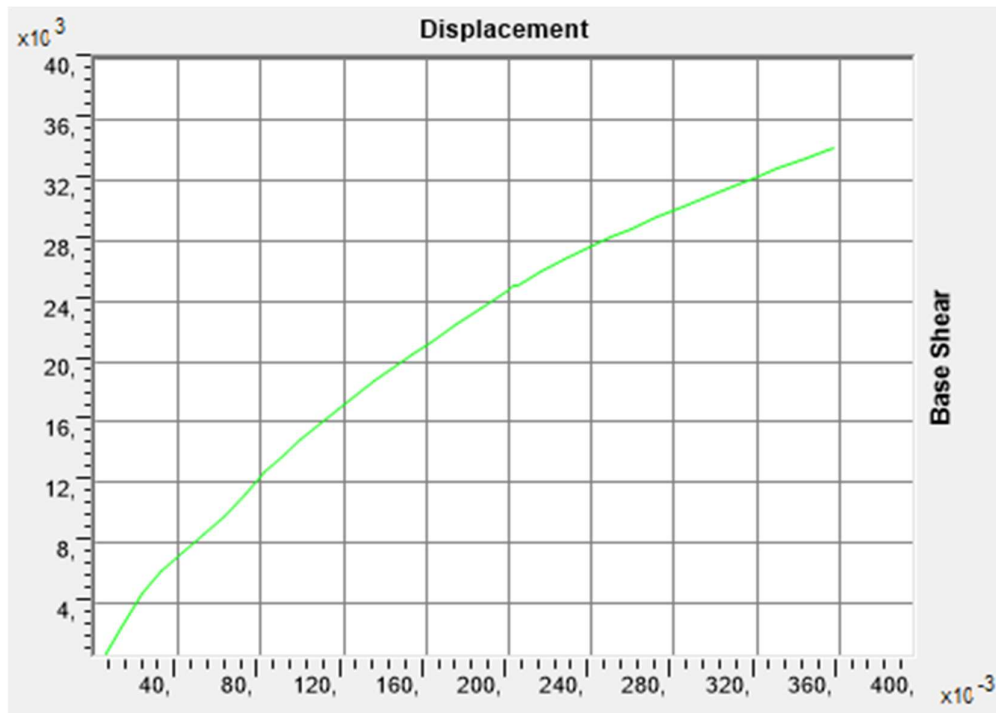
Step	<i>Displacement (m)</i>	<i>Base Shear (kN)</i>
17	0.085078	16110.80
18	0.090078	16857.41
19	0.092579	17220.99
20	0.099741	18266.51
21	0.108223	19471.07
22	0.115660	20483.80
23	0.122003	21273.64
24	0.127003	21836.85
25	0.132003	22400.64
26	0.137825	23050.24
27	0.142825	23592.47
28	0.150232	24394.66
29	0.155232	24932.23
30	0.159488	25386.65
31	0.160017	25318.49
32	0.160050	25328.31
33	0.160579	25426.74
34	0.165749	25988.50
35	0.172596	26675.17
36	0.179831	27417.47
37	0.186483	28091.32
38	0.191178	28557.72
39	0.191189	28537.80
40	0.196965	29078.94
41	0.199790	29347.16
42	0.199795	29331.62
43	0.202847	29613.02
44	0.202859	29613.34
45	0.208977	30146.34

Lanjutan Tabel 5.16 *Base Shear (V) vs Displacement (D)* Arah Y Gedung A

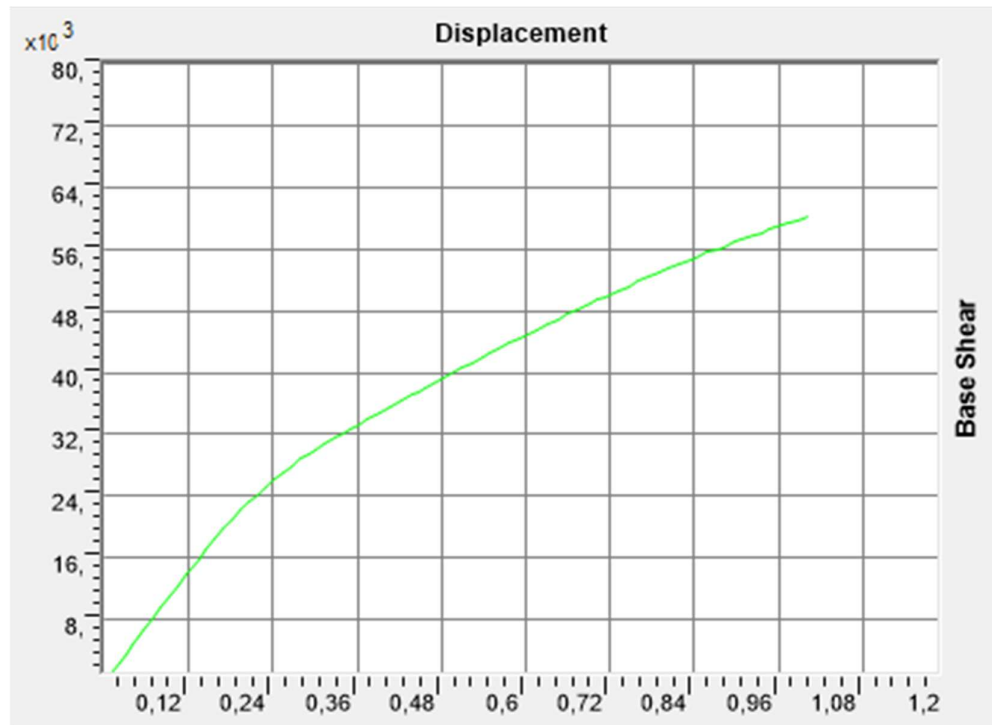
Step	<i>Displacement (m)</i>	<i>Base Shear (kN)</i>
46	0.215922	30682.33
47	0.219084	30924.26
48	0.219089	30921.20
49	0.220558	31019.64
50	0.220563	31019.77
51	0.228657	31602.27
52	0.230721	31741.22

2. Kurva Kapasitas Gedung B

Tampilan kurva kapasitas untuk Gedung B dapat dilihat pada Gambar 5.51 dan 5.52 sebagai berikut.



Gambar 5.51 Kurva Kapasitas Arah X Gedung B



Gambar 5.52 Kurva Kapasitas Arah Y Gedung B

Detail mengenai nilai gaya geser dasar dan displacement yang terjadi pada masing-masing arah dapat dilihat pada Tabel 5.17 dan 5.18 berikut.

Tabel 5.17 Base Shear (*V*) vs Displacement (*D*) Arah X Gedung B

Step	Displacement (m)	Base Shear (kN)
0	0.001975	0.00
1	0.011975	2460.12
2	0.021975	4637.84
3	0.031975	6130.96
4	0.041975	7293.67
5	0.051975	8496.05
6	0.061975	9818.28
7	0.071975	11267.17
8	0.081975	12648.83
9	0.091975	13958.59

Lanjutan Tabel 5.17 *Base Shear (V) vs Displacement (D)* Arah X Gedung B

Step	<i>Displacement (m)</i>	<i>Base Shear (kN)</i>
10	0.099116	14824.69
11	0.116904	16892.71
12	0.134498	18756.04
13	0.152611	20402.56
14	0.162610	21298.86
15	0.174700	22484.21
16	0.186686	23600.06
17	0.199541	24731.38
18	0.202442	24976.24
19	0.203754	25038.43
20	0.215786	25906.65
21	0.226580	26726.46
22	0.238989	27586.81
23	0.248990	28214.03
24	0.259191	28801.83
25	0.271390	29520.12
26	0.281544	30127.81
27	0.282043	30143.98
28	0.295689	30926.36
29	0.308651	31626.37
30	0.318669	32143.79
31	0.329637	32748.58
32	0.344070	33499.48
33	0.354464	34021.72
34	0.357530	34139.38
35	0.357539	34163.46

Tabel 5.18 Base Shear (*V*) vs Displacement (*D*) Arah Y Gedung B

Step	<i>Displacement (m)</i>	<i>Base Shear (kN)</i>
0	0.000417	0.00
1	0.010417	1197.93
2	0.020417	2395.85
3	0.030417	3593.75
4	0.040417	4791.65
5	0.050417	5989.53
6	0.055944	6651.65
7	0.066826	7950.01
8	0.080918	9621.71
9	0.091971	10930.19
10	0.103871	12335.94
11	0.117824	13964.03
12	0.133831	15818.33
13	0.145228	17115.81
14	0.157416	18483.44
15	0.168943	19726.38
16	0.180666	20931.51
17	0.193037	22119.92
18	0.205415	23263.52
19	0.216244	24207.84
20	0.228815	25212.69
21	0.241879	26208.57
22	0.252704	26993.11
23	0.265959	27904.83
24	0.279637	28785.38
25	0.289858	29407.68
26	0.301512	30086.31
27	0.312316	30694.87
28	0.327891	31545.45

Lanjutan Tabel 5.18 *Base Shear (V) vs Displacement (D)* Arah Y Gedung B

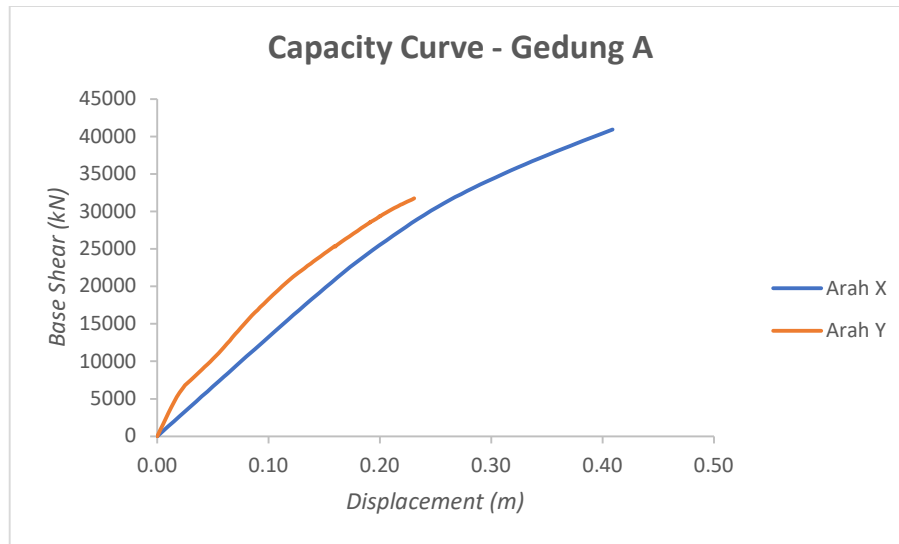
Step	<i>Displacement (m)</i>	<i>Base Shear (kN)</i>
29	0.338648	32123.15
30	0.348947	32664.06
31	0.360719	33277.93
32	0.372884	33906.81
33	0.392404	34900.41
34	0.407777	35674.74
35	0.421297	36351.22
36	0.436363	37098.95
37	0.446363	37591.45
38	0.456363	38081.07
39	0.476156	39048.37
40	0.493773	39902.73
41	0.509136	40641.27
42	0.522651	41286.01
43	0.539065	42065.61
44	0.549065	42538.53
45	0.560985	43099.13
46	0.576138	43805.09
47	0.589990	44443.61
48	0.603544	45065.50
49	0.614946	45580.79
50	0.631631	46321.35
51	0.645484	46933.89
52	0.658919	47521.50
53	0.672072	48088.92
54	0.691921	48942.92
55	0.701921	49370.20
56	0.711921	49794.39
57	0.731770	50631.17

Lanjutan Tabel 5.18 *Base Shear (V) vs Displacement (D)* Arah Y Gedung B

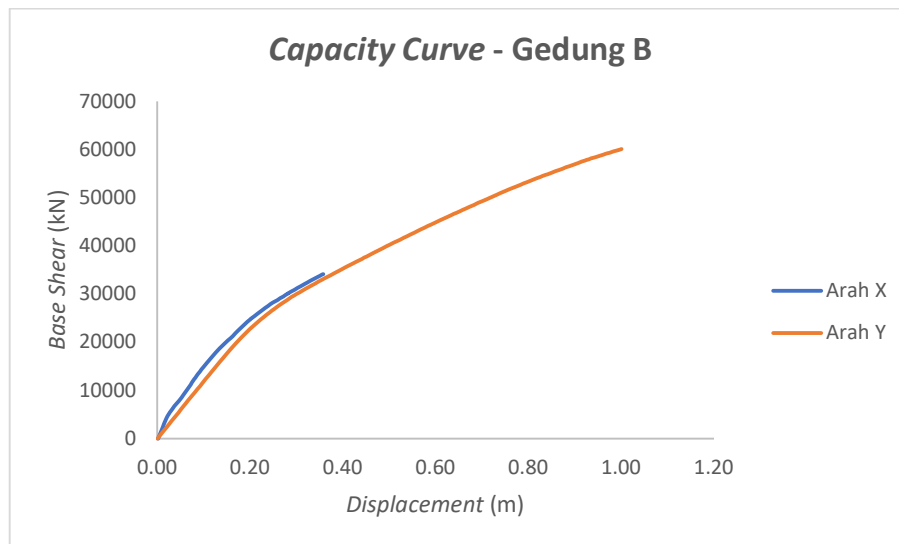
Step	<i>Displacement (m)</i>	<i>Base Shear (kN)</i>
58	0.745679	51207.50
59	0.760242	51802.92
60	0.775635	52423.69
61	0.790559	53011.38
62	0.801447	53442.36
63	0.816227	54000.86
64	0.826227	54366.89
65	0.841221	54912.87
66	0.858450	55531.05
67	0.870984	55972.72
68	0.880984	56320.86
69	0.897240	56884.48
70	0.915485	57525.22
71	0.925485	57853.33
72	0.935485	58176.63
73	0.945485	58491.61
74	0.962985	59022.82
75	0.974235	59357.52
76	0.984235	59652.22
77	0.994235	59943.00
78	1.000417	60119.67

Dari Tabel 5.15 dan 5.16 untuk Gedung A dapat dilihat bahwa analisis untuk arah X berhenti pada step ke-34 pada saat *displacement* mencapai 0,409051 m dan *base force* sebesar 40928,04 kN, sedangkan analisis arah Y berhenti pada step ke-52 ketika *displacement* mencapai 0,230721 m dengan *base force* yaitu 31741,22 kN. Sementara itu untuk Gedung B sesuai Tabel 5.17 dan 5.18 diketahui bahwa analisis arah X berhenti pada step ke-35 saat *displacement* mencapai 0,357539 m dan *base force* sebesar 34163 kN, sedangkan untuk arah Y analisis berhenti di step ke-76 saat nilai *displacement* sebesar 0,984235 m dengan *base force* 59652,22 kN.

Untuk lebih jelasnya dapat dilihat perbandingan kurva pada masing-masing arah pada Gambar 5.53 dan 5.54 berikut.



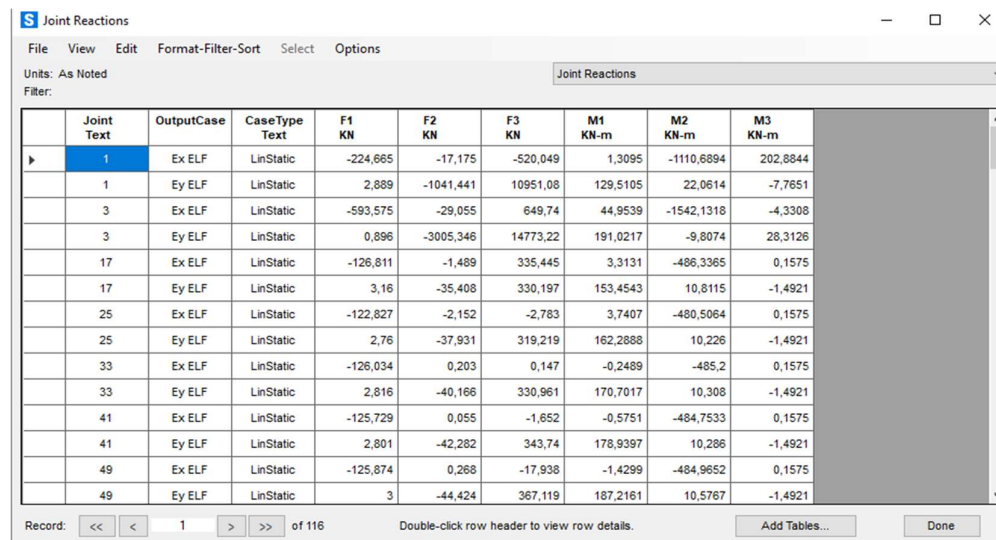
Gambar 5.53 Capacity Curve Gedung A



Gambar 5.54 Capacity Curve Gedung B

Dari gambar tersebut dapat dilihat bahwa pada masing-masing gedung memiliki kurva yang sedikit lebih tegak pada arah ortogonal dengan dinding geser (*shearwall*), sedangkan kurva pada arah dengan sistem rangka cenderung lebih landai. Hal ini menunjukkan bahwa pada arah ortogonal dengan *shearwall* mampu menerima gaya geser yang lebih besar dibandingkan arah ortogonal dengan hanya sistem rangka. Berikutnya dapat dilakukan pengecekan syarat sistem ganda berdasarkan rasio antara gaya gempa yang ditahan oleh *shearwall* dengan gaya gempa yang ditahan oleh rangkanya. SNI 1726:2019 menyebutkan bahwa untuk sistem ganda dengan rangka pemikul meomen, maka komponen rangka paling sedikit harus menerima 25% dari gaya gempa yang bekerja.

Pengecekan ini dapat dilakukan dengan nilai gaya geser dasar statik ekivalen pada subsubbab 5.4.2. Caranya dengan *select* seluruh *joint restraint* pada base lalu pilih menu *Display > Show Tables > Structure Output > Joint Reaction* dengan *output case* gempa statik pada arah sumbu kuat *shearwall* > Ambil nilai F1 untuk arah X atau F2 untuk arah Y. Lakukan langkah yang sama dengan hanya *select joint restraint* pada *shearwall* saja.



Joint Text	Output Case	Case Type	F1 KN	F2 KN	F3 KN	M1 KN-m	M2 KN-m	M3 KN-m
1	Ex ELF	LinStatic	-224,665	-17,175	-520,049	1,3095	-1110,6894	202,8844
1	Ey ELF	LinStatic	2,889	-1041,441	10951,08	129,5105	22,0614	-7,7651
3	Ex ELF	LinStatic	-593,575	-29,055	649,74	44,9539	-1542,1318	-4,3308
3	Ey ELF	LinStatic	0,896	-3005,346	14773,22	191,0217	-9,8074	28,3126
17	Ex ELF	LinStatic	-126,811	-1,489	335,445	3,3131	-486,3365	0,1575
17	Ey ELF	LinStatic	3,16	-35,408	330,197	153,4543	10,8115	-1,4921
25	Ex ELF	LinStatic	-122,827	-2,152	-2,783	3,7407	-480,5064	0,1575
25	Ey ELF	LinStatic	2,76	-37,931	319,219	162,2888	10,226	-1,4921
33	Ex ELF	LinStatic	-126,034	0,203	0,147	-0,2489	-485,2	0,1575
33	Ey ELF	LinStatic	2,816	-40,166	330,961	170,7017	10,308	-1,4921
41	Ex ELF	LinStatic	-125,729	0,055	-1,652	-0,5751	-484,7533	0,1575
41	Ey ELF	LinStatic	2,801	-42,282	343,74	178,9397	10,286	-1,4921
49	Ex ELF	LinStatic	-125,874	0,268	-17,938	-1,4299	-484,9652	0,1575
49	Ey ELF	LinStatic	3	-44,424	367,119	187,2161	10,5767	-1,4921

Gambar 5.55 Output *Joint Reaction*

Berikutnya output *joint reaction* tersebut dijumlahkan untuk masing-masing komponen lalu dibandingkan untuk mengetahui berapa rasio gaya geser setiap komponen terhadap gaya geser total. Rasio gaya geser dasar yang ditahan oleh masing-masing komponen pada Gedung A dan Gedung B dapat dilihat pada Tabel 5.19 dibawah. Hasil berikut menunjukkan bahwa nilai rasio untuk komponen *shearwall* lebih besar dibandingkan komponen rangka. Meskipun pada Gedung B rangka menerima $< 25\%$ gaya gempa, namun penempatan *shearwall* pada beberapa titik dianggap bekerja sebagai sistem ganda (*dual system*).

Tabel 5.19 Rasio Gaya Geser Dasar Pada Sistem Ganda

Komponen	Gedung A (Arah Y)		Gedung B (Arah X)	
	V (kN)	Rasio	V (kN)	Rasio
<i>Shearwall</i>	8132.28	66.97%	8801.77	84.65%
Sistem rangka	4010.95	33.03%	1596.35	15.35%
Total	12143.22	100%	10398.12	100%

Indikator lain yang dapat diketahui berdasarkan bentuk kurva kapasitas tersebut adalah kekakuan. Secara umum pada dua arah ortogonal jika salah satu arah memiliki kurva yang cenderung lebih tegak dibanding arah lainnya maka artinya sistem struktur pada arah tersebut memiliki kekakuan yang lebih tinggi. Hal ini sesuai dengan yang disampaikan oleh Muntafi, Faraodi dan Asroni, (2018) pada penelitiannya dimana kurva kapasitas pada salah satu arah lebih tegak dan memiliki nilai kekakuan lebih tinggi karena dimensi kolom yang lebih besar pada arah tersebut.

Untuk mengetahui perbandingan kekakuan pada masing-masing arah ortogonal maka dapat dilakukan dengan cara *select joint* yang segaris secara vertikal > *Display* > *Show Tables* > *Analysis Result* > *Joint Output* > *Displacement* > pilih *output case* gempa statik arah X dan Y > ambil nilai *displacement* U1 untuk arah X dan U2 untuk arah Y. Berikutnya nilai kekakuan translasi pada setiap tingkat dapat dihitung dengan membagi nilai *displacement* dengan beban 1 satuan yang bekerja pada joint tersebut. Berikut contoh perhitungan kekakuan translasi untuk lantai 1 pada Gedung A.

Displacement arah X = 0.008446 m

Displacement arah Y = 0.002710 m

$$\begin{aligned}\text{Kekakuan X} &= \frac{1 \text{ kN}}{0,008446 \text{ m}} \\ &= 118,40 \text{ kN/m}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{Kekakuan Y} &= \frac{1 \text{ kN}}{0,002710 \text{ m}} \\ &= 369,00 \text{ kN/m}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{Rasio kekakuan.} &= \frac{369,00 \text{ kN/m}}{118,40 \text{ kN/m}} \\ &= 3,12\end{aligned}$$

Artinya pada arah Y dengan *shearwall* memiliki nilai kekakuan 3,12 kali lipat dibanding arah X. Rekapitulasi rasio kekakuan setiap arah untuk masing-masing gedung dapat dilihat pada Tabel 5.20 dan 5.21 berikut.

Tabel 5.20 Kekakuan Translasi Tingkat Gedung A

Joint	Elevasi (m)	UX (m)	UY (m)	Stiff X (kN/m)	Stiff Y (kN/m)	Rasio
2	4.5	0.008446	0.002710	118.40	369.00	3.12
5	8.7	0.023302	0.007653	42.91	130.67	3.04
7	13.9	0.042758	0.015732	23.39	63.56	2.72
9	18.1	0.056844	0.022893	17.59	43.68	2.48
11	22.3	0.067443	0.030112	14.83	33.21	2.24
13	26.5	0.074135	0.036977	13.49	27.04	2.00
15	30.05	0.077179	0.042091	12.96	23.76	1.83

Tabel 5.21 Kekakuan Translasi Tingkat Gedung B

Joint	Elevasi	UX (m)	UY (m)	Stiff X (kN/m)	Stiff Y (kN/m)	Rasio
30	4.5	0.002832	0.007989	353.11	125.17	2.82
228	8.7	0.007946	0.022148	125.85	45.15	2.79
344	18.1	0.023659	0.053075	42.27	18.84	2.24
486	13.9	0.016286	0.040759	61.40	24.53	2.50
828	22.3	0.031058	0.061754	32.20	16.19	1.99
1038	26.5	0.038081	0.067301	26.26	14.86	1.77

1420	30.05	0.043201	0.069931	23.15	14.30	1.62
------	-------	----------	----------	-------	-------	------

5.6.2. Titik Kinerja (*Performance Point*) Berdasarkan ATC-40

Dalam metode ATC-40, *performance point* adalah kondisi respons maksimum struktur terhadap gempa rencana yang diperoleh dari keseimbangan antara kapasitas inelastik struktur dan tuntutan seismik. Konsep ini dikembangkan dalam kerangka *Capacity Spectrum Method* (CSM). Kurva kapasitas yang telah diperoleh sebelumnya tidak digunakan secara langsung, tetapi ditransformasikan ke dalam koordinat spektral berupa hubungan antara percepatan spektral (S_a) dan perpindahan spektral (S_d). Hasil transformasi ini disebut *capacity spectrum*, yang merepresentasikan kemampuan inelastik struktur dalam domain spektrum respons. Di sisi lain, tuntutan gempa direpresentasikan oleh *demand spectrum*, yang berasal dari spektrum respons elastik gempa rencana dengan redaman 5%. Dalam ATC-40, spektrum ini kemudian dimodifikasi untuk memperhitungkan perilaku inelastik struktur, yaitu dengan meningkatkan redaman efektif sebagai fungsi dari tingkat daktilitas yang terjadi. Semakin besar deformasi plastis yang dialami struktur, semakin besar redaman efektifnya, sehingga tuntutan spektral yang bekerja pada struktur menjadi lebih kecil.

Performance point ditentukan sebagai titik perpotongan antara *capacity spectrum* dan *demand spectrum* yang telah dimodifikasi redamannya. Proses penentuan *performance point* bersifat iteratif, karena redaman efektif bergantung pada daktilitas, sementara daktilitas sendiri bergantung pada posisi titik keseimbangan yang dicari. Pada SAP2000 proses ini dihitung otomatis oleh program, namun terdapat beberapa parameter yang dibutuhkan untuk menentukan *performance point* ini sebagai berikut.

1. Menentukan Parameter C_A dan C_V

Nilai C_A (*Coefficient of Acceleration*) dan C_V (*Coefficient of Velocity*) dihitung menggunakan persamaan 3.31 dan 3.32 dalam subsubbab 3.7.3 sebagai berikut.

$$C_A = 0,4 \times 0,9647$$

$$= 0,386$$

$$C_V = 0,898$$

Nilai ini berlaku untuk Gedung A dan Gedung B.

2. Menentukan *Structural Behaviour Type*

Parameter ini ditentukan sesuai tabel 3.11 dalam subsubbab 3.7.3 untuk kedua gedung diklasifikasikan sebagai bangunan eksisting dengan periode panjang sehingga kedua gedung masuk ke kategori *Type C*.

3. Menentukan Parameter Redaman (*Damping*)

Sesuai subsubbab 3.7.3 untuk tingkat redaman akan dihitung oleh program secara otomatis sehingga yang diinput pada SAP2000 adalah *inherent damping* sebesar 5%.

Untuk menginputnya pada SAP2000 di tampilan kurva kapasitas pilih *plot type > pilih ATC-40 Capacity Spectrum > Modify Parameters*. Isikan parameter diatas untuk arah X dan Y seperti pada Gambar 5.56 berikut.

S Parameters For ATC-40 Capacity Spectrum [X]

Pushover Parameters Name

Name: A40PO1 Units: KN, m, C

Plot Axes

☒ Sa - Sd ☐ Sa - T ☐ Sd - T **Axis Labels and Range** Set Axis Data...

Demand Spectrum Definition

☐ Function ☒ User Coeffs Ca: 0,386 Cv: 0,898 SF:

Damping Parameters Definition

Inherent + Additional Damping: 0,05

Structural Behavior Type: ☐ A ☐ B ☒ C ☐ User Modify/Show...

Items Visible On Plot

☒ Show Capacity Curve Color: [Green]

☒ Show Family of Demand Spectra Color: [Red]

Damping Ratios: 0,05 0,1 0,15 0,2

☒ Show Single Demand Spectrum (ADRS) (Variable Damping) Color: [Yellow]

☒ Show Constant Period Lines at Color: [Grey]

0,5 1 1,5 2

Reset Default Colors

Update Plot

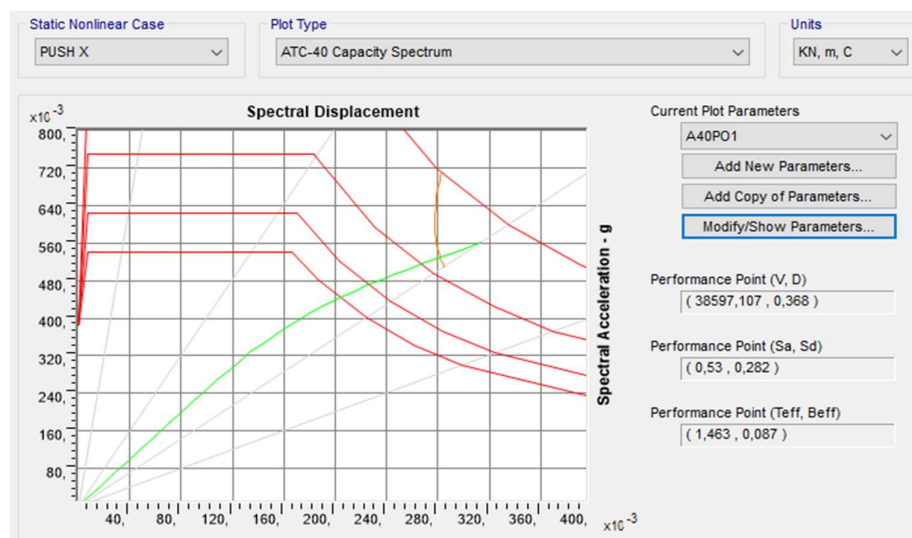
OK Cancel

Gambar 5.56 Parameter Untuk *Performance Point*

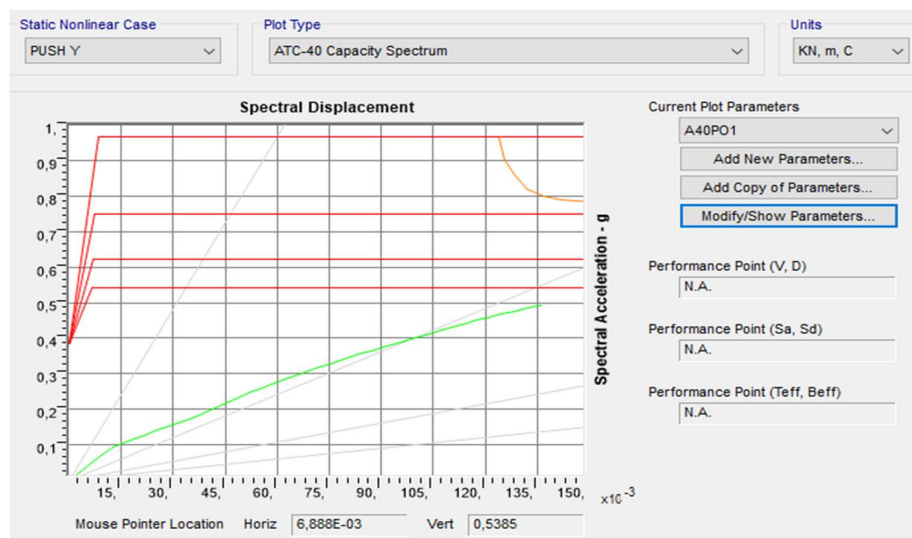
Hasil *performance point* dan detail parameter untuk masing-masing gedung dapat dilihat sebagai berikut.

1. Performance Point Gedung A

Tampilan *performance point* Gedung A untuk arah X dan Y dapat dilihat pada Gambar 5.57 dan 5.58 berikut.



Gambar 5.57 *Performance Point* Gedung A Arah X



Gambar 5.58 Performance Point Gedung A Arah Y

Detail parameter spektrum *capacity* dan *demand* untuk arah X dan Y dapat dilihat pada Tabel 5.22 dan 5.23 berikut.

Tabel 5.22 Sa-Sd Capacity vs Demand Arah X Gedung A

<i>Step</i>	<i>Sd Capacity</i>	<i>Sa Capacity</i>	<i>Sd Demand</i>	<i>Sa Demand</i>
0	0.000000	0.000000	0.282371	0.709405
1	0.007461	0.018745	0.282371	0.709405
2	0.014923	0.037490	0.282393	0.709456
3	0.022384	0.056235	0.282393	0.709452
4	0.029846	0.074980	0.282393	0.709449
5	0.037307	0.093724	0.282394	0.709445
6	0.044768	0.112469	0.282394	0.709441
7	0.047717	0.119877	0.282394	0.709440
8	0.059880	0.150374	0.282358	0.709072
9	0.071407	0.179129	0.282273	0.708097
10	0.083470	0.209157	0.282239	0.707225
11	0.091311	0.228650	0.282238	0.706746
12	0.099008	0.247372	0.282042	0.704680
13	0.108482	0.270005	0.281750	0.701256
14	0.116843	0.289700	0.281527	0.698017
15	0.125101	0.308513	0.281182	0.693424
16	0.134169	0.328052	0.280601	0.686087
17	0.144763	0.348622	0.279565	0.673256
18	0.154067	0.365763	0.278872	0.662057
19	0.163510	0.382842	0.278508	0.652097
20	0.171555	0.397042	0.278368	0.644248
21	0.180216	0.411550	0.278242	0.635408
22	0.189779	0.425992	0.277990	0.623998
23	0.197767	0.437114	0.277813	0.614035
24	0.206011	0.447865	0.277710	0.603736
25	0.214801	0.458500	0.277678	0.592715
26	0.224913	0.470034	0.277805	0.580569
27	0.235900	0.482234	0.278197	0.568699
28	0.246585	0.493799	0.278774	0.558259

29	0.256498	0.504206	0.279433	0.549291
30	0.267155	0.515129	0.280257	0.540393

Lanjutan Tabel 5.22 Sa-Sd Capacity vs Demand Arah X Gedung A

<i>Step</i>	<i>Sd Capacity</i>	<i>Sa Capacity</i>	<i>Sd Demand</i>	<i>Sa Demand</i>
31	0.279024	0.527080	0.281300	0.531378
32	0.287715	0.535759	0.282139	0.525375
33	0.298862	0.546680	0.283267	0.518155
34	0.313729	0.560948	0.284852	0.509317

Tabel 5.23 Sa-Sd Capacity vs Demand Arah Y Gedung A

<i>Step</i>	<i>Sd Capacity</i>	<i>Sa Capacity</i>	<i>Sd Demand</i>	<i>Sa Demand</i>
0	0.000000	0.000000	0.124171	0.965000
1	0.003175	0.024677	0.124171	0.965000
2	0.006356	0.049359	0.123943	0.962504
3	0.009585	0.072978	0.124252	0.946009
4	0.012794	0.092024	0.125403	0.902024
5	0.015881	0.107104	0.128136	0.864191
6	0.018897	0.117568	0.131876	0.820478
7	0.021937	0.128225	0.136805	0.799644
8	0.024979	0.138934	0.141952	0.789534
9	0.028023	0.149676	0.146991	0.785108
10	0.031068	0.160443	0.151798	0.783923
11	0.034186	0.172030	0.156445	0.787267
12	0.037342	0.184813	0.160810	0.795875
13	0.040441	0.198026	0.164682	0.806392
14	0.043549	0.211273	0.168129	0.815662
15	0.046635	0.224366	0.171184	0.823578
16	0.049697	0.237068	0.173897	0.829540
17	0.052820	0.249641	0.176398	0.833703
18	0.055815	0.261172	0.178585	0.835649
19	0.057360	0.266736	0.179634	0.835334
20	0.061810	0.282716	0.182561	0.835024
21	0.067016	0.301147	0.185795	0.834895
22	0.071532	0.316663	0.188435	0.834182
23	0.075246	0.328838	0.190497	0.832503
24	0.078126	0.337531	0.192022	0.829600

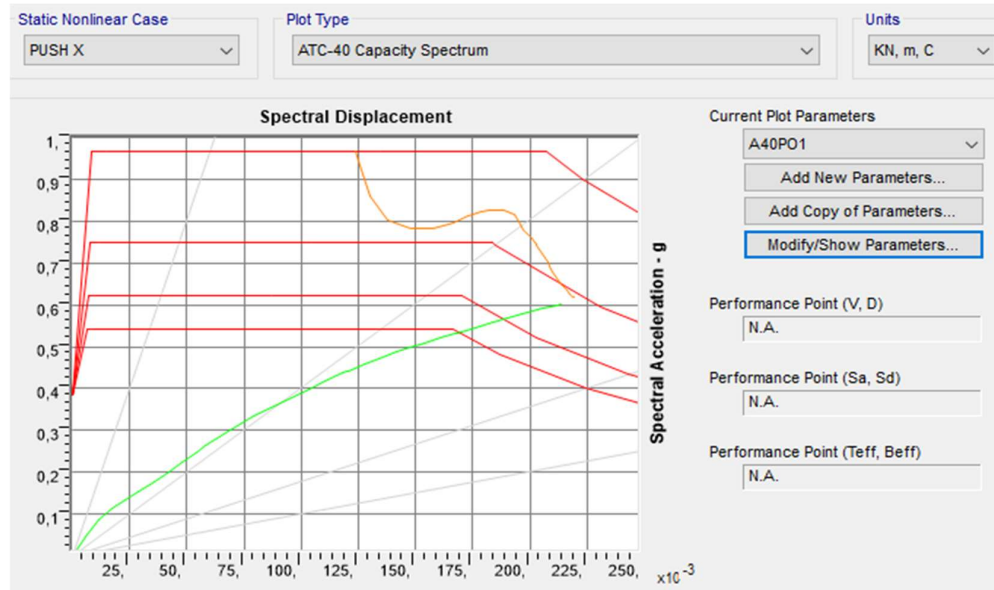
25	0.080987	0.346254	0.192928	0.824847
26	0.084306	0.356324	0.193687	0.818628

Lanjutan Tabel 5.23 Sa-Sd Capacity vs Demand Arah Y Gedung A

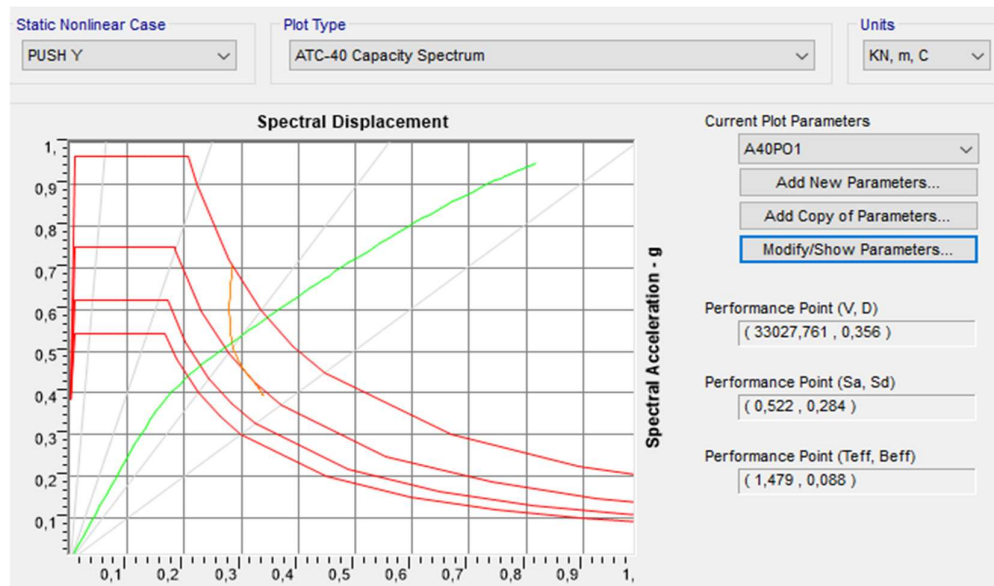
<i>Step</i>	<i>Sd Capacity</i>	<i>Sa Capacity</i>	<i>Sd Demand</i>	<i>Sa Demand</i>
27	0.087123	0.364767	0.194325	0.813603
28	0.091317	0.377256	0.195281	0.806757
29	0.094152	0.385627	0.195924	0.802465
30	0.096567	0.392707	0.196467	0.798970
31	0.096691	0.391772	0.196271	0.795246
32	0.096717	0.391920	0.196290	0.795410
33	0.097047	0.393443	0.196463	0.796492
34	0.099986	0.402204	0.197167	0.793130
35	0.103798	0.412973	0.197984	0.787700
36	0.107912	0.424530	0.198864	0.782340
37	0.111710	0.435012	0.199653	0.777470
38	0.114376	0.442289	0.200198	0.774156
40	0.117582	0.450502	0.200782	0.769274
41	0.119176	0.454711	0.201094	0.767266
43	0.120862	0.458943	0.201396	0.764752
44	0.120921	0.458885	0.201376	0.764205
45	0.124311	0.467361	0.201990	0.759405
46	0.128072	0.476015	0.202585	0.752966
47	0.129799	0.479922	0.202858	0.750053
49	0.130563	0.481515	0.202962	0.748520
50	0.130571	0.481512	0.202961	0.748466
51	0.134982	0.490991	0.203629	0.740693
52	0.136115	0.493252	0.203784	0.738472

2. Performance Point Gedung B

Tampilan *performance point* Gedung B untuk arah X dan Y dapat dilihat pada Gambar 5.59 dan 5.60 berikut.



Gambar 5.59 Performance Point Gedung B Arah X



Gambar 5.60 Performance Point Gedung B Arah Y

Detail parameter spektrum *capacity* dan *demand* untuk arah X dan Y dapat dilihat pada Tabel 5.24 dan 5.25 berikut.

Tabel 5.24 Sa-Sd *Capacity* vs *Demand* Arah X Gedung B

<i>Step</i>	<i>Sd Capacity</i>	<i>Sa Capacity</i>	<i>Sd Demand</i>	<i>Sa Demand</i>
0	0.000000	0.000000	0.123971	0.965000
1	0.005827	0.045358	0.123971	0.965000
2	0.011510	0.085361	0.125658	0.931946
3	0.017006	0.112440	0.129879	0.858722
4	0.022760	0.132735	0.137793	0.803593
5	0.028970	0.153116	0.147767	0.781002
6	0.035426	0.175704	0.157615	0.781742
7	0.041932	0.200823	0.166217	0.796047
8	0.047980	0.225290	0.172870	0.811720
9	0.053931	0.248553	0.178285	0.821669
10	0.058112	0.263942	0.181582	0.824737
11	0.068642	0.300416	0.188886	0.826675
12	0.078929	0.333238	0.193503	0.816968
13	0.089517	0.362052	0.195773	0.791800
14	0.095534	0.377578	0.197066	0.778860
15	0.103097	0.397966	0.198918	0.767850
16	0.110448	0.417287	0.200654	0.758096
17	0.118257	0.436934	0.202379	0.747748
18	0.120012	0.441197	0.202747	0.745358
19	0.120667	0.442363	0.202823	0.743546
20	0.127616	0.457705	0.204119	0.732089
21	0.134119	0.472042	0.205387	0.722875
22	0.141502	0.487145	0.206724	0.711682
23	0.147441	0.498175	0.207712	0.701819
24	0.153561	0.508504	0.208667	0.690982

25	0.161006	0.521056	0.209915	0.679340
----	----------	----------	----------	----------

Lanjutan Tabel 5.24 Sa-Sd Capacity vs Demand Arah X Gedung B

<i>Step</i>	<i>Sd Capacity</i>	<i>Sa Capacity</i>	<i>Sd Demand</i>	<i>Sa Demand</i>
26	0.167306	0.531623	0.211019	0.670522
27	0.167564	0.531935	0.211051	0.669987
28	0.175990	0.545566	0.212536	0.658858
29	0.183830	0.557870	0.213926	0.649202
30	0.189874	0.566961	0.214983	0.641934
31	0.196666	0.577429	0.216220	0.634839
32	0.205461	0.590456	0.217792	0.625892
33	0.211731	0.599543	0.218906	0.619860
34	0.213444	0.601668	0.219178	0.617830
35	0.213543	0.602031	0.219217	0.618029

Tabel 5.25 Sa-Sd Capacity vs Demand Arah Y Gedung B

<i>Step</i>	<i>Sd Capacity</i>	<i>Sa Capacity</i>	<i>Sd Demand</i>	<i>Sa Demand</i>
0	0.000000	0.000000	0.283873	0.705651
1	0.007809	0.019410	0.283873	0.705651
2	0.015617	0.038821	0.283895	0.705704
3	0.023426	0.058231	0.283895	0.705701
4	0.031234	0.077641	0.283895	0.705698
5	0.039043	0.097051	0.283895	0.705695
6	0.043359	0.107779	0.283896	0.705694
7	0.051861	0.128808	0.283811	0.704911
8	0.062877	0.155885	0.283689	0.703325
9	0.071520	0.177083	0.283669	0.702364
10	0.080824	0.199860	0.283684	0.701490
11	0.091740	0.226180	0.283548	0.699069
12	0.104269	0.256148	0.283472	0.696381
13	0.113189	0.277093	0.283344	0.693640
14	0.122743	0.299121	0.283175	0.690090

15	0.131812	0.319007	0.282762	0.684328
16	0.141073	0.338012	0.282128	0.675981

Lanjutan Tabel 5.25 Sa-Sd Capacity vs Demand Arah Y Gedung B

<i>Step</i>	<i>Sd Capacity</i>	<i>Sa Capacity</i>	<i>Sd Demand</i>	<i>Sa Demand</i>
17	0.150887	0.356367	0.281252	0.664265
18	0.160735	0.373912	0.280608	0.652765
19	0.169396	0.388346	0.280122	0.642189
20	0.179511	0.403679	0.279571	0.628690
21	0.190061	0.418802	0.279271	0.615377
22	0.198833	0.430629	0.279172	0.604624
23	0.209619	0.444310	0.279221	0.591840
24	0.220802	0.457450	0.279423	0.578898
25	0.229184	0.466747	0.279687	0.569600
26	0.238758	0.476937	0.280113	0.559548
27	0.247658	0.486130	0.280629	0.550849
28	0.260514	0.499083	0.281558	0.539398
29	0.269402	0.507933	0.282317	0.532284
30	0.277913	0.516252	0.283102	0.525891
31	0.287645	0.525717	0.284076	0.519194
32	0.297701	0.535440	0.285150	0.512865
33	0.313831	0.550859	0.286968	0.503709
34	0.326522	0.562920	0.288469	0.497317
35	0.337692	0.573478	0.289823	0.492185
36	0.350130	0.585171	0.291354	0.486940
37	0.358383	0.592866	0.292376	0.483672
38	0.366636	0.600525	0.293401	0.480572
39	0.382968	0.615671	0.295447	0.474969
40	0.397500	0.629075	0.297266	0.470446
41	0.410152	0.640700	0.298845	0.466826
42	0.421286	0.650864	0.300222	0.463827
43	0.434850	0.663159	0.301884	0.460381
44	0.443119	0.670630	0.302890	0.458403

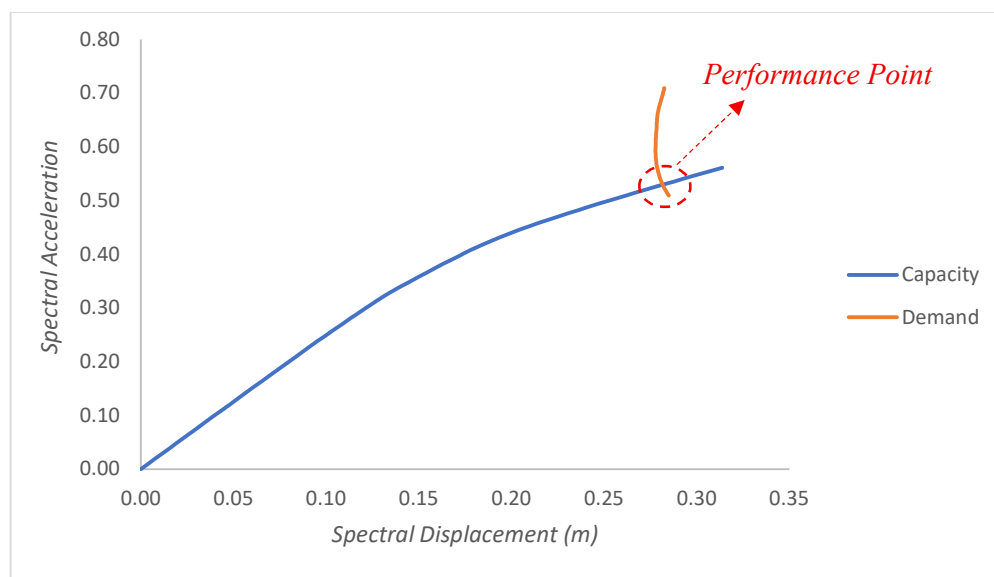
45	0.452961	0.679505	0.304079	0.456161
46	0.465466	0.690701	0.305571	0.453434
47	0.476888	0.700846	0.306915	0.451049

Lanjutan Tabel 5.25 Sa-Sd Capacity vs Demand Arah Y Gedung B

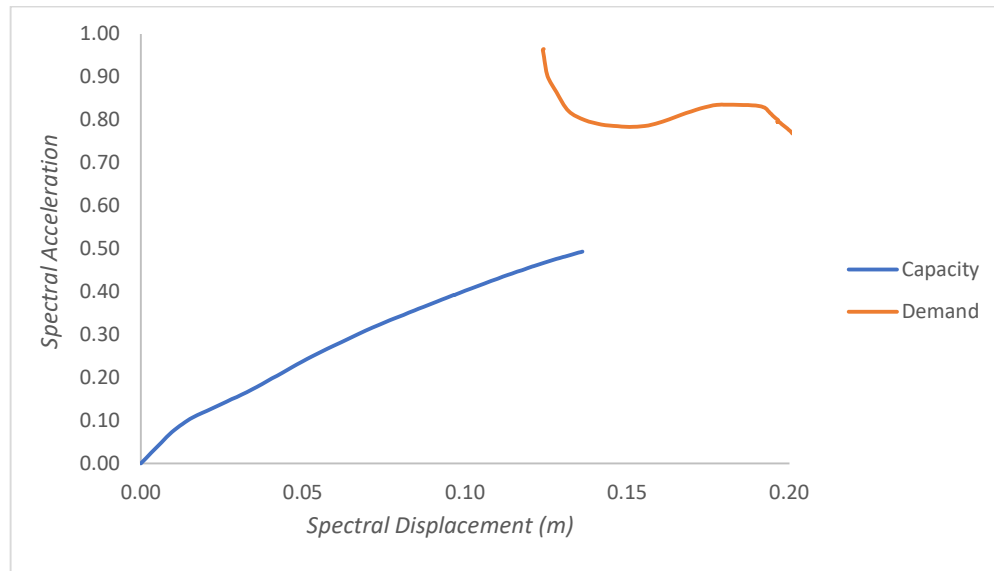
<i>Step</i>	<i>Sd Capacity</i>	<i>Sa Capacity</i>	<i>Sd Demand</i>	<i>Sa Demand</i>
48	0.488067	0.710732	0.308216	0.448829
49	0.497478	0.718912	0.309286	0.446954
50	0.511235	0.730649	0.310815	0.444212
51	0.522659	0.740358	0.312072	0.442058
52	0.533743	0.749679	0.313273	0.440014
53	0.544589	0.758686	0.314428	0.438041
54	0.560960	0.772252	0.316156	0.435240
55	0.569205	0.779048	0.317016	0.433887
56	0.577445	0.785800	0.317866	0.432560
57	0.593795	0.799135	0.319535	0.430033
58	0.605257	0.808320	0.320677	0.428263
59	0.617256	0.817812	0.321851	0.426425
60	0.629934	0.827711	0.323070	0.424503
61	0.642233	0.837088	0.324222	0.422591
62	0.651224	0.843965	0.325063	0.421271
63	0.663458	0.852870	0.326155	0.419270
64	0.671750	0.858697	0.326873	0.417841
65	0.684167	0.867381	0.327943	0.415764
66	0.698445	0.877198	0.329157	0.413398
67	0.708839	0.884192	0.330024	0.411666
68	0.717133	0.889694	0.330709	0.410287
69	0.730607	0.898606	0.331820	0.408121
70	0.745725	0.908749	0.333081	0.405896
71	0.754022	0.913948	0.333736	0.404520
72	0.762323	0.919079	0.334385	0.403144
73	0.770628	0.924078	0.335023	0.401734
74	0.785174	0.932522	0.336114	0.399191

75	0.794527	0.937837	0.336809	0.397559
76	0.802841	0.942517	0.337425	0.396129
77	0.811159	0.947130	0.338037	0.394700
78	0.816301	0.949925	0.338411	0.393806

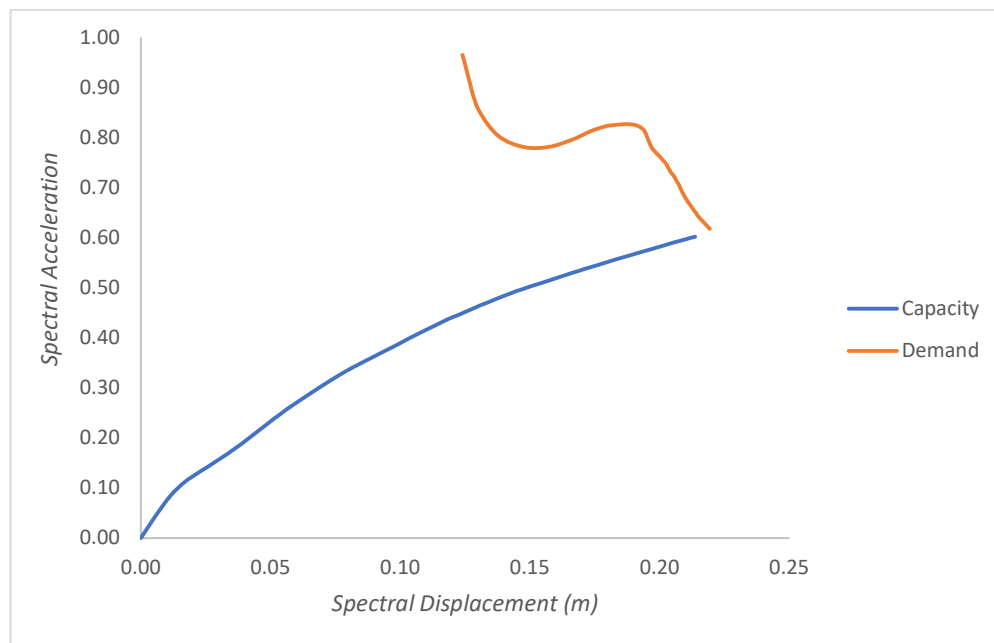
Untuk lebih jelasnya hasil perpotongan kurva spektrum kapasitas dan permintaan dapat dilihat pada Gambar 5.61 hingga 5.64 berikut.



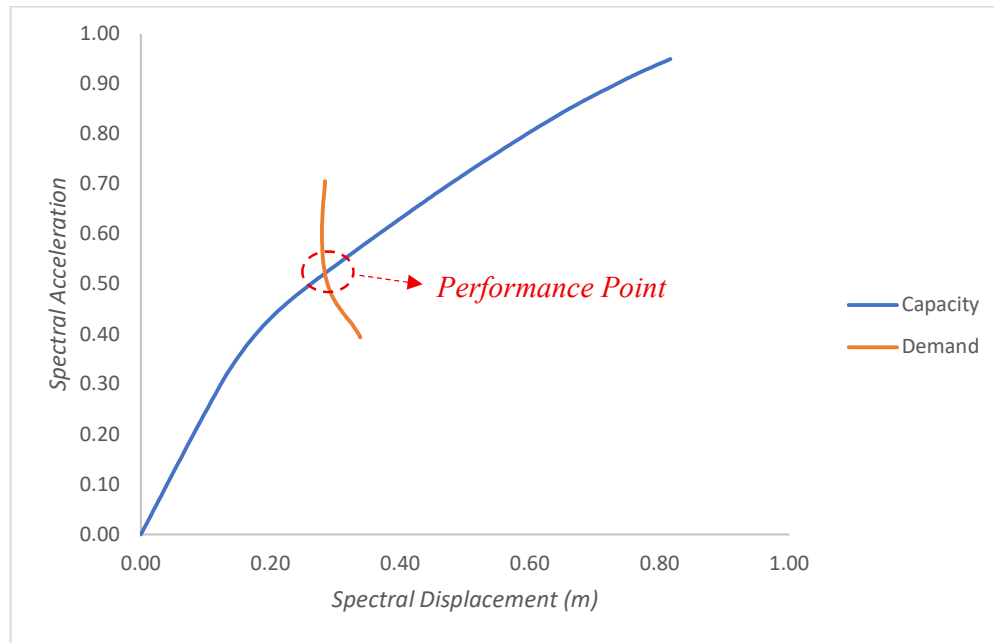
Gambar 5.61 Capacity vs Demand Spectrum Arah X Gedung A



Gambar 5.62 Capacity vs Demand Spectrum Arah Y Gedung A



Gambar 5.63 Capacity vs Demand Spectrum Arah X Gedung B



Gambar 5.64 Capacity vs Demand Spectrum Arah Y Gedung B

Dari hasil analisis tersebut diperoleh letak titik kinerja (*performance point*) untuk masing-masing gedung sebagai berikut.

1. Titik Kinerja Gedung A

a. Arah X (sistem rangka) :

$$S_a \text{ (spectral acceleration)} = 0,530$$

$$S_d \text{ (spectral displacement)} = 0,282 \text{ m}$$

Titik kinerja terjadi pada iterasi antara step ke-31 dan ke-32.

b. Arah Y (sistem ganda) :

Kurva kapasitas dan permintaan tidak berpotongan (*no intersection*).

2. Titik Kinerja Gedung B

a. Arah X (sistem ganda) :

Kurva kapasitas dan permintaan tidak berpotongan (*no intersection*).

b. Arah Y (sistem rangka) :

$$S_a \text{ (spectral acceleration)} = 0,522$$

$$S_d \text{ (spectral displacement)} = 0,284 \text{ m}$$

Titik kinerja terjadi pada iterasi antara step ke-30 dan ke-31.

Dari hasil tersebut dapat diketahui bahwa pada arah ortogonal dengan sistem rangka di masing-masing gedung telah mencapai perpotongan antara spektrum kapasitas dengan spektrum permintaan. Titik kinerja (*performance point*) tersebut merepresentasikan kondisi keseimbangan antara kapasitas struktur dan tuntutan gempa, yang menunjukkan *displacement* maksimum struktur yang diperkirakan akan terjadi akibat gempa rencana.

Sementara pada arah ortogonal dengan sistem rangka + *shearwall* di masing-masing gedung, spektrum kapasitas dan spektrum permintaan tidak menunjukkan perpotongan (*no intersection*). Kondisi ini mengindikasikan bahwa keseimbangan antara kapasitas struktur dan tuntutan gempa rencana tidak tercapai dalam rentang analisis pushover. Hal ini terjadi ketika nilai parameter C_v ditingkatkan dari nilai *default* pada program dan menyebabkan spektrum permintaan bergeser ke arah *displacement* spektral yang lebih besar pada area periode panjang. Akibatnya, untuk nilai S_a tertentu tuntutan *displacement* spektral (S_d) yang dihasilkan oleh spektrum permintaan menjadi lebih besar dibandingkan kapasitas deformasi yang ditunjukkan oleh spektrum kapasitas. Kondisi ini menyebabkan spektrum permintaan berada di luar jangkauan spektrum kapasitas dalam domain S_a - S_d , sehingga tidak tercapai titik keseimbangan antara kapasitas dan permintaan. Hal ini sejalan dengan temuan Fujii (2019) dan Das dan Islam (2018) dimana peningkatan skala spektrum permintaan khususnya pada bangunan dengan respons torsi signifikan, dapat menyebabkan tuntutan deformasi melampaui kapasitas efektif struktur sebelum tercapai kondisi keseimbangan. Lebih lanjut Maidi dan Shufrin (2024) secara eksplisit menegaskan bahwa pada bangunan eksisting dengan daktilitas rendah, metode *Capacity Spectrum Method* gagal menghasilkan *performance point* karena kapasitas deformasi struktur tidak mampu mengikuti tuntutan spektral. Dengan demikian, titik kinerja (*performance point*) pada arah Y Gedung A dan arah X Gedung B tidak dapat ditentukan.

5.6.3. Level Kinerja (*Performance Level*) Berdasarkan ATC-40

Nilai *displacement* yang terjadi ketika *performance point* pada tahap sebelumnya digunakan untuk menentukan level kinerja struktur. Prosedur penentuan level kinerja sesuai dengan subbab 3.8 sebagai berikut.

1. Level Kinerja Gedung A

a. Arah X

$$\begin{aligned} 1) \text{ Maximum Total Drift} &= \frac{0,368 \text{ m}}{30,05 \text{ m}} \\ &= 0,01225 \end{aligned}$$

Nilai *Maximum Total Drift* yang diperoleh sebesar 0,01225 dan berada pada rentang $0,01 < 0,01225 < 0,02$ sehingga berdasarkan Tabel 3.12 struktur memiliki level kinerja *Damage Control (DC)*, artinya struktur bangunan masih mampu menahan gempa dengan beberapa kerusakan kecil yang masih dapat diperbaiki.

$$\begin{aligned} 2) \text{ Maximum Inelastic Drift} &= \frac{0,368 \text{ m} - 0,080245 \text{ m}}{30,05 \text{ m}} \\ &= 0,00958 \end{aligned}$$

Nilai *Maximum Inelastic Drift* yang diperoleh sebesar 0,00958 dan berada pada rentang $0,005 < 0,00958 < 0,015$ sehingga berdasarkan Tabel 3.12 struktur memiliki level kinerja *Damage Control (DC)*.

b. Arah Y

Karena tidak terjadi perpotongan kurva kapasitas dan permintaan, *performance point* tidak terbentuk, sehingga level kinerja struktur untuk arah Y pada Gedung A tidak dapat ditentukan secara langsung menggunakan metode pushover ATC-40.

2. Level Kinerja Gedung B

a. Arah X

Karena tidak terjadi perpotongan kurva kapasitas dan permintaan, *performance point* tidak terbentuk, sehingga level kinerja struktur untuk arah X pada Gedung B tidak dapat ditentukan secara langsung menggunakan metode pushover ATC-40.

b. Arah Y

$$\begin{aligned} 1) \text{ Maximum Total Drift} &= \frac{0,356 \text{ m}}{30,05 \text{ m}} \\ &= 0,01185 \end{aligned}$$

Nilai *Maximum Total Drift* yang diperoleh sebesar 0,01185 dan berada pada rentang $0,01 < 0,01185 < 0,02$ sehingga berdasarkan Tabel 3.12 struktur memiliki level kinerja *Damage Control (DC)*, artinya struktur bangunan masih mampu menahan gempa dengan beberapa kerusakan kecil yang masih dapat diperbaiki.

$$\begin{aligned} 2) \text{ Maximum Inelastic Drift} &= \frac{0,356 \text{ m} - 0,066826 \text{ m}}{30,05 \text{ m}} \\ &= 0,00962 \end{aligned}$$

Nilai *Maximum Inelastic Drift* yang diperoleh sebesar 0,00962 dan berada pada rentang $0,005 < 0,00962 < 0,015$ sehingga berdasarkan Tabel 3.12 struktur memiliki level kinerja *Damage Control (DC)*.

5.6.4. Urutan Pembentukan Sendi Plastis

Terbentuknya sendi plastis terjadi ketika elemen struktur mulai mengalami tegangan yang melampaui batas leleh material sehingga perilaku elemen tersebut beralih dari elastis ke inelastis. Pada kondisi ini, peningkatan deformasi tidak lagi diikuti oleh peningkatan gaya yang signifikan sekaligus menandai awal terjadinya peralihan respons struktur dari tahap elastis menuju perilaku pasca-leleh. Data dan mekanisme terbentuknya sendi plastis pada masing-masing gedung diuraikan sebagai berikut.

1. Gedung A

a. Arah X

Data urutan terbentuknya sendi plastis pada arah X dapat dilihat pada Tabel 5.26 berikut.

Tabel 5.26 Data Skema Sendi Plastis Arah X Gedung A

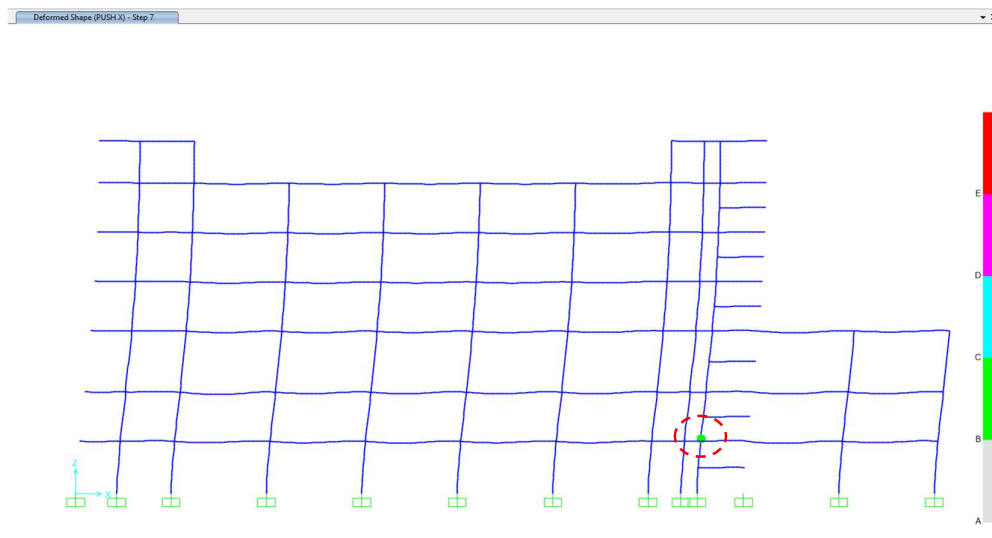
Step	AtoB	BtoC	CtoD	DtoE	BeyondE
0	1728	0	0	0	0
1	1728	0	0	0	0
2	1728	0	0	0	0
3	1728	0	0	0	0
4	1728	0	0	0	0
5	1728	0	0	0	0
6	1728	0	0	0	0
7	1727	1	0	0	0
8	1723	5	0	0	0
9	1716	12	0	0	0
10	1715	13	0	0	0

Lanjutan Tabel 5.26 Data Skema Sendi Plastis Arah X Gedung A

Step	AtoB	BtoC	CtoD	DtoE	BeyondE
11	1705	23	0	0	0
12	1696	32	0	0	0
13	1688	40	0	0	0
14	1673	55	0	0	0
15	1650	78	0	0	0
16	1618	110	0	0	0
17	1589	139	0	0	0
18	1576	152	0	0	0
19	1562	166	0	0	0
20	1545	183	0	0	0
21	1507	221	0	0	0
22	1467	261	0	0	0
23	1437	291	0	0	0
24	1395	333	0	0	0
25	1357	371	0	0	0

26	1337	391	0	0	0
27	1317	411	0	0	0
28	1281	447	0	0	0
29	1252	476	0	0	0
30	1240	488	0	0	0
31	1222	506	0	0	0
32	1210	518	0	0	0
33	1178	550	0	0	0
34	1158	570	0	0	0

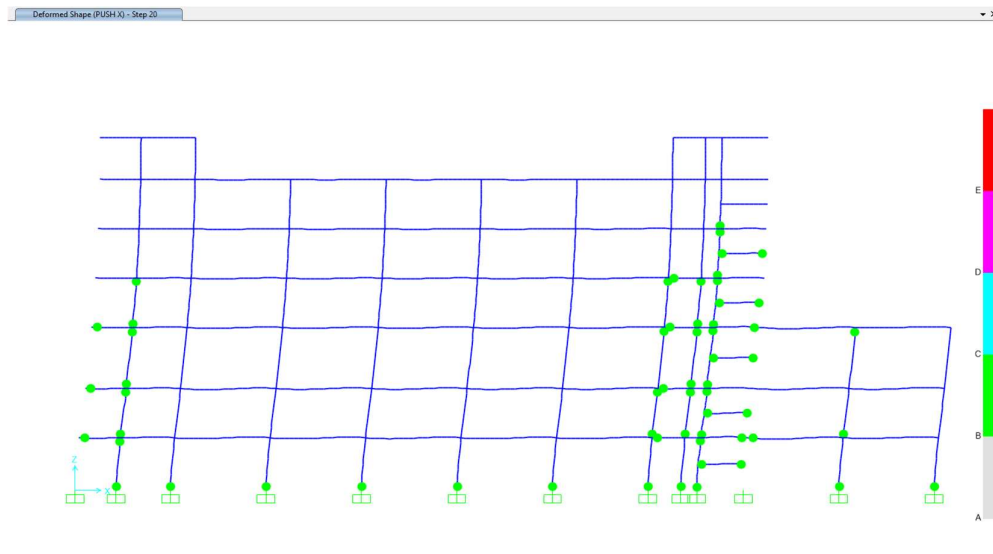
Dari Tabel 5.26 tersebut diketahui bahwa sendi plastis pertama muncul pada step ke-7 untuk kategori B to C yang artinya menunjukkan batas linier struktur. Lokasi terjadinya sendi plastis tersebut dapat dilihat pada Gambar 5.65 berikut.



Gambar 5.65 Sendi Plastis Pertama Arah X Gedung A

Dapat dilihat pada gambar tersebut bahwa sendi plastis pertama terjadi di kolom lantai 2 sekitar tangga ditandai dengan titik berwarna hijau. Analisis

kemudian dilanjutkan hingga step ke-20 yang menunjukkan lebih banyak sendi plastis terjadi pada balok dan kolom terutama pada area tangga dengan kategori yang sama yaitu B to C seperti pada Gambar 5.66 berikut.



Gambar 5.66 Sendi Plastis Arah X Gedung A

b. Arah Y

Data urutan terbentuknya sendi plastis pada arah Y dapat dilihat pada Tabel 5.27 berikut.

Tabel 5.27 Data Skema Sendi Plastis Arah Y Gedung A

Step	AtoB	BtoC	CtoD	DtoE	BeyondE
0	1728	0	0	0	0
1	1728	0	0	0	0
2	1728	0	0	0	0
3	1728	0	0	0	0
4	1728	0	0	0	0
5	1728	0	0	0	0
6	1728	0	0	0	0
7	1728	0	0	0	0
8	1728	0	0	0	0
9	1728	0	0	0	0

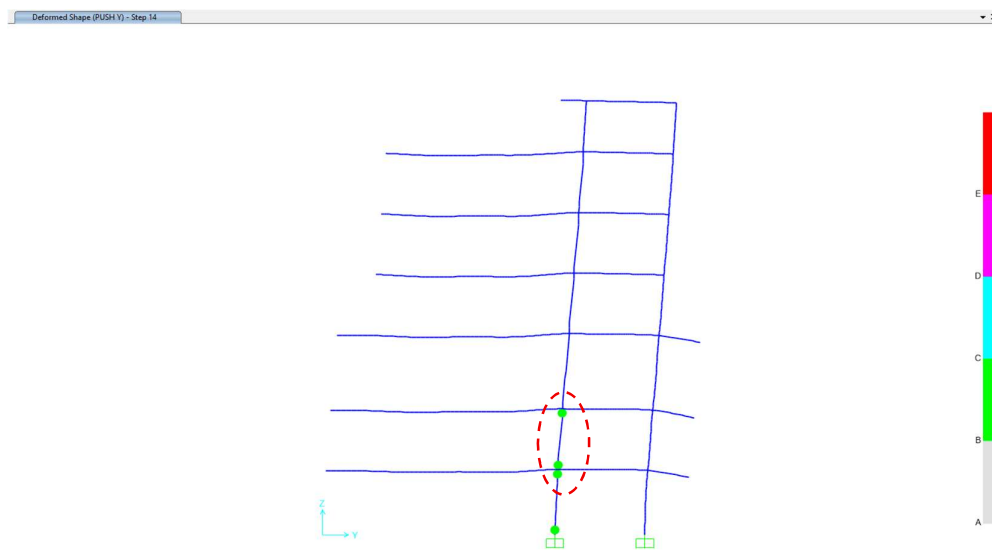
10	1728	0	0	0	0
11	1728	0	0	0	0
12	1728	0	0	0	0
13	1728	0	0	0	0
14	1724	4	0	0	0
15	1724	4	0	0	0
16	1724	4	0	0	0
17	1724	4	0	0	0
18	1724	4	0	0	0
19	1723	5	0	0	0
20	1718	10	0	0	0
21	1715	13	0	0	0
22	1711	17	0	0	0
23	1706	22	0	0	0
24	1706	22	0	0	0
25	1706	22	0	0	0
26	1701	27	0	0	0
27	1700	28	0	0	0
28	1697	31	0	0	0
29	1696	32	0	0	0

Lanjutan Tabel 5.27 Data Skema Sendi Plastis Arah Y Gedung A

Step	AtoB	BtoC	CtoD	DtoE	BeyondE
30	1694	34	0	0	0
31	1694	34	0	0	0
32	1694	34	0	0	0
33	1694	34	0	0	0
34	1689	39	0	0	0
35	1684	44	0	0	0
36	1680	48	0	0	0
37	1674	54	0	0	0
38	1666	62	0	0	0
39	1666	62	0	0	0
40	1649	79	0	0	0
41	1637	91	0	0	0
42	1637	91	0	0	0
43	1628	100	0	0	0

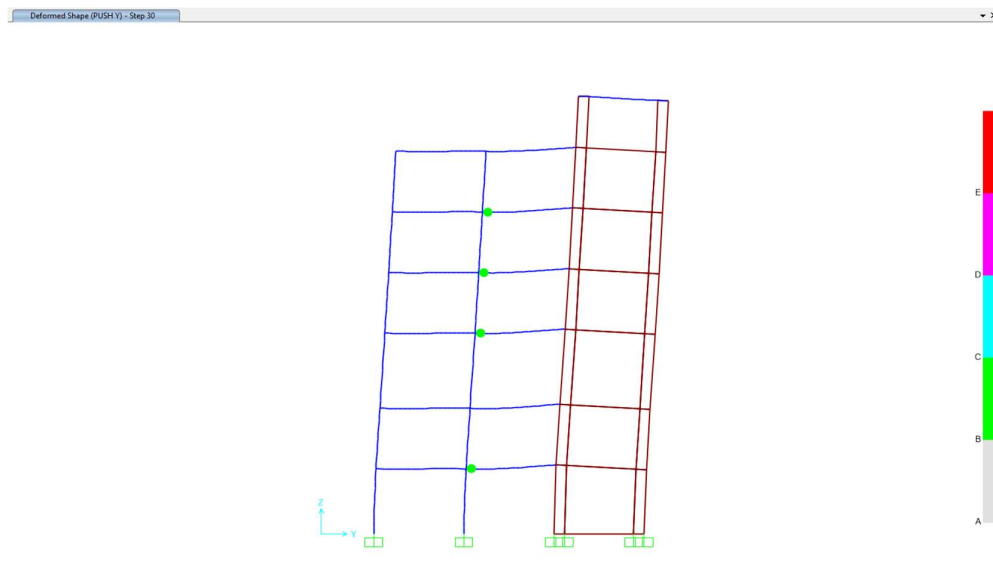
44	1628	100	0	0	0
45	1595	133	0	0	0
46	1562	165	1	0	0
47	1550	177	1	0	0
48	1550	177	1	0	0
49	1545	182	1	0	0
50	1545	182	1	0	0
51	1504	223	1	0	0
52	1499	228	1	0	0

Dari Tabel 5.27 tersebut diketahui bahwa sendi plastis pertama muncul pada step ke-14 untuk kategori B to C yang artinya menunjukkan batas linier struktur. Lokasi terjadinya sendi plastis tersebut dapat dilihat pada Gambar 5.67 berikut.



Gambar 5.67 Sendi Plastis Pertama Arah Y Gedung A

Dapat dilihat pada gambar tersebut bahwa sendi plastis pertama terjadi di kolom lantai 2 sekitar lift ditandai dengan titik berwarna hijau. Analisis kemudian dilanjutkan hingga step ke-30 yang menunjukkan sendi plastis terjadi pada balok lantai 1, 3, 4, dan 5 dengan kategori yang sama yaitu B to C seperti pada Gambar 5.68 berikut.



Gambar 5.68 Sendi Plastis Arah Y Gedung A

2. Gedung B

a. Arah X

Data urutan terbentuknya sendi plastis pada arah X dapat dilihat pada Tabel 5.28 berikut.

Tabel 5.28 Data Skema Sendi Plastis Arah X Gedung B

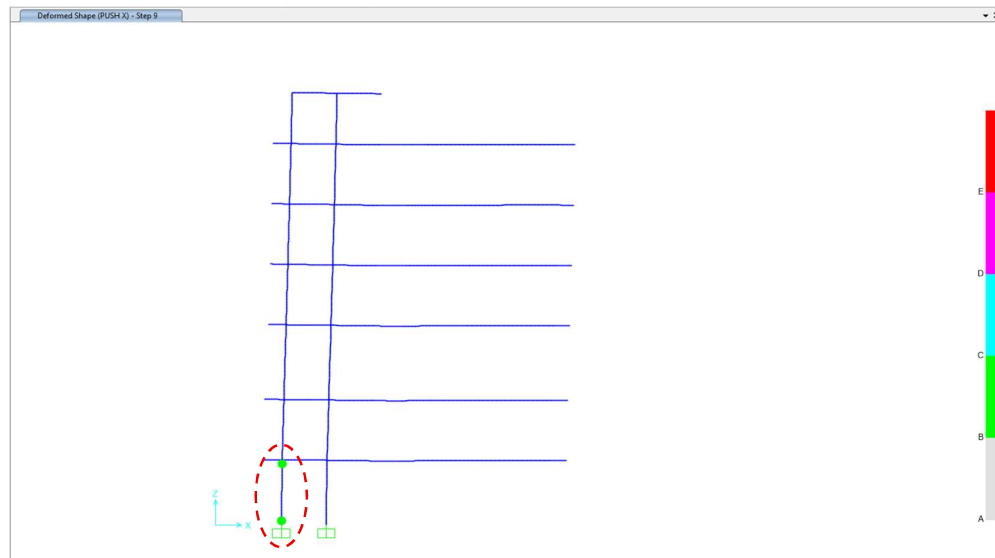
Step	AtoB	BtoC	CtoD	DtoE	BeyondE
0	1586	0	0	0	0
1	1586	0	0	0	0
2	1586	0	0	0	0
3	1586	0	0	0	0
4	1586	0	0	0	0
5	1586	0	0	0	0
6	1586	0	0	0	0

7	1586	0	0	0	0
8	1586	0	0	0	0
9	1584	2	0	0	0
10	1581	5	0	0	0
11	1574	12	0	0	0
12	1569	17	0	0	0
13	1568	18	0	0	0
14	1566	20	0	0	0
15	1553	33	0	0	0
16	1533	53	0	0	0
17	1506	80	0	0	0
18	1502	84	0	0	0
19	1498	88	0	0	0
20	1461	125	0	0	0
21	1428	158	0	0	0
22	1383	203	0	0	0
23	1355	231	0	0	0
24	1327	259	0	0	0
25	1300	286	0	0	0
26	1277	309	0	0	0
27	1277	309	0	0	0
28	1249	337	0	0	0

Lanjutan Tabel 5.28 Data Skema Sendi Plastis Arah X Gedung B

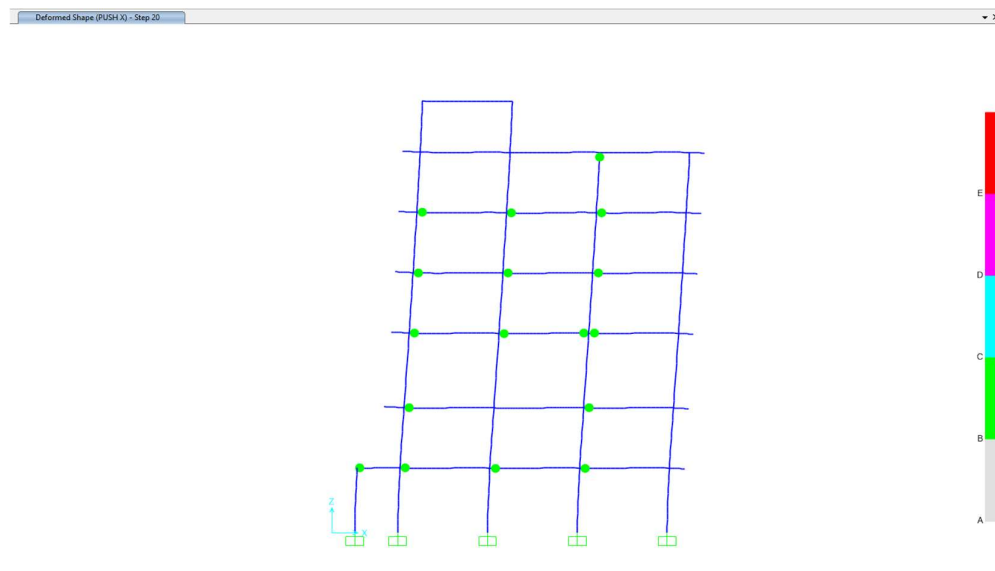
Step	AtoB	BtoC	CtoD	DtoE	BeyondE
29	1226	360	0	0	0
30	1215	370	1	0	0
31	1207	378	1	0	0
32	1184	401	1	0	0
33	1165	420	1	0	0
34	1162	423	1	0	0
35	1162	423	1	0	0

Dari Tabel 5.28 tersebut diketahui bahwa sendi plastis pertama muncul pada step ke-9 sebanyak 2 buah untuk kategori B to C yang artinya menunjukkan batas linier struktur. Lokasi terjadinya sendi plastis tersebut dapat dilihat pada Gambar 5.69 berikut.



Gambar 5.69 Sendi Plastis Pertama Arah X Gedung B

Dapat dilihat pada gambar tersebut bahwa sendi plastis pertama terjadi di kolom lantai 1 sekitar lift ditandai dengan titik berwarna hijau. Analisis kemudian dilanjutkan hingga step ke-30 yang menunjukkan sendi plastis mulai memasuki kategori C to D dengan indikator titik berwarna biru. Berikutnya pada step ke-35 menunjukkan lebih banyak sendi plastis terjadi pada balok seperti Gambar 5.70 berikut.



Gambar 5.70 Sendi Plastis Arah X Gedung B

b. Arah Y

Data urutan terbentuknya sendi plastis pada arah Y dapat dilihat pada Tabel 5.29 berikut.

Tabel 5.29 Data Skema Sendi Plastis Arah Y Gedung B

Step	AtoB	BtoC	CtoD	DtoE	BeyondE
0	1586	0	0	0	0
1	1586	0	0	0	0
2	1586	0	0	0	0
3	1586	0	0	0	0
4	1586	0	0	0	0
5	1586	0	0	0	0
6	1585	1	0	0	0
7	1579	7	0	0	0
8	1573	13	0	0	0
9	1570	16	0	0	0
10	1566	20	0	0	0
11	1557	29	0	0	0
12	1549	37	0	0	0
13	1544	42	0	0	0

Lanjutan Tabel 5.29 Data Skema Sendi Plastis Arah Y Gedung B

Step	AtoB	BtoC	CtoD	DtoE	BeyondE
14	1528	58	0	0	0
15	1503	83	0	0	0
16	1478	108	0	0	0
17	1457	129	0	0	0
18	1427	159	0	0	0
19	1394	192	0	0	0
20	1362	224	0	0	0
21	1335	251	0	0	0
22	1305	281	0	0	0
23	1264	322	0	0	0
24	1216	370	0	0	0
25	1189	397	0	0	0

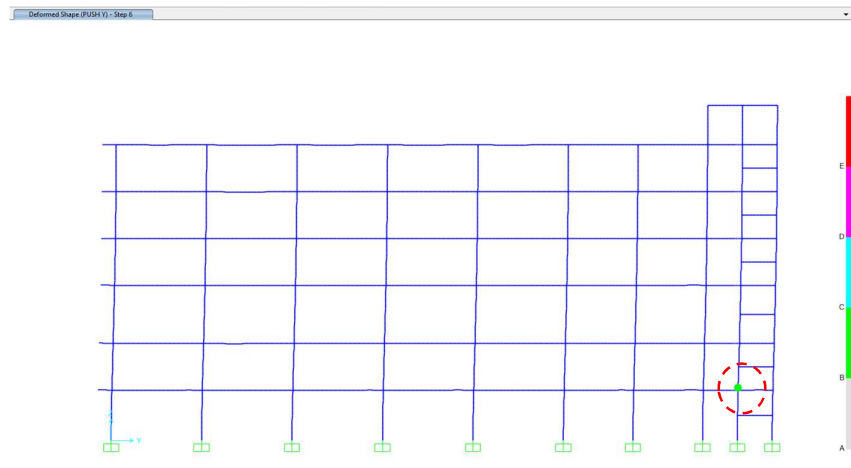
26	1167	419	0	0	0
27	1149	437	0	0	0
28	1129	457	0	0	0
29	1115	471	0	0	0
30	1106	480	0	0	0
31	1097	489	0	0	0
32	1082	504	0	0	0
33	1067	519	0	0	0
34	1055	531	0	0	0
35	1045	541	0	0	0
36	1037	548	1	0	0
37	1034	551	1	0	0
38	1033	552	1	0	0
39	1025	559	2	0	0
40	1010	574	2	0	0
41	996	587	3	0	0
42	993	588	5	0	0
43	984	595	7	0	0
44	976	603	7	0	0
45	965	614	7	0	0
46	954	621	11	0	0
47	949	624	13	0	0

Lanjutan Tabel 5.29 Data Skema Sendi Plastis Arah Y Gedung B

Step	AtoB	BtoC	CtoD	DtoE	BeyondE
48	938	633	15	0	0
49	934	634	18	0	0
50	926	641	19	0	0
51	921	645	20	0	0
52	916	645	25	0	0
53	909	652	25	0	0
54	903	657	26	0	0
55	898	660	28	0	0
56	895	663	28	0	0
57	890	660	36	0	0
58	886	660	40	0	0
59	883	655	48	0	0

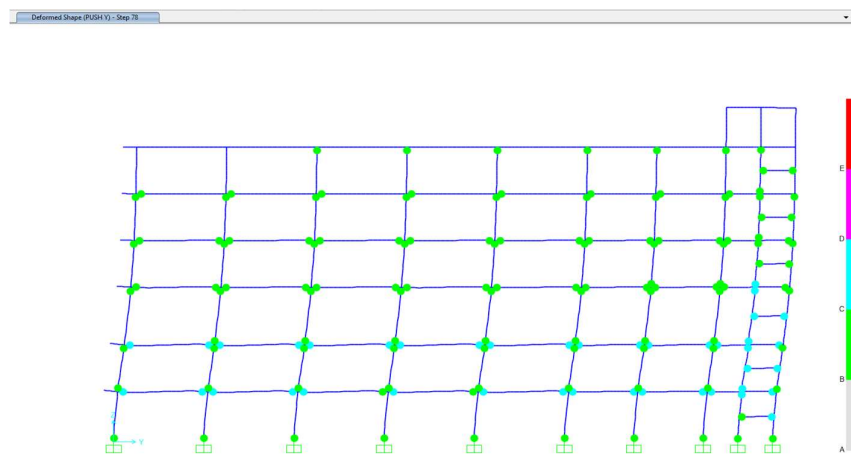
60	881	650	55	0	0
61	876	647	63	0	0
62	874	644	68	0	0
63	871	633	82	0	0
64	870	632	84	0	0
65	868	627	91	0	0
66	868	615	103	0	0
67	863	612	111	0	0
68	860	614	112	0	0
69	855	612	119	0	0
70	852	606	128	0	0
71	851	602	133	0	0
72	849	595	142	0	0
73	846	592	148	0	0
74	842	586	158	0	0
75	838	587	161	0	0
76	836	584	166	0	0
77	833	581	172	0	0
78	833	578	175	0	0

Dari Tabel 5.29 tersebut diketahui bahwa sendi plastis pertama muncul pada step ke-6 untuk kategori B *to* C. Lokasi terjadinya sendi plastis tersebut dapat dilihat pada Gambar 5.71 berikut.



Gambar 5.71 Sendi Plastis Pertama Arah Y Gedung B

Dapat dilihat pada gambar tersebut bahwa sendi plastis pertama terjadi di kolom lantai 2 sekitar tangga ditandai dengan titik berwarna hijau. Analisis kemudian dilanjutkan hingga step terakhir yaitu step ke-78 yang menunjukkan sendi plastis mulai memasuki kategori C to D sebanyak 175 buah dengan indikator titik berwarna biru seperti Gambar 5.72 berikut.



Gambar 5.72 Sendi Plastis Arah Y Gedung B

Berdasarkan mekanisme sendi plastis yang terjadi pada seluruh arah ortogonal untuk Gedung A dan Gedung B, sendi plastis pertama yang muncul dan step berikutnya selalu terbentuk pada kolom lantai 1 dan 2 terutama di area tangga dan lift. Terbentuknya sendi plastis pertama pada kolom menunjukkan bahwa

mekanisme leleh struktur tidak sepenuhnya mengikuti prinsip *strong column-weak beam* (SCWB). Prinsip SCWB mensyaratkan agar elemen balok mengalami leleh terlebih dahulu sebelum kolom, sehingga mekanisme disipasi energi terjadi melalui pembentukan sendi plastis pada balok secara merata dan kolom tetap mempertahankan kapasitasnya untuk menopang stabilitas global struktur. Namun karena sendi plastis pertama justru terjadi pada kolom terutama pada area tangga dan lift, hal ini mengindikasikan bahwa kapasitas lentur kolom pada kondisi eksisting relatif lebih rendah dibandingkan balok yang berpotensi memicu keruntuhan *column sway mechanism* seperti pada Gambar 3.12b. Akan tetapi hal ini kemudian ditinjau kembali berdasarkan level kinerja struktur secara keseluruhan yang menunjukkan kinerja *Damage Control* pada arah dengan sistem rangka. Artinya kolom pada daerah lift dan tangga bisa mengalami kerusakan lebih dulu dibanding balok, tetapi untuk kemampuan secara keseluruhan struktur masih dapat bertahan dan tidak runtuh.

Hal ini serupa dengan temuan Kurniawati dkk. (2021) dimana hasil analisis menunjukkan bahwa sebagian sendi plastis terjadi pada kolom di lantai dasar yang mengindikasikan pada kondisi eksisting tidak memenuhi keruntuhan ideal *strong column-weak beam*. Namun berdasarkan data perencanaan dengan konsep struktur ideal pada analisis pushover yang dilakukan menunjukkan kinerja dengan level *damage control* yang berarti apabila terjadi gempa, perilaku daktail parsial pada gedung mengakibatkan struktur mengalami kerusakan pada elemennya tetapi tidak runtuh.

BAB VI

KESIMPULAN DAN SARAN

6.1. Kesimpulan

Dari hasil analisis dan evaluasi yang dilakukan terhadap struktur gedung Rumah Sakit yang berlokasi di Kabupaten Karawang ini maka dapat diambil beberapa kesimpulan sebagai berikut.

1. Kurva Kapasitas dan Titik Kinerja

a. Gedung A

Berdasarkan kurva kapasitas yang diperoleh diketahui bahwa arah Y dengan sistem rangka + *shearwall* memiliki nilai kekakuan yang lebih tinggi dibanding arah X. Hal ini ditunjukkan dengan nilai *base shear* yang diterima pada arah Y lebih besar dibanding arah X. Akan tetapi meskipun cenderung lebih kaku, analisis menunjukkan bahwa arah Y mencapai *displacement* maksimum lebih dulu dibanding arah X sehingga pada plot gambar kurva arah Y tampak lebih pendek dibanding arah X. Analisis untuk arah X berhenti pada step ke-34 pada saat *displacement* mencapai 0,409051 m dan *base force* sebesar 40928,04 kN, sedangkan analisis arah Y berhenti pada step ke-52 ketika *displacement* mencapai 0,230721 m dengan *base force* yaitu 31741,22 kN. Titik kinerja arah X (sistem rangka) terjadi pada iterasi antara step ke-31 dan ke-32 ketika nilai S_a (*spectral acceleration*) mencapai 0,530 dan S_d (*spectral displacement*) mencapai 0,282 m. Sementara letak titik kinerja untuk arah Y (sistem rangka + *shearwall*) tidak dapat ditentukan karena kurva kapasitas dan permintaan tidak berpotongan (*no intersection*).

b. Gedung B

Berdasarkan kurva kapasitas yang diperoleh diketahui bahwa arah X dengan sistem rangka + *shearwall* memiliki nilai kekakuan yang lebih tinggi dibanding arah Y. Akan tetapi meskipun cenderung lebih kaku, analisis menunjukkan bahwa arah X mencapai *displacement* maksimum lebih dulu

dibanding arah Y sehingga pada plot gambar kurva arah X tampak lebih pendek dibanding arah Y. Analisis untuk arah X berhenti pada step ke-35 pada saat *displacement* mencapai 0,357539 m dan *base force* sebesar 34163,46 kN, sedangkan analisis arah Y berhenti pada step ke-76 ketika *displacement* mencapai 0,984235 m dengan *base force* yaitu 59652,22 kN. Titik kinerja arah X (sistem rangka + *shearwall*) tidak dapat ditentukan karena kurva kapasitas dan permintaan tidak berpotongan (*no intersection*). Sementara untuk arah Y (sistem rangka) titik kinerja terjadi pada iterasi antara step ke-30 dan ke-31 ketika nilai *Sa* (*spectral acceleration*) mencapai 0,522 dan *Sd* (*spectral displacement*) mencapai 0,284 m.

2. Deformasi Lateral

a. Gedung A

Nilai deformasi lateral (*displacement*) yang terjadi ketika *performance point* tercapai sebesar 0,368 m untuk arah X, sedangkan pada arah Y nilainya tidak dapat ditentukan karena *performance point* tidak terbentuk.

b. Gedung B

Nilai deformasi lateral (*displacement*) untuk arah X tidak dapat ditentukan karena *performance point* tidak terbentuk, sementara pada arah Y nilai *displacement* pada *performance point* sebesar 0,356 m.

3. Level Kinerja Struktur

a. Gedung A

Level kinerja untuk arah X diperoleh berdasarkan nilai *maximum total drift* dan *maximum inelastic drift*. Untuk arah X diperoleh nilai *maximum total drift* sebesar 0,01225 sehingga tergolong kategori kinerja *Damage Control* (DC), sedangkan nilai *maximum inelastic drift* sebesar 0,00958 dan masuk kategori kinerja *Damage Control* (DC) yang menunjukkan bahwa bangunan masih aman ketika terjadi gempa meskipun terjadi kerusakan kecil yang tidak berarti. Sementara untuk arah Y karena tidak terjadi perpotongan antara spektrum kapasitas dan spektrum permintaan, maka titik kinerja tidak dapat ditentukan, sehingga evaluasi tingkat kinerja seismik struktur berdasarkan metode ATC-40 tidak dapat dilakukan secara langsung.

b. Gedung B

Untuk arah X karena titik kinerja tidak dapat ditentukan, sehingga evaluasi level kinerja berdasarkan metode ATC-40 tidak dapat dilakukan secara langsung. Sementara level kinerja untuk arah Y diperoleh berdasarkan nilai *maximum total drift* dan *maximum inelastic drift*. Untuk arah Y diperoleh nilai *maximum total drift* sebesar 0,01185 sehingga tergolong kategori kinerja *Damage Control* (DC), sedangkan nilai *maximum inelastic drift* sebesar 0,00962 dan masuk kategori kinerja *Damage Control* (DC) yang menunjukkan bahwa bangunan masih aman ketika terjadi gempa meskipun terjadi kerusakan kecil yang tidak berarti.

Menurut U.S. *Department of Veterans Affairs* (2013) bagian 2.3 tentang evaluasi pada bangunan eksisting yang mengacu pada ASCE 31-02 untuk fasilitas penting (*Existing Critical and Essential Facilities*) seperti rumah sakit maka evaluasi harus memenuhi level kinerja *Immediate Occupancy* (IO). Namun karena pada penelitian ini diperoleh level kinerja *Damage Control* (DC) pada setiap gedung maka target kinerja tersebut masih belum terpenuhi.

6.2. Saran

Berdasarkan kesimpulan yang diperoleh, beberapa saran pengembangan yang bisa dilakukan untuk penelitian lebih lanjut sebagai berikut.

1. Menggunakan metode analisis alternatif, seperti analisis dinamik riwayat waktu nonlinier (*nonlinear time history dynamic analysis*). Pendekatan ini diperlukan untuk memperoleh gambaran kinerja seismik struktur yang lebih komprehensif terutama pada arah dimana *performance point* tidak tercapai.
2. Menggunakan acuan metode terbaru seperti ASCE 41-17 sebagai pembanding untuk menentukan level kinerja struktur bangunan.

DAFTAR PUSTAKA

- Aranta, S.D. dan Irawati, I.S. (2025) “EVALUASI KINERJA STRUKTUR PADA DESAIN STRUKTURAL GEDUNG RUMAH SAKIT DENGAN METODE PUSHOVER Structure Performance Evaluation of the Design of a Hospital Building Using the Pushover Method,” 20.
- Applied Technology Council (ATC-40). 1996. 1 *Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Building*.
- Badan Standardisasi Nasional. 2020. *SNI 1727-2020 Beban Desain Minimum Dan Kriteria Terkait Untuk Bangunan Gedung Dan Struktur Lain*.
- Badan Standarisasi Nasional. 2019. *SNI 1726-2019 Tata Cara Perencanaan Ketahanan Gempa Untuk Struktur Bangunan Gedung Dan Non Gedung*.
- Chopra, A. dan Goel, R. (2001) “A Modal Pushover Analysis Procedure to Estimate Seismic Demands for Buildings: Theory and Preliminary Evaluation,” *Civil and Environmental Engineering*, hal. 55.
- Das, M. dan Islam, M.R. (2018) “Vulnerability Assessment of an Existing Building By Damage,” (February), hal. 1–12.
- Erizal, E., Arrafi, N.R. dan Mentari, S. (2024) “Evaluation of Seismic Performance of Sabilulungan 99 Tower Structure in Bandung Regency with Nonlinear Pushover Static Analysis Method,” *Media Komunikasi Teknik Sipil*, 30(2), hal. 166–176. Tersedia pada: <https://doi.org/10.14710/mkts.v30i2.65172>.
- Fujii, K. (2019) “Correction: Pushover-Based seismic capacity evaluation of Uto City Hall damaged by the 2016 Kumamoto Earthquake. [Buildings 2019, 9, 140]doi 10.3390/buildings9060140,” *Buildings*, 9(11). Tersedia pada: <https://doi.org/10.3390/buildings9110234>.
- Kurniawati, R. dkk. (2021) “Evaluasi Kinerja Struktur Gedung Bertingkat Menggunakan Nonlinear Static Pushover Analysis dengan Capacity Spectrum Method (CSM) (Studi Kasus: Gedung B Rumah Sakit Umum Muhammadiyah Metro),” *Jurnal Rekayasa Sipil dan Desain*, 9(4), hal. 605–622. Tersedia pada: <https://doi.org/10.23960/jrsdd.v9i4.2004>.

- Maidi, M. dan Shufrin, I. (2024) "Evaluation of Existing Reinforced Concrete Buildings for Seismic Retrofit through External Stiffening: Limit Displacement Method," *Buildings*, 14(9). Tersedia pada: <https://doi.org/10.3390/buildings14092781>.
- Muntafi, Y., Faraodi, R. dan 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 of Conferences*, 229. Tersedia pada: <https://doi.org/10.1051/matecconf/201822902014>.
- Pessina, V. dkk. (2021) "Applying Simulated Seismic Damage Scenarios in the Volcanic Region of Mount Etna (Sicily): A Case-Study From the MW 4.9, 2018 Earthquake," *Frontiers in Earth Science*, 9(May). Tersedia pada: <https://doi.org/10.3389/feart.2021.629184>.
- Pranata, Y.A. dan Simanta, D. (2006) "Studi Analisis Beban Dorong Untuk Gedung," *Jurnal teknik sipil*, hal. 1–73.
- Prasetya, M.A., Wirakusuma, I. dan Sarya, G. (2022) "Kinerja struktur gedung perkuliahan 10 lantai berdasarkan analisis nonlinier pushover dan ATC-40 (studi kasus : Graha Wiyata UNTAG Surabaya)," *Jurnal Extrapolasi*, 19(01), hal. 35–45.
- Pawirodikromo, Widodo (2012). *Seismologi Teknik Dan Rekayasa Kegempaan*. 1st ed. Pustaka Pelajar.
- Supendi, P. dan Purbayanti, R. (2023) "Analysis of Local Active Faults in Western Java from Hypocenter Relocation Using BMKG Data," *Jurnal Geofisika*, 21(1), hal. 25. Tersedia pada: <https://doi.org/10.36435/jgf.v21i1.549>.
- Tavio dan Wijaya, Usman (2018). *Desain Rekayasa Gempa Berbasis Kinerja (Performance Based Design) Dilengkapi Contoh & Aplikasi Program Bantu ETABS*. Edisi 2. Penerbit ANDI Yogyakarta.
- Zebua, D. dkk. (2023) "Evaluation of Seismic Performance of Hospital Building Using Pushover Analysis Based on Atc-40," *Journal of Civil Engineering, Science and Technology*, 14(2), hal. 138–145. Tersedia pada: <https://doi.org/10.33736/jcest.5326.2023>.

LAMPIRAN

LAMPIRAN

Lampiran 1 : Surat Keterangan Hasil Cek Plagiasi



Direktorat Perpustakaan Universitas Islam Indonesia
Gedung Moh. Hatta
Jl. Kaliurang Km 14,5 Yogyakarta 55584
T. (0274) 898444 ext.2301
F. (0274) 898444 psw.2091
E. perpustakaan@uii.ac.id
W. library.uui.ac.id

SURAT KETERANGAN HASIL CEK PLAGIASI

Nomor: 2850817331/Perpus./10/Dir.Perpus/VII/2025

Bismillaahirrahmaanirrahiim

Assalamualaikum Wr. Wb.

Dengan ini, menerangkan Bahwa:

Nama : Kahfi Natakusuma
Nomor Mahasiswa : 21511066
Pembimbing : Jafar, S.T., MURP., M.T.
Fakultas / Prodi : Teknik Sipil dan Perencanaan/ Teknik Sipil
Judul Karya Ilmiah : EVALUASI KINERJA SEISMIC STRUKTUR GEDUNG BETON
BERTULANG SISTEM RANGKA-GANDA DENGAN ANALISIS
STATIK NONLINIER (PUSHOVER) (Studi Kasus : Gedung Rumah
Sakit di Kabupaten Karawang, Jawa Barat)

Karya ilmiah yang bersangkutan di atas telah melalui proses cek plagiasi menggunakan **Turnitin** dengan hasil kemiripan (*similarity*) sebesar **3 (Tiga) %**.

Demikian Surat Keterangan ini dibuat untuk dapat dipergunakan sebagaimana mestinya.

Wassalamualaikum Wr. Wb.

Yogyakarta, 12/23/2025

Direktur



Muhammad Jamil, SIP.

Lampiran 2 : *As-Built Drawing*



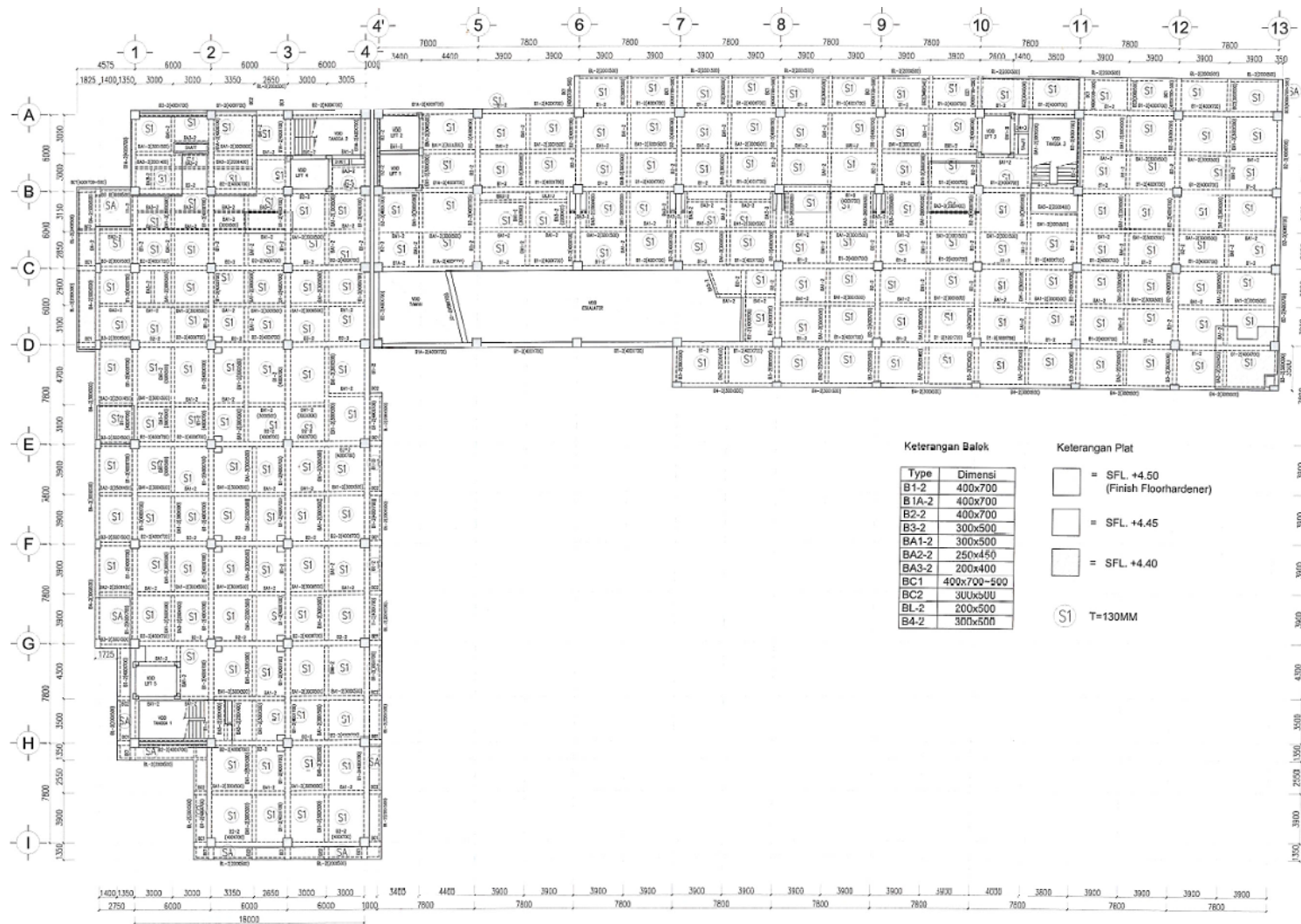
Gambar L-2.1 Denah Ruangan Lantai 2



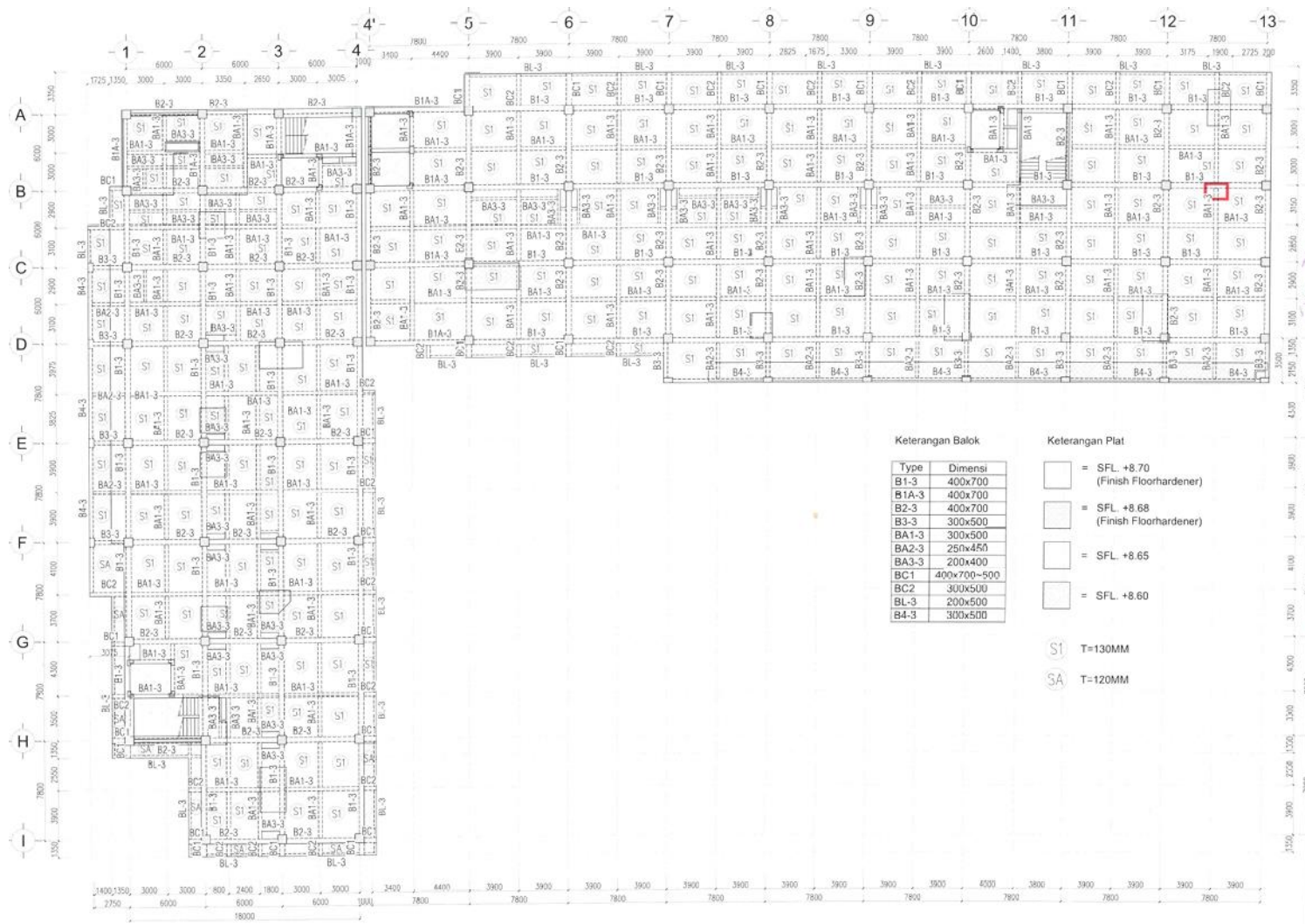
Gambar L-2.2 Denah Ruangan Lantai 3



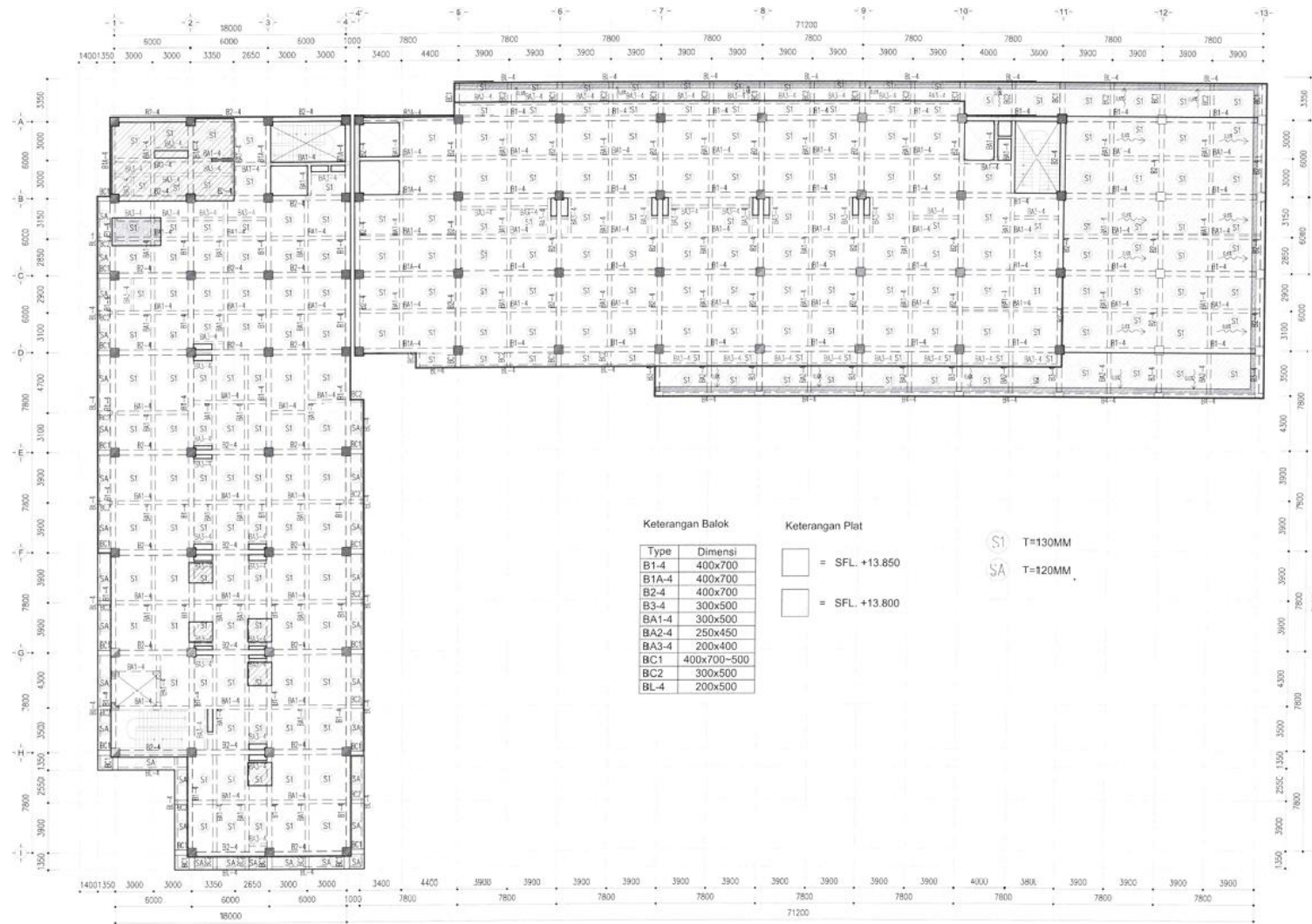
Gambar L-2.5 Denah Ruangan Lantai 6



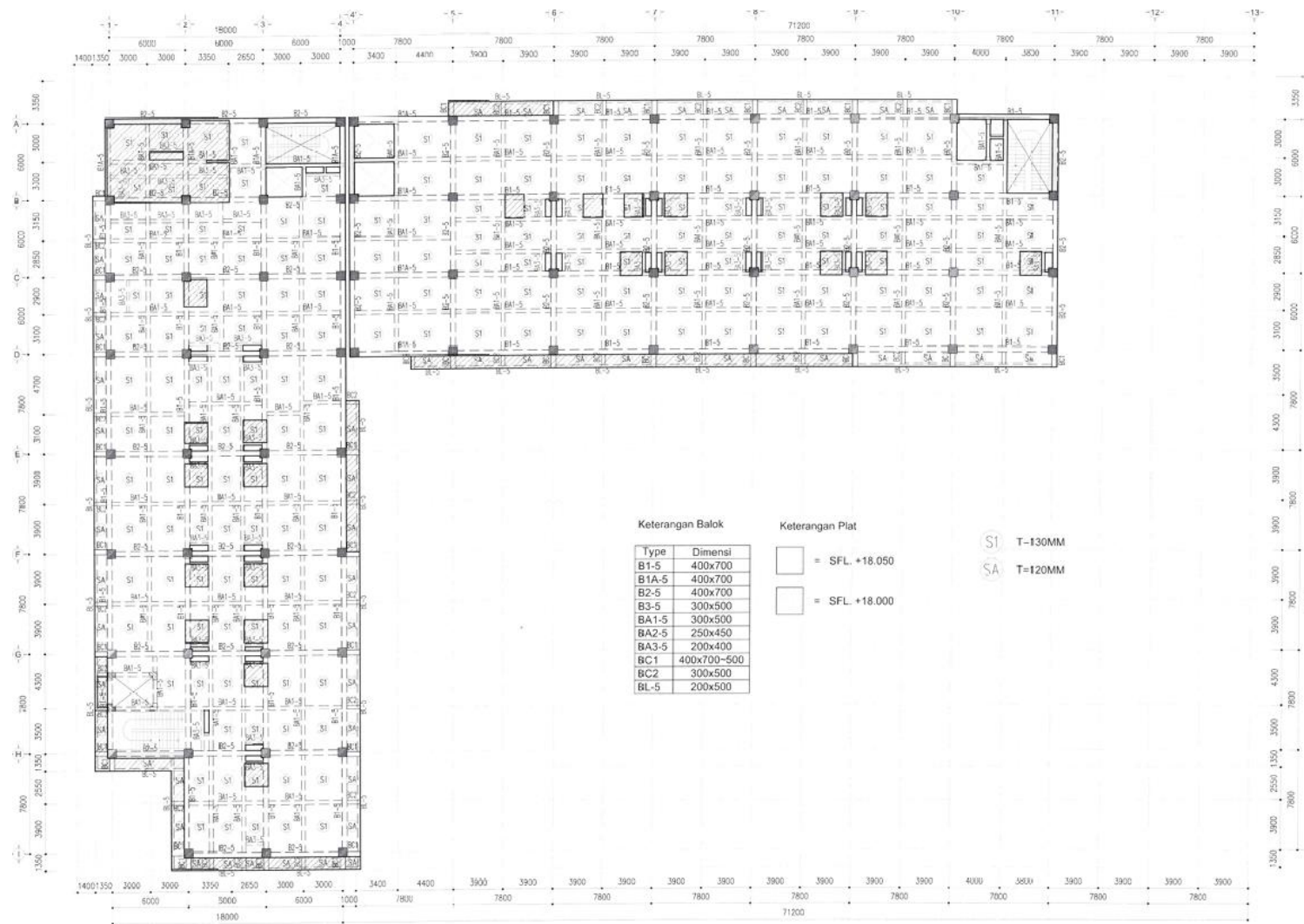
Gambar L-2.7 Denah Balok dan Pelat Lantai 2



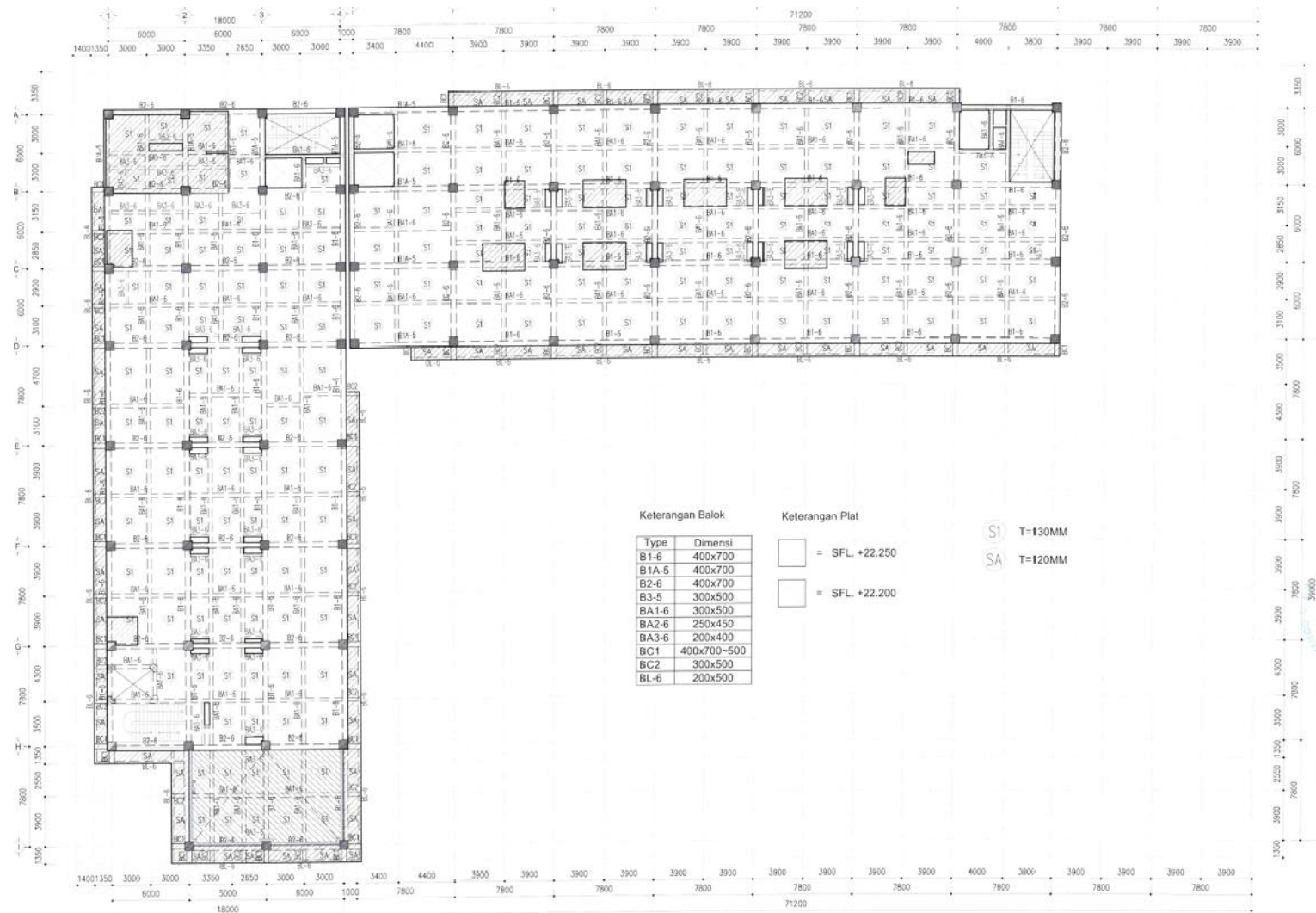
Gambar L-2.8 Denah Balok dan Pelat Lantai 3



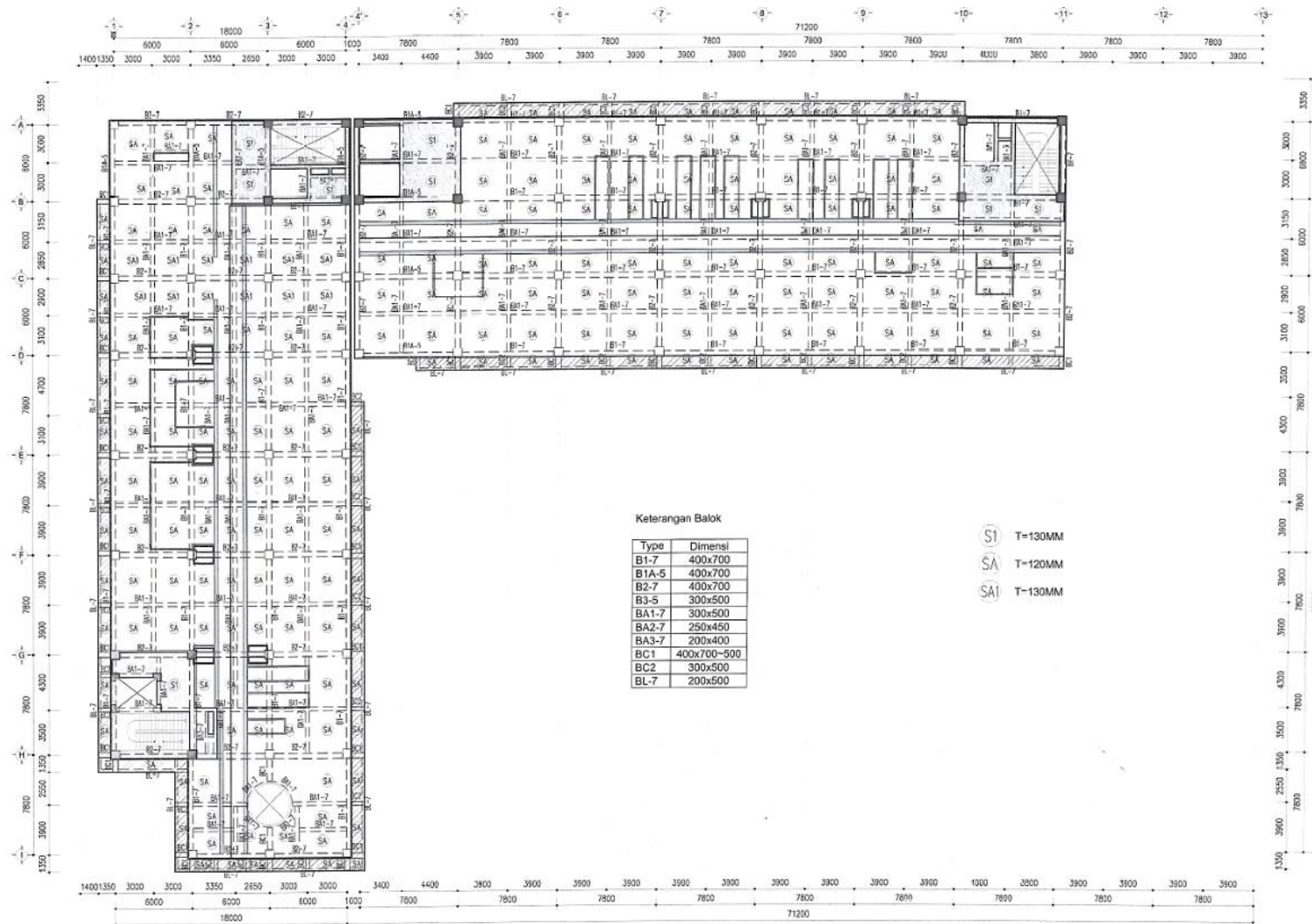
Gambar L-2.9 Denah Balok dan Pelat Lantai 4



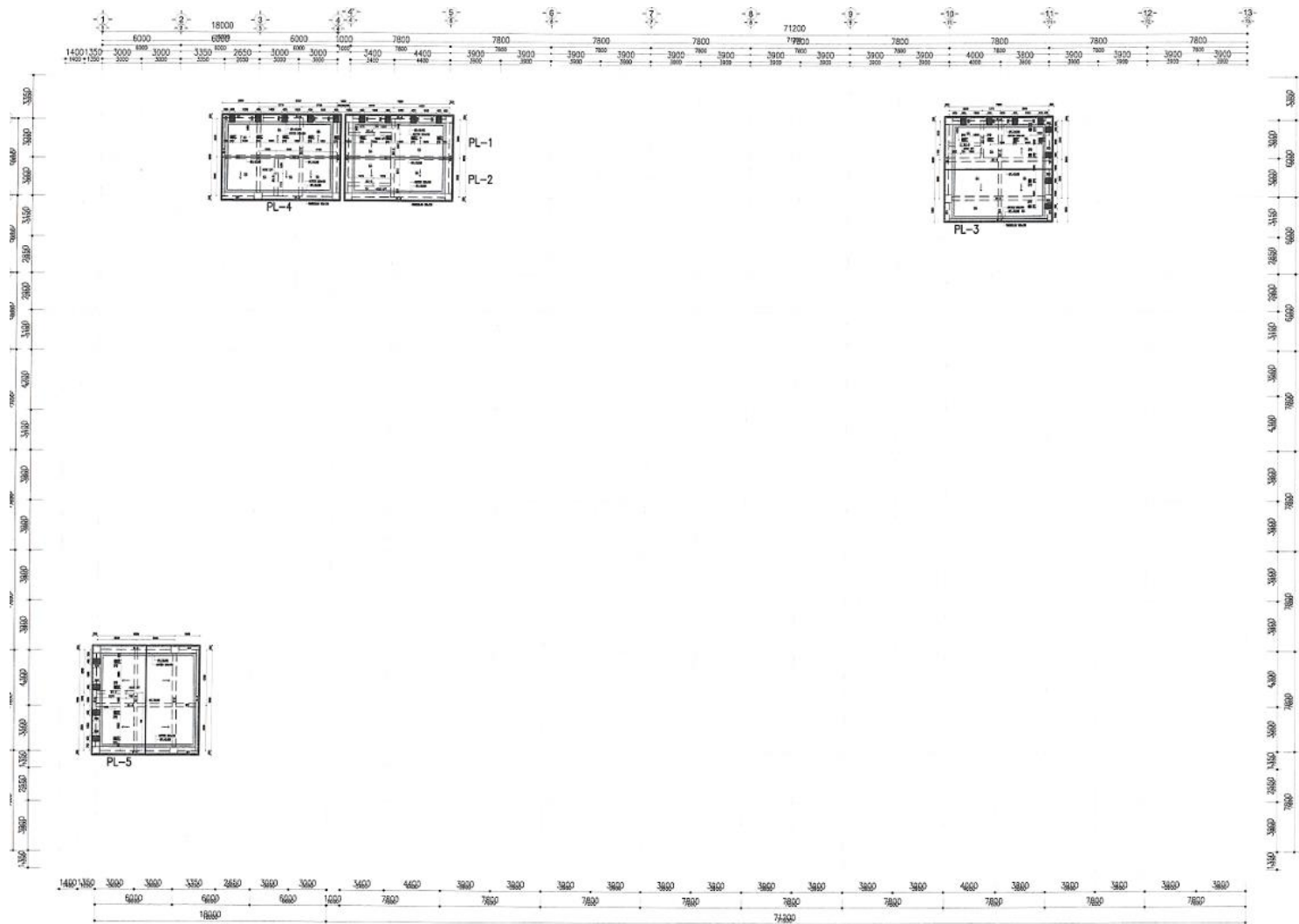
Gambar L-2.10 Denah Balok dan Pelat Lantai 5



Gambar L-2.11 Denah Balok dan Pelat Lantai 6



Gambar L-2.12 Denah Balok dan Pelat Lantai Atap



Gambar L-2.13 Denah Balok dan Pelat Lantai Dak Atap

PENULANGAN BALOK LANTAI 2

TIPE BALOK	B1-2			B1A-2			B2-2			B3-2		
LETAK POTONGAN	TUMPUAN KIRI	LAPANGAN	TUMPUAN KANAN	TUMPUAN KIRI	LAPANGAN	TUMPUAN KANAN	TUMPUAN KIRI	LAPANGAN	TUMPUAN KANAN	TUMPUAN KIRI	LAPANGAN	TUMPUAN KANAN
PENAMPANG												
DIMENSI	400 X 700			400 X 700			400 X 700			300 X 500		
TULANGAN ATAS	9 D 22	4 D 22	9 D 22	10 D 22	5 D 22	10 D 22	6 D 22	4 D 22	6 D 22	4 D 22	3 D 22	4 D 22
TULANGAN BAWAH	6 D 22	6 D 22	6 D 22	7 D 22	7 D 22	7 D 22	4 D 22	6 D 22	4 D 22	3 D 22	4 D 22	3 D 22
SENGKANG	SK.1,5D10-100	SK.1,5D10-150	SK.1,5D10-100	SK.1,5D10-100	SK.1,5D10-150	SK.1,5D10-100	SK.1,5D10-100	SK.1,5D10-150	SK.1,5D10-100	SK.D10-100	SK.D10-150	SK.D10-100
TUL. MOUNTASE	4 D 10			4 D 10			4 D 10			2 D 10		

TIPE BALOK	BA1-2			BA2-2			BA3-2			B4-2		
LETAK POTONGAN	TUMPUAN KIRI	LAPANGAN	TUMPUAN KANAN	TUMPUAN KIRI	LAPANGAN	TUMPUAN KANAN	TUMPUAN KIRI	LAPANGAN	TUMPUAN KANAN	TUMPUAN KIRI	LAPANGAN	TUMPUAN KANAN
PENAMPANG												
DIMENSI	300 X 500			250 X 450			200 X 400			300 X 600		
TULANGAN ATAS	5 D 19	3 D 19	5 D 19	3 D 19	3 D 19	3 D 19	3 D 16	3 D 16	3 D 16	5 D 19	3 D 19	5 D 19
TULANGAN BAWAH	3 D 19	5 D 19	3 D 19	3 D 19	3 D 19	3 D 19	3 D 16	3 D 16	3 D 16	3 D 19	5 D 19	3 D 19
SENGKANG	SK.D10-100	SK.D10-200	SK.D10-100	SK.D10-100	SK.D10-200	SK.D10-100	SK.D10-100	SK.D10-200	SK.D10-100	SK.D10-100	SK.D10-200	SK.D10-100
TUL. MOUNTASE	2 D 10			2 D 10			2 D 10			2 D 10		

TIPE BALOK	BC1			BC-2			BL-2		
LETAK POTONGAN	TUMPUAN	UJUNG		TUMPUAN	UJUNG		TUMPUAN KIRI	LAPANGAN	TUMPUAN KANAN
PENAMPANG									
DIMENSI	400 X 700 / 400 X 500			300 X 500			200 X 500		
TULANGAN ATAS	6 D 22	6 D 22		5 D 19	5 D 19		3 D 16	3 D 16	3 D 16
TULANGAN BAWAH	4 D 22	4 D 22		3 D 19	3 D 19		3 D 16	3 D 16	3 D 16
SENGKANG	SK.1,5D10-100	SK.1,5D10-150		SK.D10-100	SK.D10-150		SK.D10-100	SK.D10-200	SK.D10-100
TUL. MOUNTASE	4 D 10			2 D 10			4 D 10		

TIPE BALOK	B2-2'
LETAK POTONGAN	TUMPUAN KIRI
PENAMPANG	
DIMENSI	400 X 700
TULANGAN ATAS	6 D 22
TULANGAN BAWAH	4 D 22
SENGKANG	SK.1,5D10-100
TUL. MOUNTASE	

DETAIL PENULANGAN BALOK LANTAI 2

Gambar L-2.14 Detail Penulangan Balok Lantai 2

PENULANGAN BALOK LANTAI 3

TIPE BALOK	B1-3			B1A-3			B2-3			B3-3		
LETAK POTONGAN	TUMPUAN KIRI	LAPANGAN	TUMPUAN KANAN	TUMPUAN KIRI	LAPANGAN	TUMPUAN KANAN	TUMPUAN KIRI	LAPANGAN	TUMPUAN KANAN	TUMPUAN KIRI	LAPANGAN	TUMPUAN KANAN
PENAMPANG												
DIMENSI	400 X 700			400 X 700			400 X 700			300 X 500		
TULANGAN ATAS	10 D 22	6 D 22	10 D 22	10 D 22	6 D 22	10 D 22	7 D 22	5 D 22	7 D 22	4 D 22	3 D 22	4 D 22
TULANGAN BAWAH	6 D 22	6 D 22	6 D 22	7 D 22	7 D 22	7 D 22	5 D 22	7 D 22	5 D 22	3 D 22	4 D 22	3 D 22
SENGKANG	SK.1,5D10-100	SK.1,5D10-150	SK.1,5D10-100	SK.1,5D10-100	SK.1,5D10-150	SK.1,5D10-100	SK.1,5D10-100	SK.1,5D10-150	SK.1,5D10-100	SK.D10-100	SK.D10-150	SK.D10-100
TUL. MOUNTASE	4 D 10			4 D 10			4 D 10			2 D 10		

TIPE BALOK	BA1-3			BA2-3			BA3-3			B4-3		
LETAK POTONGAN	TUMPUAN KIRI	LAPANGAN	TUMPUAN KANAN	TUMPUAN KIRI	LAPANGAN	TUMPUAN KANAN	TUMPUAN KIRI	LAPANGAN	TUMPUAN KANAN	TUMPUAN KIRI	LAPANGAN	TUMPUAN KANAN
PENAMPANG												
DIMENSI	300 X 500			250 X 450			200 X 400			300 X 600		
TULANGAN ATAS	5 D 19	3 D 19	5 D 19	3 D 19	3 D 19	3 D 19	3 D 16	3 D 16	3 D 16	5 D 19	3 D 19	5 D 19
TULANGAN BAWAH	3 D 19	5 D 19	3 D 19	3 D 19	3 D 19	3 D 19	3 D 16	3 D 16	3 D 16	3 D 19	5 D 19	3 D 19
SENGKANG	SK.D10-100	SK.D10-200	SK.D10-100	SK.D10-100	SK.D10-200	SK.D10-100	SK.D10-100	SK.D10-200	SK.D10-100	SK.D10-100	SK.D10-200	SK.D10-100
TUL. MOUNTASE	2 D 10			2 D 10			2 D 10			2 D 10		

TIPE BALOK	BC1			BC-2			BL-3		
LETAK POTONGAN	TUMPUAN	UJUNG		TUMPUAN	UJUNG		TUMPUAN KIRI	LAPANGAN	TUMPUAN KANAN
PENAMPANG									
DIMENSI	400 X 700 ~ 400 X 500			300 X 500			200 X 500		
TULANGAN ATAS	6 D 22	6 D 22		5 D 19	5 D 19		3 D 16	3 D 16	3 D 16
TULANGAN BAWAH	4 D 22	4 D 22		3 D 19	3 D 19		3 D 16	3 D 16	3 D 16
SENGKANG	SK.1,5D10-100	SK.1,5D10-150		SK.D10-100	SK.D10-150		SK.D10-100	SK.D10-200	SK.D10-100
TUL. MOUNTASE	4 D 10			2 D 10			4 D 10		

DETAIL PENULANGAN BALOK LANTAI 3

Gambar L-2.15 Detail Penulangan Balok Lantai 3

Tipe Balok	B1-4			B1A-4			B2-4			B3-4		
Letak Potongan	Tumpuan Kiri	Lapangan	Tumpuan Kanan	Tumpuan Kiri	Lapangan	Tumpuan Kanan	Tumpuan Kiri	Lapangan	Tumpuan Kanan	Tumpuan Kiri	Lapangan	Tumpuan Kanan
PENAMPANG												
Dimensi	400 X 700			400 X 700			400 X 700			300 X 500		
Tulangan Atas	9 Ø 22	4 Ø 22	9 Ø 22	10 Ø 22	5 Ø 22	10 Ø 22	6 Ø 22	4 Ø 22	6 Ø 22	4 Ø 22	3 Ø 22	4 Ø 22
Tulangan Bawah	6 Ø 22	6 Ø 22	6 Ø 22	7 Ø 22	7 Ø 22	7 Ø 22	4 Ø 22	6 Ø 22	4 Ø 22	3 Ø 22	4 Ø 22	3 Ø 22
Sengkang	Ø10-100	Ø10-150	Ø10-100	Ø10-100	Ø10-100	Ø10-100	Ø10-100	Ø10-150	Ø10-100	Ø10-100	Ø10-150	Ø10-100
Ties Vertical	Ø10-100	Ø10-150	Ø10-100	Ø10-100	Ø10-150	Ø10-100	Ø10-100	Ø10-150	Ø10-100	Ø10-100	Ø10-150	Ø10-100
Ties Horizontal	Ø10-100	Ø10-100	Ø10-100	Ø10-100	Ø10-100	Ø10-100	Ø10-100	Ø10-100	Ø10-100	Ø10-100	Ø10-100	Ø10-100
Tul. Pemegang	4 Ø 10			4 Ø 10			4 Ø 10			2 Ø 10		
Selubut Beton	40 mm			40 mm			40 mm			40 mm		

Tipe Balok	BA1-4			BA2-4			BA3-4			B4-4		
Letak Potongan	Tumpuan Kiri	Lapangan	Tumpuan Kanan	Tumpuan Kiri	Lapangan	Tumpuan Kanan	Tumpuan Kiri	Lapangan	Tumpuan Kanan	Tumpuan Kiri	Lapangan	Tumpuan Kanan
PENAMPANG												
Dimensi	300 X 500			250 X 450			200 X 400			300 X 600		
Tulangan Atas	5 Ø 19	3 Ø 19	5 Ø 19	3 Ø 19	3 Ø 19	3 Ø 19	3 Ø 16	3 Ø 16	3 Ø 16	5 Ø 19	3 Ø 19	5 Ø 19
Tulangan Bawah	3 Ø 19	5 Ø 19	3 Ø 19	3 Ø 19	3 Ø 19	3 Ø 19	3 Ø 16	3 Ø 16	3 Ø 16	3 Ø 19	5 Ø 19	3 Ø 19
Sengkang	Ø10-100	Ø10-200	Ø10-100	Ø10-100	Ø10-100	Ø10-100	Ø10-100	Ø10-100	Ø10-100	Ø10-100	Ø10-200	Ø10-100
Ties Vertical	Ø10-100	Ø10-200	Ø10-100	Ø10-100	Ø10-100	Ø10-100	Ø10-100	Ø10-100	Ø10-100	Ø10-100	Ø10-200	Ø10-100
Ties Horizontal	Ø10-100	Ø10-200	Ø10-100	Ø10-100	Ø10-100	Ø10-100	Ø10-100	Ø10-100	Ø10-100	Ø10-100	Ø10-200	Ø10-100
Tul. Pemegang	2 Ø 10			2 Ø 10			2 Ø 10			2 Ø 10		
Selubut Beton	40 mm			40 mm			40 mm			40 mm		

Tipe Balok	BC1			BC2			BL-4		
Letak Potongan	Tumpuan	Ujung		Tumpuan	Ujung		Tumpuan Kiri	Lapangan	Tumpuan Kanan
PENAMPANG									
Dimensi	400 X 700 / 400 X 500			300 X 500			200 X 500		
Tulangan Atas	6 Ø 22	6 Ø 22		5 Ø 19	5 Ø 19		3 Ø 16	3 Ø 16	3 Ø 16
Tulangan Bawah	4 Ø 22	4 Ø 22		3 Ø 19	3 Ø 19		3 Ø 16	3 Ø 16	3 Ø 16
Sengkang	Ø10-100	Ø10-150		Ø10-100	Ø10-150		Ø10-100	Ø10-200	Ø10-100
Ties Vertical	Ø10-100	Ø10-150		Ø10-100	Ø10-150		Ø10-100	Ø10-200	Ø10-100
Ties Horizontal	Ø10-100	Ø10-150		Ø10-100	Ø10-150		Ø10-100	Ø10-200	Ø10-100
Tul. Pemegang	4 Ø 10			2 Ø 10			4 Ø 10		
Selubut Beton	40 mm			40 mm			40 mm		

DETAIL PENULANGAN BALOK LANTAI 4
DAUR 1 / 40

Gambar L-2.16 Detail Penulangan Balok Lantai 4

Tipe Balok	B1-5			B1A-5			B2-5		
Letak Potongan	Tumpuan Kiri	Lapangan	Tumpuan Kanan	Tumpuan Kiri	Lapangan	Tumpuan Kanan	Tumpuan Kiri	Lapangan	Tumpuan Kanan
PENAMPANG									
Dimensi	400 X 700			400 X 700			400 X 700		
Tulangan Atas	8 Ø 22	4 Ø 22	8 Ø 22	9 Ø 22	5 Ø 22	9 Ø 22	6 Ø 22	4 Ø 22	6 Ø 22
Tulangan Bawah	5 Ø 22	6 Ø 22	5 Ø 22	6 Ø 22	7 Ø 22	6 Ø 22	4 Ø 22	6 Ø 22	4 Ø 22
Sengkang	Ø10-100	Ø10-150	Ø10-100	Ø10-150	Ø10-100	Ø10-100	Ø10-100	Ø10-150	Ø10-100
Ties Vertical	Ø10-100	Ø10-150	Ø10-100	Ø10-100	Ø10-150	Ø10-100	Ø10-100	Ø10-150	Ø10-100
Ties Horizontal	Ø10-1000	—	Ø10-1000	Ø10-1000	—	Ø10-1000	—	—	—
Tul. Pemanggang	4 Ø 10			4 Ø 10			4 Ø 10		
Selubut Beton	40 mm			40 mm			40 mm		

Tipe Balok	BA1-5			BA2-5			BA3-5		
Letak Potongan	Tumpuan Kiri	Lapangan	Tumpuan Kanan	Tumpuan Kiri	Lapangan	Tumpuan Kanan	Tumpuan Kiri	Lapangan	Tumpuan Kanan
PENAMPANG									
Dimensi	300 X 500			250 X 450			200 X 400		
Tulangan Atas	5 Ø 19	3 Ø 19	5 Ø 19	3 Ø 19	3 Ø 19	3 Ø 19	3 Ø 16	3 Ø 16	3 Ø 16
Tulangan Bawah	3 Ø 19	5 Ø 19	3 Ø 19	3 Ø 19	3 Ø 19	3 Ø 19	3 Ø 16	3 Ø 16	3 Ø 16
Sengkang	Ø10-100	Ø10-200	Ø10-100	Ø10-100	Ø10-200	Ø10-100	Ø10-100	Ø10-200	Ø10-100
Ties Vertical	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Ties Horizontal	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Tul. Pemanggang	2 Ø 10			2 Ø 10			2 Ø 10		
Selubut Beton	40 mm			40 mm			40 mm		

Tipe Balok	BC1			BC2			BL-5		
Letak Potongan	Tumpuan	Ujung		Tumpuan	Ujung		Tumpuan Kiri	Lapangan	Tumpuan Kanan
PENAMPANG									
Dimensi	400 X 700 ~ 400 X 500			300 X 500			200 X 500		
Tulangan Atas	6 Ø 22	6 Ø 22		5 Ø 19	5 Ø 19		3 Ø 16	3 Ø 16	3 Ø 16
Tulangan Bawah	4 Ø 22	4 Ø 22		3 Ø 19	3 Ø 19		3 Ø 16	3 Ø 16	3 Ø 16
Sengkang	Ø10-100	Ø10-150		Ø10-100	Ø10-150		Ø10-100	Ø10-200	Ø10-100
Ties Vertical	Ø10-100	Ø10-150		—	—		—	—	—
Ties Horizontal	—	—		—	—		—	—	—
Tul. Pemanggang	4 Ø 10			2 Ø 10			4 Ø 10		
Selubut Beton	40 mm			40 mm			40 mm		

DETAIL PENULANGAN BALOK LANTAI 5
 (KALIT 4)

Gambar L-2.17 Detail Penulangan Balok Lantai 5

Tipe Balok	B1-6			B1A-5			B2-6		
Letak Potongan	Tumpuan Kiri	Lapangan	Tumpuan Kanan	Tumpuan Kiri	Lapangan	Tumpuan Kanan	Tumpuan Kiri	Lapangan	Tumpuan Kanan
PENAMPANG									
DIMENSI	400 X 700			400 X 700			400 X 700		
Tulangan Atas	8 Ø 22	4 Ø 22	8 Ø 22	9 Ø 22	5 Ø 22	9 Ø 22	6 Ø 22	4 Ø 22	8 Ø 22
Tulangan Bawah	5 Ø 22	6 Ø 22	5 Ø 22	6 Ø 22	7 Ø 22	6 Ø 22	4 Ø 22	6 Ø 22	4 Ø 22
SENGKANG	Ø10-100	Ø10-150	Ø10-100	Ø10-100	Ø10-150	Ø10-100	Ø10-100	Ø10-150	Ø10-100
TIES VERTICAL	Ø10-100	Ø10-150	Ø10-100	Ø10-100	Ø10-150	Ø10-100	Ø10-100	Ø10-150	Ø10-100
TIES HORIZONTAL	Ø10-1000	—	Ø10-1000	Ø10-1000	—	Ø10-1000	—	—	—
TUL PEMINGGANG	4 Ø 10			4 Ø 10			4 Ø 10		
SELIMUT BETON	40 mm			40 mm			40 mm		

Tipe Balok	BA1-6			BA2-6			BA3-6		
Letak Potongan	Tumpuan Kiri	Lapangan	Tumpuan Kanan	Tumpuan Kiri	Lapangan	Tumpuan Kanan	Tumpuan Kiri	Lapangan	Tumpuan Kanan
PENAMPANG									
DIMENSI	300 X 500			250 X 450			200 X 400		
Tulangan Atas	5 Ø 19	3 Ø 19	5 Ø 19	3 Ø 19	3 Ø 19	3 Ø 19	3 Ø 16	3 Ø 16	3 Ø 16
Tulangan Bawah	3 Ø 19	5 Ø 19	3 Ø 19	3 Ø 19	3 Ø 19	3 Ø 19	3 Ø 16	3 Ø 16	3 Ø 16
SENGKANG	Ø10-100	Ø10-200	Ø10-100	Ø10-100	Ø10-200	Ø10-100	Ø10-100	Ø10-200	Ø10-100
TIES VERTICAL	—	—	—	—	—	—	—	—	—
TIES HORIZONTAL	—	—	—	—	—	—	—	—	—
TUL PEMINGGANG	2 Ø 10			2 Ø 10			2 Ø 10		
SELIMUT BETON	40 mm			40 mm			40 mm		

Tipe Balok	BC1			BC2			BL-6		
Letak Potongan	Tumpuan	Ujung		Tumpuan	Ujung		Tumpuan Kiri	Lapangan	Tumpuan Kanan
PENAMPANG									
DIMENSI	400 X 700			300 X 500			200 X 500		
Tulangan Atas	6 Ø 22	6 Ø 22		5 Ø 19	5 Ø 19		3 Ø 16	3 Ø 16	3 Ø 16
Tulangan Bawah	4 Ø 22	4 Ø 22		3 Ø 19	3 Ø 19		3 Ø 16	3 Ø 16	3 Ø 16
SENGKANG	Ø10-100	Ø10-150		Ø10-100	Ø10-150		Ø10-100	Ø10-200	Ø10-100
TIES VERTICAL	Ø10-100	Ø10-150		—	—		—	—	—
TIES HORIZONTAL	—	—		—	—		—	—	—
TUL PEMINGGANG	4 Ø 10			2 Ø 10			4 Ø 10		
SELIMUT BETON	40 mm			40 mm			40 mm		

DETAIL PENULANGAN BALOK LANTAI 6
SKALA 1 : 20

Gambar L-2.18 Detail Penulangan Balok Lantai 6

Tipe Balok	B1-7			B1A-7			B2-7		
Letak Potongan	Tumpuan Kiri	Lapangan	Tumpuan Kanan	Tumpuan Kiri	Lapangan	Tumpuan Kanan	Tumpuan Kiri	Lapangan	Tumpuan Kanan
PENAMPANG									
Dimensi	400 X 700			400 X 700			400 X 700		
Tulangan Atas	8 Ø 22	4 Ø 22	8 Ø 22	9 Ø 22	5 Ø 22	9 Ø 22	6 Ø 22	4 Ø 22	6 Ø 22
Tulangan Bawah	5 Ø 22	6 Ø 22	5 Ø 22	6 Ø 22	7 Ø 22	6 Ø 22	4 Ø 22	6 Ø 22	4 Ø 22
Sengkang	Ø10-100	Ø10-150	Ø10-100	Ø10-100	Ø10-150	Ø10-100	Ø10-100	Ø10-150	Ø10-100
Ties Vertical	Ø10-100	Ø10-150	Ø10-100	Ø10-100	Ø10-150	Ø10-100	Ø10-100	Ø10-150	Ø10-100
Ties Horizontal	Ø10-1000	—	Ø10-1000	Ø10-1000	—	Ø10-1000	—	—	—
Tul. Pemnggang	4 Ø 10			4 Ø 10			4 Ø 10		
Selubut Beton	40 mm			40 mm			40 mm		

Tipe Balok	BA1-7			BA2-7			BA3-7		
Letak Potongan	Tumpuan Kiri	Lapangan	Tumpuan Kanan	Tumpuan Kiri	Lapangan	Tumpuan Kanan	Tumpuan Kiri	Lapangan	Tumpuan Kanan
PENAMPANG									
Dimensi	300 X 500			250 X 450			200 X 400		
Tulangan Atas	5 Ø 19	3 Ø 19	5 Ø 19	3 Ø 19	3 Ø 19	3 Ø 19	3 Ø 16	3 Ø 16	3 Ø 16
Tulangan Bawah	3 Ø 19	5 Ø 19	3 Ø 19	3 Ø 19	3 Ø 19	3 Ø 19	3 Ø 16	3 Ø 16	3 Ø 16
Sengkang	Ø12-100	Ø10-200	Ø10-100	Ø10-100	Ø10-200	Ø10-100	Ø12-100	Ø10-200	Ø10-100
Ties Vertical	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Ties Horizontal	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Tul. Pemnggang	2 Ø 10			2 Ø 10			2 Ø 10		
Selubut Beton	40 mm			40 mm			40 mm		

Tipe Balok	BC1			BC2			BL-7		
Letak Potongan	Tumpuan	Ujung		Tumpuan	Ujung		Tumpuan Kiri	Lapangan	Tumpuan Kanan
PENAMPANG									
Dimensi	400 X 700 / 400 X 500			300 X 500			200 X 500		
Tulangan Atas	6 Ø 22	6 Ø 22		5 Ø 19	5 Ø 19		3 Ø 16	3 Ø 16	3 Ø 16
Tulangan Bawah	4 Ø 22	4 Ø 22		3 Ø 19	3 Ø 19		3 Ø 16	3 Ø 16	3 Ø 16
Sengkang	Ø10-150	Ø10-150		Ø10-100	Ø10-150		Ø10-100	Ø10-200	Ø10-100
Ties Vertical	Ø10-150	Ø10-150		—	—		—	—	—
Ties Horizontal	—	—		—	—		—	—	—
Tul. Pemnggang	4 Ø 10			2 Ø 10			4 Ø 10		
Selubut Beton	40 mm			40 mm			40 mm		

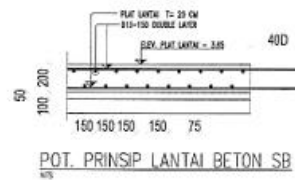
DETAIL PENULANGAN BALOK LANTAI ATAP

Gambar L-2.19 Detail Penulangan Balok Lantai Atap dan Dak Atap



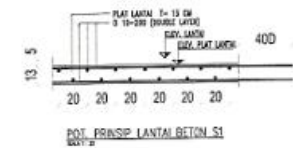
SB

DINDING COR DI TEMPAT
 $t = 200 \text{ mm}$



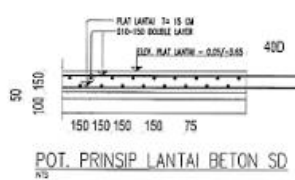
S1

PELAT COR DI TEMPAT
 $t=130\text{mm}$



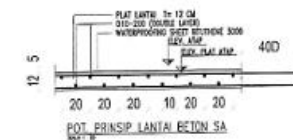
SD

DINDING COR DI TEMPAT
 $t = 150 \text{ mm}$



SA

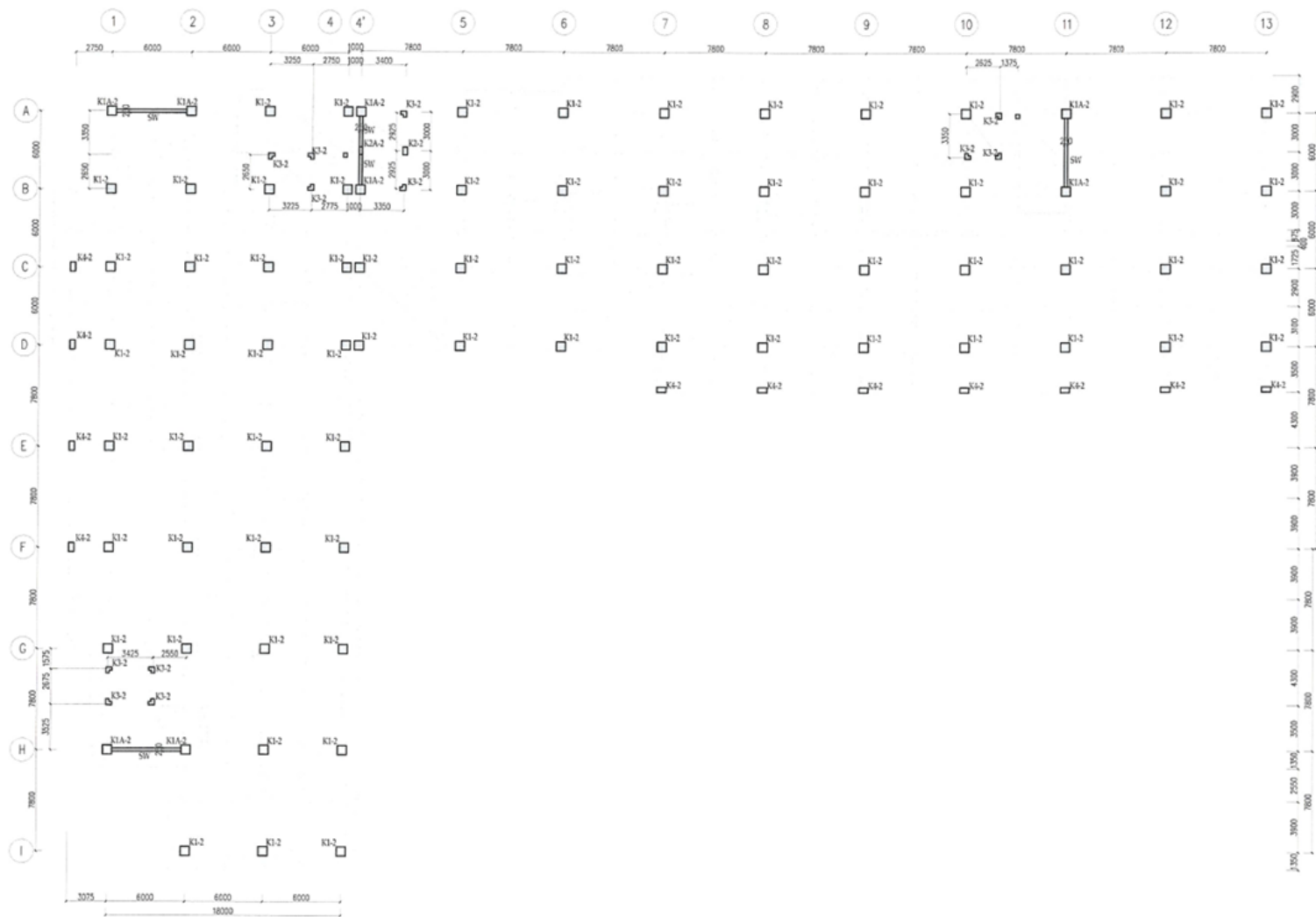
PELAT COR DI TEMPAT
 $t = 120 \text{ mm}$



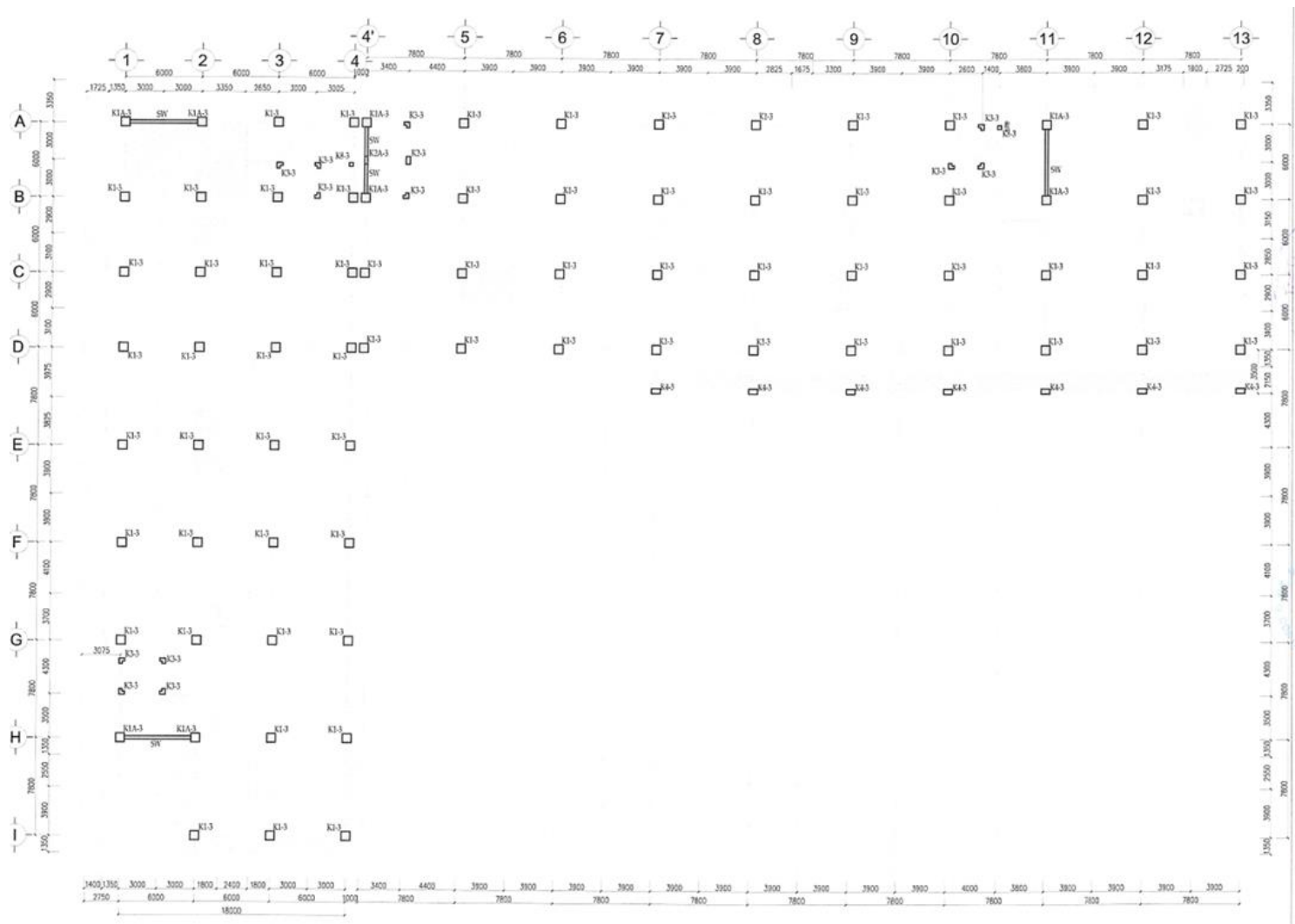
Gambar L-2.20 Detail Penulangan Pelat



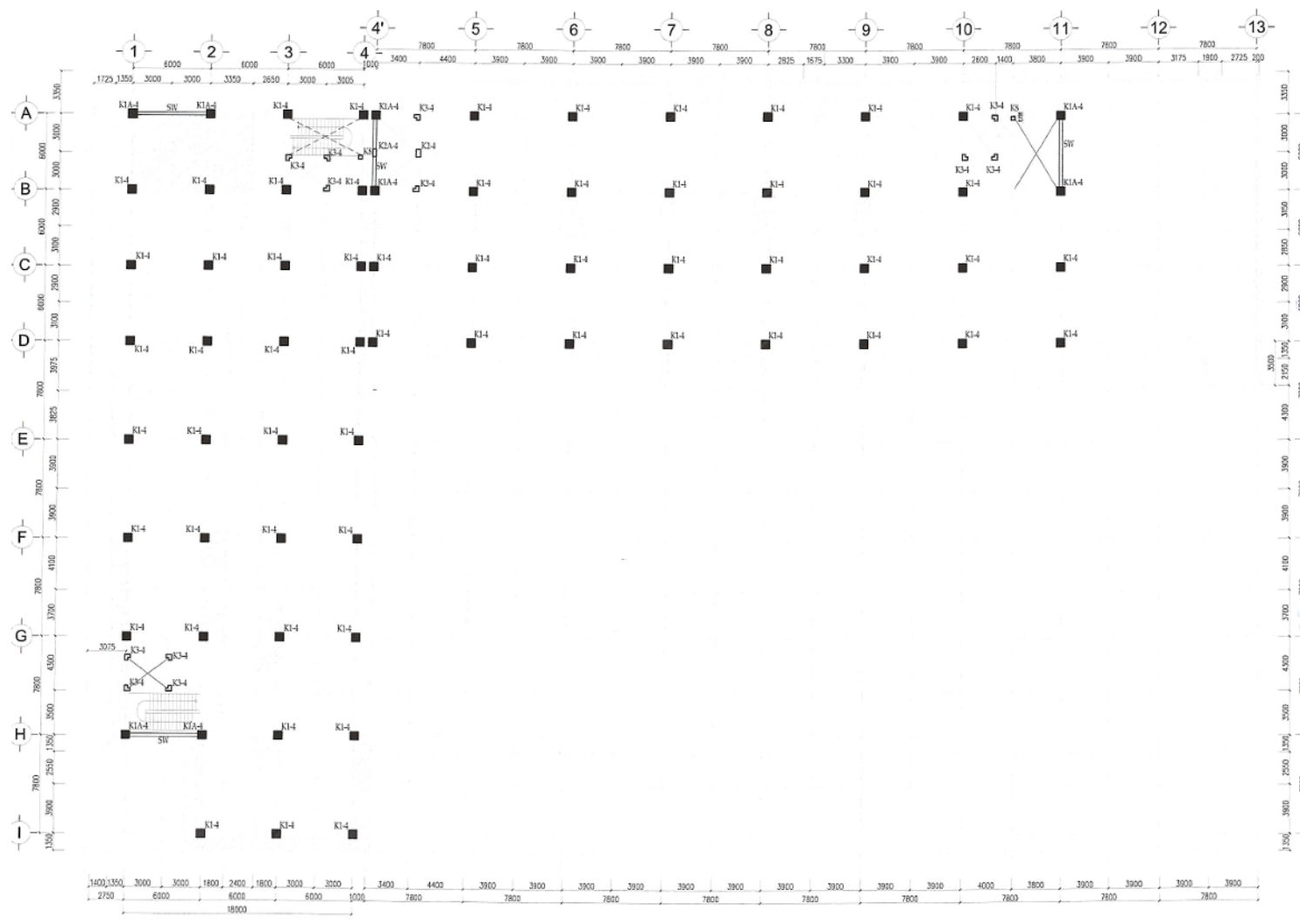
Gambar L-2.21 Denah Kolom dan *Shearwall* Lantai 1



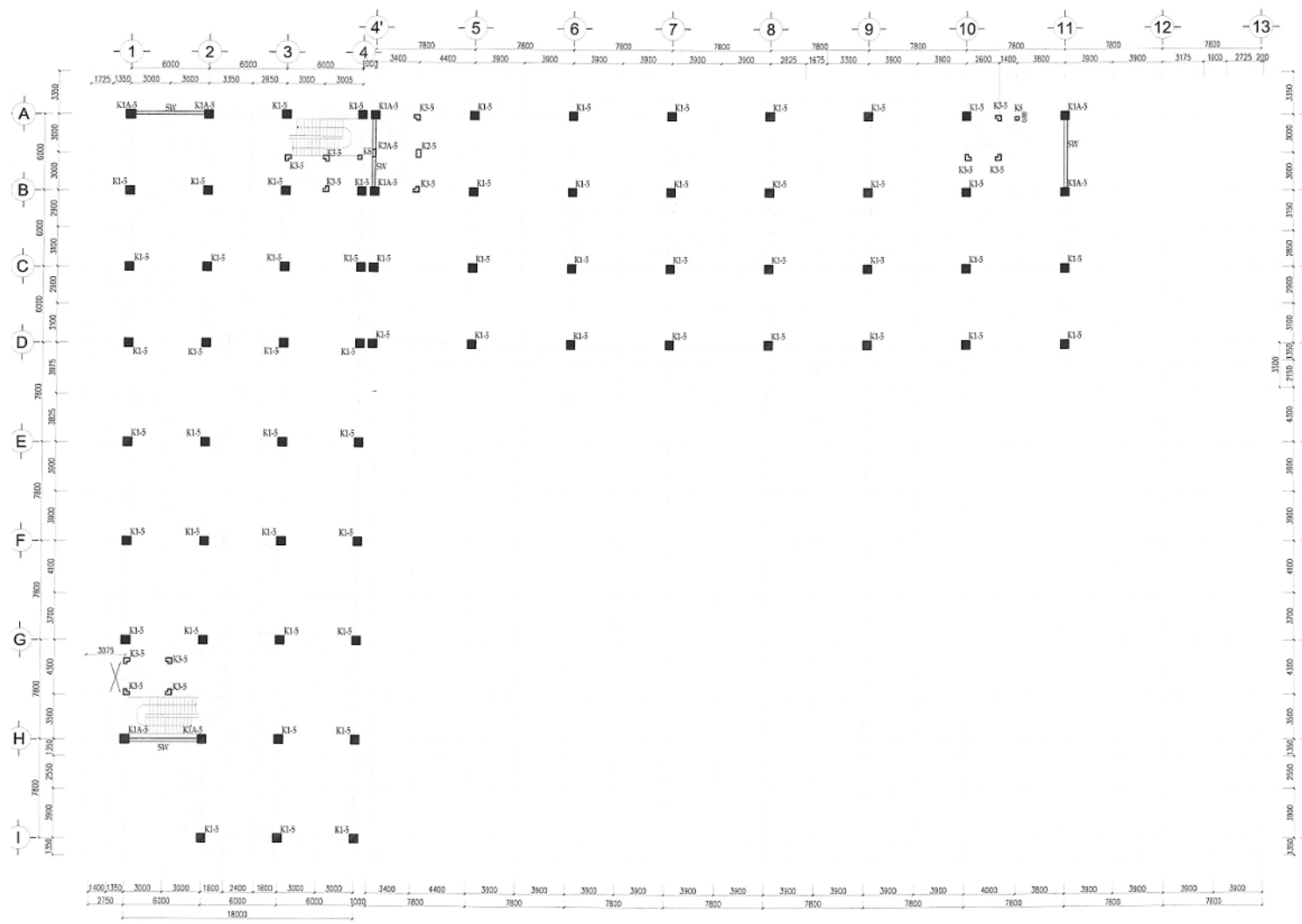
Gambar L-2.22 Denah Kolom dan *Shearwall* Lantai 2



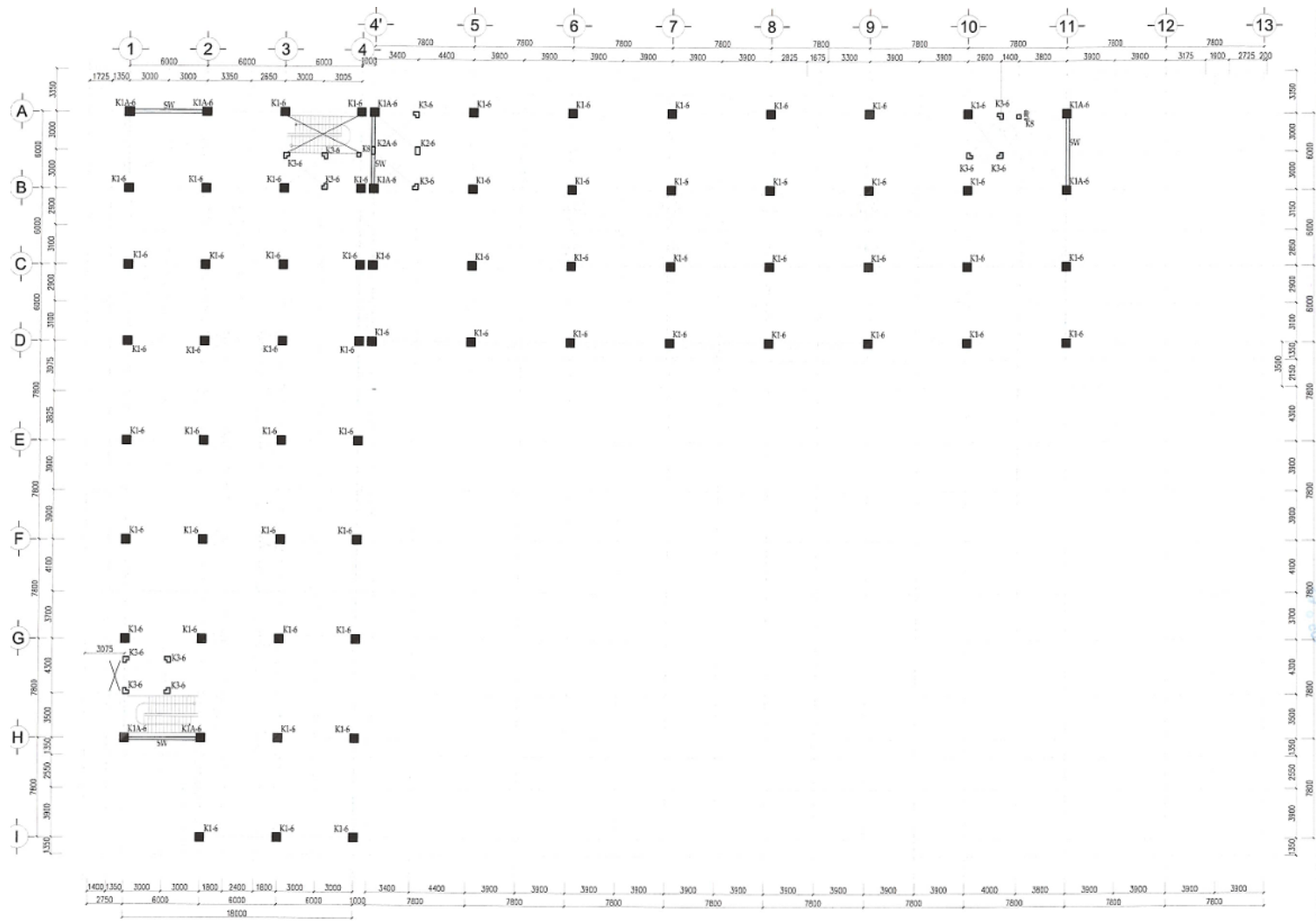
Gambar L-2.23 Denah Kolom dan *Shearwall* Lantai 3



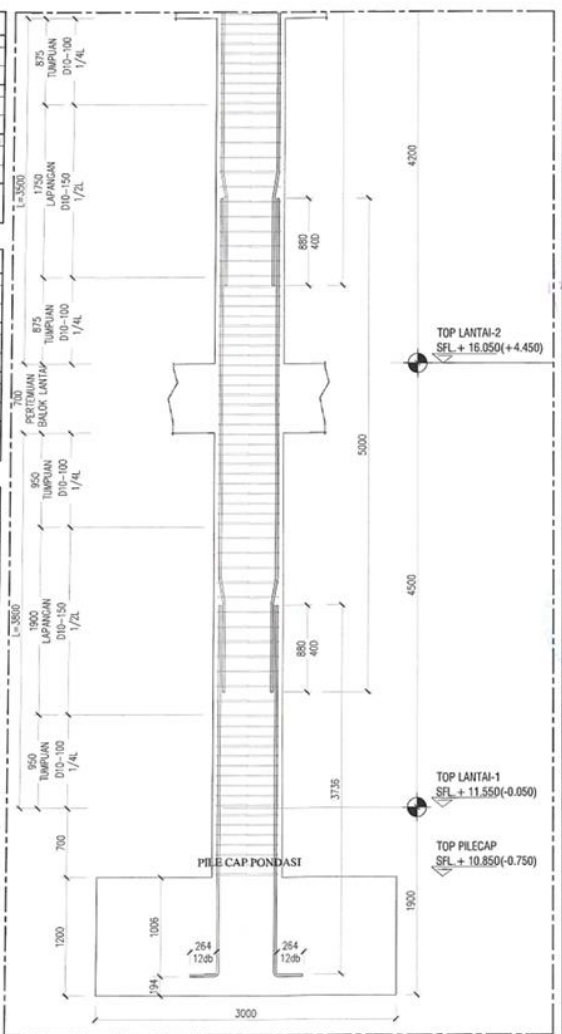
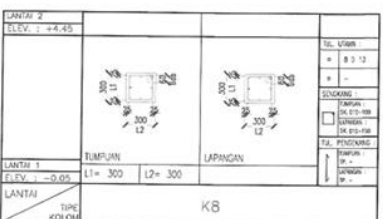
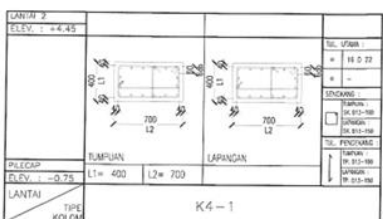
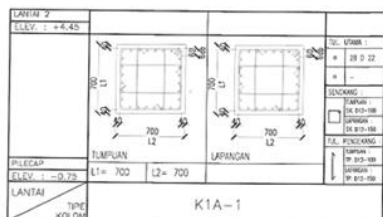
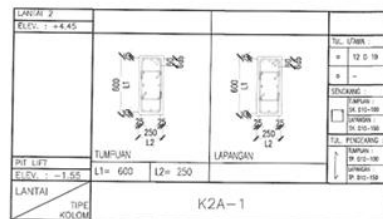
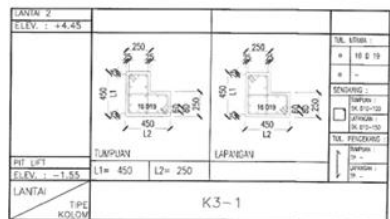
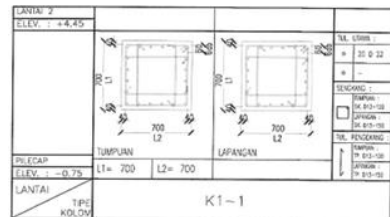
Gambar L-2.24 Denah Kolom dan *Shearwall* Lantai 4



Gambar L-2.25 Denah Kolom dan *Shearwall* Lantai 5

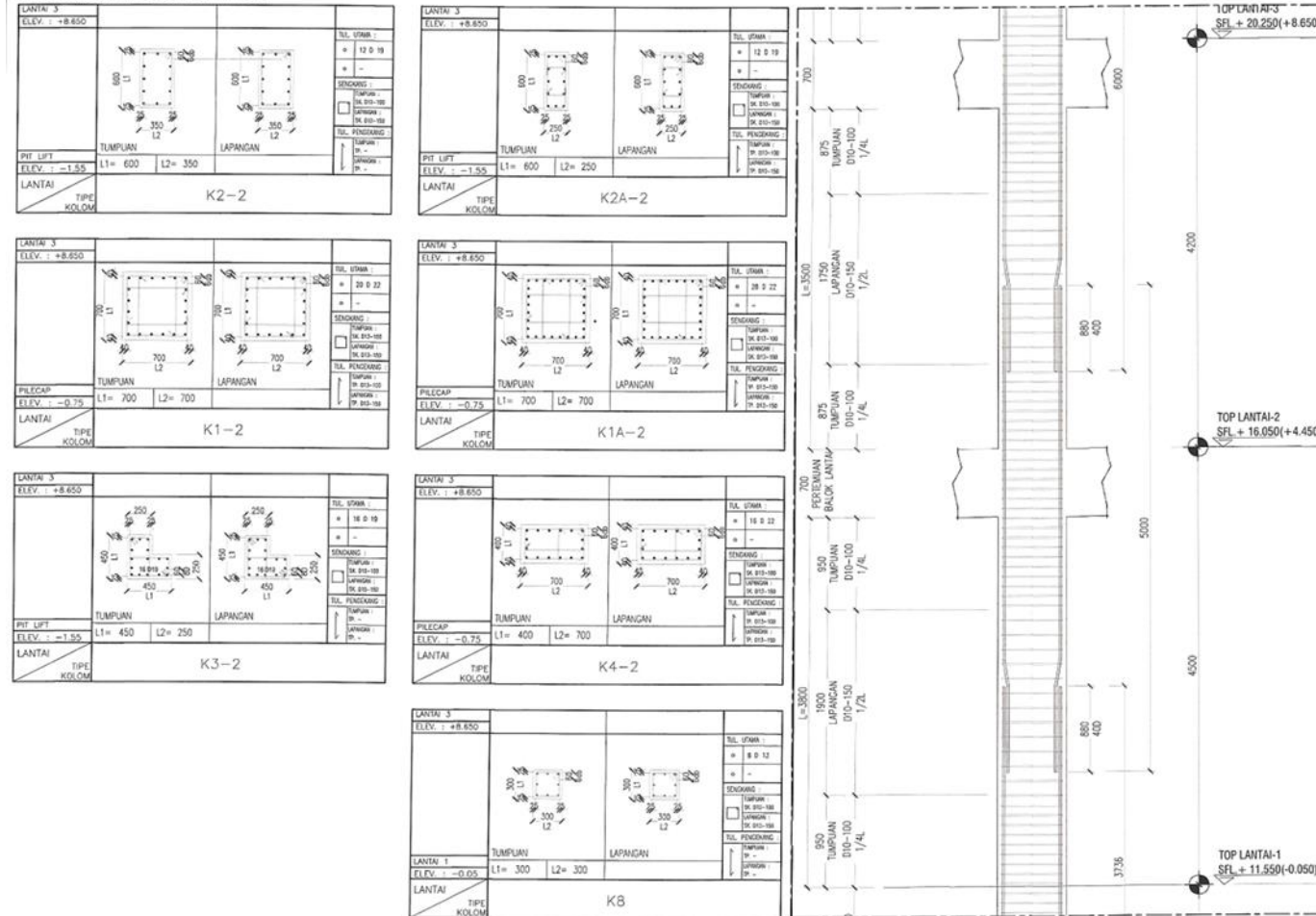


Gambar L-2.26 Denah Kolom dan *Shearwall* Lantai 6

[illegible]

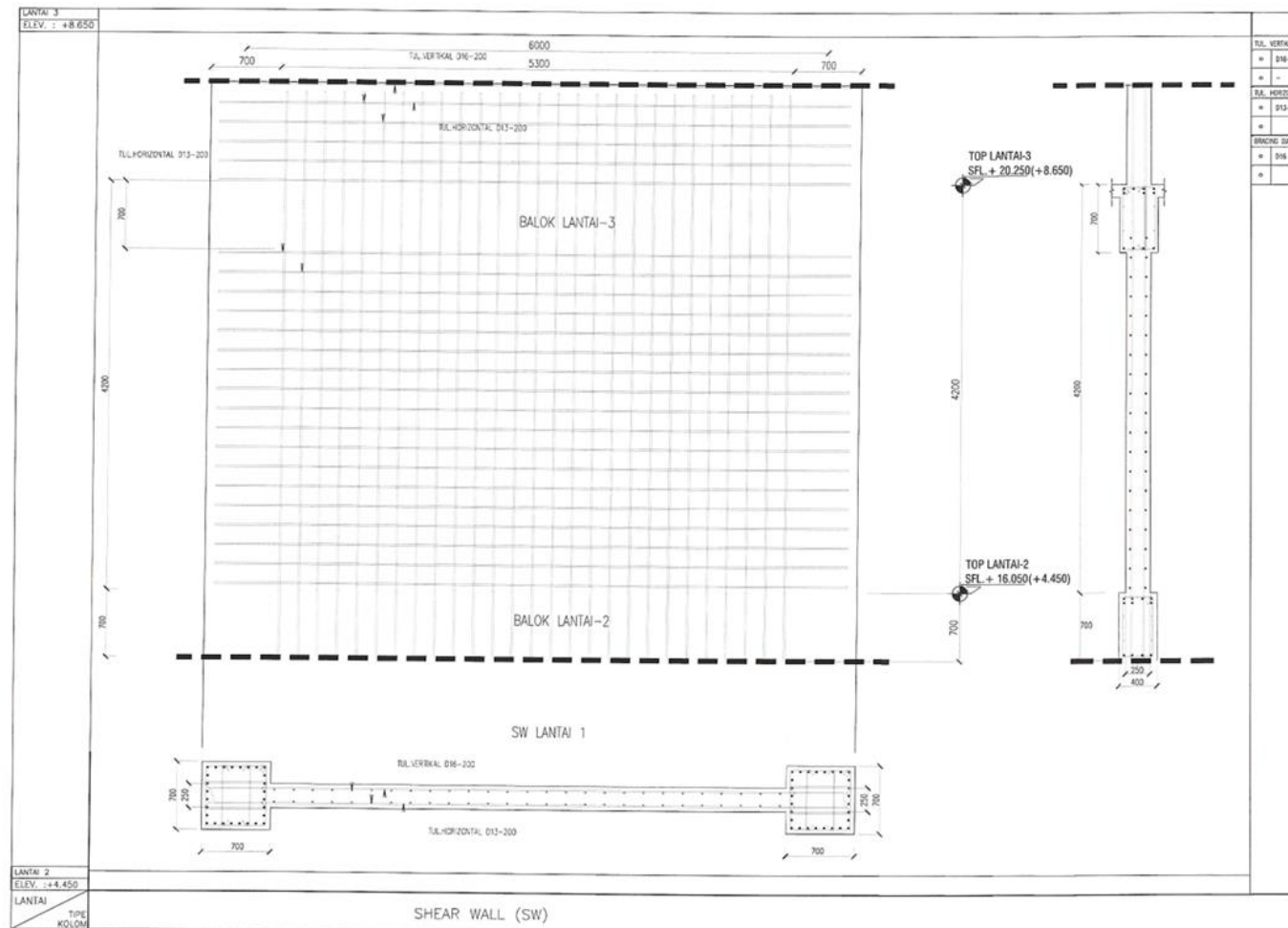
Gambar L-2.28 Detail Penulangan Kolom Lantai 1

PENULANGAN KOLOM LANTAI 2



DETAIL PENULANGAN KOLOM LANTAI 2

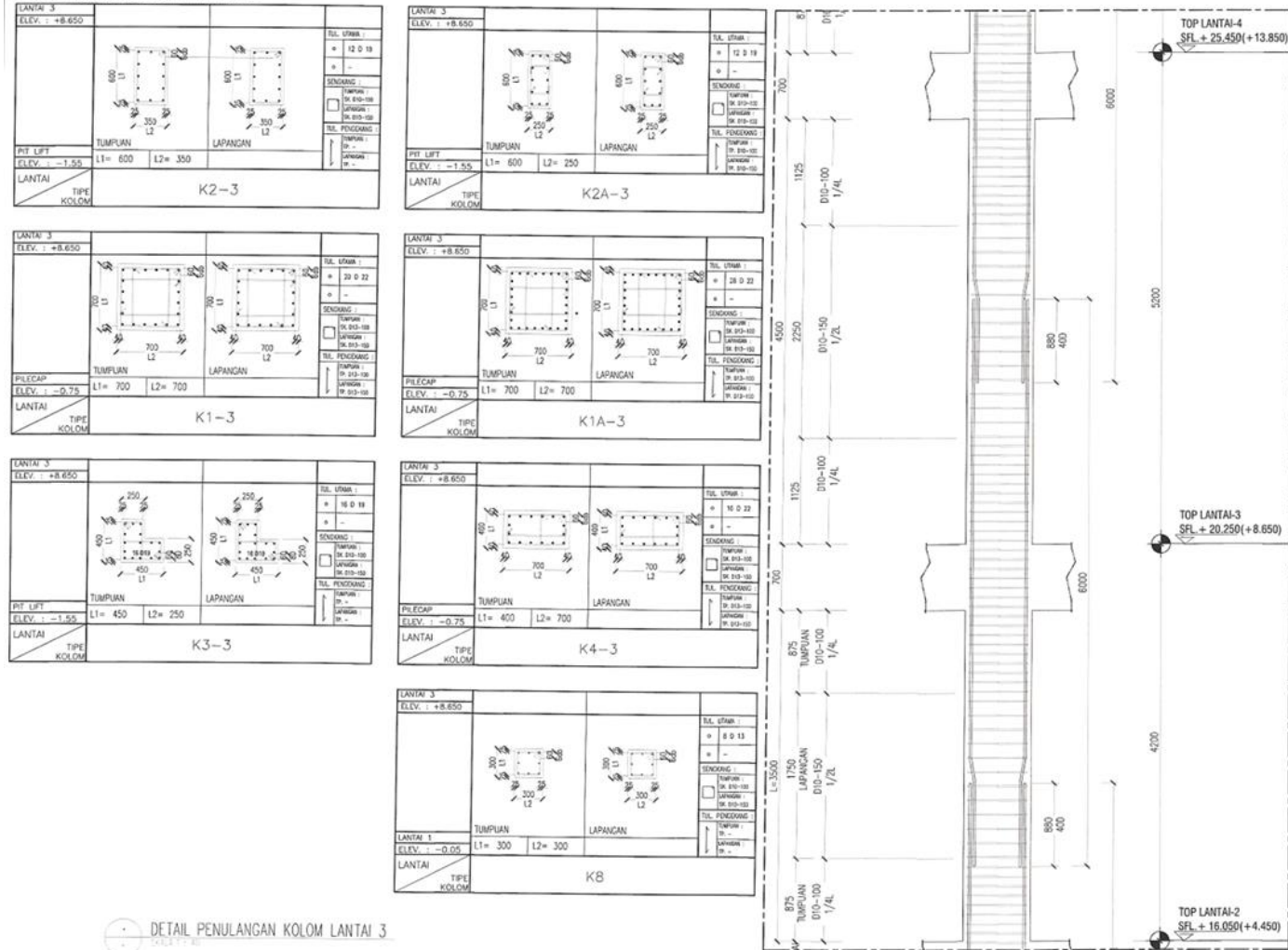
Gambar L-2.30 Detail Penulangan Kolom Lantai 2



DETAIL PENULANGAN SHEAR WALL LANTAI 2

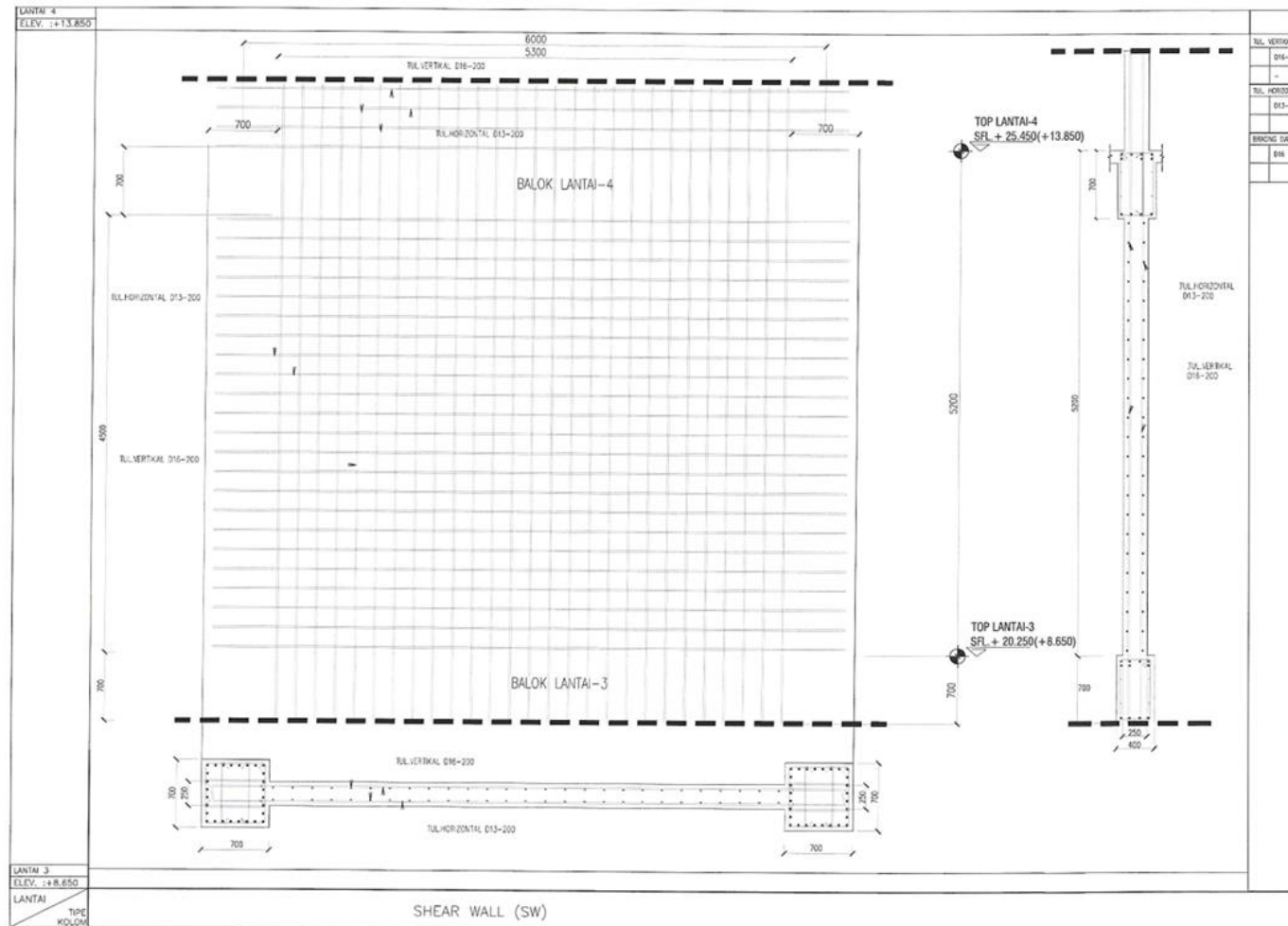
Gambar L-2.31 Detail Penulangan *Shearwall* Lantai 2

PENULANGAN KOLOM LANTAI 3



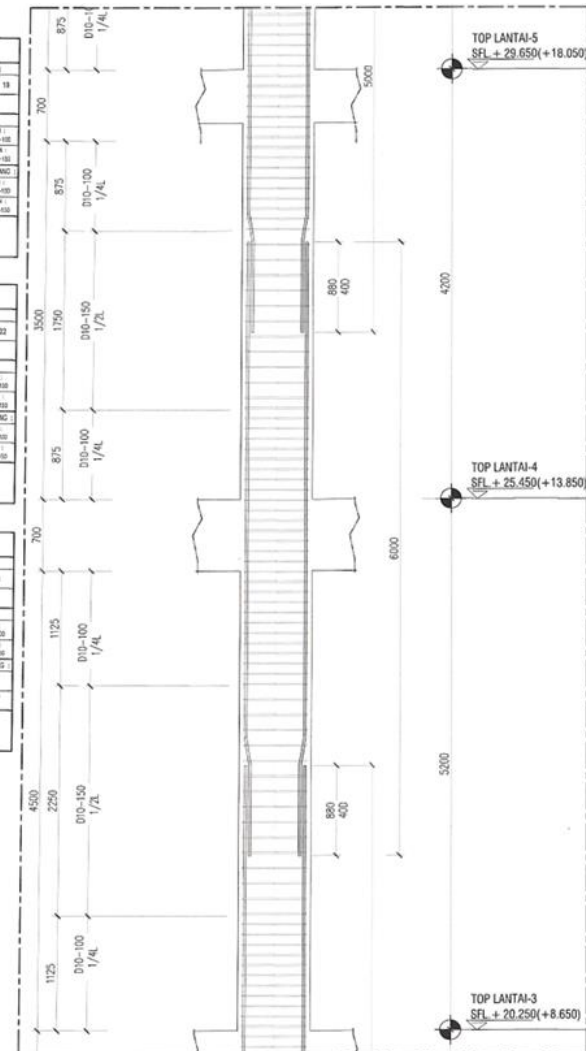
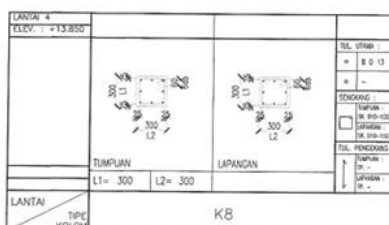
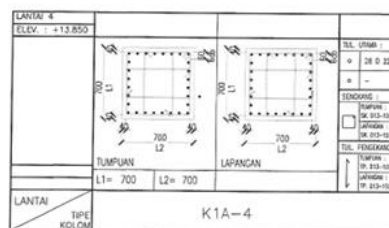
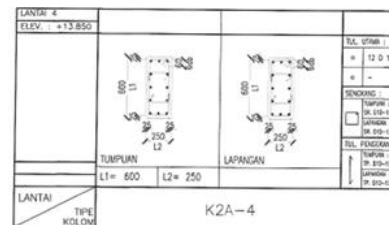
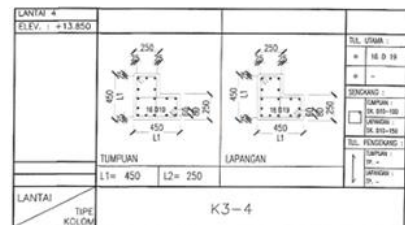
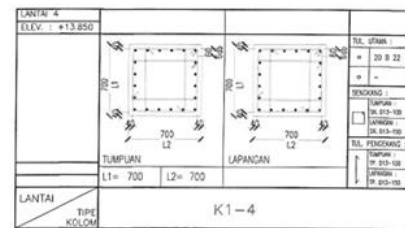
DETAIL PENULANGAN KOLOM LANTAI 3

Gambar L-2.32 Detail Penulangan Kolom Lantai 3



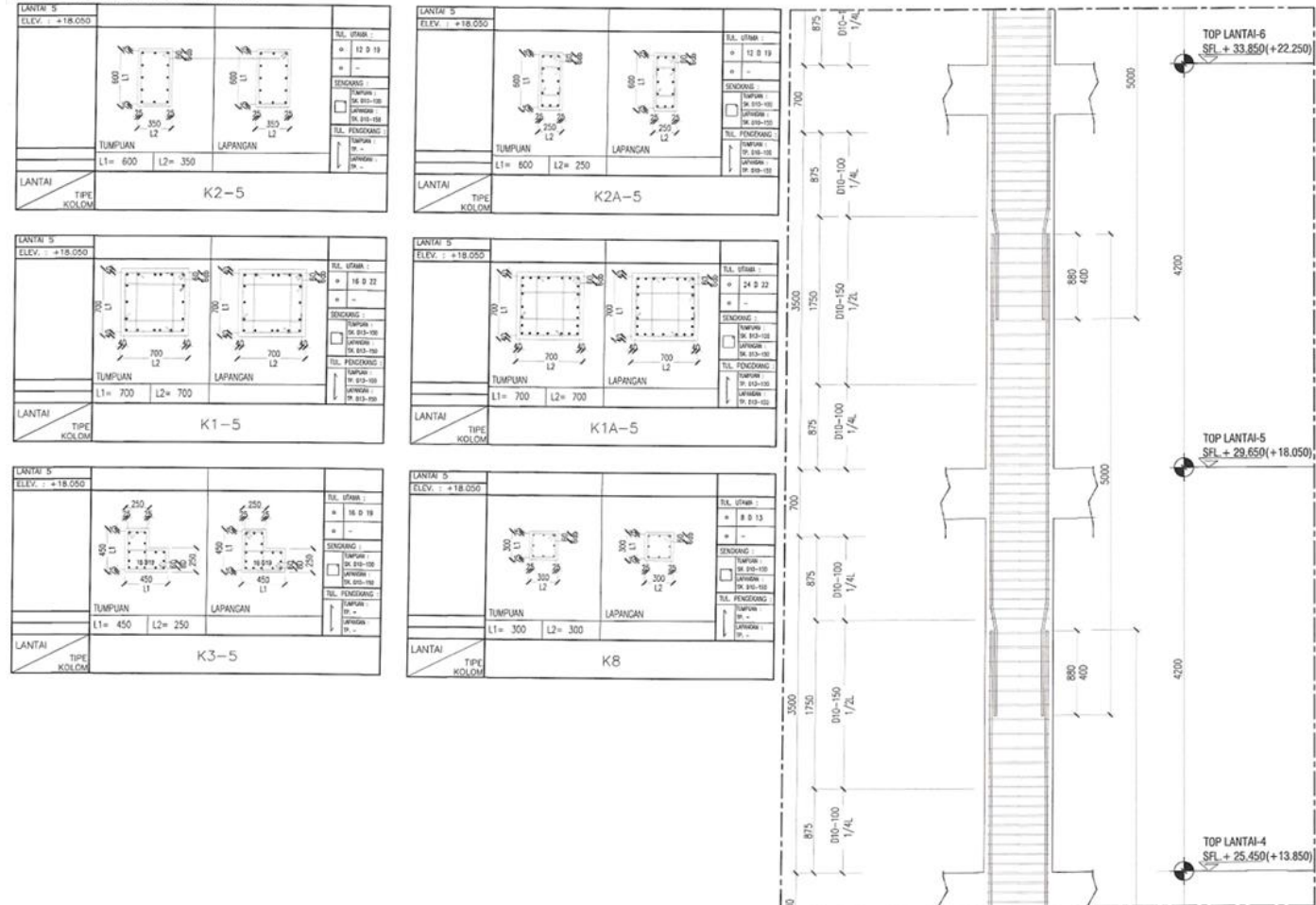
DETAIL PENULANGAN SHEAR WALL LANTAI 3
 2024.11.14

Gambar L-2.33 Detail Penulangan *Shearwall* Lantai 3

[illegible]

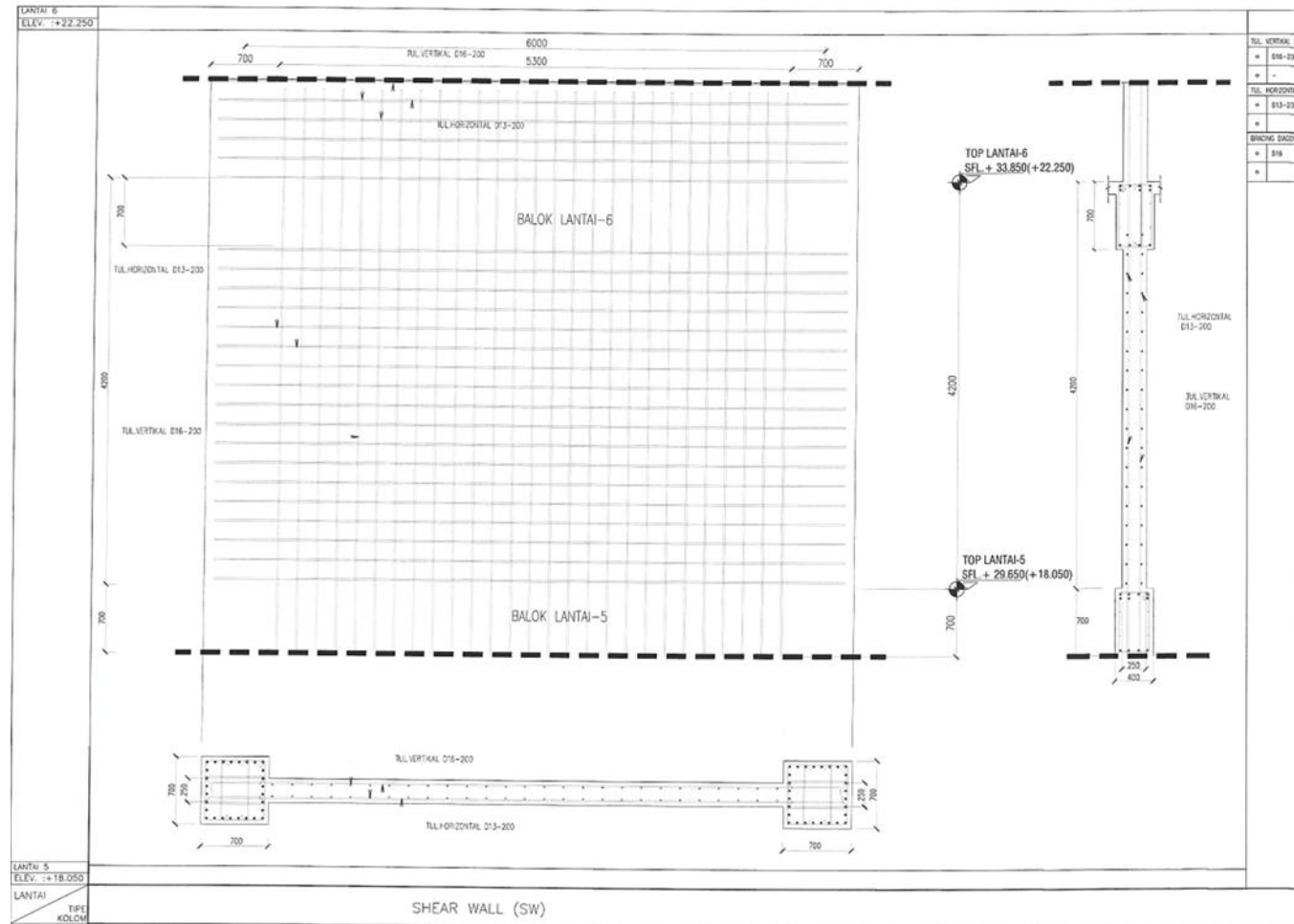
Gambar L-2.34 Detail Penulangan Kolom Lantai 4

PENULANGAN KOLOM LANTAI 5



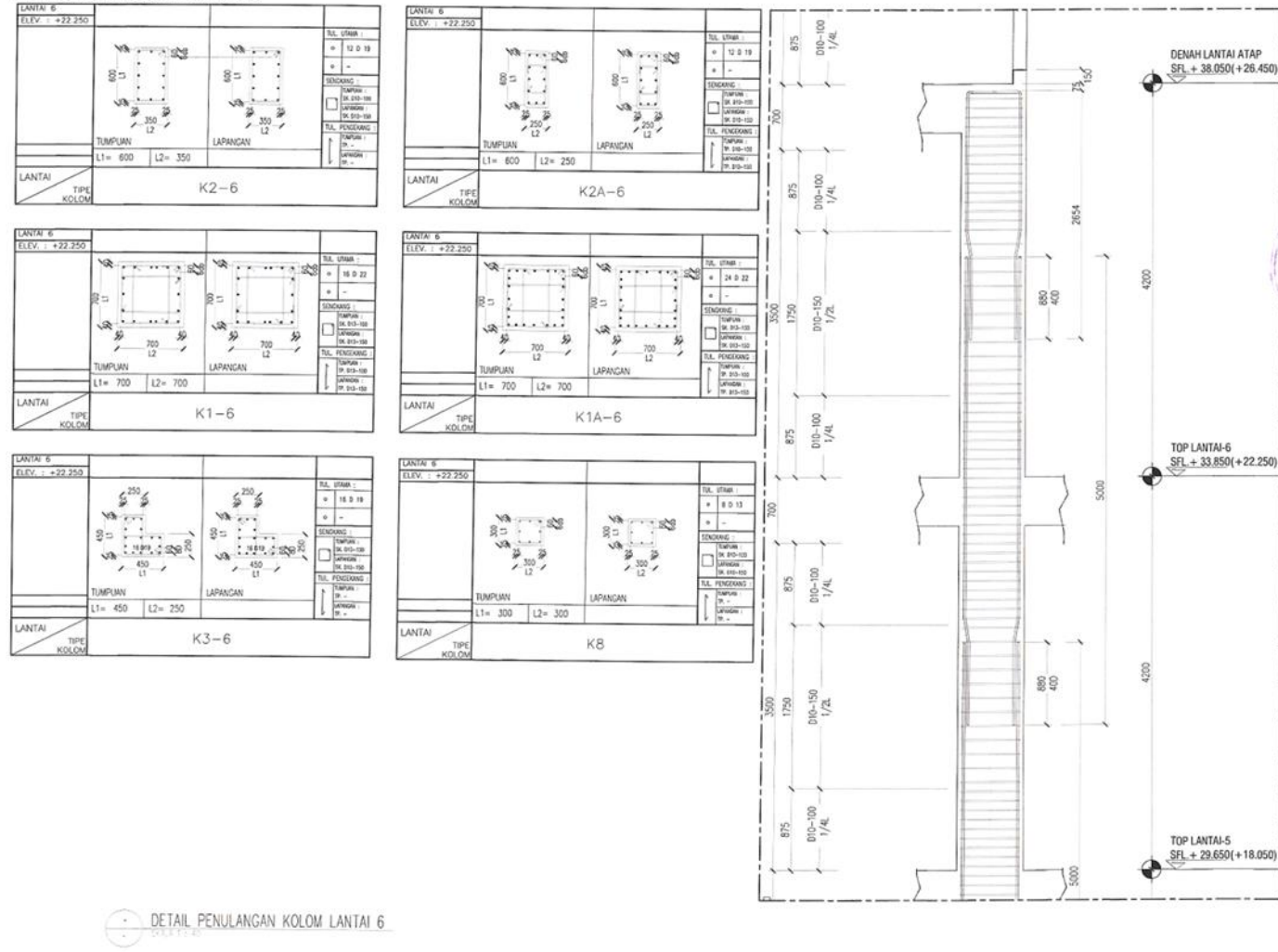
DETAIL PENULANGAN KOLOM LANTAI 5

Gambar L-2.36 Detail Penulangan Kolom Lantai 5



Gambar L-2.37 Detail Penulangan *Shearwall* Lantai 5

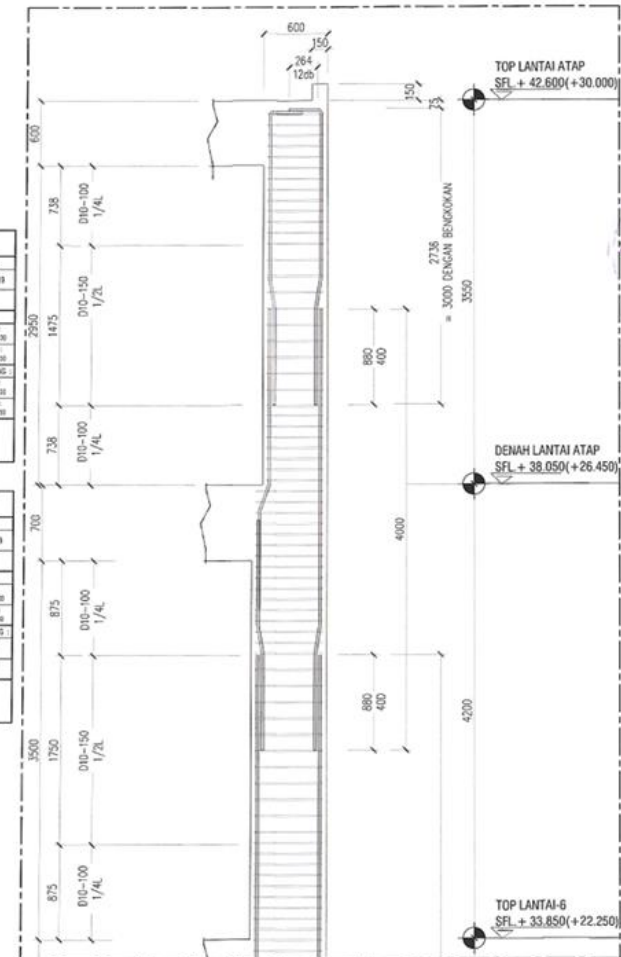
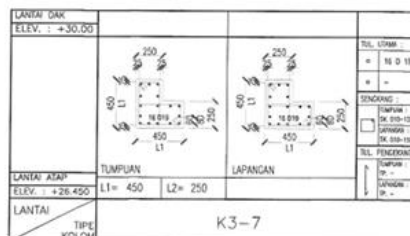
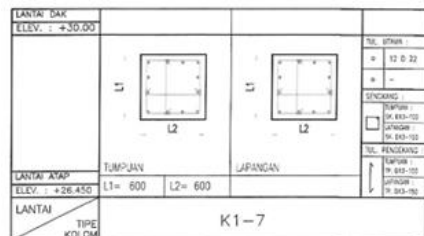
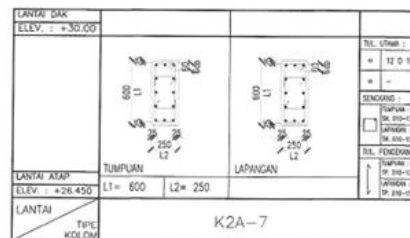
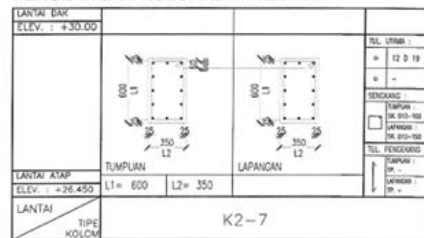
PENULANGAN KOLOM LANTAI 6



DETAIL PENULANGAN KOLOM LANTAI 6

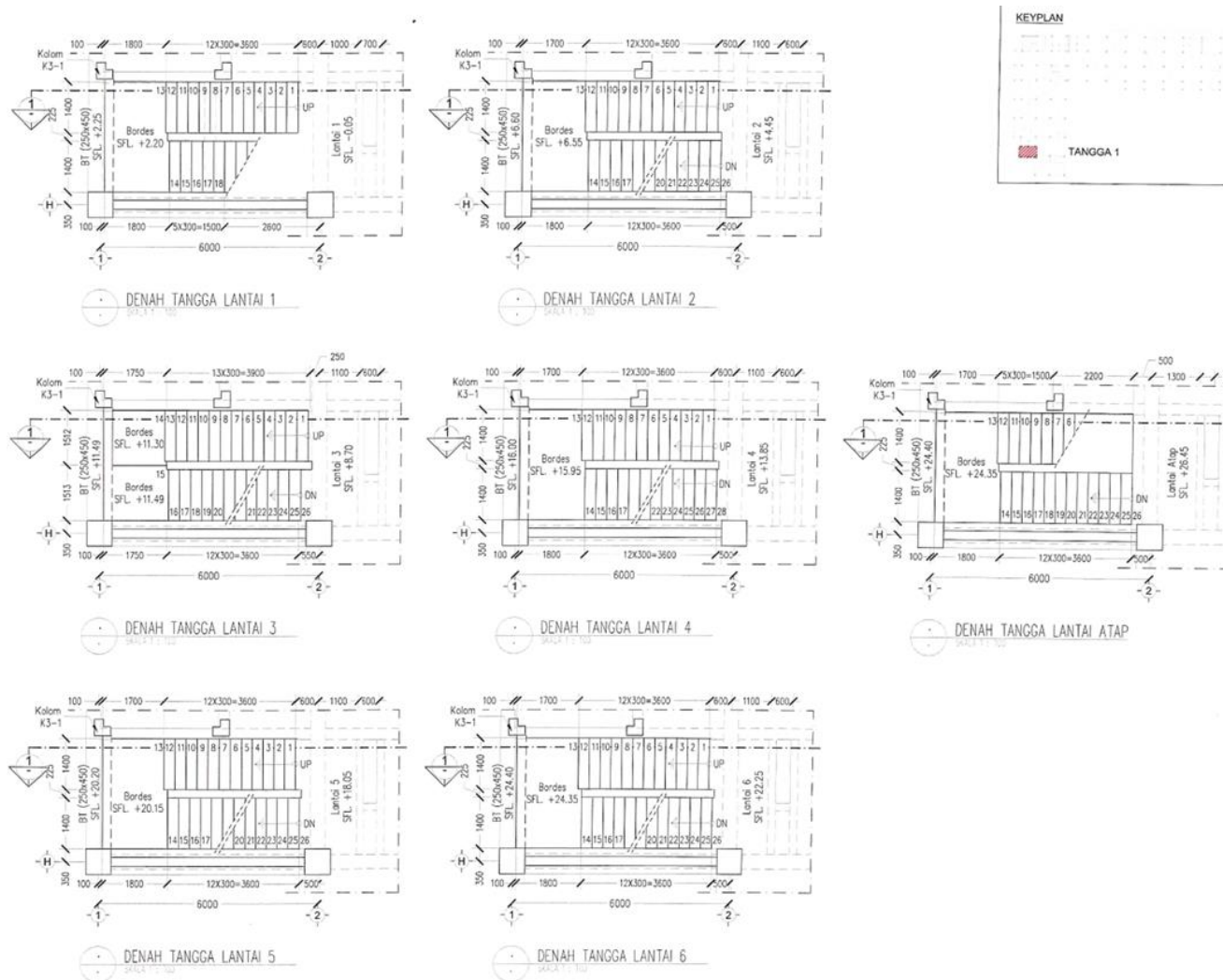
Gambar L-2.37 Detail Penulangan Kolom Lantai 6

PENULANGAN KOLOM LANTAI ATAP

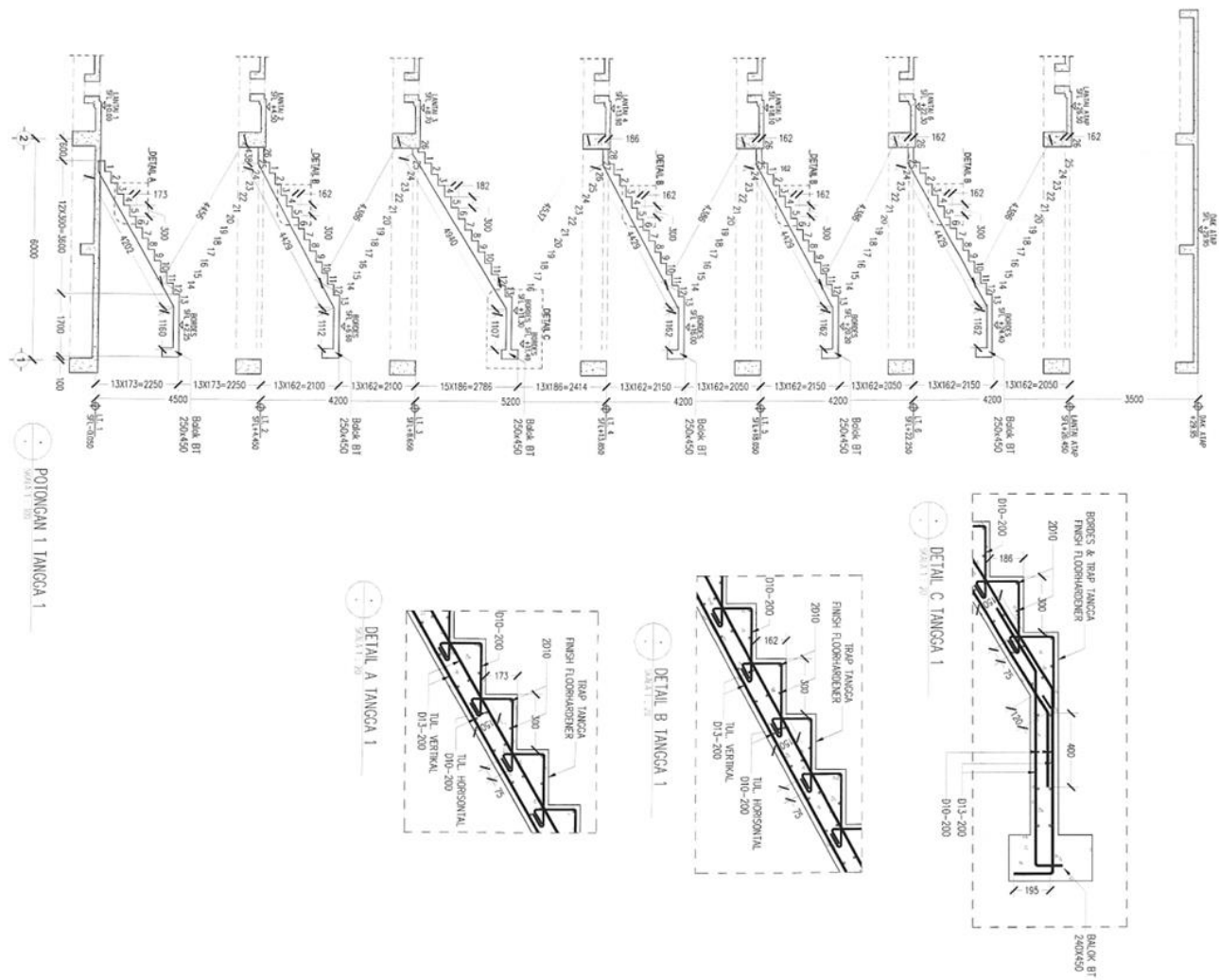


DETAIL PENULANGAN KOLOM LANTAI ATAP

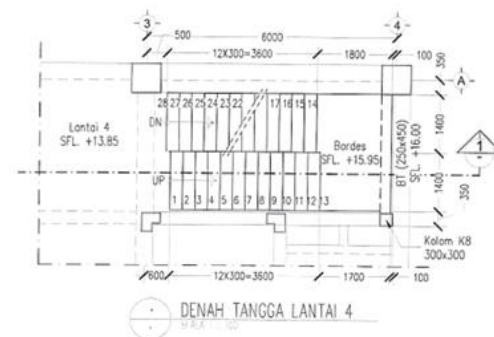
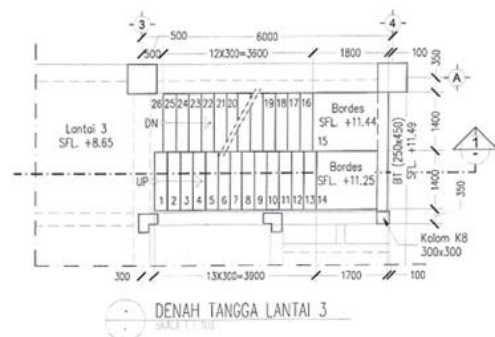
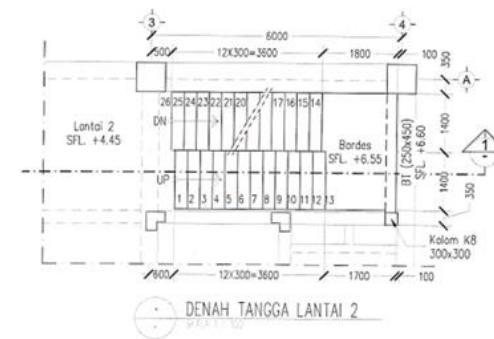
Gambar L-2.39 Detail Penulangan Kolom Lantai Atap



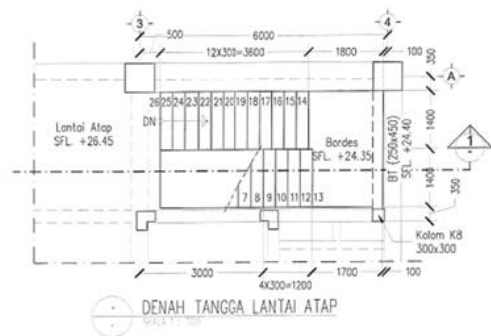
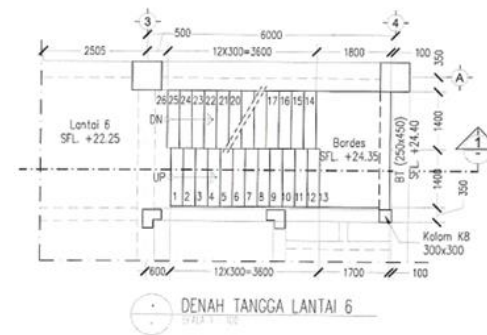
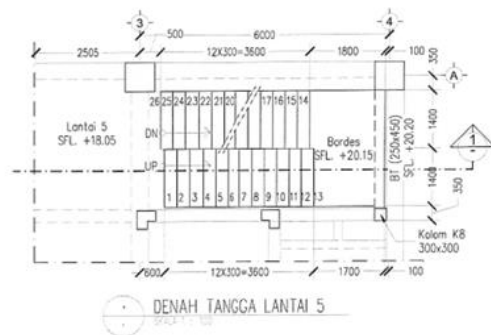
Gambar L-2.40 Denah Tangga 1



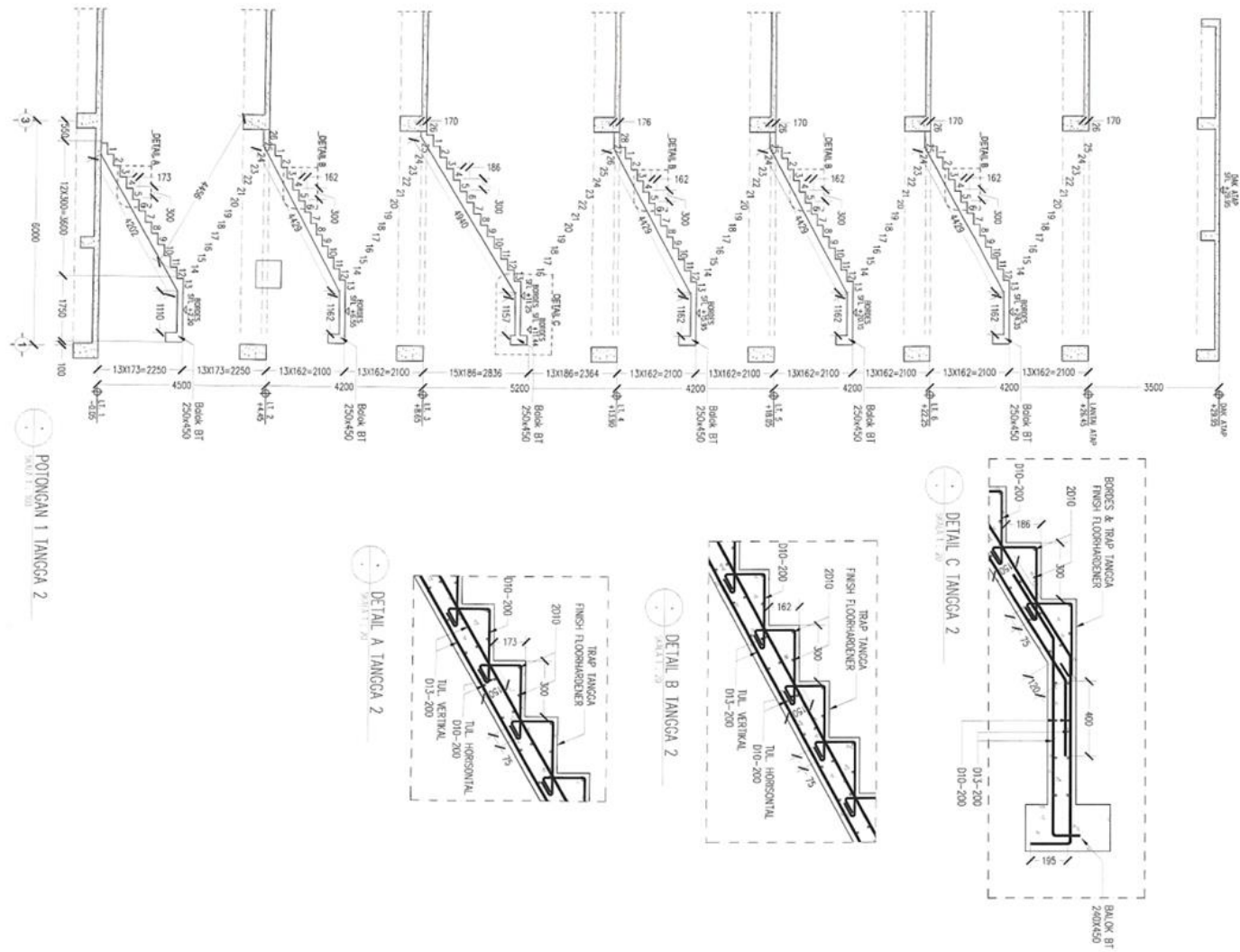
Gambar L-2.41 Detail Tangga 1



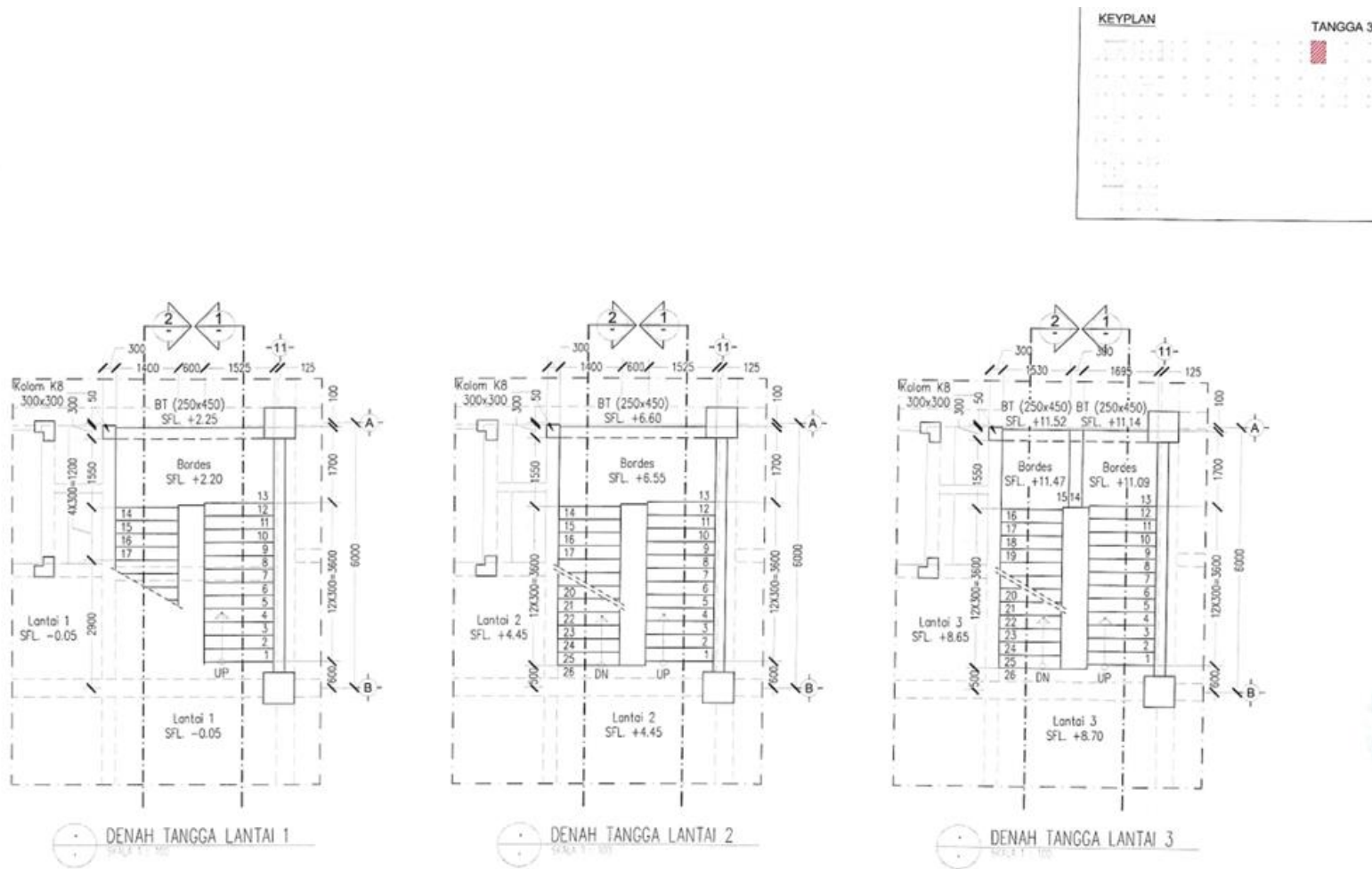
Gambar L-2.42 Denah Tangga 2 (1)



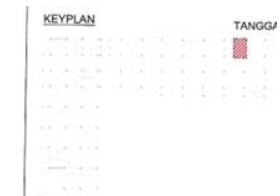
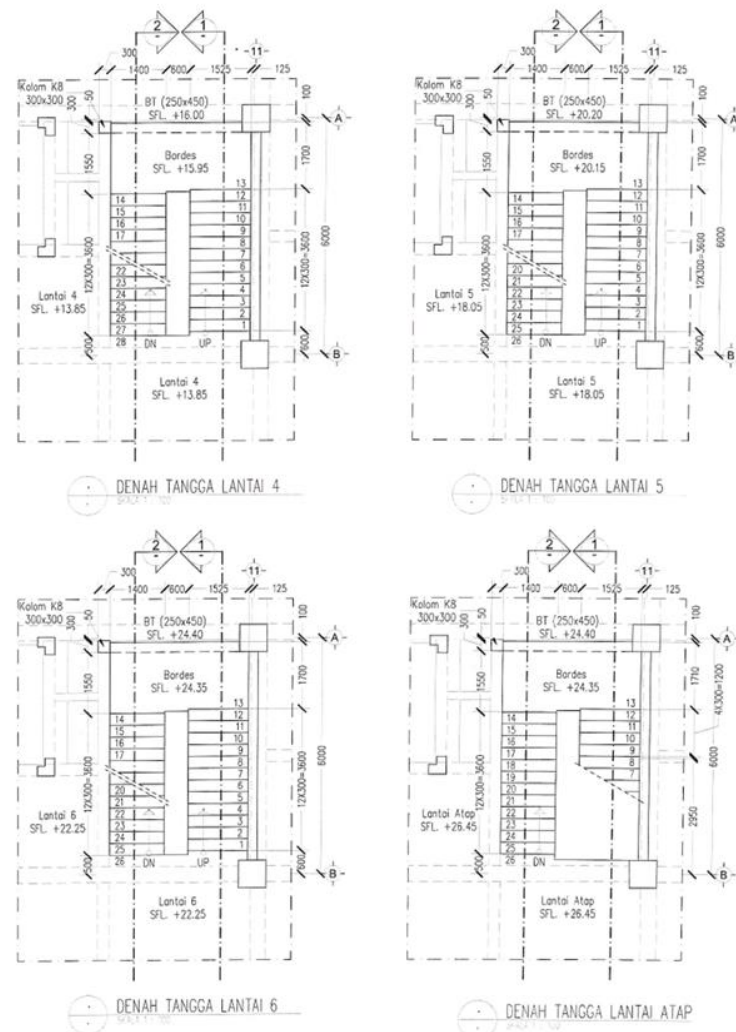
Gambar L-2.43 Denah Tangga 2 (2)



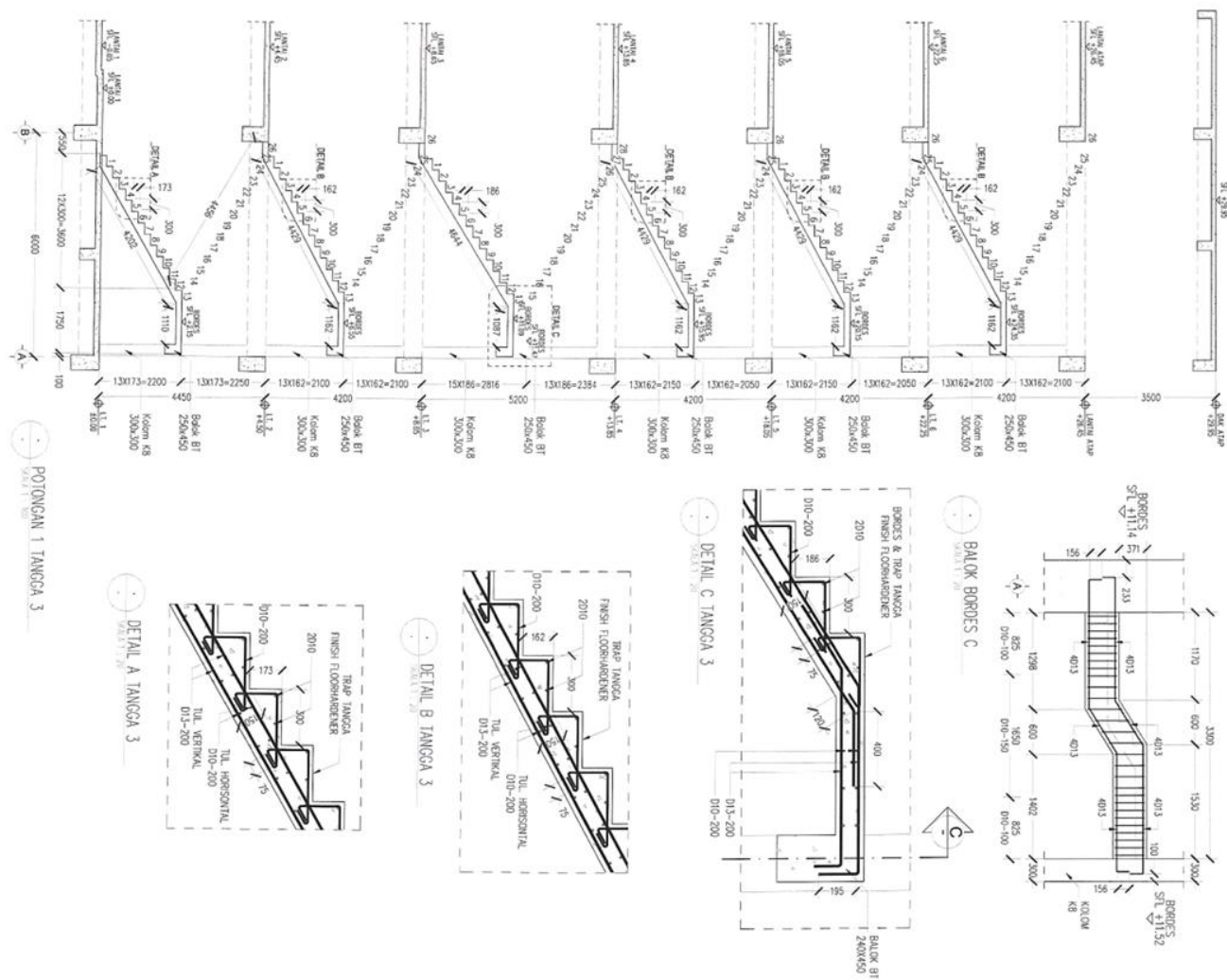
Gambar L-2.44 Detail Tangga 2



Gambar L-2.45 Denah Tangga 3 (1)



Gambar L-2.46 Denah Tangga 3 (2)



Gambar L-2.47 Detail Tangga 3

