TUGAS AKHIR

EVALUASI KINERJA SEISMIK GEDUNG BERTINGKAT TINGGI MENGGUNAKAN ANALISIS *PUSHOVER* BERDASARKAN FEMA 356 DAN FEMA 440

(SEISMIC PERFORMANCE EVALUATION OF HIGH-RISE BUILDINGS USING PUSHOVER ANALYSIS BASED ON FEMA 356 AND FEMA 440)

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

Naufal Rauf Prasetya
22511266

PROGRAM STUDI TEKNIK SIPIL

FAKULTAS TEKNIK DESAIN INOVASI

UNIVERSITAS ISLAM INDONESIA

2026

TUGAS AKHIR

EVALUASI KINERJA SEISMIK GEDUNG BERTINGKAT TINGGI MENGGUNAKAN ANALISIS *PUSHOVER* BERDASARKAN FEMA 356 DAN FEMA 440

(SEISMIC PERFORMANCE EVALUATION OF HIGH-RISE BUILDINGS USING PUSHOVER ANALYSIS BASED ON FEMA 356 AND FEMA 440)

Disusun oleh

Naufal Rauf Prasetya
22511266

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

Diuji pada tanggal 14 Agustus 2026

Oleh Dewan Penguji

Pembimbing	Penguji I	Penguji II
20/8 2026	20.08.2026	20/8 2026.
Prof., Ir. Mochamad Teguh MSCE., Ph.D	Astriana Hardawati S. T., M. Eng.	Anggit Mas Arifudin S. T., M. T.
NIK : 855110201	NIK : 165111301	NIK : 185111304

Mengesahkan,
Ketua Program Studi Teknik Sipil

20/8-26

Dinia Anggraheni, S.T., M.Eng.
NIK : 165110105

PERNYATAAN BEBAS PLAGIASI

Saya menyatakan dengan sebenar-benarnya bahwa Laporan Tugas Akhir yang saya susun sebagai salah satu persyaratan untuk memperoleh gelar Sarjana (S1) pada Program Studi Teknik Sipil dan Perencanaan Universitas Islam Indonesia merupakan hasil karya saya sendiri. Seluruh isi laporan ini disusun secara mandiri, sedangkan bagian yang berasal dari karya atau pendapat pihak lain telah dicantumkan sumbernya secara jelas dan benar sesuai dengan norma, kaidah, serta etika penulisan karya ilmiah. Apabila di kemudian hari terbukti bahwa seluruh atau sebagian isi Laporan Tugas Akhir ini bukan merupakan hasil karya saya sendiri atau mengandung unsur plagiasi, saya bersedia menerima segala bentuk sanksi sesuai dengan ketentuan dan peraturan perundang-undangan yang berlaku, termasuk pencabutan gelar akademik yang telah saya peroleh.

Yogyakarta, Agustus 2026

Yang membuat pernyataan,



Naufal Rauf Prasetya

(22511266)

DEDIKASI

Bismillahirrahmanirrahim

Puji syukur kehadirat Allah SWT yang Maha Pengasih lagi Maha Penyayang, karena atas limpahan rahmat dan hidayah-Nya, tugas akhir ini dapat diselesaikan dengan lancar. Sebagai ungkapan rasa terima kasih dan rasa hormat, tugas akhir ini dipersembahkan kepada:

1. Allah SWT yang senantiasa melimpahkan kesehatan, kemudahan, dan kekuatan dalam penyusunan tugas akhir ini.
2. Keluarga tercinta yang senantiasa memberikan motivasi, doa, dan dukungan tulus demi kelancaran penyelesaian Tugas Akhir ini.
3. Bapak Prof. Ir. Mochamad Teguh, MSCE., Ph.D. selaku dosen pembimbing yang telah meluangkan waktu serta mentransfer ilmu yang sangat bermanfaat dalam membimbing.

KATA PENGANTAR

Puji dan syukur dipanjatkan ke hadirat Allah SWT Yang Maha Pengasih lagi Maha Penyayang atas segala limpahan rahmat, karunia, dan hidayah-Nya sehingga Tugas Akhir yang berjudul "Evaluasi Kinerja Seismik Gedung Bertingkat Tinggi Menggunakan Analisis Pushover Berdasarkan FEMA 356 dan FEMA 440" dapat diselesaikan dengan baik. Penyusunan tugas akhir ini merupakan salah satu persyaratan akademik yang harus dipenuhi untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik Sipil pada Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Islam Indonesia, Yogyakarta.

Selama proses penyusunan tugas akhir ini, berbagai kendala dan tantangan dihadapi. Namun, berkat bimbingan, dukungan, kritik, serta saran dari berbagai pihak, seluruh proses tersebut dapat dilalui dengan baik hingga tugas akhir ini dapat diselesaikan. Oleh karena itu, pada kesempatan ini disampaikan rasa terima kasih yang sebesar-besarnya kepada:

1. Ibu Dinia Anggraheni S.T., M.Eng. selaku Ketua Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik Desain Inovasi, Universitas Islam Indonesia.
2. Bapak Prof. Ir. Mochamad Teguh, MSCE., Ph.D. selaku Dosen Pembimbing
3. Ibu Astriana Hardawati S.T., M.Eng. selaku Dosen Penguji I.
4. Bapak Anggit Mas Arifudin S.T., M.T. selaku Dosen Penguji II.

Semoga tugas akhir ini dapat memberikan manfaat serta menjadi referensi yang berguna bagi pembaca.

Yogyakarta, Agustus 2026
Yang membuat pernyataan,

Naufal Rauf Prasetya
(22511266)

DAFTAR ISI

PERNYATAAN BEBAS PLAGIASI iii

DEDIKASI iv

KATA PENGANTAR v

DAFTAR ISI vi

DAFTAR TABEL x

DAFTAR GAMBAR xii

DAFTAR LAMPIRAN xiv

DAFTAR NOTASI DAN SINGKATAN xvi

ABSTRAK xix

ABSTRACT xx

BAB I PENDAHULUAN 1

1.1 Latar Belakang 1

1.2 Rumusan Masalah 4

1.3 Tujuan Penelitian 4

1.4 Manfaat Penelitian 4

1.5 Batasan Masalah 5

BAB II TINJAUAN PUSTAKA 7

2.1 Ringkasan Penelitian Terdahulu 7

2.2 Perbandingan Penelitian yang akan Dilakukan dengan Penelitian Terdahulu 10

2.3 Keaslian Penelitian 15

BAB III LANDASAN TEORI 17

3.1 Fenomena dan Klasifikasi Gempa Bumi 17

3.2 Konsep Bangunan Tahan Gempa 17

3.2.1 Definisi Bangunan Tahan Gempa 17
3.2.2 Karakteristik Gedung Bertingkat Tinggi 17
3.2.3 Kinerja Struktur Terhadap Beban Gempa 18
3.3 Pembebanan Struktur 18
3.3.1 Beban Mati 18
3.3.2 Beban Hidup 19
3.3.3 Beban Gempa 19
3.3.4 Kombinasi Pembebanan 19
3.4 Ketentuan Umum Perancanaan Struktur Bangunan Gedung Tahan Gempa Berdasarkan SNI 1726:2019 20
3.4.1 Kategori Risiko Struktur Bangunan dan Faktor Keutamaan Gempa 20
3.4.2 Klasifikasi Situs Tanah 21
3.4.3 Parameter Percepatan Gempa 21
3.4.4 Parameter Percepatan Spektral Desain 23
3.4.5 Spektrum Respons Desain 23
3.4.6 Kategori Desain Seismik 25
3.4.7 Pemilihan Sistem Struktur 26
3.4.8 Periode Fundamental Struktur 27
3.4.9 Gaya Geser Dasar Seismik 28
3.4.10 Distribusi Gaya Seismik Lateral 29
3.5 Sistem Ganda 30
3.6 Ketidakberaturan Struktur 30
3.6.1 Ketidakberaturan Horizontal 31
3.6.2 Ketidakberaturan Vertikal 34
3.7 Dinding Geser 36

3.7.1 Perilaku Dinding Geser terhadap Gempa 36
3.7.2 Pengaruh Dinding Geser terhadap Respons Struktur 37
3.7.3 Konfigurasi, Bentuk Geometri, dan Penempatan Dinding Geser 37
3.7.4 Persyaratan Minimum Tebal Dimensi Dinding Geser 37
3.8 Analisis *Pushover* 38
3.8.1 Konsep Dasar Analisis *Pushover* 38
3.8.2 Kurva Kapasitas 38
3.8.3 Titik Kinerja 39
3.8.4 Metode Koefisien Perpindahan FEMA 356 40
3.8.5 Penyesuaian Prosedur FEMA 440 42
3.9 Mekanisme Sendi Plastis 44
3.10 Mekanisme Keruntuhan 46
3.11 Tingkat Kinerja Struktur 47
BAB IV METODOLOGI PENELITIAN 51
4.1 Jenis Penelitian 51
4.2 Data Penelitian 51
4.2.1 Objek Penelitian 51
4.2.2 Data Teknis Bangunan 55
4.2.3 Dimensi Elemen Struktur 56
4.3 Tahapan Analisis 58
BAB V ANALISIS DAN PEMBAHASAN 64
5.1 Pemodelan Struktur 64
5.1.1 Pemodelan Elemen Balok 64
5.1.2 Pemodelan Elemen Kolom 65
5.1.3 Pemodelan Elemen Dinding Geser 65

5.2 Analisis Pembebanan Struktur 67
5.2.1 Perhitungan Beban Mati 67
5.2.2 Perhitungan Beban Hidup 70
5.2.3 Kontrol Total Massa Struktur 70
5.2.4 Perhitungan Beban Gempa 71
5.3 Kontrol Ketidakberaturan Struktur 77
5.4 Kontrol Deformasi Struktur 80
5.4.1 Kontrol Gaya Geser Dasar Statik dan Dinamik 80
5.4.2 Kontrol Partisipasi Massa 81
5.4.3 Kontrol Simpangan Antartingkat 81
5.5 Analisis *Pushover* 83
5.5.1 Pendefinisian Beban *Pushover* 83
5.5.2 Pendefinisian Sendi Plastis 86
5.6 Kurva Kapasitas Struktur 90
5.7 Mekanisme Pembentukan Sendi Plastis 95
5.7.1 Urutan Pembentukan Sendi Plastis 95
5.7.2 Mekanisme Keruntuhan 100
5.8 Penentuan Target Perpindahan Berdasarkan FEMA 440 102
5.9 Penentuan Rasio Simpangan Berdasarkan FEMA 356 107
5.10 Evaluasi Tingkat Kinerja Berdasarkan FEMA 356 108
BAB VI KESIMPULAN DAN SARAN 110
6.1 Kesimpulan 110
6.2 Saran 111
DAFTAR PUSTAKA 112
LAMPIRAN 115

DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1 Perbandingan Penelitian Terdahulu dan Sekarang 11

Tabel 3. 1 Faktor Keutamaan Gempa 20

Tabel 3. 2 Kategori Desain Seismik berdasarkan Parameter Respons Percepatan pada Periode Pendek 26

Tabel 3. 3 Kategori Desain Seismik berdasarkan Parameter Respons Percepatan pada Periode 1 Detik 26

Tabel 3. 4 Faktor R, Cd, dan Ω₀ untuk Sistem Pemikul Gaya Seismik 27

Tabel 3. 5 Nilai Parameter Periode Pendekatan Ct dan x 28

Tabel 3. 6 Nilai Faktor Modifikasi C0 42

Tabel 3. 7 Perilaku Sendi Plastis Berdasarkan FEMA 356 46

Tabel 3. 8 Tingkat Kinerja Berdasarkan FEMA 356 48

Tabel 3. 9 Batasan Nilai Rasio Simpangan Tingkat Kinerja Struktur 50

Tabel 4. 1 Dimensi Balok 56

Tabel 4. 2 Dimensi Kolom 57

Tabel 4. 3 Dimensi Pelat dan Dinding Geser 58

Tabel 5. 1 Perhitungan Berat Jenis Dinding 69

Tabel 5. 2 Kontrol Total Massa Struktur 70

Tabel 5. 3 Hasil Perhitungan Spektrum Respons Desain 73

Tabel 5. 4 Nilai Gaya Seismik Lateral 76

Tabel 5. 5 Rekapitulasi Ketidakberaturan Horizontal Struktur 78

Tabel 5. 6 Rekapitulasi Ketidakberaturan Vertikal Struktur 79

Tabel 5.7 Rekapitulasi Kontrol Gaya Geser Dasar 80

Tabel 5.8 Nilai Partisipasi Massa Ragam Terkombinasi 81

Tabel 5.9 Kontrol Simpangan Antartingkat 82

Tabel 5.10 Nilai Kurva Kapasitas Arah X 91
Tabel 5.11 Nilai Kurva Kapasitas Arah Y 93
Tabel 5.12 Rekapitulasi Pembentukan Sendi Plastis Arah X 95
Tabel 5.13 Rekapitulasi Pembentukan Sendi Plastis Arah Y 96
Tabel 5.14 Elemen Pengontrol Mekanisme Keruntuhan 101
Tabel 5.15 Rekapitulasi Target Perpindahan FEMA 440 106
Tabel 5.16 Hasil Evaluasi Tingkat Kinerja Struktur 107

DAFTAR GAMBAR

Gambar 3. 1 Parameter Gerak Tanah Ss, Wilayah Indonesia Untuk Spektrum Respons 0,2 Detik (Redaman Kritis 5%) 22

Gambar 3. 2 Parameter Gerak Tanah S1, Wilayah Indonesia Untuk Spektrum Respons 0,2 Detik (Redaman Kritis 5%) 22

Gambar 3. 3 Spektrum Respons Desain 24

Gambar 3. 4 Ketidakberaturan Torsi 32

Gambar 3. 5 Kurva Kapasitas Berdasarkan FEMA 356 39

Gambar 3. 6 Pola Terjadinya Sendi Plastis 45

Gambar 3. 7 Kurva Perilaku Sendi Plastis FEMA 356 45

Gambar 3. 8 Kurva Hubungan Gaya dan Deformasi 47

Gambar 3. 9 Kurva Tingkat Kinerja Struktur 48

Gambar 4. 1 Lokasi Penelitian 52

Gambar 4. 2 Denah Lantai Dasar 52

Gambar 4. 3 Denah Lantai 2 53

Gambar 4. 4 Denah Lantai 3 53

Gambar 4. 5 Denah Lantai 4-25 53

Gambar 4. 6 Denah Potongan X-X 54

Gambar 4. 7 Denah Potongan Y-Y 55

Gambar 4. 8 Bagan Alir Tahapan Analisis 61

Gambar 5. 1 Model Struktur Bangunan Gedung 66

Gambar 5. 2 Tampak X-Y Struktur Bangunan Gedung 66

Gambar 5. 3 Tampak X-Z Struktur Bangunan Gedung 67

Gambar 5.4 Grafik Spektrum Respons Desain 75

Gambar 5. 5 Grafik Simpangan Antartingkat 82

Gambar 5. 6 Pendefinisian Beban Gravitasi 84
Gambar 5. 7 Pendefinisian Beban *Pushover* Arah X 85
Gambar 5. 8 Pendefinisian Target Perpindahan *Pushover* Arah X 86
Gambar 5. 9 *Frame Assignment* Balok 87
Gambar 5. 10 Pendefinisian Sendi Plastis Balok 87
Gambar 5. 11 *Frame Assignment* Kolom 88
Gambar 5. 12 Pendefinisian Sendi Plastis Kolom 89
Gambar 5. 13 Pendefinisian Sendi Plastis Dinding Geser 90
Gambar 5. 14 Grafik Kurva Kapasitas Arah X 92
Gambar 5. 15 Grafik Kurva Kapasitas Arah Y 93
Gambar 5. 16 Terjadinya Sendi Plastis Pertama Arah X 97
Gambar 5. 17 Terjadinya Sendi Plastis Akhir Arah X 98
Gambar 5. 18 Terjadinya Sendi Plastis Pertama Arah Y 99
Gambar 5. 19 Terjadinya Sendi Plastis Akhir Arah Y 100
Gambar 5. 20 Elemen Pengontrol Mekanisme Keruntuhan Arah X 101
Gambar 5. 21 Elemen Pengontrol Mekanisme Keruntuhan Arah Y 101

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1 Denah Lantai Dasar 111
Lampiran 2 Denah Lantai 2 112
Lampiran 3 Denah Lantai 3 113
Lampiran 4 Denah Lantai 4 114
Lampiran 5 Denah Lantai 5 & 6 115
Lampiran 6 Denah Lantai 7 116
Lampiran 7 Denah Lantai 8 & 9 117
Lampiran 8 Denah Lantai 10 118
Lampiran 9 Denah Lantai 11 & 12 119
Lampiran 10 Denah Lantai 13 120
Lampiran 11 Denah Lantai 14 & 15 121
Lampiran 12 Denah Lantai 16 122
Lampiran 13 Denah Lantai 17 & 18 123
Lampiran 14 Denah Lantai 19 124
Lampiran 15 Denah Lantai 20 & 21 125
Lampiran 16 Denah Lantai 22 126
Lampiran 17 Denah Lantai 23 & 24 127
Lampiran 18 Denah Lantai Atap 128
Lampiran 19 Detail Penulangan Kolom 129
Lampiran 20 Detail Penulangan Dinding Geser Tipe 1 dan 2 Lantai 1 - Lantai 4 130
Lampiran 21 Detail Penulangan Dinding Geser Tipe 1 dan 2 Lantai 4 - Lantai 13 131
Lampiran 22 Detail Penulangan Dinding Geser Tipe 1 dan 2 Lantai 13 - Lantai Atap 132
Lampiran 23 Detail Penulangan Dinding Geser Tipe 3 dan 4 Lantai 1 - Lantai 4 133
Lampiran 24 Detail Penulangan Dinding Geser Tipe 3 dan 4 Lantai 4 - Lantai 13 134
Lampiran 25 Detail Penulangan Dinding Geser Tipe 3 dan 4 Lantai 13 - Lantai Atap 135

Lampiran 26 Detail Penulangan Dinding Geser Tipe 5 - 8 Lantai 1 - Lantai 4 136
Lampiran 27 Detail Penulangan Dinding Geser Tipe 5 - 8 Lantai 4 - Lantai 13 137
Lampiran 28 Detail Penulangan Dinding Geser Tipe 5 - 8 Lantai 13 - Lantai Atap 138
Lampiran 29 Detail Penulangan Balok 139
Lampiran 30 Nilai Simpangan Antartingkat 140
Lampiran 31 *Output* Kurva Kapasitas Arah X 141
Lampiran 32 *Output* Kurva Kapasitas Arah Y 142
Lampiran 33 *Output* Kurva Idealisasi Arah X 143
Lampiran 34 *Output* Kurva Idealisasi Arah Y 144

DAFTAR NOTASI DAN SINGKATAN

a	=	Parameter spektrum respons
ATC-40	=	*Applied Technology Council 40*
C_d	=	Faktor pembesaran defleksi
C_m	=	Faktor partisipasi massa
CP	=	*Collapse Prevention*
C_s	=	Koefisien respons seismik
C_t	=	Koefisien periode pendekatan (nilai dari Tabel 3.5)
C_u	=	Koefisien batas atas periode
C_{vx}	=	Faktor distribusi vertikal
C_0	=	Koefisien konversi sistem MDOF ke SDOF
C_1	=	Koefisien modifikasi efek inelastik
C_2	=	Koefisien degradasi kekakuan dan kekuatan
C_3	=	Koefisien pengaruh efek P-Δ (P-delta)
D	=	Beban mati
DBE	=	*Design Basis Earthquake*
Δ	=	Deformasi (simpangan)
δ_T	=	Target perpindahan
Δ_y	=	Perpindahan leleh
E	=	Beban gempa
F_a	=	Faktor amplifikasi getaran terkait percepatan pada periode pendek
FEMA	=	*Federal Emergency Management Agency*

F_v	=	Koefisien situs untuk periode pendek
g	=	Percepatan gravitasi (9,81 m/s²)
h_i dan h_x	=	Tinggi dari dasar sampai tingkat i atau x
h_n	=	Tinggi struktur di atas dasar sampai tingkat tertinggi
H_{total}	=	Tinggi total struktur
IO	=	*Immediate Occupancy*
k	=	Eksponen yang terkait dengan periode struktur
K_e	=	Kekakuan efektif
K_i	=	Kekakuan awal
L	=	Beban hidup
L_r	=	Beban hidup atap
LS	=	*Life Safety*
MCER	=	*Maximum Considered Earthquake*
MDOF	=	*Multi Degree of Freedom*
Ω_0	=	Faktor kuat lebih sistem
φ	=	Diameter tulangan
PPIUG	=	Peraturan Pembebanan Indonesia untuk Gedung
Q	=	Gaya
R	=	Beban hujan
R	=	Koefisien modifikasi respons
R	=	Rasio kuat elastik terhadap kuat leleh (FEMA 440)
S	=	Beban salju
S_a	=	Percepatan spektra
SCWB	=	*Strong Column Weak Beam*
SDOF	=	*Single Degree of Freedom*
S_{DS}	=	Parameter spektral desain pada periode pendek, redaman 5%
S_{D1}	=	Parameter spektral desain pada periode 1 detik, redaman 5%

S_{MS}	=	Parameter percepatan respons spektrum MCER pada periode pendek yang telah disesuaikan dengan pengaruh kelas situs
S_{M1}	=	Parameter percepatan respons spektrum MCER pada periode 1 detik yang telah disesuaikan dengan pengaruh kelas situs
SNI	=	Standar Nasional Indonesia
S_s	=	Parameter percepatan respons spektrum MCER dari peta gempa pada periode pendek
S_1	=	Parameter percepatan respons spektrum MCER dari peta gempa pada periode 1 detik
T	=	Periode fundamental struktur
T_a	=	Periode fundamental pendekatan
T_e	=	Periode getar alami efektif
T_i	=	Periode awal
T_L	=	Periode transisi panjang
T_S	=	Periode getar pada batas atas percepatan respons spektral konstan
T_0	=	Periode getar pada batas bawah percepatan respons spektral konstan
V	=	Gaya geser dasar seismik
V_y	=	Gaya geser leleh
W	=	Berat seismik efektif
w_i dan w_x	=	Bagian berat seismik efektif total struktur (W) yang dibebankan pada tingkat i atau x
x	=	Eksponen pada persamaan periode fundamental pendekatan (nilai dari Tabel 3.5)

ABSTRAK

Secara umum, gedung bertingkat tinggi memiliki risiko terhadap beban gempa yang dapat menimbulkan respons lateral dan torsi yang signifikan, terutama pada struktur dengan konfigurasi dinding geser yang tidak simetris. Ketidaksimetrisan tersebut dapat menyebabkan ketidakseimbangan distribusi kekakuan dan memengaruhi respons seismik struktur. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi kinerja seismik Gedung Tower B Hunian Terjangkau Nuansa Cilangkap di Jakarta Timur yang merupakan bangunan apartemen 25 lantai dengan tinggi 78,6 m dan menggunakan sistem struktur ganda dengan konfigurasi dinding geser tidak simetris. Evaluasi dilakukan dengan meninjau kurva kapasitas, target perpindahan, pola pembentukan sendi plastis, mekanisme keruntuhan, serta tingkat kinerja struktur pada arah X dan Y.

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif melalui studi numerik berdasarkan data teknis dan konfigurasi struktur Gedung Tower B Hunian Terjangkau Nuansa Cilangkap. Pemodelan dan analisis struktur dilakukan menggunakan perangkat lunak ETABS 22.7. Pembebanan dan pemodelan struktur mengacu pada SNI 1727:2020, SNI 1726:2019, dan SNI 2847:2019, sedangkan evaluasi kinerja seismik dilakukan menggunakan analisis statik nonlinier (pushover analysis). Pendefinisian sendi plastis dan kriteria tingkat kinerja berdasarkan prosedur FEMA 356, sedangkan penentuan target perpindahan dilakukan berdasarkan penyesuaian prosedur FEMA 440. Analisis dilakukan pada arah X dan Y untuk memperoleh kurva kapasitas, target perpindahan, pola pembentukan sendi plastis, mekanisme keruntuhan, serta tingkat kinerja struktur.

Hasil analisis menunjukkan bahwa kapasitas gaya geser dasar maksimum struktur sebesar 9461,303 kN pada arah X dan 15933,776 kN pada arah Y. Target perpindahan yang diperoleh sebesar 0,426 m pada arah X dan 0,261 m pada arah Y. Berdasarkan target perpindahan tersebut, rasio simpangan struktur sebesar 0,54% pada arah X berada pada tingkat kinerja Life Safety (LS), sedangkan rasio simpangan sebesar 0,33% pada arah Y memenuhi tingkat kinerja Immediate Occupancy (IO). Mekanisme pembentukan sendi plastis menunjukkan perilaku yang dominan daktail dan terutama terjadi pada elemen balok, namun ditemukan konsentrasi kerusakan pada beberapa kolom lantai 1 yang mencapai atau melampaui batas Collapse Prevention (CP). Secara keseluruhan, tingkat kinerja seismik struktur dikategorikan Life Safety (LS) yang dikendalikan oleh respons struktur pada arah X, sedangkan arah Y memenuhi tingkat kinerja Immediate Occupancy (IO), sesuai dengan kriteria yang ditetapkan dalam FEMA 356.

Kata kunci: Analisis *pushover*, Kinerja seismik, Dinding geser, FEMA 356, FEMA 440

ABSTRACT

In general, high-rise buildings are highly vulnerable to seismic loads, particularly those with asymmetric shear wall configurations, which may lead to an unbalanced stiffness distribution and torsional response. This study aims to evaluate the seismic performance of Tower B Hunian Terjangkau Nuansa Cilangkap, an apartment building located in East Jakarta consisting of 25 stories with a total height of 78.6 m, utilizing a dual structural system with an asymmetric shear wall configuration. The evaluation was conducted through the analysis of the capacity curve, target displacement, plastic hinge mechanism, collapse mechanism, and structural performance level in both the X and Y directions.

This research employed a quantitative approach based on numerical simulation using technical data and structural configuration of Tower B Hunian Terjangkau Nuansa Cilangkap. The structural model was developed using ETABS 22.7 software. Structural loading and design parameters were determined in accordance with SNI 1727:2020, SNI 1726:2019, and SNI 2847:2019. Nonlinear static (pushover) analysis was performed in accordance with FEMA 356 for plastic hinge modeling and structural performance criteria, while FEMA 440 was adopted to determine the target displacement. The analysis was conducted in both the X and Y directions to evaluate the structural capacity, target displacement, plastic hinge mechanism, collapse mechanism, and structural performance level.

The analysis results indicate that the maximum base shear capacity reached 9461.303 kN in the X direction and 15933.776 kN in the Y direction, with corresponding target displacements of 0.426 m and 0.261 m, respectively. The drift ratio at the target displacement was 0.54% in the X direction, corresponding to the Life Safety (LS) performance level, while the Y direction exhibited a drift ratio of 0.33% and met the Immediate Occupancy (IO) performance level. The plastic hinge mechanism demonstrated a ductile behavior distributed within the beam elements; however, localized damage was observed in several columns on the first story, where the hinge state exceeded the Collapse Prevention (CP) limit. Overall, the seismic performance of the structure was classified as Life Safety (LS), governed by the structural response in the X direction, whereas the Y direction satisfied the Immediate Occupancy (IO) performance level, in accordance with the criteria specified in FEMA 356.

Keywords: *pushover analysis, seismic performance, shear wall, FEMA 356, FEMA 440*

BAB I
PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Secara geografis, wilayah Indonesia terletak pada pertemuan tiga lempeng tektonik utama, yaitu Lempeng Eurasia, Lempeng Indo-Australia, dan Lempeng Pasifik sehingga hampir seluruh wilayah Indonesia berada pada zona rawan gempa bumi. Jia dkk. (2022) menjelaskan bahwa bangunan bertingkat tinggi menjadi salah satu proyeksi infrastruktur penting di masa depan dalam menunjang aktivitas manusia sehingga perlu mendapat perhatian luas terkait kemampuannya menghadapi bahaya gempa bumi. Gempa bumi dianggap sebagai ancaman paling serius karena dapat terjadi secara tiba-tiba dan berpotensi menimbulkan kerusakan yang sangat besar pada bangunan. Sebagai respons terhadap ancaman tersebut, berbagai sistem struktural seperti dinding geser, struktur penghubung, serta struktur rangka inti dinding telah dikembangkan untuk memastikan keamanan bangunan bertingkat tinggi .

Sistem struktur memiliki peran utama dalam mengendalikan respons bangunan terhadap beban gempa, terutama dalam menahan beban lateral maupun beban vertikal akibat gempa dan membatasi deformasi pada struktur yang berpotensi mengubah gaya aksial kolom secara fluktuatif. Pada bangunan bertingkat tinggi, beban gempa dapat menimbulkan gaya geser dasar, momen, serta simpangan antartingkat yang signifikan. Oleh karena itu, diperlukan sistem struktur yang memiliki kekakuan lateral untuk membatasi simpangan, kekuatan untuk memikul gaya geser dan momen, serta daktilitas yang memadai untuk mengendalikan respons seismik tersebut. Prathama dkk. (2021) menyatakan bahwa salah satu solusi untuk mengantisipasi beban gempa pada bangunan bertingkat tinggi adalah dengan penggunaan elemen struktur dinding geser dengan profil dan tata letak yang tepat.

Berdasarkan SNI 1726:2019, dinding geser sebaiknya ditempatkan secara simetris terhadap pusat massa untuk meminimalkan eksentrisitas dan efek torsi. Penempatan pada inti bangunan efektif dalam menahan gaya geser dan momen guling, sedangkan penempatan pada tepi bangunan dapat meningkatkan kapasitas torsi struktur. Namun, efektivitas penyerapan beban gempa tidak hanya dipengaruhi oleh posisi penempatan, melainkan juga oleh aspek bentuk geometri penampang dan metode instalasi sistem strukturnya pada bangunan. Dari sisi geometri dan bentuk, dinding geser dengan profil L, T, atau C terbukti jauh lebih efektif dalam menahan dan menyerap beban lateral dari berbagai arah dibandingkan profil lurus, karena memiliki modulus penampang, momen inersia, dan ketahanan tekuk lateral yang jauh lebih besar. Sementara itu, dari aspek instalasi dan pemasangan, integrasi monolit antara dinding geser dengan elemen balok dan kolom sangat krusial untuk memastikan transfer gaya lateral yang menerus dari lantai ke fondasi, serta mencegah kegagalan geser pada sambungan antarelemen struktural.

Salah satu metode yang umum digunakan untuk mengevaluasi kinerja struktur terhadap beban gempa adalah analisis statik nonlinier (*pushover analysis)*. Analisis *pushover* merupakan metode analisis statik nonlinier yang memodelkan beban gempa pada struktur bangunan sebagai beban statik. Beban statik diberikan pada pusat massa di setiap lantai, kemudian ditingkatkan secara bertahap hingga melampaui batas leleh pertama pada salah satu elemen struktur bangunan. Dengan demikian, peningkatan pembebanan yang terus-menerus akan menyebabkan perubahan bentuk material karena telah melewati batas elastis material tersebut (Pierre dan Hidayat, 2020). Analisis *pushover* menghasilkan kurva kapasitas yang menggambarkan hubungan antara gaya geser dasar dan perpindahan struktur, yang kemudian digunakan untuk mengevaluasi tingkat kinerja struktur berdasarkan standar evaluasi yang telah ditetapkan.

Dalam penelitian ini, evaluasi kinerja seismik dilakukan dengan mengacu pada FEMA 356 dan FEMA 440. FEMA 356 merupakan prosedur Metode Koefisien Perpindahan, yang menggunakan faktor-faktor empiris untuk memodifikasi respons struktur dalam menentukan target perpindahan sebagai acuan penilaian kinerja seismik yang didefinisikan dalam tiga tingkatan kinerja struktur,

yaitu *Immediate Occupancy* (IO), *Life Safety* (LS), dan *Collapse Prevention* (CP). Tingkatan kinerja ini menggambarkan ekspektasi kinerja bangunan mulai dari kerusakan minimal hingga kondisi ambang keruntuhan akibat beban gempa rencana. Sementara itu, FEMA 440 sebagai penyempurnaan atas prosedur analisis nonlinier sebelumnya dengan cakupan perbaikan meliputi prosedur modifikasi perpindahan, linearisasi ekuivalen, pengaruh *multi-degree-of-freedom*, serta interaksi tanah struktur. Dengan mengacu pada kedua standar tersebut, perilaku struktur dapat dipahami secara lebih menyeluruh, mencakup pembentukan sendi plastis, kapasitas deformasi, dan tingkat kinerja struktur terhadap beban gempa.

Objek penelitian berupa Gedung Tower B Hunian Terjangkau Nuansa Cilangkap yang berlokasi di Jakarta Timur dipilih berdasarkan karakteristik strukturnya yang menggunakan sistem ganda dengan dinding geser serta memiliki fungsi sebagai bangunan hunian apartemen. Karakteristik tersebut menjadi penting untuk dikaji karena bangunan bertingkat tinggi dengan sistem struktur ganda memiliki tuntutan terhadap kekuatan, kekakuan, dan kemampuan deformasi dalam merespons beban gempa. Selain itu, konfigurasi dinding geser pada objek penelitian tidak tersusun secara simetris sehingga berpotensi menyebabkan ketidakseimbangan distribusi kekakuan dan respons torsi pada struktur.

Kondisi tersebut menjadi dasar dilakukannya evaluasi kinerja seismik secara lebih mendalam untuk mengetahui kemampuan struktur dalam merespons beban gempa. Evaluasi dilakukan dengan meninjau kapasitas struktur, target perpindahan, pola pembentukan sendi plastis, mekanisme keruntuhan, serta tingkat kinerja struktur berdasarkan pedoman FEMA 356 dan FEMA 440. Dengan demikian, penelitian ini diharapkan dapat memberikan gambaran mengenai perilaku dan tingkat kinerja seismik gedung bertingkat tinggi dengan konfigurasi dinding geser tidak simetris.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang tersebut, maka rumusan masalah dalam penelitian ini dapat dijelaskan sebagai berikut.

1. Bagaimana kurva kapasitas struktur berdasarkan analisis *pushover*?

2. Bagaimana nilai target perpindahan struktur berdasarkan metode koefisien perpindahan FEMA 440?
3. Bagaimana mekanisme pembentukan sendi plastis, mekanisme keruntuhan, serta elemen struktur yang mengontrol mekanisme tersebut?
4. Bagaimana tingkat pemenuhan batasan simpangan dan tingkat kinerja struktur pada arah X dan Y berdasarkan kriteria *Immediate Occupancy* (IO), *Life Safety* (LS), dan *Collapse Prevention* (CP)?
5. Bagaimana tingkat kinerja seismik struktur gedung berdasarkan pedoman FEMA 356?

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan penelitian ini adalah untuk:

1. Menganalisis kurva kapasitas struktur menggunakan analisis *pushover*,
2. Mengevaluasi nilai target perpindahan struktur berdasarkan metode koefisien perpindahan FEMA 440,
3. Menganalisis pola pembentukan sendi plastis, mekanisme keruntuhan, serta mengidentifikasi elemen struktur yang mengontrol mekanisme keruntuhan,
4. Mengevaluasi pemenuhan tingkat kinerja *Immediate Occupancy* (IO), *Life Safety* (LS) dan *Collapse Prevention* (CP) serta batasan simpangan pada arah X dan Y, dan
5. Menentukan tingkat kinerja seismik struktur gedung berdasarkan pedoman FEMA 356.

1.4 Manfaat Penelitian

Manfaat dari penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Penelitian ini diharapkan dapat memperkaya literatur di bidang rekayasa gempa, khususnya mengenai evaluasi kinerja seismik gedung bertingkat tinggi akibat beban gempa menggunakan analisis *pushover*. Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi ilmiah berupa pemahaman komprehensif mengenai integrasi pemodelan sendi plastis berdasarkan FEMA 356 dan target perpindahan menggunakan FEMA 440. Selain itu, data penelitian ini dapat

menjadi referensi bagi peneliti selanjutnya dalam mengembangkan kajian serupa dengan karakteristik struktur bangunan gedung yang lebih beragam.

2. Penelitian ini dapat dijadikan panduan praktis bagi mahasiswa teknik sipil dalam memahami tahapan pemodelan dan prosedur analisis statik nonlinier. Melalui studi kasus ini, mahasiswa dapat memperoleh gambaran nyata tentang cara mengevaluasi kurva kapasitas struktur serta mengklasifikasikan tingkat kinerjanya berdasarkan kriteria *Immediate Occupancy* (IO), *Life Safety* (LS), dan *Collapse Prevention* (CP).
3. Temuan dari penelitian ini dapat dimanfaatkan oleh para praktisi dan perencana struktur sebagai salah satu dasar pertimbangan dalam merancang atau merehabilitasi gedung agar memenuhi target kinerja seismik yang diinginkan.

1.5 Batasan Masalah

Guna memberikan arah yang jelas serta menghindari perluasan pembahasan, penelitian ini dibatasi pada hal-hal berikut.

1. Objek penelitian adalah bangunan gedung Tower B Hunian Terjangkau Nuansa Cilangkap yang berlokasi di Jakarta Timur dengan jumlah 25 tingkat dan tinggi bangunan 78,6 m.
2. Analisis dilakukan dengan menggunakan klasifikasi situs Tanah Sedang (SD) sesuai ketentuan SNI 1726:2019 sebagai batasan penelitian karena data investigasi tanah proyek tidak tersedia.
3. Struktur gedung merupakan gedung beton bertulang dengan fungsi bangunan gedung sebagai hunian apartemen.
4. Pembebanan meliputi :
   a. Beban mati, termasuk beban dinding pada struktur portal yang diperhitungkan sebagai beban mati tambahan (SIDL),
   b. Beban hidup, dan
   c. Beban gempa.
5. Analisis struktur dibatasi pada gedung dengan sistem ganda yang memiliki konfigurasi dinding geser.

6. Penelitian ini dibatasi pada evaluasi kinerja struktur gedung menggunakan analisis statik nonlinier (*pushover analysis)*. Pemodelan struktur, definisi sendi plastis, dan kriteria tingkat kinerja mengacu pada FEMA 356, sedangkan penentuan target perpindahan struktur dilakukan berdasarkan penyesuaian prosedur FEMA 440.
7. Analisis konfigurasi dinding geser dilakukan pada arah X dan Y.
8. Standar peraturan yang digunakan adalah sebagai berikut.
   a. Beban Minimum untuk Perancangan Bangunan Gedung dan Struktur Lain (SNI 1727:2020),
   b. Tata Cara Perencanaan Ketahanan Gempa untuk Struktur Bangunan Gedung dan Non Gedung (SNI 1726:2019),
   c. Persyaratan Beton Struktural untuk Bangunan Gedung (SNI 2847:2019),
   d. *Federal Emergency Management Agency* (FEMA 356), dan
   e. *Federal Emergency Management Agency* (FEMA 440*)*.
9. Pemodelan struktur menggunakan ETABS 22.7, dengan properti material sesuai data perencanaan.
10. Analisis tidak mencakup desain ulang tulangan, analisis fondasi, analisis biaya, serta faktor-faktor arsitektural.
11. Tidak mengevaluasi respon nonstruktural gedung.
12. Pengaruh beban angin, dan beban ledakan tidak diperhitungkan.

BAB II
TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Ringkasan Penelitian Terdahulu

Banyak penelitian yang telah dilakukan terkait evaluasi kinerja bangunan dengan analisis *pushover*. Studi-studi tersebut menjadi dasar untuk memahami perilaku struktur dan pengaruh konfigurasi elemen struktural terhadap respons bangunan. Berikut merupakan rangkuman beberapa penelitian terdahulu yang dapat dijadikan sebagai tinjauan pustaka pada penelitian ini.

1. Evaluasi Kinerja Struktur Atas Pada Desain Gedung Perkantoran Menggunakan Analisis *Pushover* Berdasarkan ATC-40

   Penelitian ini dilakukan oleh Syahira (2023)**.** Penelitian ini dilakukan dengan mengevaluasi kinerja struktur atas pada desain gedung perkantoran 4 lantai di Kota Padang yang berada pada daerah rawan gempa dengan kondisi tanah lunak, menggunakan metode analisis statik nonlinier (*pushover analysis)* berdasarkan ATC-40 dengan bantuan *software* SAP 2000. Tujuan penelitian ini untuk memperhitungkan tingkat kinerja struktur dengan melihat kurva kapasitas, titik kinerja, serta mekanisme pembentukan sendi plastis. Hasil penelitian menunjukkan bahwa pada gempa MCE_R diperoleh titik kinerja arah X sebesar V = 20149,839 kN dan δ = 0,309 m serta arah Y sebesar V = 26643,810 kN dan δ = 0,231 m, sedangkan pada gempa DBE arah X sebesar V = 16186,151 kN dan δ = 0,175 m serta arah Y sebesar V = 20103,415 kN dan δ = 0,131 m. Tingkat kinerja struktur pada gempa DBE berada pada tingkat *Immediate Occupancy*, sedangkan pada gempa MCE_R berada pada tingkat *Damage Control*, dengan mekanisme keruntuhan yang terjadi adalah *strong column–weak beam*. Secara keseluruhan, penelitian ini menyimpulkan bahwa struktur gedung telah memenuhi kriteria desain berbasis kinerja dan mampu menahan beban gempa sesuai standar tanpa mengalami kegagalan total.

2. Evaluasi Struktur Gedung Bertingkat Banyak Akibat Alih Fungsi Dengan Analisis *Pushover*

   Penelitian ini bersumber dari tugas akhir oleh Sutoko (2023). memfokuskan penelitian pada Gedung Hotel Mutiara di Jalan Malioboro, Yogyakarta. Tujuan penelitian ini adalah mengevaluasi kinerja seismik gedung akibat adanya alih fungsi untuk memperhitungkan kurva kapasitas, titik kinerja, dan mekanisme sendi plastis yang terjadi. Metode analisis yang diterapkan adalah analisis statik nonlinier (*pushover analysis*) dengan metode spektrum kapasitas (ATC-40) menggunakan bantuan *software* SAP2000. Hasil analisis menunjukkan nilai titik kinerja pada arah X sebesar V_t = 27594,093 kN dengan perpindahan (δ_t) sebesar 0,175 m, sedangkan pada arah Y diperoleh V_t = 29680,384 kN dengan perpindahan (δ_t) sebesar 0,002054 m. Kesimpulan penelitian menetapkan tingkat kinerja struktur pada tingkat *Immediate Occupancy* (IO) yang menunjukkan gedung aman pasca-gempa dengan kerusakan struktural minimal.
3. Analisis Kinerja Gedung Perkantoran 4 Lantai Dengan Metode *Pushover Analysis*

   Penelitian ini bersumber dari tugas akhir oleh Nugroho (2023)**.** Berfokus pada objek bangunan Gedung Joint Office Tegar Utama Group & RBI Law Firm di Kota Balikpapan. Tujuan utama penelitian ini adalah mengevaluasi kinerja seismik gedung tersebut untuk memperhitungkan kurva kapasitas, titik kinerja, dan skema sendi plastis yang terbentuk. Metode yang digunakan adalah analisis statik nonlinier (*pushover analysis)* dengan prosedur metode spektrum kapasitas mengacu pada ATC-40 dengan bantuan *software* SAP2000. Hasil analisis menunjukkan bahwa gaya lateral pada arah X sebesar 4080,403 kN dengan perpindahan sebesar 0,19861 m, sedangkan gaya lateral pada arah Y sebesar 9030,155 dengan perpindahan sebesar 0,320 m. Nilai titik kinerja diperoleh dengan target perpindahan (δ_t) pada arah X mencapai 0,035 m dan gaya gempa maksimum (V_t) sebesar 1296,198 kN, sedangkan target perpindahan (δ_t) pada arah Y mencapai 0,042 m dengan gaya gempa maksimum (V_t) sebesar 1279,610 kN. Berdasarkan data tersebut, kesimpulan penelitian menetapkan tingkat kinerja struktur berada pada tingkat *Immediate Occupancy* (IO), yang berarti

gedung aman pasca-gempa dengan risiko korban jiwa yang minimal dan bangunan dapat segera difungsikan kembali.

4. Analisis Kinerja Bangunan Menggunakan Metode Analisis *Pushover* Terhadap Struktur Bangunan Bertingkat Banyak Sesuai Standar SNI 1726:2019 Dan ATC-40

   Penelitian ini bersumber dari tugas akhir oleh Abdillah (2024). Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi kinerja struktur bangunan pada gedung Teaching Industry Learning Center (TILC) di Yogyakarta terhadap beban gempa. Analisis dilakukan dengan menggunakan metode analisis statik nonlinier (*pushover analysis)* berdasarkan SNI 03:1726:2019 dan ATC-40 dengan bantuan *software* ETABS. Evaluasi dilakukan dengan analisis kurva kapasitas, penentuan titik kinerja, serta penilaian tingkat kinerja struktur berdasarkan parameter simpangan dan mekanisme sendi plastis. Hasil analisis menunjukkan bahwa kurva kapasitas arah X berhenti pada *step* ke-119 dengan nilai perpindahan (δ) sebesar 192,418 mm dengan gaya geser dasar (V) sebesar 195618,2225 kN, sedangkan untuk arah Y berhenti pada *step* ke-176 dengan nilai perpindahan (δ) sebesar 278,617 mm dengan gaya geser dasar (V) sebesar 211307,1955 kN. Berdasarkan simpangan total, Tingkat kinerja struktur pada arah X dan Y berada pada kategori *Immediate Occupancy* (IO), namun berdasarkan *inelastic* simpangan menunjukkan kondisi *Damage Control*. Secara keseluruhan, struktur gedung masih tergolong aman dan mampu menahan beban gempa tanpa mengalami keruntuhan, meskipun telah mengalami deformasi inelastik pada kondisi tertentu.

5. Evaluasi Kinerja Seismik Gedung Bertingkat Banyak Dengan Metode Analisis *Pushover* Berdasarkan Pedoman ATC-40 Dan FEMA 356 (Studi Kasus : Hotel Oakwood Yogyakarta)

   Penelitian ini bersumber dari tugas akhir oleh Bahtiar (2025). Penelitian ini mengkaji kinerja struktur gedung Hotel Oakwood Yogyakarta sebagai objek penelitian berupa bangunan beton bertulang 10 lantai yang berfungsi sebagai hunian sementara di kawasan rawan gempa. Penelitian bertujuan untuk memperhitungkan kurva kapasitas, titik kinerja, tingkat kinerja struktur, serta

mekanisme sendi plastis akibat beban gempa. Metode analisis yang digunakan adalah metode analisis statik nonlinier (*pushover analysis)* dengan bantuan *software* ETABS, mengacu pada metode spektrum kapasitas (ATC-40) dan metode koefisien perpindahan (FEMA 356). Hasil analisis menunjukkan nilai titik kinerja berdasarkan ATC-40 untuk arah X sebesar V = 17773,776 kN dan δ = 0,126 m, serta arah Y sebesar V = 21340,786 kN dan δ = 0,106 m; sedangkan berdasarkan FEMA 356 untuk arah X sebesar V = 17716,38 kN dan δ = 0,125 m, dan arah Y sebesar V = 13841,35 kN dan δ = 0,031 m. Selain itu, mekanisme sendi plastis menunjukkan pola *strong column–weak beam* (SCWB), di mana plastisitas terjadi lebih dahulu pada balok. . Kesimpulannya, berdasarkan pedoman ATC-40 dan FEMA 356, struktur gedung berada pada tingkat kinerja *Immediate Occupancy (IO)* untuk arah X dan Y, yang berarti bangunan masih aman, mengalami kerusakan minimal, dan tetap dapat difungsikan setelah terjadi gempa.

2.2 Perbandingan Penelitian yang akan Dilakukan dengan Penelitian Terdahulu

Berikut adalah perbedaan antara penelitian yang akan dilakukan penulis dengan penelitian terdahulu yang dapat dilihat pada Tabel 2.1.

Tabel 2. 1 Perbandingan Penelitian Terdahulu dan Sekarang

Aspek	**Penelitian Terdahulu**					**Penelitian Sekarang**
Peneliti	**Maritza Syifa Syahira, 2023**	**Rizqullah Ahnaf Rafi Sutoko, 2023**	**Pratisto Ganang Nugroho, 2023**	**Fikri Abdillah, 2024**	**Aulia Ananda Bahtiar, 2025**	**Naufal Rauf Prasetya , 2025**
Judul Penelitian	Evaluasi Kinerja Struktur Atas Pada Desain Gedung Perkantoran Menggunakan Analisis *Pushover* Berdasarkan ATC-40	Evaluasi Struktur Gedung Bertingkat Banyak Akibat Alih Fungsi Dengan Analisis *Pushover*	Analisis Kinerja Gedung Perkantoran 4 Lantai Dengan Metode *Pushover Analysis*	Analisis Kinerja Bangunan Menggunakan Metode Analisis *Pushover* Terhadap Struktur Bangunan Bertingkat Banyak Sesuai Standar SNI 03:1726:2019 Dan ATC-40	Evaluasi Kinerja Seismik Gedung Bertingkat Banyak Dengan Metode Analisis *Pushover* Berdasarkan Pedoman ATC-40 Dan FEMA 356 (Studi Kasus : Hotel Oakwood Yogyakarta)	Evaluasi Kinerja Seismik Bangunan Gedung Bertingkat Tinggi Menggunakan Analisis *Pushover* Berdasarkan FEMA 356 dan FEMA 440.

Lanjutan Tabel 2.1 Perbandingan Penelitian Terdahulu dan Sekarang

Aspek	**Penelitian Terdahulu**					**Penelitian Sekarang**
Peneliti	**Maritza Syifa Syahira, 2023**	**Rizqullah Ahnaf Rafi Sutoko, 2023**	**Pratisto Ganang Nugroho, 2023**	**Fikri Abdillah, 2024**	**Aulia Ananda Bahtiar, 2025**	**Naufal Rauf Prasetya , 2025**
Tujuan Penelitian	Menentukan serta membandingkan nilai parameter gaya geser dasar, perpindahan, tingkat kinerja berdasarkan ATC-40, serta mekanisme sendi plastis pada struktur gedung akibat beban gempa DBE (*Design Basis Earthquake*) dan MCE_R (*Maximum Considered Earthquake, Risk-Targeted*) melalui analisis *pushover*.	Mengevaluasi kinerja seismik gedung akibat adanya alih fungsi untuk mengukur kurva kapasitas, tingkat kinerja bangunan, dan mekanisme sendi plastis yang terjadi.	Mengevaluasi kinerja tahanan gempa berdasarkan titik kinerja dan terjadinya sendi plastis pada struktur dengan metode *pushover* sesuai pedoman ATC 40.	Mengevaluasi kinerja struktur melalui analisis *pushover* untuk memperoleh kurva kapasitas yang merepresentasikan perilaku struktural terhadap beban lateral. Penentuan kriteria kinerja seismik dilakukan berdasarkan nilai titik kinerja merujuk pada standar ATC-40, serta mengidentifikasi pola sendi plastis.	Melakukan evaluasi kinerja struktur terhadap gempa menggunakan analisis *pushover* untuk mengukur kurva kapasitas dan mekanisme sendi plastis yang terjadi pada struktur gedung saat dikenai beban gempa, dimana tingkat kinerja struktur dievaluasi berdasarkan pedoman ATC-40 dan FEMA 356.	Mengevaluasi kinerja seismik gedung menggunakan analisis *pushover* dengan dengan meninjau kurva kapasitas, titik kinerja, serta pemenuhan tingkat kinerja pada arah X dan Y. Analisis juga mencakup pengamatan pola pembentukan sendi plastis dan mekanisme keruntuhan guna mengidentifikasi elemen struktur yang mengontrol perilaku seismik gedung.

Lanjutan Tabel 2.1 Perbandingan Penelitian Terdahulu dan Sekarang

Peneliti	Maritza Syifa Syahira, 2023	Rizqullah Ahnaf Rafi Sutoko, 2023	Pratisto Ganang Nugroho, 2023	Fikri Abdillah, 2024	Aulia Ananda Bahtiar, 2025	Naufal Rauf Prasetya, 2025
Objek Penelitian	Gedung perkantoran 4 lantai di Kota Padang dengan tinggi total bangunan 17 m.	Gedung Hotel Mutiara di Jalan Malioboro Yogyakarta dengan jumlah lantai 8 lantai dan ketinggian 28 m.	Gedung Joint Office Tegar Utama Group & RBI Law Firm dengan jumlah lantai 4 lantai dan ketinggian 16 m.	Gedung Teaching Industry Learning Center (TILC) di Yogyakarta dengan jumlah lantai 9 lantai dengan tinggi total bangunan 37,4 m.	Hotel Oakwood Yogyakarta dengan jumlah lantai 10 lantai dan tinggi bangunan total 35,75 m.	Gedung Tower B Hunian Terjangkau Nuansa Cilangkap dengan jumlah lantai 25 lantai dan ketinggian 78,6 m.
Metode Penelitian	Pengumpulan data, dan studi literatur, memodelkan struktur dengan *software* SAP2000, melakukan prosedur analisis *pushover* berpedoman pada standar ATC-40.	Pengumpulan data dan studi literatur, memodelkan dengan program SAP2000, melakukan analisis pushover, evaluasi tingkat kinerja struktur dilakukan dengan pedoman ATC-40	Studi literatur dan pengumpulan data bangunan, memodelkan struktur (kolom, balok, dan pelat) bangunan dengan *software* SAP2000, analisis pushover, evaluasi kinerja struktur.	Pengumpulan data teknis dan studi literatur, melakukan pemodelan struktur 3D berdasarkan *DED* menggunakan *software* ETABS. melakukan analisis statik *pushover*.	Studi literatur dan pengumpulan data. Pemodelan desain struktur dan pembebanan pada *software* ETABS. Pendefinisian sendi plastis, analisis *pushover* berdasarkan 2 acuan yaitu ATC-40 dan FEMA 356.	Pengumpulan data bangunan dan studi literatur, melakukan pemodelan bangunan dengan *software ETABS*, melakukan analisis *pushover* dengan berpedoman pada FEMA 356 dan FEMA 440.

Lanjutan Tabel 2.1 Perbandingan Penelitian Terdahulu dan Sekarang

Aspek	**Penelitian Terdahulu**					**Penelitian Sekarang**
Peneliti	**Maritza Syifa Syahira, 2023**	**Rizqullah Ahnaf Rafi Sutoko, 2023**	**Pratisto Ganang Nugroho, 2023**	**Fikri Abdillah, 2024**	**Aulia Ananda Bahtiar, 2025**	**Naufal Rauf Prasetya, 2025**
Hasil Penelitian	Hasil penelitian menunjukkan bahwa tingkat kinerja struktur berada pada kategori *Damage Control* (DC) untuk beban MCE dan *Immediate Occupancy* (IO) untuk beban DBE. Mekanisme sendi plastis diawali pada balok sebelum kolom.	Hasil penelitian menunjukkan bahwa struktur gedung berada pada tingkat kinerja *Immediate Occupancy* (IO), dengan arah Y lebih kaku dibandingkan arah X. Mekanisme sendi plastis diawali pada balok dan struktur mengalami kerusakan pada beberapa elemen tanpa mengalami keruntuhan total. .	Hasil penelitian menunjukkan bahwa struktur gedung memenuhi tingkat kinerja *Immediate Occupancy* (IO) berdasarkan metode ATC-40, dengan kapasitas arah Y lebih besar daripada arah X. Evaluasi SCWB menunjukkan beberapa elemen belum memenuhi kriteria.	Hasil penelitian menunjukkan bahwa struktur gedung arah Y memiliki kapasitas struktur lebih besar dibandingkan arah Y. Tingkat kinerja struktur berada pada kategori *Immediate Occupancy* (IO). Mekanisme sendi plastis diawali pada elemen balok sebelum kolom.	Hasil penelitian menunjukkan bahwa struktur gedung berada pada tingkat kinerja *Immediate Occupancy* (IO) berdasarkan metode ATC-40 dan FEMA 356, dengan arah Y lebih kaku dibandingkan arah X. Mekanisme sendi plastis mengikuti prinsip *strong column–weak beam* (SCWB). .	Hasil penelitian menunjukkan bahwa tingkat kinerja gedung arah Y lebih besar dibandingkan arah X. Tingkat kinerja struktur berada pada kategori *Life Safety* (LS) untuk arah X dan *Immediate Occupancy* (IO) untuk arah Y, dengan mekanisme sendi plastis yang dominan terjadi pada balok meskipun terdapat beberapa kolom dengan tingkat *Collapse Prevention* (CP).

2.3 Keaslian Penelitian

Bersumber dari beberapa penelitian yang telah dilakukan sebelumnya yang terangkum dalam Tabel 2.1, penelitian yang akan dilakukan merupakan karya asli dan bebas dari plagiasi. Berikut adalah beberapa perbedaan terhadap penelitian pada tugas akhir ini.

1. Objek yang akan dianalisis adalah bangunan gedung Tower B Hunian Terjangkau Nuansa Cilangkap yang berlokasi di Jl. Raya Cilangkap, Kel. Cilangkap, Kec. Cipayung, Jakarta Timur.
2. Struktur bangunan yang dievaluasi merupakan sistem ganda yang telah menggunakan dinding geser, namun memiliki konfigurasi penempatan dinding geser yang tidak simetris.
3. Analisis *pushover* dilakukan dengan menggunakan bantuan perangkat lunak ETABS dan akan dimodelkan secara 3D dengan ukuran serta spesifikasi sesuai data bangunan.
4. Penentuan tingkat kinerja struktur berdasarkan pedoman FEMA 356, sedangkan penentuan target perpindahan struktur akibat gempa dilakukan berdasarkan penyesuaian prosedur FEMA 440.

Kebaruan penelitian ini terletak pada evaluasi kinerja seismik secara menyeluruh terhadap struktur gedung bertingkat tinggi yang sejak awal sudah mengadopsi sistem ganda namun memiliki konfigurasi dinding geser yang tidak simetris. Kondisi ketidaksimetrisan ini berpotensi menimbulkan distribusi kekakuan yang tidak merata dan respons torsi yang signifikan saat menerima beban gempa, namun belum dievaluasi secara khusus menggunakan pendekatan analisis *pushover*. Berdasarkan uraian tersebut, *research positioning* penelitian ini berada pada ranah evaluasi kinerja seismik bangunan eksisting bertingkat tinggi dengan ketidaksimetrisan struktur dinding geser. Penelitian ini mengevaluasi sejauh mana struktur mampu memenuhi target kinerja seismik yang disyaratkan, mencakup pembentukan sendi plastis, mekanisme keruntuhan, pemenuhan batasan simpangan, serta klasifikasi tingkat kinerja *Immediate Occupancy* (IO), *Life Safety* (LS), dan *Collapse Prevention* (CP), dengan menggunakan metode analisis *pushover*

berdasarkan FEMA 356 dalam menentukan tingkat kinerja struktur dan FEMA 440 dalam menentukan target perpindahan.

BAB III
LANDASAN TEORI

3.1 Fenomena dan Klasifikasi Gempa Bumi

Gempa bumi didefinisikan sebagai guncangan mendadak di atas permukaan tanah yang dipicu oleh rambatan gelombang seismik dari dalam kerak bumi (Ardika, 2023). Berdasarkan penyebabnya, gempa dibedakan menjadi beberapa jenis, yaitu gempa tektonik akibat pergeseran lempeng bumi, gempa vulkanik akibat aktivitas gunung berapi, gempa buatan akibat aktivitas manusia seperti peledakan atau mesin berat, gempa runtuhan akibat tanah longsor atau runtuhan di area pertambangan, serta gempa tumbukan akibat benturan asteroid atau meteor dengan bumi.

3.2 Konsep Bangunan Tahan Gempa

3.2.1 Definisi Bangunan Tahan Gempa

Konsep struktur bangunan tahan gempa didefinisikan sebagai konstruksi yang dirancang khusus untuk mencegah kerusakan secara langsung saat terjadi gempa bumi, meskipun proses realisasinya cenderung memerlukan biaya yang lebih tinggi (Bahtiar, 2025).

3.2.2 Karakteristik Gedung Bertingkat Tinggi

Berdasarkan SNI 1726:2019, bangunan bertingkat tinggi secara teknis didefinisikan sebagai struktur bangunan dengan ketinggian struktural melebihi 40 meter. Zhang dan Far (2022) menyatakan bahwa bangunan bertingkat tinggi memiliki karakteristik respons struktural yang berbeda dibandingkan bangunan bertingkat rendah, terutama ketika menerima beban gempa. Pengaruh beban horizontal terhadap bangunan bertingkat tinggi tidak bersifat linier, melainkan meningkat secara eksponensial seiring bertambahnya ketinggian bangunan. Momen guling yang bekerja pada struktur berbanding lurus dengan kuadrat tingginya, sedangkan defleksi lateral yang terjadi pada puncak bangunan berbanding lurus

dengan pangkat empat dari tinggi bangunan tersebut. Kondisi ini menjadikan simpangan lateral sebagai faktor penentu utama dalam perencanaan struktur, sekaligus menjadikan pengendalian deformasi sebagai tantangan kritis untuk mencegah keruntuhan bangunan saat terjadi gempa.

3.2.3 Kinerja Struktur Terhadap Beban Gempa

Pada bangunan bertingkat tinggi, analisis struktur harus mempertimbangkan efek dinamik gempa, kategori desain seismik, dan batas simpangan antartingkat guna menjamin kinerja gedung saat menerima beban lateral. Menurut Salim dan Siswanto (2018), terdapat metode pembebanan gempa yang dikenal dengan konsep Pembebanan Dua Tingkat. Konsep ini mensyaratkan bangunan mampu menahan beban gempa ringan hingga menengah dengan periode ulang kurang dari 75 tahun yang terjadi berulang kali, dan satu kejadian gempa besar dengan periode ulang 2500 tahun. Penerapannya mencakup sambungan yang kuat, material berstandar, dan pelaksanaan konstruksi yang tepat, di mana setiap elemen struktur diperhitungkan terhadap beban gempa.

3.3 Pembebanan Struktur

3.3.1 Beban Mati

Berdasarkan SNI 1727:2020 pasal 3.1.1, beban mati merupakan berat keseluruhan material konstruksi yang terpasang pada suatu bangunan gedung, yang mencakup elemen-elemen seperti dinding, lantai, atap, plafon, tangga, partisi permanen, *finishing*, klading, serta komponen arsitektural dan struktural lainnya. Selain itu, beban mati juga meliputi berat peralatan layanan terpasang lainnya, termasuk derek dan sistem pemindahan material. Berat sendiri bahan bangunan untuk bangunan gedung dapat ditentukan berdasarkan peraturan Pedoman Perencanaan Pembebanan Untuk Rumah dan Gedung SKBI-1987 Tabel 1. Berat Sendiri Bahan Bangunan dan Komponen Gedung.

3.3.2 Beban Hidup

Berdasarkan SNI 1727:2020 pasal 4.1, beban hidup adalah beban yang berasal dari pengguna dan penghuni suatu bangunan gedung atau struktur lainnya, yang tidak termasuk dalam kategori beban konstruksi maupun beban lingkungan seperti beban angin, beban hujan, beban gempa, beban banjir, atau beban mati. Penentuan penggunaan beban hidup dapat merujuk pada Tabel 4-1 Beban Hidup Terpusat Merata Minimum, L*0* dan Beban Hidup Terpusat Minimum dalam SNI 1727:2020.

3.3.3 Beban Gempa

Berdasarkan SNI 1727:2020 pasal 3.3.3, beban gempa adalah semua beban statik ekivalen yang bekerja pada suatu bangunan atau bagian dari bangunan, yang berfungsi meniru efek dari pergerakan tanah yang disebabkan oleh gempa bumi.

3.3.4 Kombinasi Pembebanan

Dalam tahapan analisis struktur gedung bertingkat, penentuan kombinasi pembebanan yang digunakan mengacu pada SNI 1726:2019 untuk mendapatkan kondisi pembebanan paling kritis. Berikut adalah kombinasi pembebanan yang digunakan dalam penelitian ini.

1. $U = 1{,}4D$ (3.1)
2. $U = 1{,}2D + 1{,}6L$ (3.2)
3. $U = 1{,}2D + 1{,}0L + 1{,}0E_h + 0{,}3E_v$ (3.3)
4. $U = 1{,}2D + 1{,}0L + 1{,}0E_h - 0{,}3E_v$ (3.4)
5. $U = 1{,}2D + 1{,}0L - 1{,}0E_h + 0{,}3E_v$ (3.5)
6. $U = 1{,}2D + 1{,}0L - 1{,}0E_h - 0{,}3E_v$ (3.6)
7. $U = 1{,}2D + 1{,}0L + 0{,}3E_h + 1{,}0E_v$ (3.7)
8. $U = 1{,}2D + 1{,}0L + 0{,}3E_h - 1{,}0E_v$ (3.8)
9. $U = 1{,}2D + 1{,}0L - 0{,}3E_h + 1{,}0E_v$ (3.9)
10. $U = 1{,}2D + 1{,}0L - 0{,}3E_h - 1{,}0E_v$ (3.10)
11. $U = 1{,}0D + 0{,}5L$ (3.11)

dengan:

D = Beban mati,

E_v = Beban gempa vertikal,

E_h = Beban gempa horizontal, dan

L = Beban hidup.

3.4 Ketentuan Umum Perancanaan Struktur Bangunan Gedung Tahan Gempa Berdasarkan SNI 1726:2019

3.4.1 Kategori Risiko Struktur Bangunan dan Faktor Keutamaan Gempa

1. Penentuan kategori risiko bangunan

   Kategori risiko adalah pengelompokan bangunan dan struktur berdasarkan tingkat kerentanan terhadap keselamatan jiwa, ekonomi, dan fungsi penting apabila struktur tersebut mengalami kerusakan akibat gempa. Penentuan kategori risiko bangunan dapat ditentukan berdasarkan peraturan SNI 1726:2019 Tabel 3. Kategori Risiko Bangunan Gedung dan Non gedung untuk Beban Gempa.

2. Faktor keutamaan gempa

   Faktor keutamaan gempa berkaitan langsung dengan kategori risiko bangunan. Faktor ini digunakan untuk meningkatkan beban gempa rencana, dengan tujuan agar struktur mampu menahan beban gempa yang memiliki periode ulang lebih panjang sehingga tingkat kerusakan yang diharapkan lebih kecil. Adapun nilai faktor keutamaan gempa (I_e) untuk tiap kategori risiko bangunan dapat dilihat pada Tabel 3.1.

Tabel 3. 1 Faktor Keutamaan Gempa

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

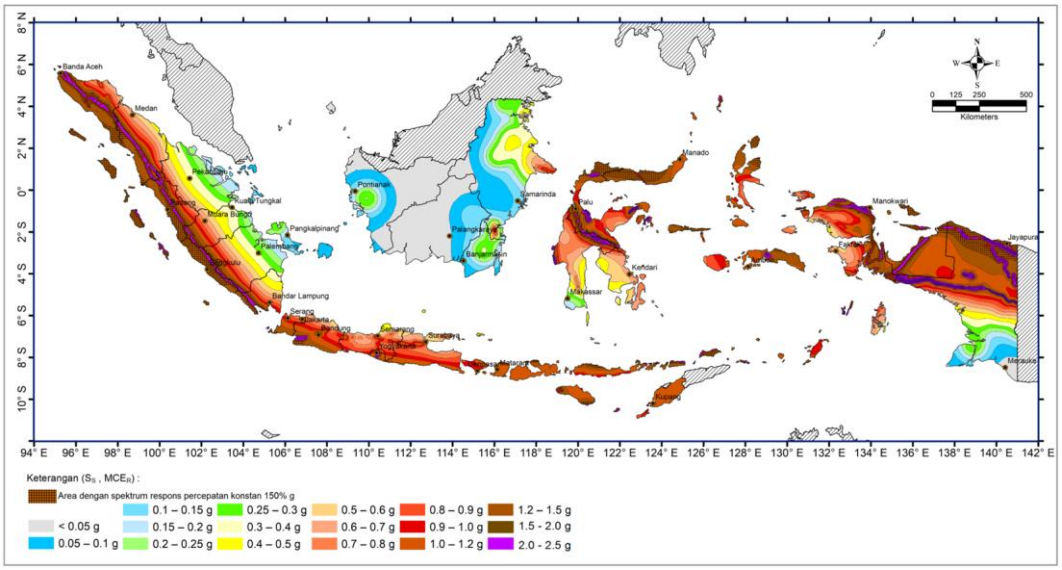
Sumber: SNI 1726:2019

3.4.2 Klasifikasi Situs Tanah

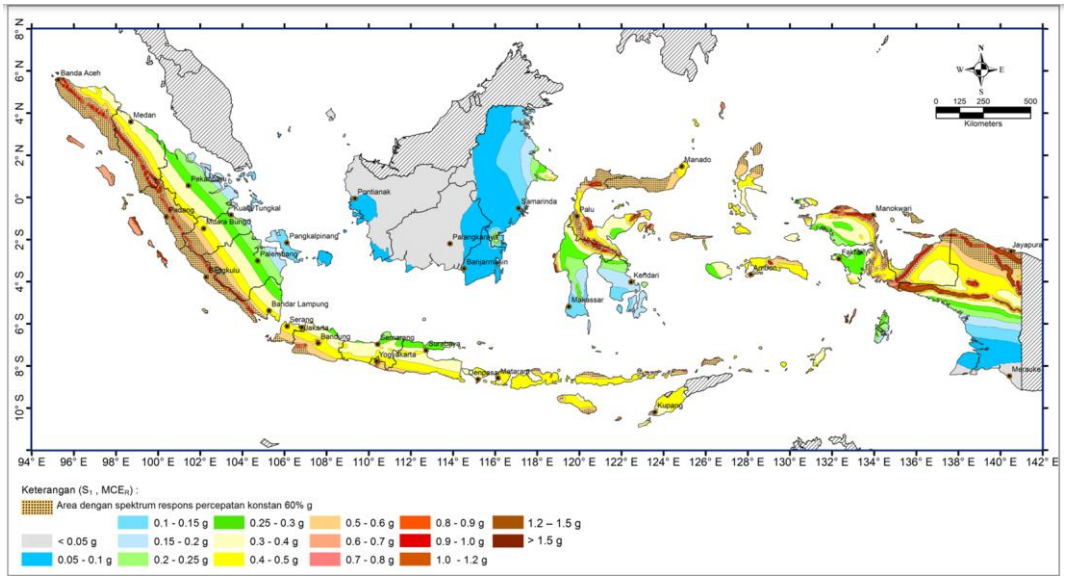
Menurut SNI 1726:2019 Klasifikasi situs tanah adalah pengelompokan kondisi tanah di lokasi bangunan ke dalam beberapa kelas berdasarkan sifat dinamik tanah terutama kekakuan dan kemampuan merambatkan gelombang gempa. Klasifikasi situs terbagi menjadi 6 kelas situs, yaitu batuan keras (SA), batuan (SB), tanah keras, sangat padat dan batuan lunak (SC), tanah sedang (SD), tanah lunak (SE), dan tanah khusus yang membutuhkan investigasi geoteknik spesifik dan analisis respons spesifik (SF). Adapun penentuan jenis tanah dapat mengacu pada peraturan SNI 1726:2019 Pasal 5.3 Tabel 5. Klasifikasi situs.

3.4.3 Parameter Percepatan Gempa

Parameter percepatan batuan dasar pada periode pendek (S_S) dan percepatan batuan dasar pada periode 1 detik (S_1) harus ditetapkan berdasarkan nilai respons spektral percepatan pada periode 0,2 detik dan 1 detik yang diperoleh dari peta gerak tanah seismik dengan probabilitas terlampaui sebesar 2% dalam kurun 50 tahun (MCE_R, 2% dalam 50 tahun), dan dinyatakan dalam satuan desimal terhadap percepatan gravitasi. Berdasarkan SNI 1726:2019 Besaran nilai S_S dan S_1 yang digunakan dapat dilihat pada Gambar 3.1 dan Gambar 3.2.



Gambar 3. 1 Parameter Gerak Tanah Ss, Wilayah Indonesia Untuk Spektrum Respons 0,2 Detik (Redaman Kritis 5%)
(Sumber: SNI 1726:2019)



Gambar 3. 2 Parameter Gerak Tanah S1, Wilayah Indonesia Untuk Spektrum Respons 0,2 Detik (Redaman Kritis 5%)
(Sumber: SNI 1726:2019)

Dalam menentukan nilai respons spektrum, diperlukan faktor amplifikasi getaran pada periode 0,2 detik (F_a), dan faktor amplifikasi getaran pada periode 1 detik (F_v) sebagai pengali terhadap parameter gerak tanah S_S dan S_1. Selanjutnya,

nilai respons spektrum pada periode pendek (S_{MS}) maupun pada periode panjang (S_{M1}) dapat dihitung menggunakan Persamaan 3.12 dan 3.13.

$$S_{MS} = F_a \, . \, S_s \quad (3.12)$$

$$S_{M1} = F_v \, . \, S_1 \quad (3.13)$$

dengan:

F_a = Faktor amplifikasi getaran terkait percepatan pada getaran periode pendek,

F_v = Koefisien situs untuk periode pendek,

S_s = Parameter percepatan respon spektrum MCE_R dari peta gempa pada periode pendek, dan

S_1 = Parameter percepatan respon spektrum MCE_R dari peta gempa pada periode 1 detik.

3.4.4 Parameter Percepatan Spektral Desain

Dalam menentukan parameter percepatan spektral desain untuk periode pendek (S_{DS}) dan pada periode 1 detik (S_{D1}), dapat melalui Persamaan 3.14 dan Persamaan 3.15.

$$S_{DS} = \frac{2}{3} S_{MS} \quad (3.14)$$

$$S_{D1} = \frac{2}{3} S_{M1} \quad (3.15)$$

dengan:

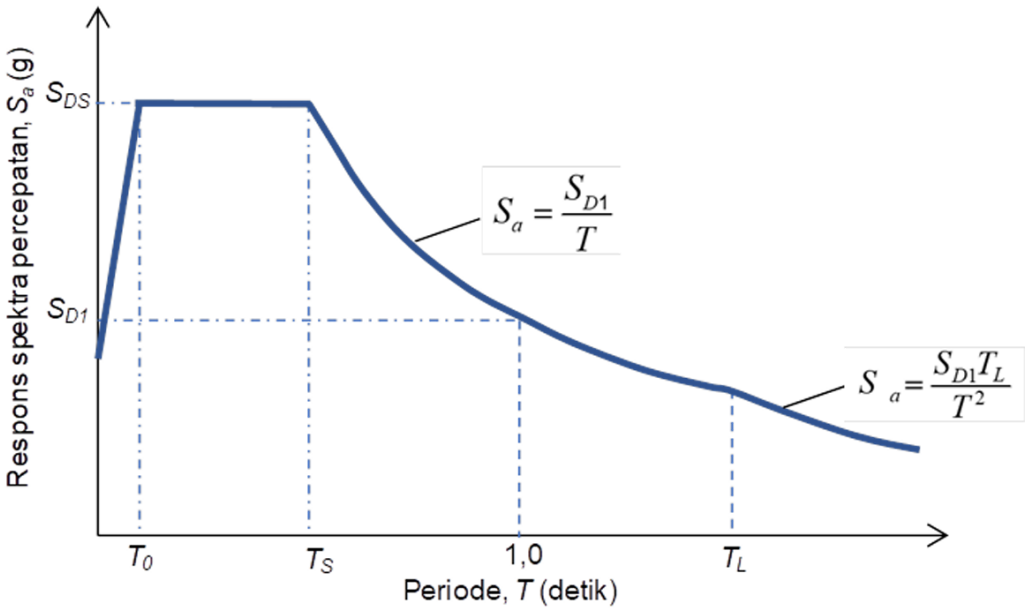
S_{DS} = Parameter spektral desain pada periode pendek, redaman 5%, dan

S_{D1} = Parameter spektral desain pada periode 1 detik, redaman 5%.

3.4.5 Spektrum Respons Desain

Spektrum respons desain merupakan grafik yang menggambarkan hubungan antara periode getar alami struktur (T) dan percepatan spektral desain(S_a). Besaran

nilai respons tersebut dipengaruhi oleh beberapa parameter utama, meliputi periode getar, rasio redaman, tingkat daktilitas, serta klasifikasi situs tanah lokal. Apabila prosedur analisis gerak tanah berbasis situs spesifik tidak diterapkan, maka kurva spektrum respons desain wajib disusun secara manual dengan mengacu pada Gambar 3.3.



Gambar 3. 3 Spektrum Respons Desain
(Sumber: SNI 1726:2019)

Untuk memperoleh nilai periode getar fundamental struktur yang digunakan dalam kurva spektrum respon desain, digunakan Persamaan 3.16 dan Persamaan 3.17.

$$T_S = \frac{S_{D1}}{S_{DS}} \quad (3.16)$$

$$T_0 = 0{,}2\,\frac{S_{D1}}{S_{DS}} \quad (3.17)$$

Untuk nilai parameter percepatan respon spektrum (S_a) dapat diperoleh dengan mengacu pada ketentuan-ketentuan berikut.

1. Untuk periode yang nilainya lebih kecil dari nilai T_0, spektrum respon percepatan desain (S_a) diambil dengan Persamaan 3.18.

$$S_a = S_{DS}\,(0{,}4+0{,}6\,\frac{T}{T0}) \quad (3.18)$$

2. Untuk periode yang nilainya lebih besar sama dengan nilai T_0 dan lebih kecil sama dengan nilai T_S , spektrum respon percepatan desain (S_a) sama dengan S_{DS}.
3. Untuk periode yang nilainya lebih besar dari nilai T_S tetapi lebih kecil sama dengan T_L, spektrum respon percepatan desain (S_a) diambil dengan Persamaan 3.19.

$$S_a = \frac{S_{D1}}{T} \tag{3.19}$$

4. Untuk periode yang nilainya lebih besar dari nilai T_L, spektrum respon percepatan desain (S_a) diambil dengan Persamaan 3.20.

$$S_a = \frac{S_{D1}\, T_L}{T^2} \tag{3.20}$$

dengan :
S_{DS} = Parameter spektral desain pada periode pendek, redaman 5%,
S_{D1} = Parameter spektral desain pada periode 1 detik, redaman 5%,
T = Periode getar fundamental struktur, dan
T_L = Peta transisi periode panjang.

3.4.6 Kategori Desain Seismik

Berdasarkan SNI 1726:2019, struktur dengan kategori risiko I sampai III pada wilayah $S_1 \geq 0{,}75$ diklasifikasikan sebagai KDS E, sedangkan kategori risiko IV ditetapkan sebagai KDS F. Struktur lainnya ditentukan berdasarkan nilai S_{DS} dan S_{D1} sesuai kategori risikonya. Setiap bangunan dan struktur wajib ditetapkan ke dalam kategori desain seismik yang lebih ketat di antara hasil klasifikasi yang diperoleh, dengan mengacu pada Tabel 3.2 dan Tabel 3.3.

Tabel 3. 2 Kategori Desain Seismik berdasarkan Parameter Respons Percepatan pada Periode Pendek

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

Sumber: SNI 1726:2019

Tabel 3. 3 Kategori Desain Seismik berdasarkan Parameter Respons Percepatan pada Periode 1 Detik

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

Sumber: SNI 1726:2019

3.4.7 Pemilihan Sistem Struktur

Berdasarkan SNI 1726:2019, penggunaan sistem pemikul gaya seismik yang berbeda diperbolehkan untuk menahan gaya seismik pada masing-masing arah kedua sumbu ortogonal struktur. Apabila sistem yang berbeda diterapkan pada tiap arah tersebut, maka nilai R, C_d, dan Ω_o harus diberlakukan secara tersendiri pada setiap sistem yang digunakan, termasuk memperhatikan batasan-batasan sistem struktur yang telah tercantum dalam Tabel 3.4.

Tabel 3. 4 Faktor R, Cd, dan Ω₀ untuk Sistem Pemikul Gaya Seismik

Sistem Pemikul Gaya Seismik	Koefisien Modifikasi Respons, *Ra*	Faktor Kuat Lebih Sistem Ω_0[b]	Faktor Pembesaran Defleksi, *Cd*[c]	Batasan Sistem truktur dan Batasan Tinggi Struktur, *hn* (m)[d]				
				Kategori Desain Seismik				
				B		D[e]	E[e]	F[f]
D. Sistem ganda dengan rangka pemikul momen khusus yang mampu menahan paling sedikit 25% gaya seismik yang ditetapkan								
Rangka baja dengan bresing eksentris	8	2½	4	TB	TB	TB	TB	TB
Rangka baja dengan bresing eksentris	7	2½	5½	TB	TB	TB	TB	TB
Dinding geser beton bertulang khusus[g.h]	7	2½	5½	TB	TB	TB	TB	TB

Sumber: SNI 1726:2019

3.4.8 Periode Fundamental Struktur

Berdasarkan ketentuan dalam SNI 1726:2019, terdapat persyaratan bahwa nilai periode fundamental yang digunakan dalam perhitungan tidak diperkenankan melebihi batas atas periode fundamental pendekatan, yang diperoleh dari hasil perkalian antara koefisien batas atas periode (C_u) dengan periode pendekatan (T_a). Periode fundamental pendekatan (T_a) dalam detik, harus ditentukan dengan Persamaan 3.21.

$$T_a = C_t h_n^x \tag{3.21}$$

dengan:

h_n adalah ketinggian struktur (m), di atas dasar sampai tingkat tertinggi struktur, dan koefisien C_t dan ^{x} di tentukan dari Tabel 3.5.

Tabel 3. 5 Nilai Parameter Periode Pendekatan C*t* dan x

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

Sumber: SNI 1726 (2019)

3.4.9 Gaya Geser Dasar Seismik

Gaya geser dasar seismik dapat ditentukan dengan menggunakan Persamaan 3.22.

$$V = C_s \, . \, W \tag{3.22}$$

dengan:

V = Gaya geser dasar seismik,

C_s = Koefisien respons seismik, dan

W = Berat seismik efektif.

Nilai koefisien respons seismik (C_s) dapat ditentukan dengan Persamaan 3.23.

$$C_s = \frac{S_{DS}}{\left(\frac{R}{Ie}\right)} \tag{3.23}$$

Adapun nilai koefisien respons seismik (C_s) yang dihitung tidak boleh melebihi ketentuan.

Untuk $T \leq T_L$

$$C_s = \frac{S_{D1}}{T\left(\frac{R}{Ie}\right)} \tag{3.24}$$

Untuk $T > T_L$

$$C_s = \frac{S_{D1} T_L}{T^2 \left(\frac{R}{Ie}\right)} \quad (3.25)$$

C_s harus tidak kurang dari

$$C_s = 0{,}044\, S_{DS}\, I_e \geq 0{,}01 \quad (3.26)$$

Pada bangunan yang berlokasi di daerah di mana $S_1 \geq 0{,}6g$, maka nilai C_s harus tidak kurang dari Persamaan 3.27.

$$C_s = \frac{0{,}5 S_1}{\left(\frac{R}{Ie}\right)} \quad (3.27)$$

dengan:

S_{DS} = Parameter percepatan respons spektral desain,

R = Koefisien modifikasi respons,

I_e = Faktor keutamaan gempa,

T = Periode fundamental struktur (detik),

S_1 = Parameter percepatan respons spektral maksimum yang dipetakan, dan

S_{D1} = Parameter percepatan respons spektral desain pada periode 1,0 detik.

3.4.10 Distribusi Gaya Seismik Lateral

Besaran gaya seismik lateral (F_x) yang terdistribusi pada setiap tingkat lantai dapat dihitung menggunakan Persamaan 3.28.

$$F_x = C_{vx} \,.\, V \quad (3.28)$$

Nilai koefisien faktor distribusi vertikal (C_{vx}) dapat diperoleh melalui Persamaan 3.29.

$$C_{vx} = \frac{W_x\, h_x^k}{\sum_{i=1}^{n} w_i h_i^k} \quad (3.29)$$

dengan:

C_{vx} = Faktor distribusi vertikal,

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

hi dan *hx* = tinggi dari dasar sampai tingkat i atau x (m),

wi dan *wx* = bagian berat seismik efektif total struktur (W) yang ditempatkan Atau dikenakan pada tingkat i atau x,

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

untuk struktur bangunan dengan $T \leq 0{,}5$ detik. $k = 1$,

untuk struktur bangunan dengan $T \geq 2{,}5$ detik. $k = 2$,

untuk struktur bangunan dengan $0{,}5 < T > 2{,}5$ detik. $k = 2$ atau dapat dengan interpolasi nilai 1 atau 2.

3.5 Sistem Ganda

Berdasarkan SNI 1726:2019, sistem ganda adalah sistem struktur gedung di mana beban gempa dipikul oleh kombinasi antara rangka pemikul momen dan dinding geser atau bresing. Dalam sistem ini, rangka pemikul momen harus didesain untuk mampu menahan minimal 25 persen dari total gaya seismik desain, sementara sisa beban lateralnya didistribusikan secara proporsional berdasarkan tingkat kekakuan masing-masing komponen struktur tersebut.

3.6 Ketidakberaturan Struktur

Berdasarkan SNI 1726:2019, ketidakberaturan struktur merupakan kondisi ketika distribusi massa, kekakuan, kekuatan, atau konfigurasi geometris struktur tidak seragam sehingga dapat memengaruhi respons struktur terhadap beban gempa. Ketidakberaturan struktur dibedakan menjadi ketidakberaturan horizontal dan ketidakberaturan vertikal. Ketidakberaturan horizontal berkaitan dengan kondisi struktur pada arah denah, sedangkan ketidakberaturan vertikal berkaitan dengan perubahan karakteristik struktur sepanjang ketinggian bangunan. Identifikasi ketidakberaturan diperlukan karena struktur dengan konfigurasi tidak

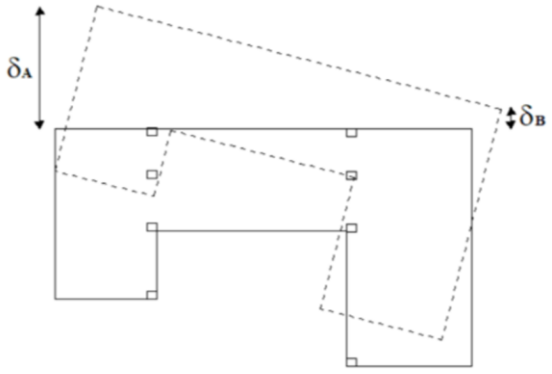
beraturan dapat menghasilkan distribusi gaya dan deformasi yang lebih kompleks dibandingkan struktur beraturan.

3.6.1 Ketidakberaturan Horizontal

Ketidakberaturan horizontal merupakan ketidakberaturan yang terjadi pada konfigurasi struktur dalam bidang denah. Berdasarkan SNI 1726:2019, ketidakberaturan horizontal terdiri atas ketidakberaturan torsi dan torsi berlebihan, sudut dalam, diskontinuitas diafragma, pergeseran tegak lurus terhadap bidang, dan sistem nonparalel.

1. Ketidakberaturan torsi dan torsi berlebihan

   Salah satu jenis ketidakberaturan horizontal yang relevan dengan kondisi objek penelitian adalah ketidakberaturan torsi. Ketidakberaturan torsi terjadi apabila simpangan antartingkat maksimum di salah satu ujung struktur, melebihi 1,2 kali simpangan antartingkat rata-rata dari kedua ujung struktur pada lantai yang sama. Kondisi ini umumnya diakibatkan oleh distribusi kekakuan lateral yang tidak simetris terhadap pusat massa bangunan, salah satunya akibat dari penempatan elemen dinding geser yang tidak tersusun secara simetris pada denah struktur. Apabila simpangan antartingkat maksimum melebihi 1,4 kali simpangan rata-rata, maka struktur dikategorikan mengalami ketidakberaturan torsi yang berlebih.



Gambar 3. 4 Ketidakberaturan Torsi
(Sumber: SNI 1726:2019)

Ketidakberaturan torsi yang terjadi akibat penempatan dinding geser yang tidak simetris berdampak terhadap respons seismik struktur secara keseluruhan. Distribusi kekakuan yang tidak merata menyebabkan pusat kekakuan struktur tidak sejajar dengan pusat massanya sehingga menimbulkan eksentrisitas yang memicu momen torsi saat struktur menerima beban gempa. Kondisi ini dapat menyebabkan sebagian elemen struktur mengalami deformasi yang lebih besar dibandingkan elemen lainnya sehingga berpotensi mempercepat terbentuknya sendi plastis pada elemen-elemen tersebut. Oleh karena itu, evaluasi kinerja seismik pada struktur dengan ketidakberaturan torsi perlu dilakukan secara cermat untuk memastikan bahwa struktur masih mampu memenuhi target kinerja seismik yang disyaratkan.

2. Ketidakberaturan sudut dalam

   Ketidakberaturan sudut dalam terjadi apabila kedua dimensi proyeksi denah struktur dari lokasi sudut dalam lebih besar dari 15% dimensi denah struktur pada arah yang ditinjau. Ketidakberaturan ini umumnya dijumpai pada bangunan dengan denah berbentuk L, T, U, atau konfigurasi lain yang memiliki cekungan pada sudut denah. Keberadaan sudut dalam dapat menyebabkan distribusi massa, kekakuan, dan gaya lateral menjadi tidak seragam pada denah. Kondisi tersebut dapat menimbulkan konsentrasi tegangan dan deformasi di sekitar daerah sudut dalam sehingga respons struktur terhadap beban gempa menjadi lebih kompleks. Oleh karena itu, konfigurasi denah dengan sudut dalam perlu diperiksa untuk memastikan distribusi respons seismik tetap dapat dikendalikan.

3. Ketidakberaturan diskontinuitas diafragma

   Ketidakberaturan diskontinuitas diafragma terjadi apabila suatu diafragma memiliki diskontinuitas atau perubahan kekakuan yang signifikan. Kondisi ini termasuk apabila terdapat daerah terpotong atau terbuka yang luasnya lebih dari 50% luas bruto diafragma yang tertutup atau apabila terjadi perubahan kekakuan diafragma efektif lebih dari 50% dari satu tingkat ke tingkat berikutnya. Diafragma lantai berfungsi menyalurkan gaya gempa horizontal menuju elemen-elemen vertikal pemikul gaya lateral. Adanya bukaan atau perubahan kekakuan yang besar dapat mengganggu kontinuitas lintasan gaya tersebut sehingga

distribusi gaya lateral menjadi tidak merata. Kondisi ini dapat meningkatkan tuntutan gaya pada elemen kolektor, sambungan, maupun elemen vertikal tertentu. Oleh karena itu, keberadaan bukaan dan perubahan kekakuan diafragma perlu diperhitungkan dalam evaluasi respons seismik struktur.

4. Ketidakberaturan akibat pergeseran tegak lurus terhadap bidang

   Ketidakberaturan akibat pergeseran tegak lurus terhadap bidang terjadi apabila terdapat diskontinuitas dalam lintasan tahanan gaya lateral, seperti adanya pergeseran tegak lurus terhadap bidang pada elemen vertikal pemikul gaya lateral. Kondisi ini dapat terjadi apabila elemen pemikul gaya lateral pada suatu tingkat tidak menerus secara langsung dari tingkat di atasnya menuju tingkat di bawahnya. Diskontinuitas tersebut menyebabkan lintasan transfer gaya lateral menjadi tidak menerus sehingga gaya harus dialihkan melalui elemen struktur lainnya. Akibatnya, elemen yang berfungsi sebagai pengalihan gaya dapat menerima tuntutan gaya yang lebih besar. Kondisi ini berpotensi menimbulkan konsentrasi gaya dalam dan perlu diperhatikan dalam pemodelan serta evaluasi struktur terhadap beban gempa.

5. Ketidakberaturan sistem nonparalel

   Ketidakberaturan sistem nonparalel terjadi apabila elemen vertikal pemikul gaya lateral tidak sejajar atau tidak paralel terhadap sumbu-sumbu ortogonal utama sistem pemikul gaya seismik. Kondisi tersebut dapat terjadi pada bangunan yang memiliki konfigurasi elemen pemikul gaya lateral dengan orientasi yang tidak mengikuti arah utama denah. Sistem nonparalel menyebabkan gaya gempa yang bekerja pada arah utama struktur tidak hanya menghasilkan respons translasi pada arah tersebut, tetapi juga dapat menimbulkan respons pada arah ortogonal dan respons torsi. Kondisi ini dapat meningkatkan kompleksitas distribusi gaya dan deformasi pada struktur sehingga orientasi elemen pemikul gaya lateral perlu diperhitungkan dalam analisis seismik.

3.6.2 Ketidakberaturan Vertikal

Ketidakberaturan vertikal merupakan kondisi ketika massa, kekakuan, kekuatan, atau konfigurasi geometris sistem pemikul gaya seismik mengalami

perubahan yang signifikan sepanjang tinggi bangunan. Berdasarkan SNI 1726:2019, ketidakberaturan vertikal terdiri atas ketidakberaturan kekakuan tingkat lunak, berat atau massa, geometri vertikal, diskontinuitas bidang pada elemen vertikal pemikul gaya lateral, serta tingkat lemah.

1. Ketidakberaturan kekakuan tingkat lunak

   Ketidakberaturan kekakuan tingkat lunak tipe 1a terjadi apabila kekakuan lateral suatu tingkat kurang dari 70% kekakuan lateral tingkat di atasnya atau kurang dari 80% kekakuan rata-rata tiga tingkat di atasnya. Untuk kategori tertentu, kondisi yang lebih ekstrem dikategorikan sebagai ketidakberaturan kekakuan tingkat lunak berlebihan tipe 1b, yaitu apabila kekakuan lateral suatu tingkat kurang dari 60% kekakuan tingkat di atasnya atau kurang dari 70% kekakuan rata-rata tiga tingkat di atasnya. Tingkat dengan kekakuan yang jauh lebih kecil dibandingkan tingkat di sekitarnya akan mengalami deformasi lateral yang lebih besar ketika menerima beban gempa. Kondisi tersebut dapat menyebabkan konsentrasi simpangan dan gaya dalam pada tingkat tersebut sehingga berpotensi membentuk mekanisme keruntuhan tingkat. Oleh karena itu, perubahan kekakuan antar tingkat perlu dikendalikan agar distribusi deformasi sepanjang tinggi bangunan tetap terkendali.

2. Ketidakberaturan berat

   Ketidakberaturan berat atau massa terjadi apabila massa efektif pada suatu tingkat lebih dari 150% massa efektif tingkat yang berdekatan. Atap yang lebih ringan dibandingkan lantai di bawahnya tidak perlu diperiksa sebagai ketidakberaturan massa. Perubahan massa yang signifikan pada suatu tingkat dapat menyebabkan distribusi gaya inersia akibat gempa menjadi tidak merata sepanjang tinggi bangunan. Tingkat dengan massa yang lebih besar akan menghasilkan gaya inersia yang lebih besar sehingga tuntutan gaya pada elemen pemikul gaya lateral di tingkat tersebut dapat meningkat. Kondisi ini perlu diperhatikan terutama pada bangunan yang memiliki perubahan fungsi ruang, peralatan berat, atau elemen arsitektural dengan berat yang signifikan pada tingkat tertentu.

3. Ketidakberaturan geometri vertikal

Ketidakberaturan geometri vertikal terjadi apabila dimensi horizontal sistem pemikul gaya seismik pada suatu tingkat lebih dari 130% dimensi horizontal sistem pemikul gaya seismik pada tingkat yang berdekatan. Perubahan dimensi struktur secara signifikan sepanjang tinggi bangunan dapat menyebabkan perubahan distribusi kekakuan, kekuatan, dan jalur penyaluran gaya lateral. Kondisi tersebut dapat menyebabkan perubahan respons struktur secara tiba-tiba pada tingkat tertentu dan meningkatkan tuntutan gaya maupun deformasi pada elemen yang mengalami perubahan geometri. Oleh karena itu, perubahan dimensi denah sepanjang tinggi bangunan perlu diperiksa sebagai bagian dari evaluasi ketidakberaturan vertikal.

4. Ketidakberaturan akibat diskontinuitas bidang pada elemen vertikal pemikul gaya lateral

   Ketidakberaturan akibat diskontinuitas bidang pada elemen vertikal pemikul gaya lateral terjadi apabila terdapat pergeseran arah bidang elemen pemikul gaya lateral yang lebih besar dari panjang elemen tersebut atau terdapat reduksi kekakuan elemen pemikul gaya pada tingkat di bawahnya. Kondisi ini menyebabkan lintasan gaya lateral dari bagian atas menuju fondasi tidak berlangsung secara menerus. Gaya lateral harus ditransfer melalui elemen lain sehingga dapat menimbulkan konsentrasi gaya pada elemen transfer. Kondisi tersebut berpotensi meningkatkan tuntutan gaya geser, momen, dan gaya aksial pada elemen yang menerima transfer gaya sehingga perlu diperhatikan dalam evaluasi respons seismik struktur.

5. Ketidakberaturan tingkat lemah

   Ketidakberaturan tingkat lemah tipe 5a terjadi apabila kekuatan lateral suatu tingkat kurang dari 80% kekuatan lateral tingkat di atasnya. Kekuatan lateral tingkat merupakan kekuatan total seluruh elemen pemikul gaya seismik yang berbagi gaya geser tingkat pada arah yang ditinjau. Kondisi yang lebih ekstrem dikategorikan sebagai ketidakberaturan tingkat lemah berlebihan tipe 5b apabila kekuatan lateral suatu tingkat kurang dari 65% kekuatan lateral tingkat di atasnya. Ketidakberaturan tingkat lemah menunjukkan adanya tingkat dengan kapasitas menahan gaya lateral yang lebih rendah dibandingkan tingkat di

atasnya. Ketika menerima beban gempa, deformasi inelastik cenderung terkonsentrasi pada tingkat tersebut sehingga dapat membentuk mekanisme keruntuhan tingkat. Kondisi ini perlu dihindari karena dapat menyebabkan kerusakan lokal yang berkembang menjadi keruntuhan progresif apabila kapasitas dan daktilitas elemen pada tingkat tersebut tidak mencukupi.

3.7 Dinding Geser

3.7.1 Perilaku Dinding Geser terhadap Gempa

Dinding geser beton bertulang merupakan elemen struktur vertikal yang berfungsi sebagai penahan gaya lateral yang ditimbulkan oleh beban gempa. Penggunaan dinding geser pada sistem struktur bangunan menjadi salah satu solusi dalam mengatasi permasalahan dalam mengatasi gaya akibat gempa. Menurut Muna (2024), pada struktur bangunan gedung bertingkat, dinding geser memiliki berbagai fungsi penting yaitu untuk menahan beban lateral seperti beban gempa dan angin, menyerap beban horizontal atau gaya geser pada struktur, meningkatkan kekakuan struktur secara keseluruhan, serta memastikan struktur tetap berdiri dan tidak mengalami keruntuhan akibat gaya lateral yang muncul saat terjadi gempa bumi.

3.7.2 Pengaruh Dinding Geser terhadap Respons Struktu**r**

Keberadaan dinding geser dalam suatu sistem struktur bangunan memiliki pengaruh signifikan terhadap respons struktur bangunan, khususnya dalam meningkatkan kemampuan struktur dalam menahan gaya lateral. Peningkatan kekakuan yang dihasilkan oleh dinding geser berdampak langsung pada kemampuan struktur dalam mengurangi deformasi lateral yang terjadi selama gempa. Dengan demikian, respons struktur terhadap beban dinamis menjadi lebih terkendali (Syafwandi et al., 2024).

Namun demikian, efektivitas dinding geser dalam meningkatkan kinerja struktur sangat dipengaruhi oleh penempatannya dalam sistem struktur secara keseluruhan. Penempatan dinding geser yang tidak simetris terhadap pusat massa berpotensi menimbulkan distribusi kekakuan yang tidak merata sehingga dapat

memicu respons torsi yang tidak diinginkan saat struktur menerima beban gempa. Kondisi ini perlu dievaluasi secara mendalam untuk memastikan bahwa sistem dinding geser yang ada pada struktur eksisting masih mampu menjalankan fungsinya secara optimal dalam menahan beban lateral dan memenuhi target kinerja seismik yang disyaratkan.

3.7.3 Konfigurasi, Bentuk Geometri, dan Penempatan Dinding Geser

Usmat dkk. (2019) dalam Patria dan Haq (2024) mengatakan bahwa konfigurasi dinding geser yang ditempatkan secara lebih simetris terhadap pusat massa bangunan cenderung menghasilkan respons struktur yang lebih stabil dalam meminimalkan efek puntir pada bangunan. Dari aspek geometri, dinding geser dengan profil bentuk L, T, atau C terbukti jauh lebih efektif dalam menahan beban lateral dari berbagai arah dibandingkan profil lurus, karena memiliki modulus penampang, momen inersia, dan ketahanan tekuk lateral yang jauh lebih besar.

3.7.4 Persyaratan Minimum Tebal Dimensi Dinding Geser

Dalam merencanakan ketebalan dinding geser, agar efektif dalam menahan gaya lateral baik akibat beban gempa maupun beban angin harus mengikuti persyaratan minimum terkait tebal dimensi sesuai pada peraturan SNI 2847:2019 Pasal 11.3.1.1, di mana ketebalan dinding geser tidak boleh kurang dari 1/25 dari tinggi atau panjang bentang bersih elemen tersebut guna mencegah risiko tekuk lokal.

3.8 Analisis *Pushover*

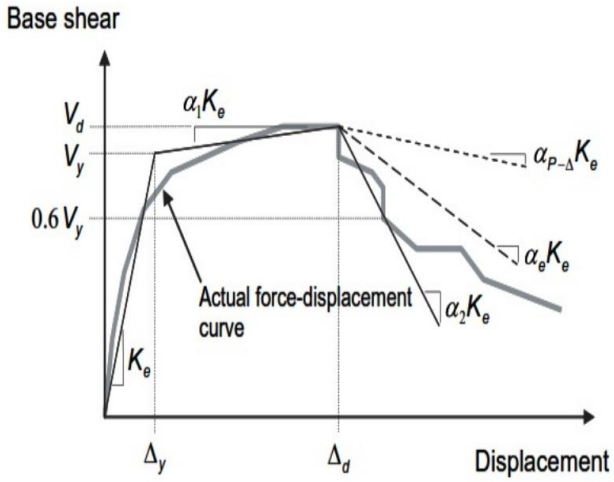
3.8.1 Konsep Dasar Analisis *Pushover*

Menurut Syahira (2023), analisis nonlinier statik (*pushover analysis*) merupakan salah satu pendekatan desain berbasis kinerja yang bertujuan untuk mengevaluasi kapasitas suatu struktur. Pada prinsipnya, analisis pushover dilakukan dengan menerapkan beban lateral secara bertahap hingga mencapai target perpindahan atau kondisi ambang keruntuhan akibat sendi plastis. Untuk menentukan target perpindahan tersebut, terdapat beberapa pendekatan yang dapat

digunakan, yaitu Metode Spektrum Kapasitas ATC-40 dan Metode Koefisien Perpindahan FEMA 356 atau FEMA 440.

3.8.2 Kurva Kapasitas

Kurva kapasitas merupakan kurva yang menggambarkan hubungan antara gaya geser dasar dengan perpindahan struktur pada titik kontrol tertentu, umumnya pada atap bangunan. Berdasarkan FEMA 356, kurva ini digunakan untuk menggambarkan perilaku nonlinier struktur akibat pembebanan lateral yang meningkat secara bertahap hingga mencapai kondisi inelastik. Kurva ini menjadi dasar dalam mengevaluasi kemampuan struktur dalam menahan beban gempa serta menentukan tingkat kinerja struktur. Adapun bentuk kurva kapasitas dapat dilihat pada Gambar 3. 5.



Gambar 3. 5 Kurva Kapasitas Berdasarkan FEMA 356

(Sumber: Abbas dan Jarallah, 2021)

Kurva kapasitas menggambarkan tiga fase perilaku struktur. Pertama, fase elastis yang ditandai hubungan linier antara gaya dan perpindahan tanpa kerusakan permanen. Kedua, fase inelastis ketika beban terus meningkat sehingga terbentuk sendi plastis dan sebagian elemen mengalami pelelehan, namun struktur masih mampu menahan beban tambahan hingga kapasitas maksimum. Ketiga, fase degradasi setelah kapasitas maksimum terlampaui, di mana kekuatan struktur menurun dan mendekati kondisi keruntuhan.

3.8.3 Titik Kinerja

Berdasarkan FEMA 356, titik kinerja adalah perpotongan antara kurva kapasitas struktur dan kurva spektrum respons gempa yang telah dimodifikasi, yang merepresentasikan grafik perbandingan antara kemampuan struktur dan tuntutan gempa. Kurva kapasitas dikonversi dari hubungan gaya geser dan perpindahan menjadi spektrum kapasitas, kemudian dibandingkan dengan spektrum respons gempa yang disesuaikan dengan redaman efektif. Titik perpotongannya menghasilkan perpindahan target sebagai dasar evaluasi kinerja. Perpindahan ini kemudian dibandingkan dengan batasan deformasi pada kriteria kinerja IO, LS, dan CP. Perpindahan yang lebih kecil mencerminkan kinerja struktur yang lebih baik, sedangkan perpindahan yang besar mengindikasikan deformasi signifikan dan potensi penurunan tingkat kinerja.

3.8.4 Metode Koefisien Perpindahan FEMA 356

Metode koefisien perpindahan merupakan salah satu prosedur yang direkomendasikan oleh *Federal Emergency Management Agency* (FEMA 356) untuk menentukan target perpindahan dalam analisis *pushover*. Metode ini digunakan untuk memperkirakan respons maksimum struktur akibat gempa dengan mempertimbangkan perilaku nonlinier melalui pendekatan berbasis perpindahan. Target perpindahan yang diperoleh akan digunakan sebagai acuan dalam mengevaluasi kinerja struktur terhadap kriteria tingkat kinerja seperti *Immediate Occupancy* (IO), *Life Safety* (LS), dan *Collapse Prevention* (CP).

Dalam metode koefisien perpindahan, target perpindahan struktur ditentukan dengan memodifikasi koefisien-koefisien C_0, C_1, C_2, dan C_3 yang didefinisikan sebagai perpindahan global maksimum yang mencakup kondisi elastis maupun inelastis. Melalui proses perhitungan tersebut, diperoleh nilai target perpindahan (δ_T) sebagai hasil akhir yang menjadi acuan dalam evaluasi kinerja struktur. Secara umum, persamaan yang digunakan untuk menghitung nilai target perpindahan (δ_T) dapat dilihat pada Persamaan 3.30.

$$\delta_T = C_0 C_1 C_2 C_3 S_a \frac{T_e^2}{4\pi^2} g \tag{3.30}$$

dengan:

δ_T = Target perpindahan,

C_0 = Koefisien konversi sistem MDOF ke SDOF,

C_1 = Koefisien modifikasi efek inelastik,

C_2 = Koefisien degradasi kekakuan dan kekuatan,

C_3 = Koefisien pengaruh efek P-Δ,

S_a = Percepatan spektral,

T_e = Periode getar alami efektif, dan

g = Percepatan gravitasi (9,81 m/s^2).

Nilai periode getar alami efektif (T_e) ditentukan dengan Persamaan 3.31.

$$T_e = T_i\sqrt{\frac{K_i}{K_e}} \tag{3.31}$$

dengan:

T_i = Periode awal,

K_i = Kekakuan awal, dan

K_e = Kekakuan efektif.

Nilai kekakuan efektif (K_e) dapat dihitung dengan Persamaan 3.32.

$$K_e = \frac{0{,}6\,V_y}{0{,}6\Delta_y} \tag{3.32}$$

dengan:

V_y = Gaya geser leleh , dan

Δ_y = Perpindahan leleh.

Nilai faktor modifikasi C_0 diperoleh dari Tabel 3.6.

Tabel 3. 6 Nilai Faktor Modifikasi C_0

Jumlah Tingkat	Bangunan Geser		Bangunan Lainnya
	Triangular Load Pattern	*Uniform Load Pattern*	*Any Load Pattern*
1	1	1,0	1,0
2	1,2	1,15	1,2
3	1,2	1,2	1,3
5	1,3	1,2	1,4
10+	1,3	1,2	1,5
1. Interpolasi linear yang harus digunakan untuk menghitung nilai tengah 2. Bangunan dimana, untuk setiap lantai, simpangan antartingkat menurun seiring dengan penurunan tinggi.			

Sumber: FEMA 356 (2000)

3.8.5 Penyesuaian Prosedur FEMA 440

FEMA 440 menyarankan agar pembatasan pada koefisien C_1 yang sebelumnya diperbolehkan dalam FEMA 356 untuk dihapuskan. Selain itu, FEMA 440 menjelaskan adanya perbedaan antara dua jenis penurunan kekuatan yang memiliki pengaruh berbeda terhadap respons dan kinerja sistem struktur. Perbedaan tersebut kemudian menjadi dasar rekomendasi penyesuaian pada koefisien C_2 untuk memperhitungkan degradasi kekuatan dan kekakuan. Di samping itu, FEMA 440 juga merekomendasikan agar koefisien C_3 dihapuskan dan digantikan dengan penetapan batasan kekuatan berdasarkan rasio kuat elastik terhadap kuat leleh (R).

Dalam FEMA 356, koefisien C_1 diizinkan untuk dibatasi khususnya pada struktur yang memiliki periode pendek. Berbeda dengan hal tersebut, FEMA 440 merekomendasikan agar pembatasan tersebut tidak lagi diterapkan. Maka konsekuensi dari tidak diterapkannya pembatasan tersebut adalah kemungkinan untuk menghasilkan nilai estimasi perpindahan yang lebih tinggi pada beberapa jenis struktur tertentu. Secara umum, nilai C_1 dapat dinyatakan dalam Persamaan 3.33.

$$C_1 = 1 + \frac{R-1}{aT_e^2} \quad (3.33)$$

dengan:

R = Rasio kuat elastik terhadap kuat leleh,

a = Parameter spektrum respons, dan

T_e = Periode getar alami efektif.

Untuk struktur dengan periode kurang dari 0,2 detik, nilai koefisien C_1 yang digunakan dapat mengacu pada nilai yang berlaku untuk periode 0,2 detik. Untuk struktur dengan periode lebih dari 1,0 detik, nilai koefisien C_1 dapat diasumsikan sama dengan 1,0. Selanjutnya, koefisien C_2 dalam FEMA 440 juga mengalami penyempurnaan dengan memperhitungkan efek degradasi kekakuan terhadap respons maksimum struktur. Nilai C_2 ditentukan dengan Persamaan 3.34.

$$C_2 = 1 + \frac{1}{800}\left(\frac{R-1}{T}\right)^2 \quad (3.34)$$

dengan:

R = Rasio kuat elastik terhadap kuat leleh,

a = Parameter spektrum respons, dan

T = Periode getar alami struktur.

Untuk struktur dengan periode kurang dari 0,2 detik, nilai koefisien C_2 yang digunakan dapat mengacu pada nilai yang berlaku untuk periode 0,2 detik. Sedangkan untuk struktur dengan periode lebih dari 0,7 detik, nilai koefisien C_2 dapat diasumsikan sama dengan 1,0. Adapun nilai rasio kuat elastik perlu terhadap kuat leleh (R) dapat dihitung dengan Persamaan 3.35.

$$R = \frac{S_a}{V_y/W} C_m \quad (3.35)$$

dengan:

S_a = Percepatan spektra,

V_y = Gaya geser leleh,

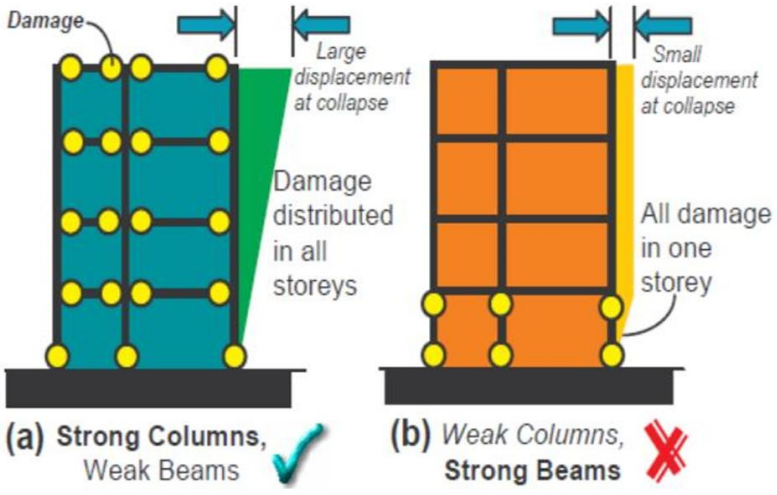
W = Berat seismik total struktur, dan

C_m = Faktor partisipasi massa.

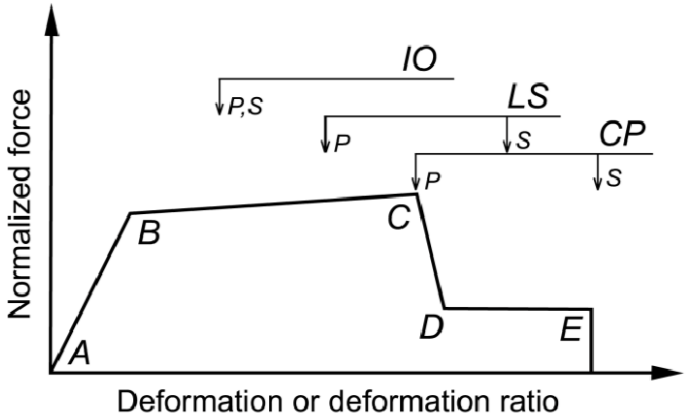
Dalam penelitian ini, FEMA 356 digunakan sebagai dasar dalam pemodelan struktur, penentuan sendi plastis, serta evaluasi tingkat kinerja. Sementara itu, penentuan target perpindahan dilakukan dengan menggunakan penyesuaian prosedur FEMA 440, khususnya dalam perhitungan koefisien C_1 dan C_2. Dengan pendekatan ini, diharapkan hasil analisis *pushover* yang diperoleh dapat memberikan gambaran yang lebih representatif terhadap kinerja struktur akibat beban gempa.

3.9 Mekanisme Sendi Plastis

Sendi plastis merupakan suatu titik di mana pelelehan lentur diharapkan terjadi akibat perpindahan yang diakibatkan oleh desain beban seismik. Fenomena ini terjadi ketika penampang struktur tidak lagi mampu menahan peningkatan beban gempa yang bekerja sehingga pada bagian di sekitar sambungan komponen struktur terjadi penurunan kekuatan yang berakibat pada keruntuhan lokal di daerah tertentu (Kusuma dan Sabariman, 2022). Dalam perencanaan bangunan tahan gempa, sendi plastis diharapkan terbentuk terlebih dahulu pada elemen balok sebelum kemudian menuju ke elemen kolom. Urutan pembentukan sendi plastis ini bertujuan untuk memenuhi konsep desain struktural *Strong Column – Weak Beam* (*SCWB*), yakni prinsip yang mengutamakan agar kolom tetap lebih kuat dibandingkan balok sehingga mencegah keruntuhan struktur secara menyeluruh seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.6 dan Gambar 3.7.



Gambar 3. 6 Pola Terjadinya Sendi Plastis
(Sumber: Kusuma dan Sabariman, 2022)



Gambar 3. 7 Kurva Perilaku Sendi Plastis FEMA 356
(Sumber: FEMA 356, 2000)

Kurva pada Gambar 3.7 menunjukkan hubungan antara gaya terhadap deformasi pada suatu elemen struktur yang mengalami perilaku nonlinier. Kurva ini digunakan untuk menggambarkan tahapan respons struktur mulai dari kondisi elastis hingga mendekati keruntuhan. Penjelasan terkait tahapan respons struktur terhadap sendi plastis dapat dilihat pada Tabel 3.7.

Tabel 3. 7 Perilaku Sendi Plastis Berdasarkan FEMA 356

Titik	Penjelasan
A	Titik A menunjukkan kondisi awal sebelum pembebanan, di mana gaya dan deformasi masih bernilai nol.
B	Titik B merupakan titik leleh (*yield point*), yang menandai awal terbentuknya sendi plastis dan berakhirnya perilaku elastis.
IO	Elemen struktur memasuki fase inelastik. Pada tahap ini, deformasi plastis yang terjadi masih relatif kecil dan kerusakan yang dialami elemen struktur bersifat ringan.
LS	Elemen struktur telah mengalami deformasi plastis yang lebih besar. Kerusakan yang terjadi tergolong sedang, ditandai dengan berkembangnya retak yang lebih lebar pada elemen beton
CP	Elemen struktur mengalami deformasi plastis yang sangat besar. Terjadi penurunan kekakuan dan kekuatan yang signifikan, serta sebagian elemen mengalami kerusakan serius seperti retak lebar, hancurnya beton, atau lelehnya tulangan secara signifikan.
C	Elemen struktur mencapai kapasitas geser maksimum, di mana gaya yang dapat ditahan mencapai nilai puncaknya. Setelah titik ini, struktur mengalami penurunan kapasitas.
D	Degradasi kekuatan yang terjadi pada struktur sangat signifikan, menyebabkan kondisi struktur berada di ambang keruntuhan. Elemen struktur hanya memiliki kapasitas residual yang sangat kecil atau hampir tidak mampu menahan beban tambahan.
E	Struktur kehilangan kemampuannya dalam menahan gaya geser dan mengalami keruntuhan total.

Sumber: FEMA 356 (2000)

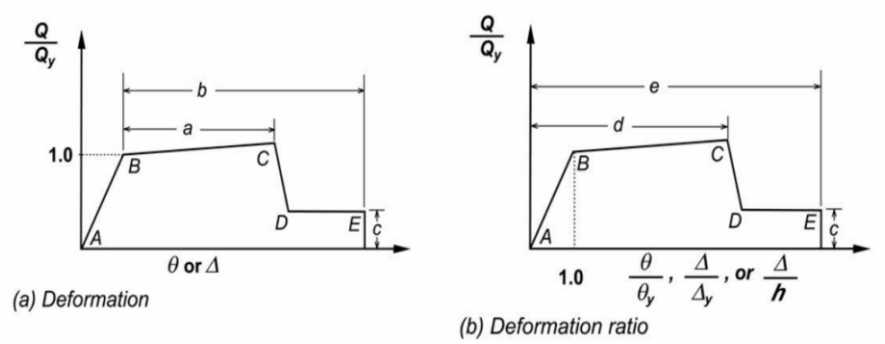
3.10 Mekanisme Keruntuhan

Mekanisme keruntuhan struktur merupakan pola atau urutan terjadinya kegagalan elemen-elemen struktur akibat pembebanan yang terus meningkat, khususnya akibat beban gempa. Berdasarkan FEMA 356, evaluasi mekanisme keruntuhan digunakan untuk menilai apakah struktur memiliki perilaku yang daktail dan aman, atau mengalami kegagalan yang bersifat getas dan tidak diinginkan.

Dalam analisis *pushover*, mekanisme keruntuhan ditinjau dari urutan terbentuknya sendi plastis akibat peningkatan beban lateral. Struktur yang baik akan membentuk sendi plastis terlebih dahulu pada balok sehingga menghasilkan mekanisme keruntuhan global yang daktail. Sebaliknya, terbentuknya sendi plastis pada kolom dapat menyebabkan keruntuhan lokal yang bersifat getas dan tidak sesuai dengan prinsip *Strong Column – Weak Beam* (SCWB) pada desain struktur tahan gempa.

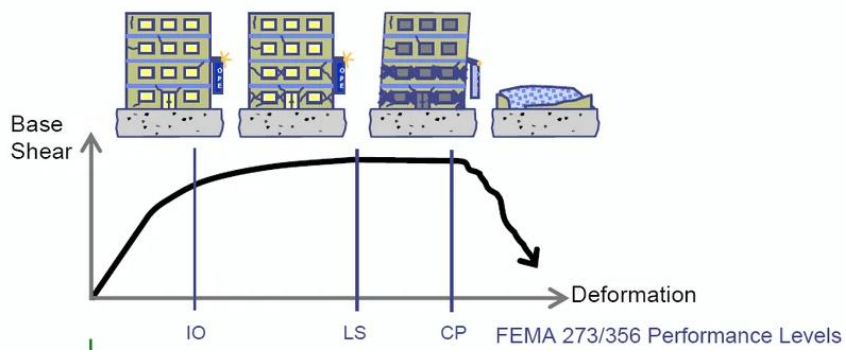
3.11 Tingkat Kinerja Struktur

Menurut FEMA 356, tingkat kinerja struktur (*performance level*) digunakan untuk menggambarkan kondisi bangunan setelah mengalami gempa, terutama dilihat dari tingkat kerusakan dan apakah bangunan masih dapat difungsikan. Kriteria ini didasarkan pada nilai deformasi yang terjadi pada titik-titik tertentu dalam kurva hubungan antara gaya (Q) dan deformasi (Δ) yang dapat dilihat pada Gambar 3.8.



Gambar 3. 8 Kurva Hubungan Gaya dan Deformasi
(Sumber: FEMA 356, 2000)

Adapun kurva yang menggambarkan tingkat kinerja struktur serta penjelasan terkait tingkat kinerja struktur dapat dilihat pada Gambar 3.9 dan Tabel 3.8.



Gambar 3. 9 Kurva Tingkat Kinerja Struktur
(Sumber: FEMA 356, 2000)

Tabel 3. 8 Tingkat Kinerja Berdasarkan FEMA 356

Tingkat Kinerja	Tingkat Kerusakan	Kondisi Struktur	Kondisi Nonstruktur
Operational level	Sangat Ringan	Tidak terjadi simpangan permanen pada struktur. Kekuatan dan kekakuan struktur secara keseluruhan masih dapat dipertahankan mendekati kondisi semula. Kerusakan yang terjadi hanya berupa retakan minor pada elemen fasad, partisi, plafon, serta elemen-elemen struktural. Seluruh sistem yang berperan penting bagi keberlangsungan operasional bangunan masih berfungsi dengan baik.	Kerusakan yang terjadi sangat minim. Sistem listrik dan utilitas masih dapat berfungsi dengan baik.

Lanjutan Tabel 3. 8 Tingkat Kinerja Berdasarkan FEMA 356

Tingkat Kinerja	Tingkat Kerusakan	Kondisi Struktur	Kondisi Nonstruktur
Immediate Occupancy (IO)	Ringan	Tidak terjadi simpangan permanen pada struktur. Kekuatan dan kekakuan struktur secara keseluruhan masih dapat mendekati kondisi awalnya. Hanya terjadi kerusakan berupa retakan kecil pada elemen fasad, partisi, plafon, serta elemen-elemen struktural. *Lift* dapat dioperasikan kembali, dan sistem proteksi kebakaran masih berfungsi dengan baik.	Peralatan dan isi bangunan umumnya masih aman, namun mungkin tidak dapat beroperasi akibat kegagalan mekanis atau gangguan pasokan utilitas.
Life Safety (LS)	Sedang	Seluruh komponen struktur masih memiliki sisa kekuatan dan kekakuan, dengan elemen penahan beban gravitasi yang masih berfungsi. Tidak terjadi kegagalan dinding ke arah luar bidang maupun penggulingan parapet. Terdapat simpangan permanen pada struktur disertai kerusakan pada elemen partisi. Kondisi bangunan kemungkinan sudah tidak layak untuk diperbaiki secara ekonomis.	Potensi bahaya akibat keruntuhan dapat dicegah, namun sebagian besar sistem arsitektural, mekanikal, dan elektrikal bangunan mengalami kerusakan yang signifikan.
Collapse Prevention (CP)	Berat	Kekakuan dan kekuatan sisa yang tersisa pada struktur sangat kecil, namun kolom dan dinding penahan beban masih mampu menjalankan fungsinya. Terjadi simpangan permanen yang besar pada struktur. Sebagian jalur keluar bangunan mengalami hambatan sehingga tidak dapat diakses. Secara keseluruhan, bangunan berada dalam kondisi yang sangat kritis dan mendekati keruntuhan total.	Kerusakan yang terjadi bersifat luas dan menyeluruh pada berbagai elemen bangunan.

Sumber: FEMA 356 (2000)

Adapun batasan nilai rasio simpangan untuk tiap tingkat kinerja struktur seperti dapat dilihat pada Tabel 3.9.

Tabel 3. 9 Batasan Nilai Rasio Simpangan Tingkat Kinerja Struktur

Tingkat Kinerja Struktur	Simpangan (%)
Immediate Occupancy (IO)	≤ 0,5
Life Safety (LS)	0,5 - 1,0
Collapse Prevention (CP)	2,0

Sumber: FEMA 356 (2000)

BAB IV
METODOLOGI PENELITIAN

4.1 Jenis Penelitian

Penelitian ini merupakan penelitian kuantitatif dengan pendekatan studi numerik yang bertujuan untuk mengevaluasi kinerja seismik struktur gedung eksisting menggunakan analisis statik nonlinier (*pushover analysis*). Analisis dilakukan menggunakan perangkat lunak ETABS 22.7 untuk memodelkan perilaku struktur terhadap beban gempa. Evaluasi kinerja struktur dilakukan berdasarkan pedoman FEMA 356 melalui peninjauan kurva kapasitas, distribusi sendi plastis, rasio simpangan, dan tingkat kinerja struktur. Selanjutnya, target perpindahan ditentukan menggunakan prosedur FEMA 440 melalui perhitungan parameter seperti kurva kapasitas idealisasi, periode efektif, percepatan spektral, faktor modifikasi, hingga diperoleh target perpindahan struktur.

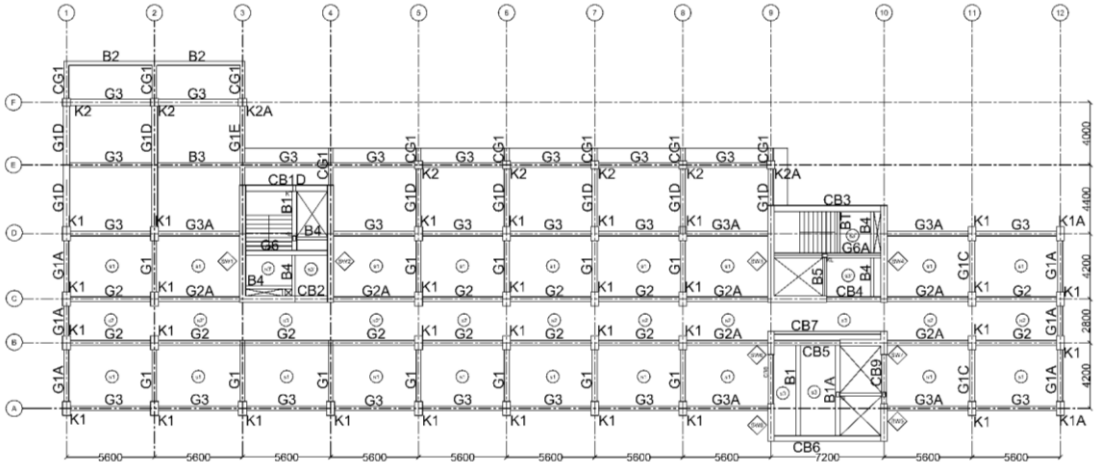
4.2 Data Penelitian

4.2.1 Objek Penelitian

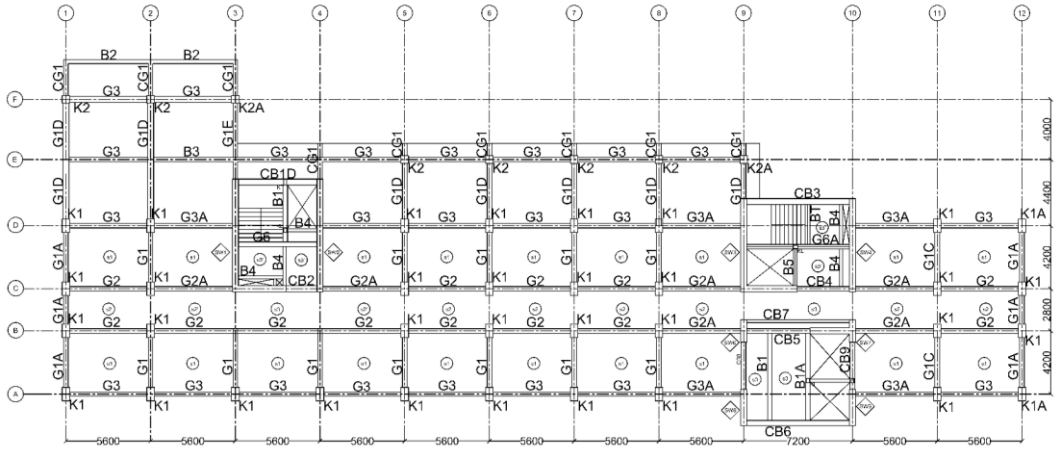
Objek penelitian adalah bangunan Gedung Tower B Hunian Terjangkau Nuansa Cilangkap yang menggunakan model struktur rangka beton bertulang dengan dinding geser. Bangunan ini terdiri dari 25 lantai dengan tinggi bangunan 78,6 m dan tinggi antartingkat 3 m. Lokasi dan denah objek penelitian dapat dilihat pada Gambar 4.1 sampai 4.7.



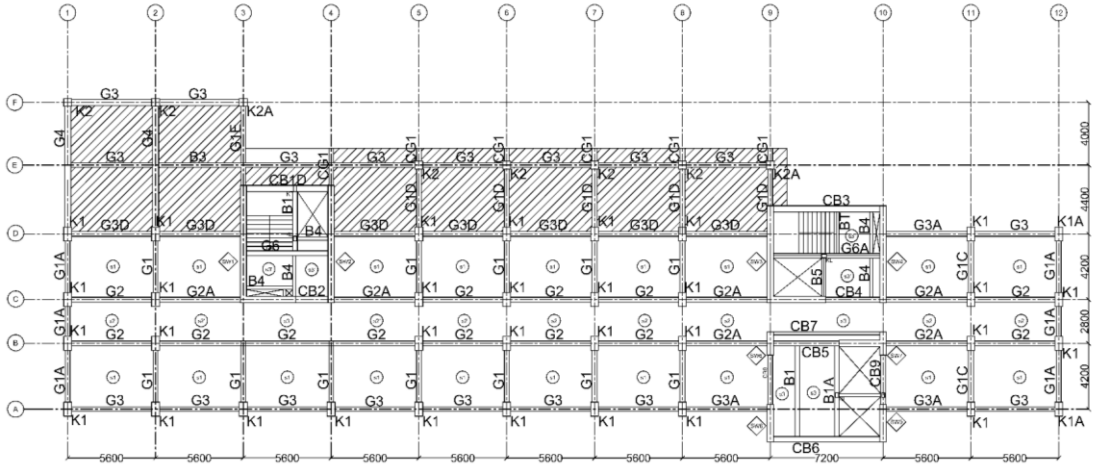
Gambar 4. 1 Lokasi Penelitian
(Sumber: *Google Earth*, 2026)



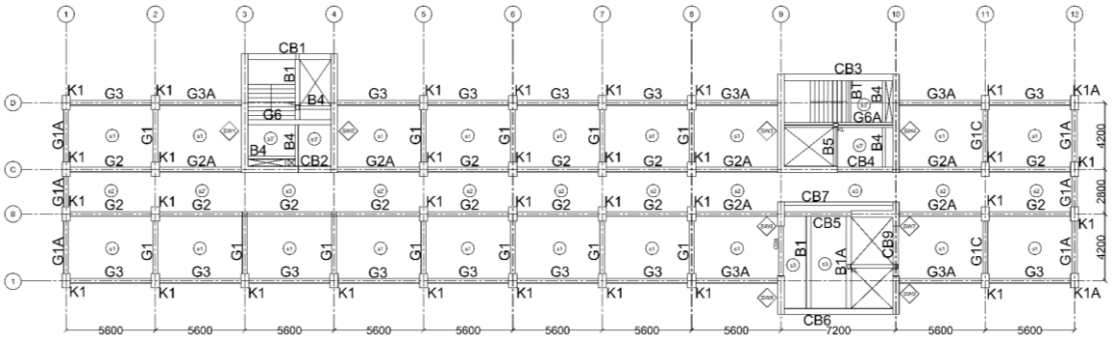
Gambar 4. 2 Denah Lantai Dasar
(Sumber: *Detailed Engineering Design*)



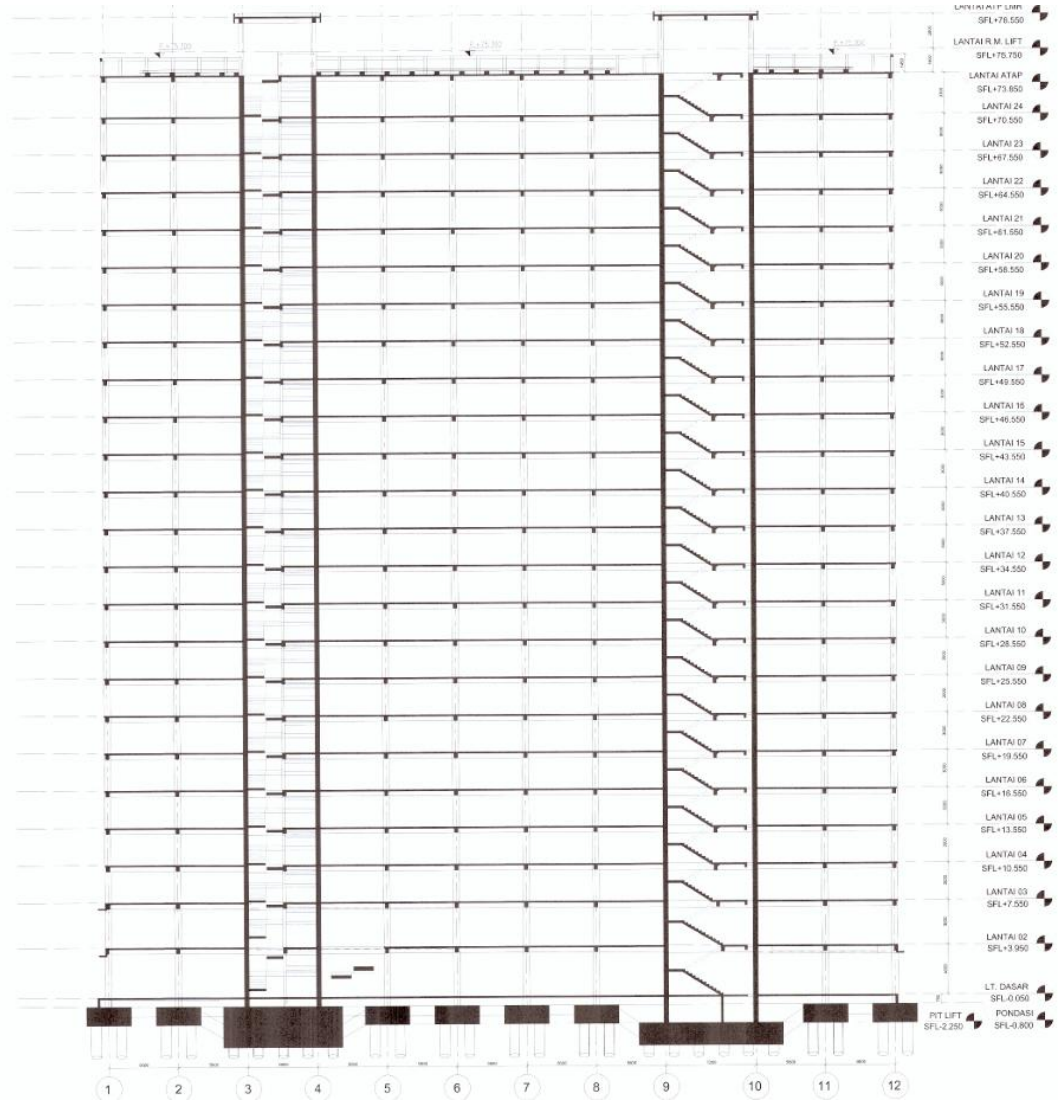
Gambar 4. 3 Denah Lantai 2
(Sumber: *Detailed Engineering Design*)



Gambar 4. 4 Denah Lantai 3
(Sumber: *Detailed Engineering Design*)



Gambar 4. 5 Denah Lantai 4-25
(Sumber: *Detailed Engineering Design*)



Gambar 4. 6 Denah Potongan X-X

(Sumber: *Detailed Engineering Design*)



Gambar 4. 7 Denah Potongan Y-Y
(Sumber: *Detailed Engineering Design*)

4.2.2 Data Teknis Bangunan

Data awal yang digunakan pada penelitian ini dapat dilihat sebagai berikut.

1. Fungsi bangunan = Apartemen
2. Lokasi bangunan = Jakarta Timur
3. Jenis tanah = Tanah sedang
4. Jumlah lantai = 25 lantai
5. Tinggi bangunan = 78,6 m
6. Luas area bangunan = 20.474 m^2
7. Panjang bangunan arah x = 63,2 m

8. Panjang bangunan arah Y = 19,6 m
9. Jenis struktur = Beton bertulang
10. Sistem struktur = Sistem ganda
11. Mutu pelat dan balok = 35 Mpa
12. Mutu kolom dan dinding geser (Lt.dasar – Lt.12) = 45 Mpa
13. Mutu kolom & dinding geser (Lt. 13 – Lt. 25) = 35 Mpa
14. Mutu baja tulangan ulir ≥ D10 mm = BJTS 420B
15. Mutu baja tulangan polos φ ≤ 8 mm = BJTP 280
16. Baja tulangan *wire mesh* = BJTS 520

4.2.3 Dimensi Elemen Struktur

Dimensi elemen struktur yang digunakan berdasarkan kondisi eksisting yang diambil dari *Detailed Engineering Design* (DED).

1. Balok

Tabel 4. 1 Dimensi Balok

No	Tipe Balok	Dimensi (mm)
1	B1	300 x 500
2	B2	250 x 500
3	B3	300 x 500
4	B4	200 x 400
5	B5	250 x 500
6	B1A	300 x 500
7	BT	300 x 450
8	G1	300 x 500
9	G2	300 x 500
10	G3	300 x 500
11	G6	300 x 600
12	G1A	300 x 500
13	G2A	300 x 500

Sumber: *Detailed Engineering Design*

Lanjutan Tabel 4. 1 Dimensi Balok

No	Tipe Balok	Dimensi (mm)
14	G3A	300 x 500
15	G6A	300 x 600
16	G1C	300 x 500
17	CG1	300 x 500
18	CG1A	300 x 500
19	CGC	300 x 650
20	CB1	400 x 600
21	CB2	400 x 600
22	CB3	400 x 600
23	CB4	400 x 600
24	CB5	400 x 600
25	CB6	400 x 600
26	CB7	250 x 500
27	CB8	400 x 600
28	CB9	400 x 600

Sumber: *Detailed Engineering Design*

2. Kolom

Tabel 4. 2 Dimensi Kolom

No	Tipe Kolom	Dimensi (mm)
1	K1 (Lt. Dasar – Lt. 6)	500 x 900
2	K1 (Lt. 7 – Lt. 12)	500 x 800
3	K1 (Lt. 13 – Lt. 19)	500 x 700
4	K1 (Lt. 19 – Lt. Atap)	500 x 600
5	K2	500 x 500
6	K3	400 x 400

Sumber: *Detailed Engineering Design*

Lanjutan Tabel 4. 2 Dimensi Kolom

No	Tipe Kolom	Dimensi (mm)
7	KA	200 x 200
8	K1A (Lt. Dasar – Lt. 6)	500 x 900
9	K1A (Lt. 7 – Lt. 12)	500 x 800
10	K1A (Lt. 13 – Lt. 19)	500 x 700
11	K1A (Lt. 19 – Lt. Atap)	500 x 600
12	K2A	500 x 500
13	KBS	200 x 300

Sumber: *Detailed Engineering Design*

3. Pelat dan dinding geser

Tabel 4. 3 Dimensi Pelat dan Dinding Geser

No	Elemen Struktur	Tebal (mm)
Pelat		
1	S1	130
2	S1’	130
3	S2	150
4	S2’	150
5	S3	200
6	S3’	200
7	S1A	130
8	S1’A	130
9	SOG	150
Dinding Beton		
10	*Shear wall*	400

Sumber: *Detailed Engineering Design*

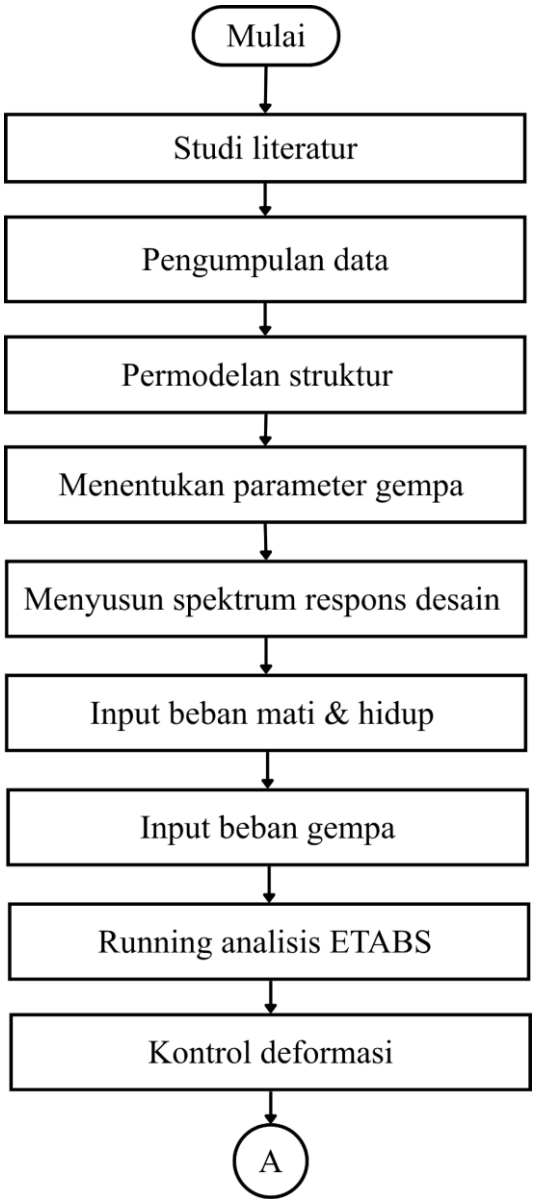
4.3 Tahapan Analisis

Tahapan penelitian meliputi studi literatur, pengumpulan data struktur, pemodelan tiga dimensi menggunakan ETABS, pendefinisian pembebanan dan sendi plastis, pelaksanaan analisis pushover, evaluasi kurva kapasitas, penentuan target perpindahan berdasarkan FEMA 440, serta penilaian tingkat kinerja struktur berdasarkan FEMA 356.

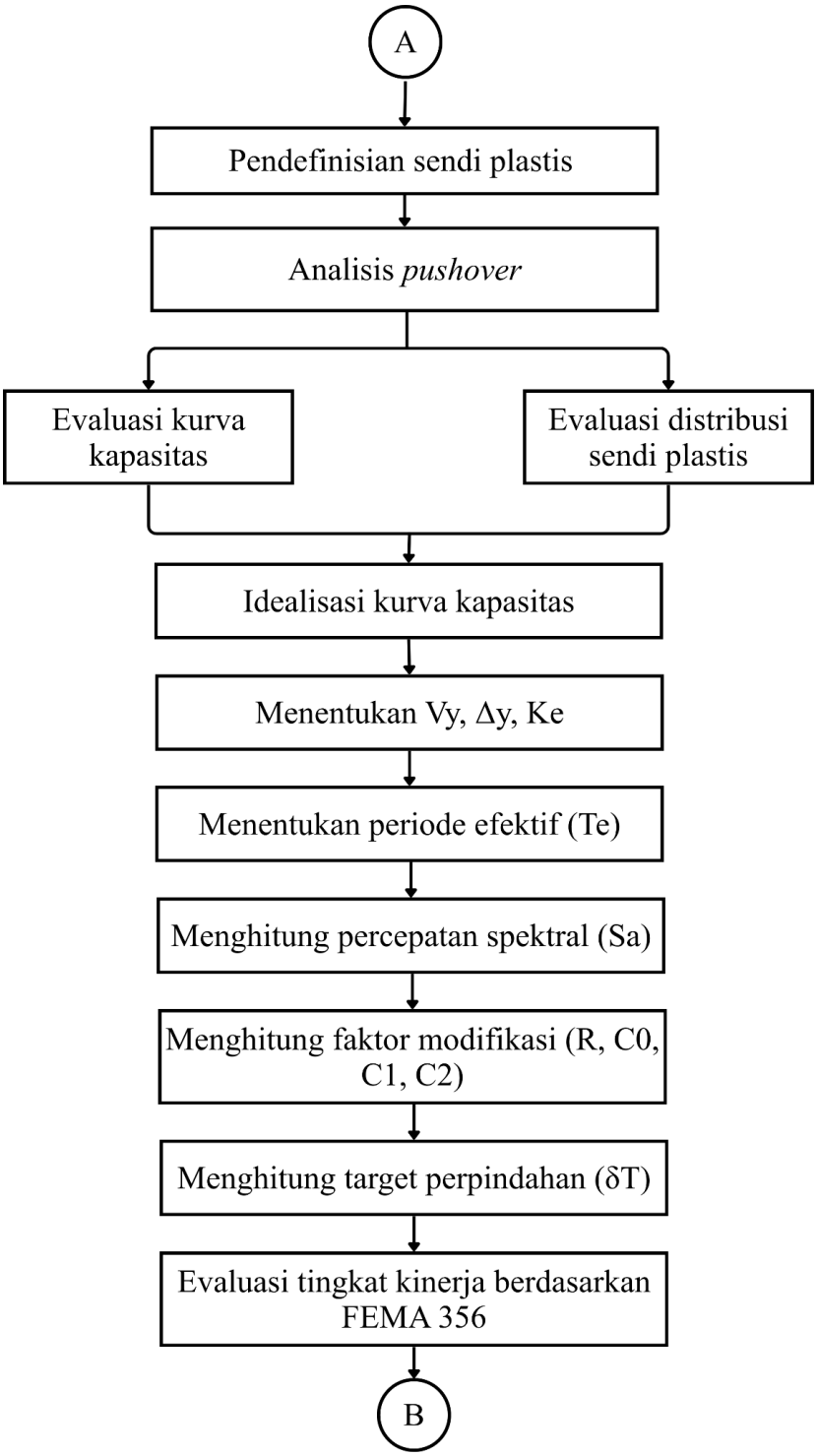
1. Studi literatur.
2. Pengumpulan data struktur, meliputi pengumpulan data gambar struktur, dimensi elemen, mutu material, data pembebanan, serta data lain yang diperlukan sebagai dasar pemodelan struktur.
3. Pemodelan struktur gedung, dilakukan dengan membuat model tiga dimensi menggunakan perangkat lunak ETABS v22.7 berdasarkan data struktur gedung yang telah diperoleh.
4. Pendefinisian pembebanan struktur, meliputi input beban mati, beban hidup, dan beban gempa sesuai dengan ketentuan SNI 1727:2020 dan SNI 1726:2019 serta penyusunan spektrum respons desain untuk analisis gempa.
5. Analisis struktur, dilakukan untuk memperoleh respons struktur sebelum dilakukan analisis *pushover*.
6. Pendefinisian sendi plastis, dilakukan pada elemen struktur sesuai ketentuan FEMA 356 sebagai dasar pelaksanaan analisis *pushover*.
7. Analisis *pushover*, dilakukan dengan memberikan beban lateral secara bertahap hingga struktur mencapai target perpindahan atau kondisi batas yang ditentukan untuk memperoleh kurva kapasitas dan distribusi sendi plastis.
8. Penentuan target perpindahan, dilakukan berdasarkan prosedur FEMA 440 melalui perhitungan parameter seperti periode efektif, percepatan spektral, dan faktor modifikasi hingga diperoleh target perpindahan struktur.
9. Evaluasi kinerja struktur, dilakukan berdasarkan hasil analisis *pushover* dengan mengevaluasi rasio simpangan, distribusi sendi plastis, mekanisme keruntuhan, dan tingkat kinerja struktur berdasarkan kriteria FEMA 356.

10. Interpretasi hasil analisis, dilakukan dengan membahas hasil evaluasi kurva kapasitas, target perpindahan, tingkat kinerja struktur, serta mekanisme pembentukan sendi plastis pada arah X dan arah Y.
11. Penyusunan kesimpulan dan saran, dilakukan berdasarkan hasil analisis yang telah diperoleh.

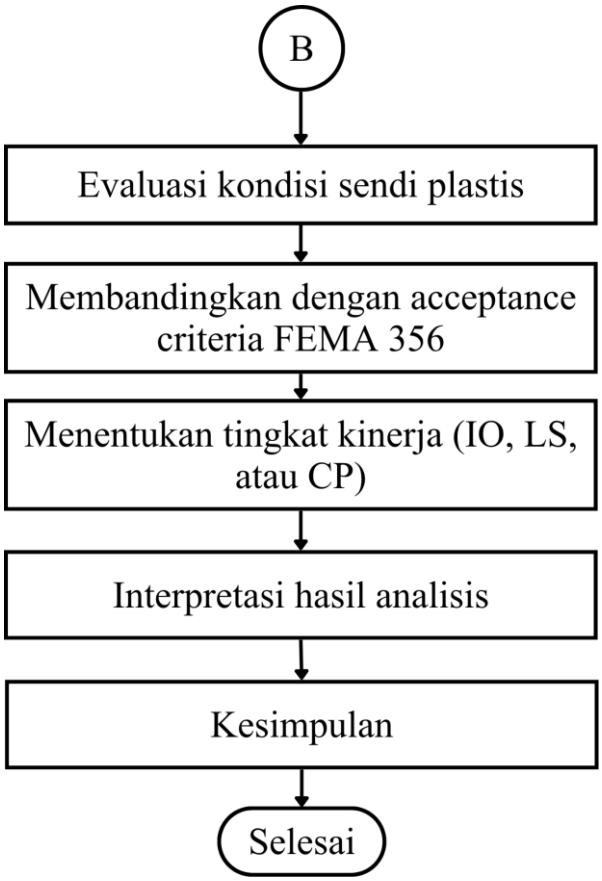
Alur pelaksanaan penelitian secara ringkas disajikan dalam bentuk bagan alir pada Gambar 4.8 berikut.



Gambar 4. 8 Bagan Alir Tahapan Analisis



Lanjutan Gambar 4. 8 Bagan Alir Tahapan Analisis



Lanjutan Gambar 4. 8 Bagan Alir Tahapan Analisis

BAB V
ANALISIS DAN PEMBAHASAN

5.1 Pemodelan Struktur

Pemodelan struktur dilakukan menggunakan perangkat lunak ETABS versi 22.7 dengan mengacu pada data geometri dan spesifikasi struktur yang terdapat dalam *Detailed Engineering Design* (DED) gedung. Struktur dimodelkan dalam bentuk model analisis tiga dimensi (3D) untuk merepresentasikan perilaku struktur secara menyeluruh terhadap pembebanan gravitasi maupun beban gempa sehingga interaksi antar elemen struktur, distribusi massa, kekakuan, serta respons struktur dapat dianalisis secara lebih akurat.

5.1.1 Pemodelan Elemen Balok

Tahapan pemodelan balok dilakukan sebagai berikut.

1. Mendefinisikan mutu material beton dan baja tulangan melalui menu *Define* > *Material Properties* sesuai dengan data perencanaan.
2. Mendefinisikan dimensi penampang balok menggunakan menu *Define* > *Section Properties* > *Frame Sections* sesuai dengan ukuran pada gambar *Detailed Engineering Design* (DED).
3. Menggambar elemen balok pada setiap lantai menggunakan menu *Draw Beam/Column Line Object* dengan menghubungkan titik-titik *grid* sesuai denah struktur.
4. Memberikan properti penampang pada setiap balok sesuai dengan tipe dan dimensinya.
5. Memastikan seluruh sambungan balok terhubung dengan kolom dan elemen struktur lainnya.

5.1.2 Pemodelan Elemen Kolom

Pemodelan kolom dilakukan melalui tahapan berikut.

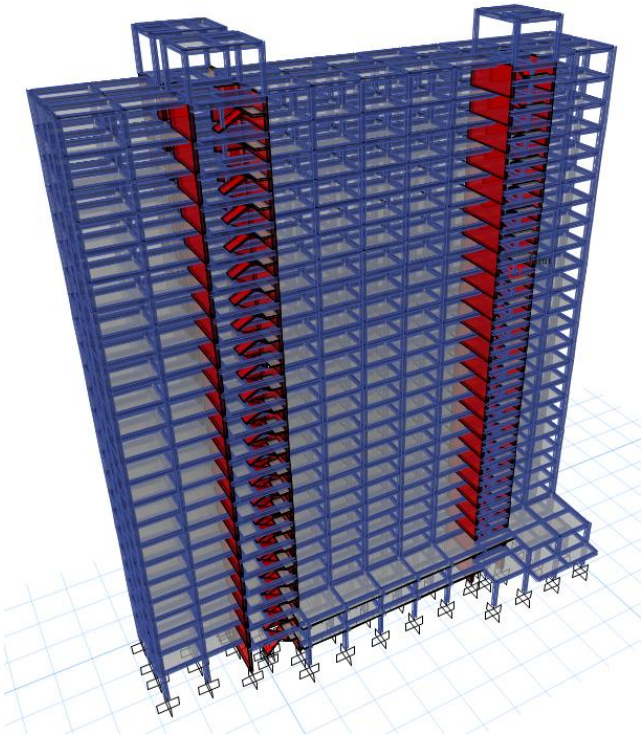
1. Mendefinisikan seluruh variasi dimensi kolom pada menu *Define* > *Section Properties* > *Frame Sections* sesuai dengan gambar *Detailed Engineering Design* (DED).
2. Menggambar kolom secara vertikal dari elevasi dasar hingga lantai atap menggunakan menu *Draw Beam/Column Line Object*.
3. Menyesuaikan dimensi kolom pada masing-masing lantai.
4. Memastikan seluruh kolom terhubung dengan balok dan pelat.

5.1.3 Pemodelan Elemen Dinding Geser

Dinding geser dimodelkan sebagai elemen *wall* yang berfungsi sebagai sistem utama penahan gaya gempa pada bangunan. Tahapan pemodelan dilakukan sebagai berikut.

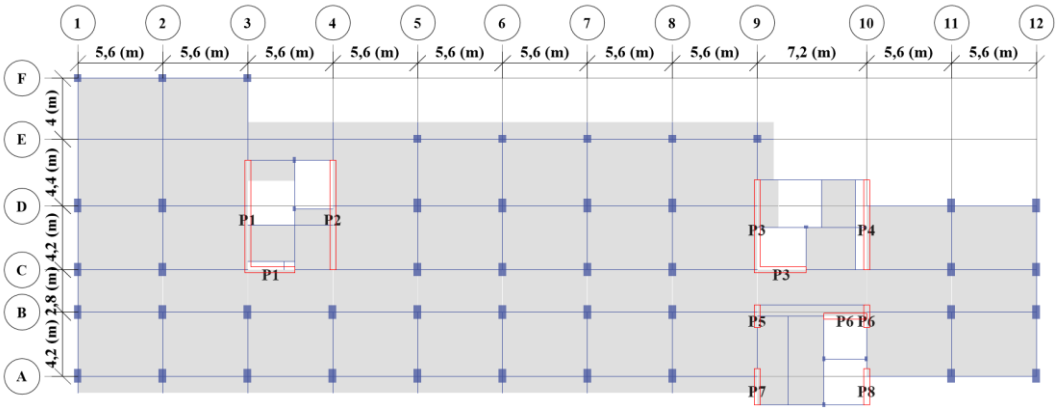
1. Mendefinisikan penampang dinding geser menggunakan menu *Define* > *Wall/Slab/Deck* Sections dengan memasukkan mutu beton dan ketebalan dinding sesuai data perencanaan.
2. Menggambar dinding geser menggunakan menu *Draw Wall Object* pada posisi yang sesuai dengan denah struktur.
3. Memastikan dinding geser terhubung dengan balok, kolom, dan pelat.
4. Memberikan kondisi tumpuan dan konektivitas yang sesuai sehingga dinding geser bekerja sebagai bagian integral dari sistem struktur.
5. Melakukan *meshing* pada elemen dinding geser untuk meningkatkan ketelitian analisis.

Pemodelan struktur bangunan dapat dilihat pada Gambar 5.1 hingga 5.3.



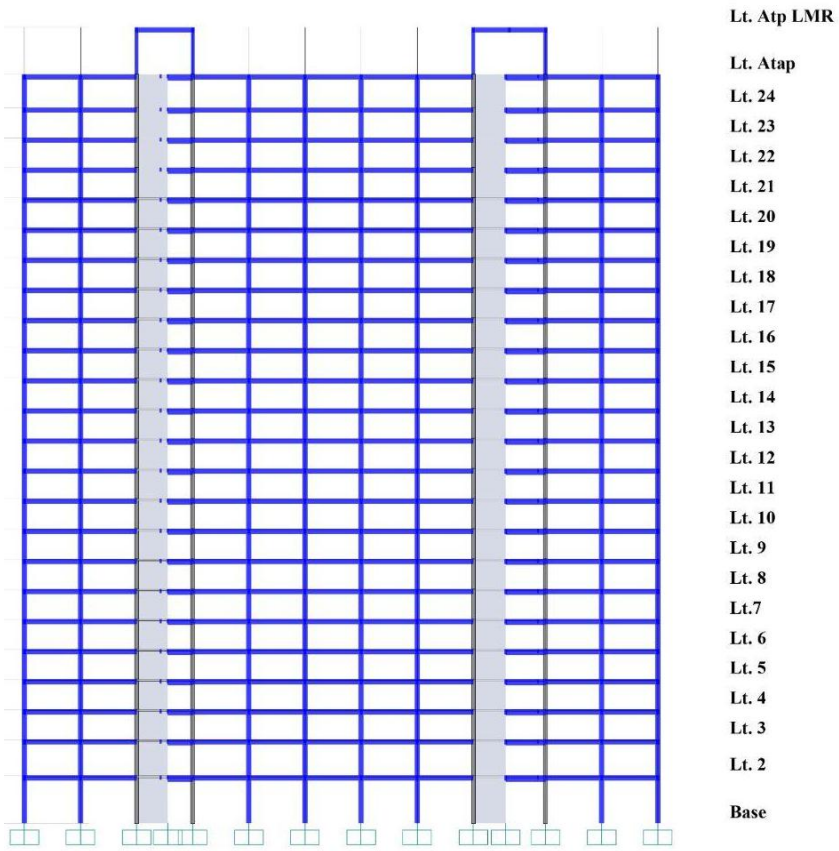
Gambar 5. 1 Model Struktur Bangunan Gedung

(Sumber: ETABS)



Gambar 5. 2 Tampak X-Y Struktur Bangunan Gedung

(Sumber: ETABS)



Gambar 5. 3 Tampak X-Z Struktur Bangunan Gedung

(Sumber: ETABS)

5.2 Analisis Pembebanan Struktur

Analisis pembebanan struktur merupakan tahapan yang dilakukan untuk menentukan besarnya beban yang bekerja pada bangunan sebelum dilakukan analisis respons struktur. Beban-beban tersebut meliputi beban mati, beban hidup, serta beban gempa yang dihitung berdasarkan parameter kegempaan. Seluruh pembebanan ditentukan berdasarkan ketentuan SNI 1726:2019 dan SNI 1727:2020.

5.2.1 Perhitungan Beban Mati

Perhitungan pembebanan pada beban mati akibat berat sendiri komponen seperti kolom, balok, pelat lantai, dan dinding geser sudah dihitung secara otomatis oleh program ETABS. Sementara itu untuk perhitungan beban mati tambahan, konversi satuan yang digunakan adalah 1 kg = 0,00981 kN, yang diperoleh dengan menggunakan nilai percepatan gravitasi bumi sebesar 9,81 m/s² dengan perhitungan sebagai berikut.

1. Beban mati tambahan pelat lantai

Pasir (5 cm)	= 1600 kg/m^3 x 0,05 m x 0,00981
	= 0,78 kN/m^2
Spesi (3 cm)	= 2100 kg/m^3 x 0,03 m x 0,00981
	= 0,62 kN/m^2
Keramik	= 17 kg/m^3 x 0,00981
	= 0,17 kN/m^2
MEP	= 30 kg/m^3 x 0,00981
	= 0,29 kN/m^2
Q_{SIDL}	= 0,78 + 0,62 + 0,17 + 0,29 +0,48
	= 2,34 kN/m^2

2. Beban mati tambahan pelat atap

Waterproofing (2 cm)	= 2100 kg/m^3 x 0,02 m x 0,00981
	= 0,41 kN/m^2
Spesi (3 cm)	= 2100 kg/m^3 x 0,03 m x 0,00981
	= 0,62 kN/m^2
Plafond	= 9 kg/m^3 x 0,00981
	= 0,09 kN/m^2
MEP	= 30 kg/m^3 x 0,00981
	= 0,29 kN/m^2
Penggantung Plafond	= 5 kg/m^3 x 0,00981
	= 0,05 kN/m^2
Q_{SIDL}	= 0,41 + 0,62 + 0,09 + 0,29 + 0,05
	= 1,46 kN/m^2

3. Beban mati tambahan pelat tangga

Anak tangga	= 2400 kg/m^3 x 0,085 m x 0,00981
	= 2,00 kN/m^2
Pasir (5 cm)	= 1600 kg/m^3 x 0,05 m x 0,00981
	= 0,78 kN/m^2
Spesi (3 cm)	= 2100 kg/m^3 x 0,03 m x 0,00981
	= 0,62 kN/m^2

Keramik = 17 kg/m^3 x 0,00981

= 0,17 kN/m^2

Q_{SIDL} = 2,00 + 0,78 + 0,62 + 0,17

= 3,57 kN/m^2

4. Beban mati tambahan pelat bordes

Pasir (5 cm) = 1600 kg/m^3 x 0,05 m x 0,00981

= 0,78 kN/m^2

Spesi (3 cm) = 2100 kg/m^3 x 0,03 m x 0,00981

= 0,62 kN/m^2

Keramik = 17 kg/m^3 x 0,00981

= 0,17 kN/m^2

Q_{SIDL} = 0,78 + 0,62 + 0,17

=1,57 kN/m^2

5. Beban dinding

Tabel 5. 1 Perhitungan Berat Jenis Dinding

No	Material	Tebal (m)	Berat (Kg/m^3)	Berat (Kg/m^2)
1	Bata ringan	0,075	650	48,75
2	Plesteran	0,02	1900	38
3	Acian	0,0015	1900	2,85
4	Spesi	0,002	1900	3,8
Berat jenis (kN/m^2)				0,916

1. Lantai dasar = 0,916 x 4 = 2,749 kN/m
2. Lantai 2 = 0,916 x 3,6 = 2,382 kN/m
3. Lantai 3-24 = 0,916 x 3 = 1,832 kN/m
4. Lantai 25 = 0,916 x 3,3 = 2,107 kN/m
5. *Lift Machine Room* = 0,916 x 4,7 = 3,39 kN/m

5.2.2 Perhitungan Beban Hidup

1. Beban hidup koridor = 4,79 kN/m^2
2. Beban hidup ruangan = 1,92 kN/m^2
3. Beban hidup atap = 0,96 kN/m^2
4. Beban hidup tangga = 4,79 kN/m^2
5. Beban hidup *lift* = 11,5 kN/m^2

5.2.3 Kontrol Total Massa Struktur

Kontrol total massa dilakukan dengan membandingkan massa struktur hasil perhitungan manual dengan massa struktur yang diperoleh dari ETABS. Kontrol ini dilakukan untuk memastikan bahwa massa yang digunakan dalam pemodelan dan analisis dinamik telah sesuai dengan hasil perhitungan berdasarkan beban struktur. Massa hasil perhitungan manual diperoleh dari total berat struktur yang diperhitungkan, kemudian dikonversi menjadi massa dengan membagi berat terhadap percepatan gravitasi. Hasil perbandingan massa manual dan massa ETABS disajikan pada Tabel 5.2.

Tabel 5. 2 Kontrol Total Massa Struktur

Parameter	Massa Manual (Kg)	Massa ETABS (Kg)	Selisih (Kg)	Persentase Selisih (%)
Total Massa Struktur	23458613,02	24401791,68	943178,6626	4,021

Berdasarkan hasil kontrol, persentase selisih nilai massa hasil perhitungan manual dan massa yang diperoleh dari ETABS sebesar 4,021%. Hasil tersebut menunjukkan adanya perbedaan massa antara perhitungan manual dan pemodelan ETABS, namun nilai keduanya masih relatif konsisten sehingga massa yang digunakan dalam pemodelan struktur dapat dilanjutkan untuk analisis.

5.2.4 Perhitungan Beban Gempa

1. Objek penelitian yang dianalisis tergolong dalam kategori risiko II dengan faktor keutamaan gempa (I_e) sebesar 1.

2. Objek penelitian berlokasi di daerah Jakarta Timur dengan klasifikasi tanah sedang (SD).
3. Berdasarkan peta parameter gerak tanah pada Gambar 3.1 dan 3.2, nilai parameter S_S yang digunakan sebesar 0,781g dan nilai parameter S_1 sebesar 0,382g.
4. Berdasarkan Tabel 3.7 dan Tabel 3.8, koefisien situs F_a ditetapkan berdasarkan hasil interpolasi dengan nilai sebesar 1,188 dan untuk koefisien situs F_v menghasilkan nilai interpolasi sebesar 1,634.
5. Parameter yang digunakan untuk menyusun grafik respons spektrum dihitung menggunakan Persamaan 3.12 sampai Persamaan 3.15. Adapun perhitungannya dilakukan sebagai berikut.

   S_{MS} $= F_a \text{ x } S_s$

   $= 1{,}188 \text{ x } 0{,}781$

   $= 0{,}927$

   S_{M1} $= F_v \text{ x } S_1$

   $= 1{,}634 \text{ x } 0{,}382$

   $= 0{,}625\text{g}$

   S_{DS} $= \frac{2}{3} \text{ x } S_{MS}$

   $= \frac{2}{3} \text{ x } 0{,}927$

   $= 0{,}618\text{g}$

   S_{D1} $= \frac{2}{3} \text{ x } S_{M1}$

   $= \frac{2}{3} \text{ x } 0{,}625$

   $= 0{,}417\text{g}$
6. Nilai periode getar fundamental struktur yang digunakan dalam kurva spektrum respon desain dihitung dengan menggunakan Persamaan 3.16 dan Persamaan 3.17. Perhitungannya dapat dilakukan sebagai berikut.

   T_S $= \frac{S_{D1}}{S_{DS}}$

   $= \frac{0{,}417}{0{,}618}$

   $= 0{,}674 \text{ s}$

T_0 = 0,2 x $\frac{S_{D1}}{S_{DS}}$

= 0,2 x $\frac{0,417}{0,618}$

= 0,135 s

T_L = 20 s

7. Berdasarkan nilai S_{DS} dan S_{D1} yang diperoleh, objek penelitian tergolong dalam kategori desain seismik D.
8. Jenis sistem struktur yang digunakan pada penelitian ini merupakan sistem ganda sehingga parameter gempa yang digunakan adalah sebagai berikut.

   Koefisien modifikasi respons, (R) = 7

   Faktor kuat lebih sistem, (Ω_0) = 2,5

   Faktor pembesaran defleksi, (C_d) = 5,5
9. Periode fundamental pendekatan (T_a) dapat ditentukan dengan Persamaan 3.21 dengan nilai koefisien C_u yang diperoleh untuk batas atas periode yang dihitung berdasarkan ketentuan SNI 1726:2019 sebesar 1,4. Selanjutnya, didapatkan nilai C_t sebesar 0,0488 dan x sebesar 0,75. Dengan tinggi total struktur atas h_n = 78,6 m. Perhitungan periode fundamental pendekatan dilakukan sebagai berikut.

   T_a = C_t x h_n^x

   = 0,0488 x $78,6^{0,75}$

   = 1,288 s

   $T_a\,max$ = C_u x T_a

   = 1,4 x 1,288

   = 1,803 s

10. Perhitungan parameter respons spektrum dengan percepatan desain awal (S_a) dapat dihitung menggunakan Persamaan 3.18.

    S_a = S_{MS} (0,4 + 0,6 x $\frac{T}{T_0}$)

    = 0,927 (0,4 + 0,6 x $\frac{0}{0,135}$)

    = 0,247g

    Untuk periode dengan nilai $T = T_0$

    S_a = S_{MS}

= 0,927g

Untuk periode dengan nilai $T > T_S$ Menggunakan Persamaan 3.20.

$S_a = \frac{S_{M1} \ X \ T_L}{T}$

$= \frac{0,625 \ X \ 20}{0,8}$

= 0,521g

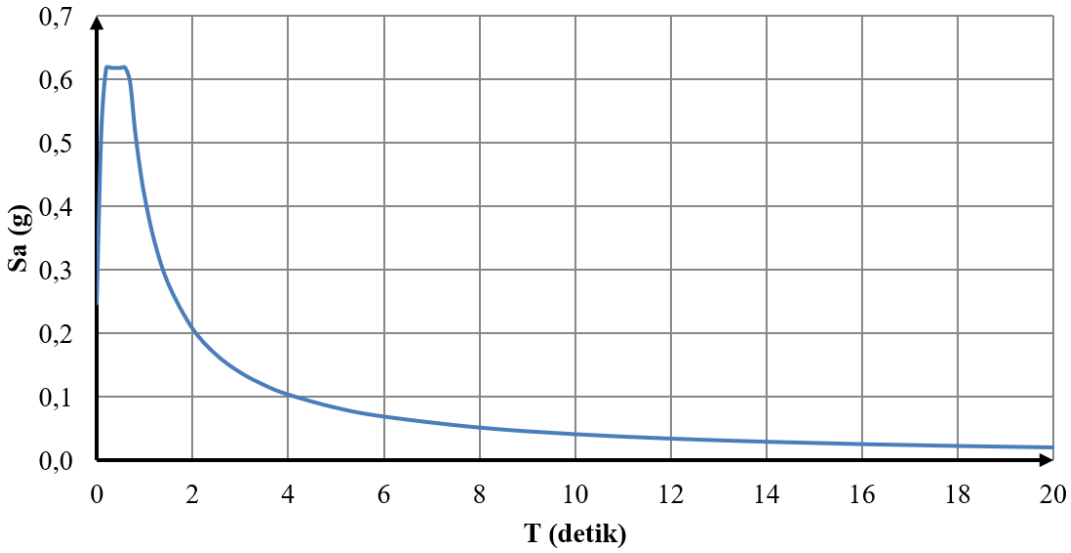
Hasil perhitungan parameter percepatan desain awal dapat dilihat pada Tabel 5.3 dan Gambar 5.4.

Tabel 5. 3 Hasil Perhitungan Spektrum Respons Desain

T (detik)	S_a (g)
0,00	0,247
0,10	0,522
0,20	0,618
0,30	0,618
0,40	0,618
0,50	0,618
0,60	0,618
0,70	0,595
0,80	0,521
0,90	0,463

Lanjutan Tabel 5.3 Hasil Perhitungan Spektrum Respons Desain

T (detik)	S_a (g)
1,00	0,417
1,50	0,278
2,00	0,208
3,00	0,139
3,50	0,119
4,00	0,104
5,00	0,083
6,00	0,069
8,00	0,052
10,00	0,042
12,00	0,035
14,00	0,030
16,00	0,026
18,00	0,023
20,00	0,021



Gambar 5.4 Grafik Spektrum Respons Desain

11. Gaya geser dasar seismik

C_s $= \frac{S_{MS}}{\frac{R}{Ie}}$

$= \frac{0,927}{\frac{7}{1}}$

$= 0,132$

$C_{s,\ maks}$ $= \frac{S_{M1}}{Tx\ (\frac{R}{Ie})}$

$= \frac{0,625}{1,803x\ (\frac{7}{1})}$

$= 0,05$

$C_{s,\ min}$ $= 0.044\ S_{MS}\ I_e \geq 0,01$

$= 0,044 \text{ x } 0,927 \text{ x } 1 \geq 0,01$

$= 0,0408$

Berdasarkan perhitungan, diperoleh nilai C_S hasil perhitungan melebihi nilai $C_{S\ min}$ dan $C_{S\ maks}$. Oleh karena itu, nilai C_S yang digunakan adalah nilai $C_{S\ maks}$ yaitu sebesar 0,05 sesuai batas maksimum yang dipersyaratkan pada SNI 1726:2019 Pasal 7.8.1.1.

$V = C_s \text{ x } W$

= 0,05 x ($\frac{197629{,}519\ kN\ x\ 9{,}81}{1000}$)

= 11261 kN

12. Distribusi beban gempa gempa statik ekuivalen

F_x = C_{vx} x V

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

Untuk T = 1,803, dapat ditentukan nilai k dengan interpolasi berikut.

k = $\frac{(2-1)\ x\ (1{,}803-0{,}5)}{(2{,}5-0{,}5)} + 1$

= 1,652

Tabel 5. 4 Nilai Gaya Seismik Lateral

Lantai	wi (kN)	h (m)	h^k	wi h^k	C_{vx} dan C_{vy}	Fx dan Fy (kN)
25	1088	78,6	1351	1470232	0,0161	181
24	6513	73,9	1220	7949237	0,0870	980
23	7715	70,6	1132	8732134	0,0956	1076
22	7591	67,6	1053	7996902	0,0875	985
21	7618	64,6	977	7445687	0,0815	918
20	7618	61,6	904	6883245	0,0753	848
19	7618	58,6	832	6338379	0,0694	781
18	7676	55,6	763	5855352	0,0641	722
17	7741	52,6	696	5387859	0,0590	664
16	7741	49,6	632	4889787	0,0535	603
15	7741	46,6	570	4410975	0,0483	544
14	7741	43,6	511	3951846	0,0432	487
13	7741	40,6	454	3512863	0,0384	433

Lanjutan Tabel 5. 4 Nilai Gaya Seismik Lateral

Lantai	wi (kN)	h (m)	h^k	wi h^k	C_{vx} dan C_{vy}	Fx dan Fy (kN)
12	7798	37,6	400	3117566	0,0341	384
11	7863	34,6	348	2740080	0,0300	338
10	7863	31,6	300	2358862	0,0258	291
9	7863	28,6	254	2000540	0,0219	247
8	7863	25,6	212	1665924	0,0182	205
7	7863	22,6	172	1355949	0,0148	167
6	7921	19,6	136	1079568	0,0118	133
5	7986	16,6	104	827217	0,0091	101
4	7986	13,6	75	595153	0,0065	73
3	7986	10,6	49	394326	0,0043	49
2	10843	7,6	29	309044	0,0034	38
1	11950	4,0	10	117983	0,0013	15
∑	197629			91386709	1	11261

5.3 Kontrol Ketidakberaturan Struktur

Sebelum melakukan analisis *pushover*, perlu dilakukan pemeriksaan terhadap ketidakberaturan struktur sesuai dengan ketentuan yang tercantum dalam SNI 1726:2019. Pemeriksaan ini bertujuan untuk mengidentifikasi karakteristik geometri, distribusi massa, dan kekakuan struktur yang berpotensi memengaruhi respons bangunan terhadap beban gempa. Struktur yang memiliki ketidakberaturan tertentu umumnya menunjukkan perilaku yang lebih kompleks dibandingkan struktur beraturan, seperti terjadinya konsentrasi gaya dalam, peningkatan simpangan, maupun distribusi sendi plastis yang tidak merata. Oleh karena itu, hasil

pemeriksaan ketidakberaturan menjadi salah satu dasar dalam menginterpretasikan perilaku struktur pada analisis *pushover*.

Pemeriksaan ketidakberaturan meliputi ketidakberaturan horizontal dan ketidakberaturan vertikal. Ketidakberaturan horizontal mencakup pemeriksaan terhadap torsi, sudut dalam, diskontinuitas diafragma, pergeseran bidang, dan sistem struktur yang tidak sejajar, sedangkan ketidakberaturan vertikal meliputi pemeriksaan kekakuan tingkat, distribusi massa, geometri vertikal, diskontinuitas elemen penahan gaya lateral, serta tingkat lemah. Rekapitulasi hasil pemeriksaan ketidakberaturan struktur disajikan pada Tabel 5.5 dan Tabel 5.6.

Tabel 5. 5 Rekapitulasi Ketidakberaturan Horizontal Struktur

No	Jenis Ketidakberaturan	Hasil Pemeriksaan	Kontrol
1	Torsi (H1a) arah X	Tidak ditemukan ketidakberaturan torsi	Memenuhi persyaratan
2	Torsi (H1a) arah Y	Terdapat ketidakberaturan torsi	Tidak memenuhi persyaratan
3	Sudut dalam	Terdapat sudut dalam dengan proyeksi >15% dimensi denah	Tidak memenuhi persyaratan
4	Diskontinuitas diafragma	Tidak ditemukan	Memenuhi persyaratan
5	Pergeseran keluar bidang	Tidak ditemukan	Memenuhi persyaratan
6	Sistem struktur tidak sejajar	Tidak ditemukan	Memenuhi persyaratan

.Berdasarkan Tabel 5.5, struktur gedung mengalami ketidakberaturan torsi pada arah Y dan ketidakberaturan sudut dalam. Ketidakberaturan torsi ditunjukkan oleh rasio simpangan maksimum terhadap simpangan rata-rata sebesar 1,274–1,323 pada sebagian besar tingkat, sedangkan arah X tidak mengalami ketidakberaturan torsi. Kondisi tersebut menunjukkan distribusi kekakuan yang tidak merata sehingga dapat meningkatkan respons torsi, simpangan, dan konsentrasi gaya pada elemen struktur tertentu. Ketidakberaturan sudut dalam juga menyebabkan respons

struktur terhadap beban lateral menjadi lebih kompleks, sehingga kedua kondisi tersebut perlu diperhitungkan dalam analisis gempa.

Berdasarkan ketentuan SNI 1726:2019, struktur dengan ketidakberaturan horizontal tipe torsi dan sudut dalam pada kategori desain seismik D, E, dan F memiliki ketentuan khusus dalam pemilihan prosedur analisis. Oleh karena struktur yang ditinjau termasuk dalam kategori desain seismik D, maka analisis gempa dilakukan menggunakan analisis linier dinamik dengan metode analisis spektrum respons ragam atau *Response Spectrum Analysis* (RSA). Penggunaan RSA memungkinkan respons struktur terhadap berbagai ragam getar diperhitungkan secara lebih representatif, termasuk pengaruh translasi pada dua arah utama dan respons torsi struktur. Dengan demikian, hasil analisis RSA digunakan sebagai dasar untuk memperoleh respons struktur, melakukan kontrol gaya geser dasar, partisipasi massa, dan simpangan antartingkat sebelum dilanjutkan dengan evaluasi kinerja menggunakan analisis *pushover*.

Tabel 5. 6 Rekapitulasi Ketidakberaturan Vertikal Struktur

No.	Jenis Ketidakberaturan	Hasil Pemeriksaan	Kontrol
1	Kekakuan tingkat lunak	Tidak ditemukan	Memenuhi persyaratan
2	Ketidakberaturan massa	Tidak ditemukan	Memenuhi persyaratan
3	Ketidakberaturan geometri vertikal	Tidak ditemukan	Memenuhi persyaratan
4	Diskontinuitas elemen penahan gaya lateral	Tidak ditemukan	Memenuhi persyaratan
5	Tingkat lemah	Tidak ditemukan	Memenuhi persyaratan

Berdasarkan Tabel 5.6, struktur tidak menunjukkan adanya ketidakberaturan vertikal. Seluruh pemeriksaan telah memenuhi persyaratan SNI 1726:2019. Hal ini menunjukkan bahwa distribusi massa, kekakuan, dan sistem penahan gaya lateral

pada arah vertikal relatif seragam sehingga tidak menimbulkan potensi konsentrasi respons gempa akibat perubahan karakteristik struktur antar lantai.

5.4 Kontrol Deformasi Struktur

5.4.1 Kontrol Gaya Geser Dasar Statik dan Dinamik

Pada tahap analisis respons spektrum, hasil analisis respons spektrum perlu diverifikasi melalui pemeriksaan gaya geser dasar sesuai dengan ketentuan SNI 1726:2019. Pemeriksaan ini bertujuan untuk memastikan bahwa gaya geser dasar hasil analisis dinamik tidak lebih kecil dari batas minimum yang disyaratkan. Apabila gaya geser dasar hasil analisis dinamik lebih kecil dari gaya geser dasar statik ekuivalen, maka hasil analisis dinamik harus dikalikan dengan faktor skala hingga memenuhi persyaratan. Rekapitulasi dari hasil analisis respons spektrum dapat dilihat pada Tabel 5.7.

Tabel 5. 7 Rekapitulasi Kontrol Gaya Geser Dasar

Arah	V_{Statik} (kN)	$V_{Dinamik}$ (kN)	Faktor Skala	$V_{dinamik}$ Setelah Skala (kN)	Kontrol
X	11261,883	3249,793	3,397	11261,883	Memenuhi
Y	11261,883	4207,439	2,608	11261,883	Memenuhi

Dari Tabel 5.7 diketahui bahwa gaya geser dasar hasil analisis respons spektrum pada arah X dan arah Y sebelum dilakukan penskalaan masih lebih kecil dibandingkan gaya geser dasar statik ekuivalen. Maka perlu dilakukan penskalaan dengan faktor sebesar 3,397 untuk arah Y dan 2,608 untuk arah Y sehingga gaya geser dasar hasil analisis dinamik menjadi sama dengan gaya geser dasar statik ekuivalen, yaitu sebesar 11261,883 kN. Dengan demikian, hasil analisis dinamik telah memenuhi ketentuan SNI 1726:2019 dan dapat digunakan sebagai dasar dalam evaluasi perilaku struktur melalui analisis *pushover*.

5.4.2 Kontrol Partisipasi Massa

Selain pemeriksaan gaya geser dasar, analisis dinamik juga diverifikasi melalui pemeriksaan partisipasi massa modal. Pemeriksaan ini bertujuan untuk memastikan bahwa jumlah mode getar yang digunakan telah mampu merepresentasikan respons dinamik struktur secara memadai. Berdasarkan ketentuan SNI 1726:2019, jumlah partisipasi massa kumulatif pada masing-masing arah utama struktur harus mencapai paling sedikit 90% dari massa total bangunan. Nilai partisipasi massa disajikan pada Tabel 5.8.

Tabel 5.8 Nilai Partisipasi Massa Ragam Terkombinasi

Arah	*Mode*	Partisipasi Massa Kumulatif	Persyaratan	Kontrol
X	13	95,4%	≥ 90%	Memenuhi
Y	13	90,1%	≥ 90%	Memenuhi

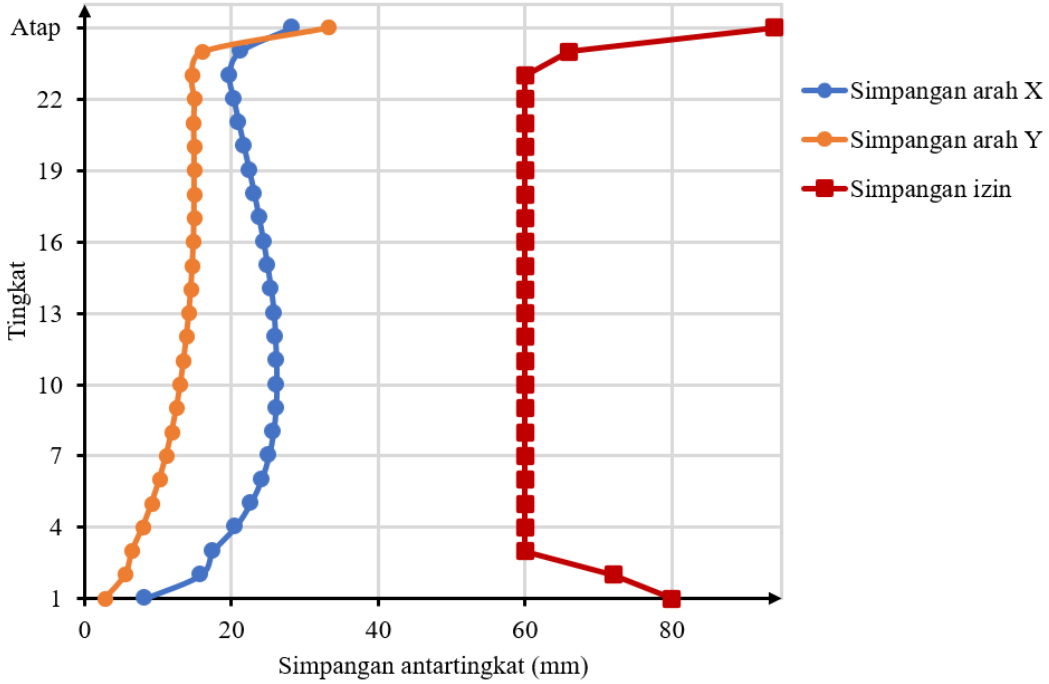
Berdasarkan Tabel 5.8, partisipasi massa kumulatif pada arah X mencapai 95,4%, sedangkan pada arah Y mencapai 90,1%. Kedua nilai tersebut telah memenuhi persyaratan minimum sebesar 90% sehingga jumlah mode getar yang digunakan dalam analisis dinamik sudah mampu merepresentasikan respons struktur terhadap pembebanan gempa.

5.4.3 Kontrol Simpangan Antartingkat

Berdasarkan SNI 1726:2019 Pasal 7.12.1, simpangan antartingkat desain harus dikontrol agar tidak melebihi simpangan antartingkat izin yang telah ditetapkan sehingga struktur tidak mengalami deformasi berlebihan yang dapat menyebabkan kerusakan pada elemen struktur maupun nonstruktur. Nilai simpangan antartingkat diperoleh dari hasil analisis respons spektrum yang telah memenuhi persyaratan penskalaan gaya geser dasar. Hasil analisis simpangan antartingkat dapat dilihat pada Tabel 5.9 dan Gambar 5.5.

Tabel 5.9 Kontrol Simpangan Antartingkat

Arah	Lantai Kritis	Simpangan Maksimum (mm)	Simpangan Izin (mm)	Kontrol
X	25	28,353	94	Memenuhi
Y	25	33,237	94	Memenuhi



Gambar 5. 5 Grafik Simpangan Antartingkat

Berdasarkan Gambar 5.5, nilai simpangan antartingkat pada setiap tingkat dipengaruhi oleh respons lateral struktur serta variasi tinggi antartingkat. Tinggi antartingkat yang berbeda menyebabkan nilai simpangan antartingkat izin juga berbeda, karena batas simpangan izin ditentukan berdasarkan tinggi tingkat yang ditinjau. Pada objek penelitian, tinggi tingkat bervariasi, yaitu 4,0 m pada tingkat 1, 3,5 m pada tingkat 2, 3,0 m pada tingkat 4–24, dan 4,7 m pada tingkat 25. Dengan demikian, nilai simpangan izin tidak dapat dianggap sama untuk seluruh tingkat.

Perbedaan tinggi tingkat tersebut menyebabkan batas simpangan izin menjadi lebih besar pada tingkat dengan tinggi lantai yang lebih besar dan lebih kecil pada

tingkat dengan tinggi lantai yang lebih rendah. Namun, nilai simpangan aktual pada setiap tingkat tidak hanya dipengaruhi oleh tinggi tingkat, tetapi juga oleh distribusi massa, kekakuan, dan gaya lateral sepanjang tinggi struktur. Berdasarkan hasil analisis, simpangan maksimum terjadi pada tingkat 25 sebesar 28,353 mm pada arah X dan 33,237 mm pada arah Y, sedangkan simpangan izin pada tingkat tersebut sebesar 94 mm. Dengan demikian, simpangan maksimum masih berada di bawah batas simpangan izin, sehingga struktur memenuhi persyaratan simpangan antartingkat.

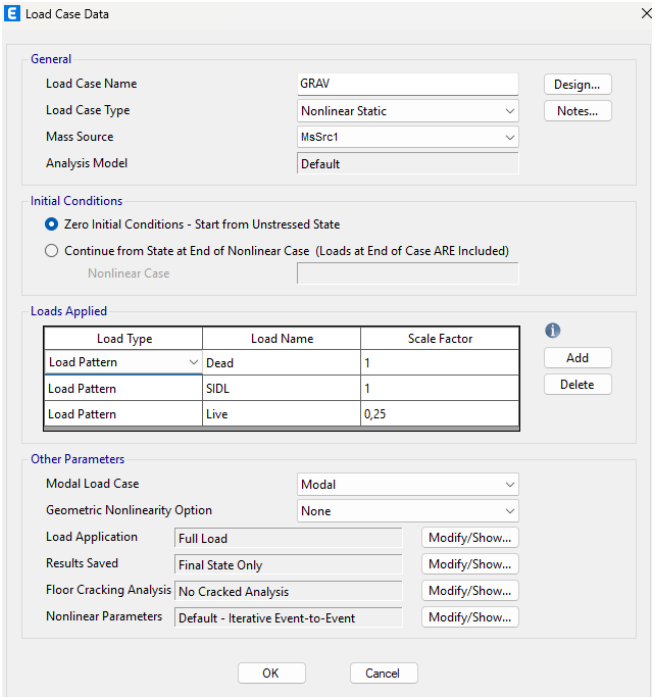
5.5 Analisis *Pushover*

5.5.1 Pendefinisian Beban *Pushover*

Analisis *pushover* dilakukan menggunakan perangkat lunak ETABS versi 22.7 terhadap model struktur tiga dimensi yang telah memenuhi persyaratan hasil analisis linear. Sebelum melakukan analisis, perlu terlebih dahulu mendefinisikan *load case* yang bekerja pada struktur bangunan untuk arah X dan arah Y. *Load case* didefinisikan dalam dua tahapan pembebanan. Tahap awal dilakukan dengan menganalisis struktur akibat kombinasi beban mati dan beban hidup dalam kondisi elastis, sedangkan tahap berikutnya dilakukan dengan menerapkan beban lateral secara bertahap hingga diperoleh respons nonlinier struktur.

1. Pendefinisian beban gravitasi

   Beban gravitasi yang bekerja pada struktur perlu terlebih dahulu didefinisikan pada ETABS. Pendefinisian *load case* dilakukan melalui menu *Define* > *Load Cases*, kemudian pilih *Add New Load Case*. Selanjutnya, parameter pembebanan diisi pada jendela *Load Case Data* sesuai dengan pengaturan yang ditunjukkan pada Gambar 5.6. Setelah itu, pada bagian *Load Application* pilih *Modify/Show*, kemudian atur *Load Application Control* dengan memilih opsi *Full Load*. Pada bagian *Monitored Displacement*, pilih opsi *DOF/Joint* dengan derajat kebebasan (DOF) U3, sedangkan titik acuan perpindahan ditetapkan pada lantai paling atas di pusat bangunan. Setelah seluruh parameter selesai diatur, klik *OK* untuk menyimpan pengaturan. Tampilan tahapan pendefinisian beban gravitasi disajikan pada Gambar 5.6.

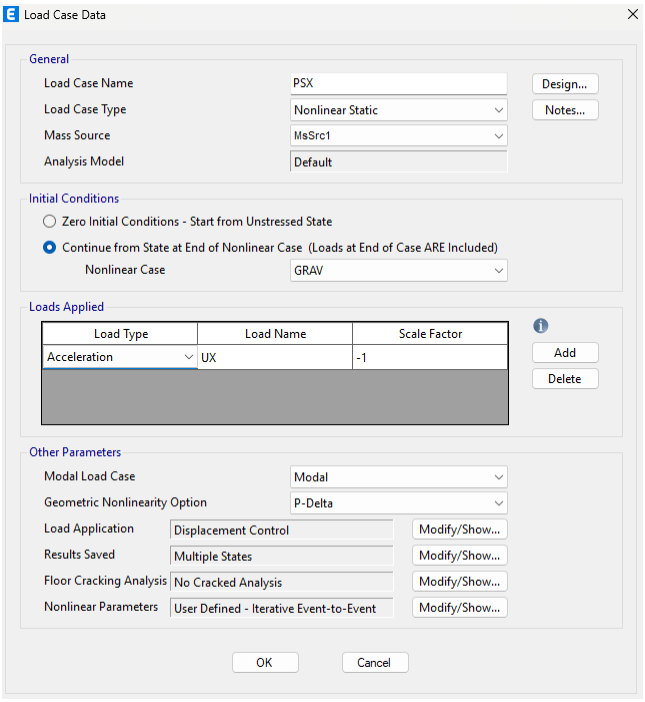


Gambar 5. 6 Pendefinisian Beban Gravitasi
(Sumber: *Software* ETABS)

2. Pendefinisian beban lateral *pushover* arah X dan Y

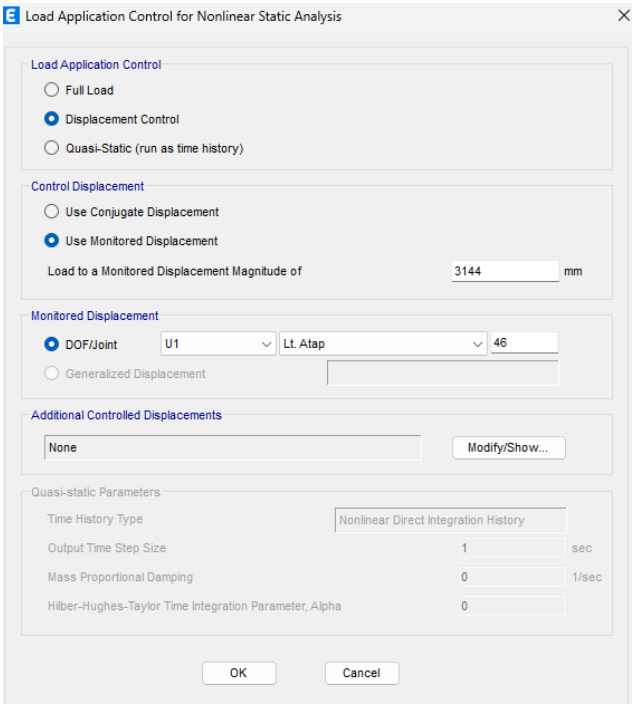
   Beban lateral untuk analisis *pushover* didefinisikan pada perangkat lunak ETABS melalui menu *Define* > *Load Cases*, kemudian pilih *Add New Load Case*. Selanjutnya, parameter pembebanan diatur pada jendela *Load Case Data* sesuai dengan konfigurasi yang ditunjukkan pada Gambar 5.7. Pada bagian *Load Application*, pilih Modify/Show, kemudian atur *Load Application Control* dengan memilih opsi *Full Load*. Selanjutnya, pada bagian *Control Displacement*, pilih opsi *Use Monitored Displacement* dan masukkan nilai perpindahan sebesar 2% dari tinggi total bangunan. Pada bagian *Monitored Displacement*, pilih opsi *DOF/Joint* dengan derajat kebebasan (DOF) U1, kemudian tetapkan titik acuan perpindahan pada lantai paling atas di pusat bangunan. Setelah seluruh pengaturan selesai dilakukan, klik *OK* untuk

menyimpan konfigurasi *load case*. Lakukan tahapan yang sama untuk beban lateral pada arah Y. Tampilan tahapan pendefinisian beban lateral *pushover* disajikan pada Gambar 5.7 hingga 5.8.



Gambar 5. 7 Pendefinisian Beban *Pushover* Arah X

(Sumber: *Softwar*e ETABS)



Gambar 5. 8 Pendefinisian Target Perpindahan *Pushover* Arah X

(Sumber: *Software* ETABS)

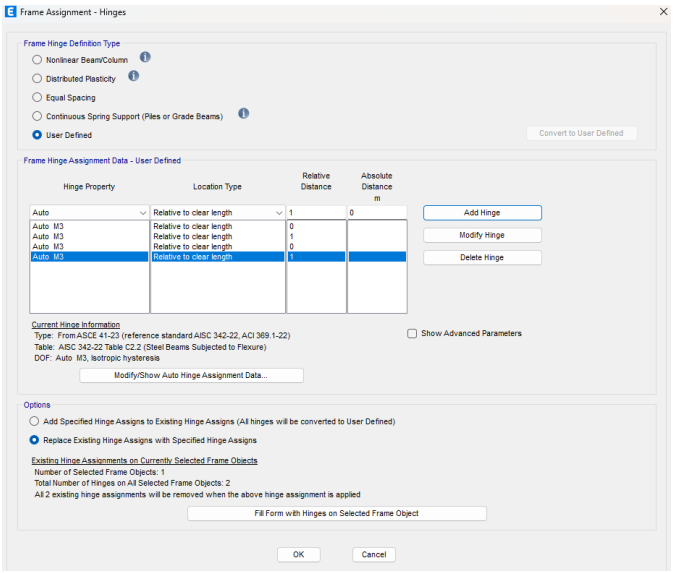
5.5.2 Pendefinisian Sendi Plastis

Pendefinisian sendi plastis dilakukan untuk mengetahui kondisi plastisitas struktur bangunan yang ditinjau, kondisi plastisitas struktur ditargetkan terjadi lebih dahulu pada elemen balok kemudian elemen kolom. Pendefinisian sendi plastis pada ETABS dilakukan dengan tahapan sebagai berikut.

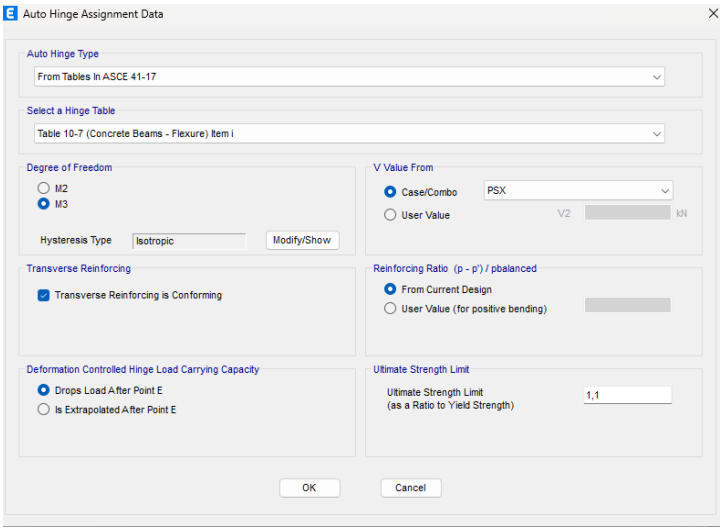
1. Pendefinisian sendi plastis elemen balok

   Pendefinisian sendi plastis pada elemen balok dilakukan pada perangkat lunak ETABS dengan terlebih dahulu memilih seluruh tipe penampang balok yang dimodelkan melalui menu *Select* > *Properties* > *Frame Section*. Selanjutnya, sendi plastis didefinisikan melalui menu *Assign* > *Frame* > *Hinge*, kemudian pada jendela *Frame Hinge Assignment Data* pilih *Add New Hinge* dengan tipe properti *Auto M3*. Lokasi sendi plastis diatur pada *Location Type* > *Relative to Clear Length* dengan nilai *0 dan 1*, yang menunjukkan bahwa sendi plastis ditempatkan pada kedua ujung balok. Setelah itu, pilih tombol *Modify*, kemudian pada menu *Auto Hinge Assignment* pilih tipe ASCE 41-17 serta parameter

lainnya disesuaikan. Tampilan tahapan pendefinisian sendi plastis elemen balok disajikan pada Gambar 5.9 hingga 10.



Gambar 5. 9 *Frame Assignment* Balok
(Sumber: *Software* ETABS)

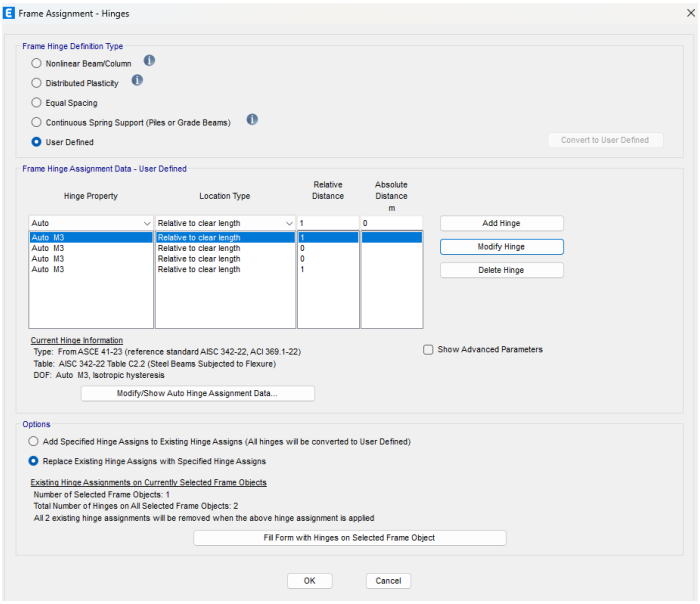


Gambar 5. 10 Pendefinisian Sendi Plastis Balok
(Sumber: *Software* ETABS)

2. Pendefinisian sendi plastis elemen kolom

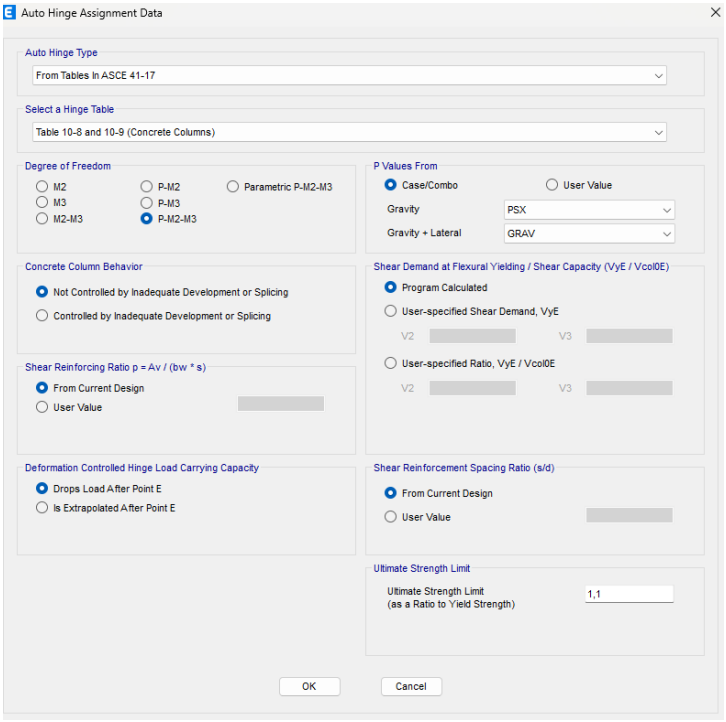
   Pendefinisian sendi plastis pada elemen kolom dilakukan dengan memilih seluruh tipe penampang kolom yang dimodelkan melalui menu *Select* > *Properties* > *Frame Section*. Selanjutnya, sendi plastis didefinisikan melalui

menu *Assign* > *Frame* > *Hinge*, kemudian pada jendela *Frame Hinge Assignment Data* pilih *Add New Hinge* dengan tipe properti *Auto P-M2-M3*. Lokasi sendi plastis diatur pada *Relative to Clear Length* dengan nilai 0 dan 1, yang menunjukkan bahwa sendi plastis ditempatkan pada kedua ujung kolom. Setelah itu, klik *Modify*, kemudian pada menu *Auto Hinge* Assignment pilih tipe ASCE 41-17 dan sesuaikan parameter yang diperlukan. Setelah seluruh pengaturan selesai dilakukan. Tampilan tahapan pendefinisian sendi plastis elemen balok disajikan pada Gambar 5.11 hingga 12.



Gambar 5. 11 *Frame Assignment* Kolom

(Sumber: *Software* ETABS)

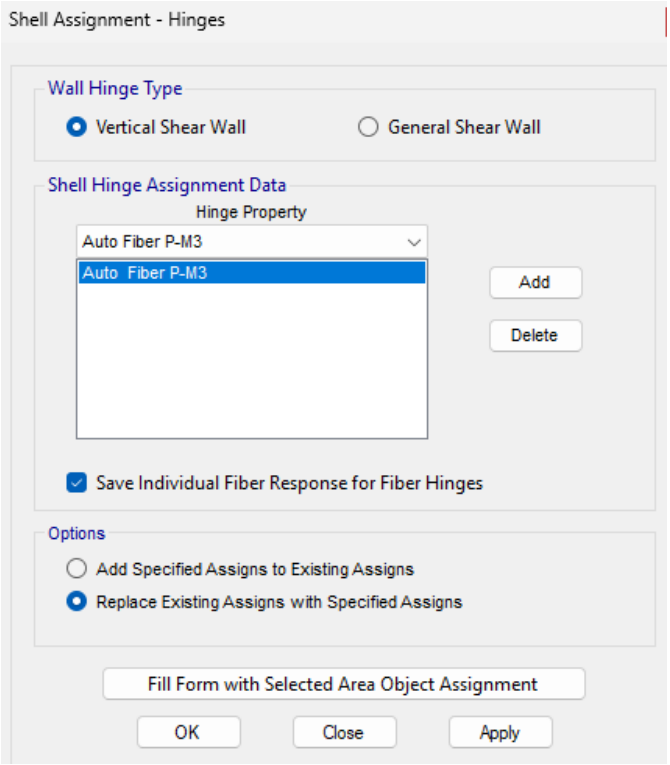


Gambar 5. 12 Pendefinisian Sendi Plastis Kolom

(Sumber: *Software* ETABS)

3. Pendefinisian sendi plastis elemen dinding geser

   Pendefinisian sendi plastis pada elemen dinding geser dilakukan dengan memilih seluruh elemen dinding geser yang dimodelkan melalui menu *Select* > *Properties* > *Wall/Slab Section* atau dengan memilih langsung elemen dinding geser pada tampilan model. Selanjutnya, sendi plastis didefinisikan melalui menu *Assign* > *Shell* > *Hinges*, kemudian pada jendela *Shell Hinge Assignment Data* pilih *Add New Hinge* dengan tipe properti *Auto Fiber P-M3*. Tampilan tahapan pendefinisian sendi plastis elemen balok disajikan pada Gambar 5.13.



Gambar 5. 13 Pendefinisian Sendi Plastis Dinding Geser

(Sumber: *Software* ETABS)

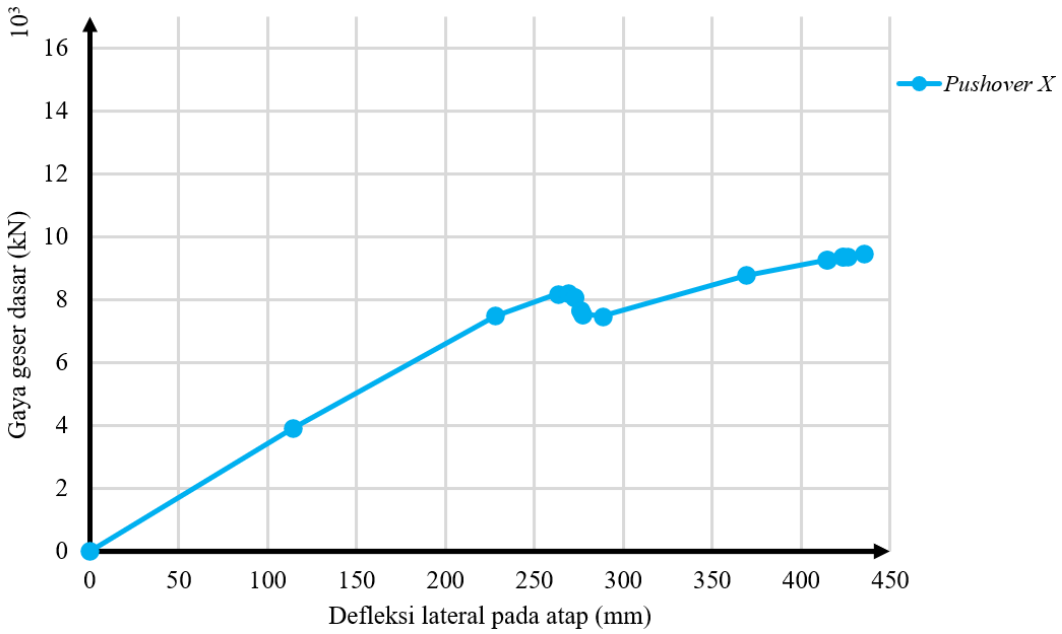
Setelah proses pendefinisian beban *pushover* dan sendi plastis pada elemen struktur selesai, analisis *pushover* dapat dijalankan menggunakan ETABS.

5.6 Kurva Kapasitas Struktur

Berdasarkan hasil analisis yang telah dilakukan dengan *software* ETABS, diperoleh kurva kapasitas yang menggambarkan hubungan antara gaya geser dasar terhadap defleksi lateral pada atap. Kurva ini digunakan untuk mengevaluasi kemampuan struktur dalam menahan deformasi hingga batas tertentu sebelum mengalami kondisi keruntuhan. Nilai kurva kapasitas disajikan pada Tabel 5.10.

Tabel 5.10 Nilai Kurva Kapasitas Arah X

Step	Defleksi Lateral Atap (mm)	Gaya Geser Dasar (kN)
0	0	0
1	113,9	3898,274
2	227,8	7479,790
3	262,903	8178,311
4	268,859	8206,102
5	272,082	8068,753
6	272,094	8074,618
7	272,105	8070,198
8	275,982	7653,271
9	275,993	7669,803
10	276,005	7653,659
11	277,006	7521,744
12	277,017	7536,807
13	288,184	7473,435
14	389,12	8767,584
15	413,839	9256,083
16	414,341	9259,556
17	423,176	9353,879
18	423,187	9351,267
19	425,832	9354,198
20	434,959	9461,303

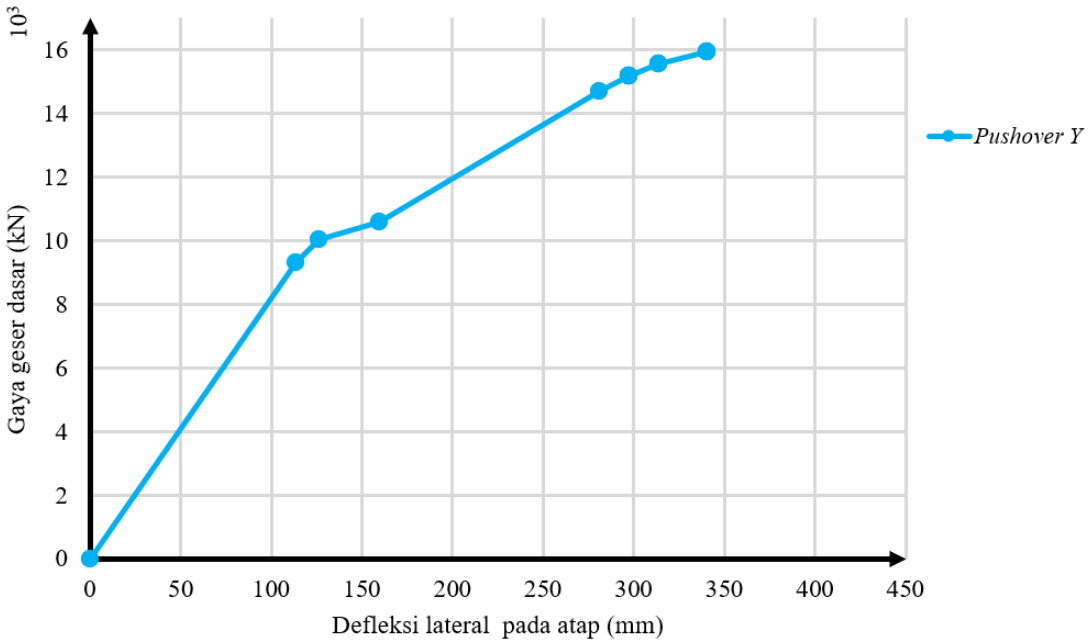


Gambar 5. 14 Grafik Kurva Kapasitas Arah X

Dari hasil grafik yang disajikan pada Gambar 5.14, kurva kapasitas arah X menunjukkan fase elastis awal yang cukup landai hingga defleksi lateral pada atap sekitar 227,8 mm dengan gaya geser dasar 7479,79 kN, yang mengindikasikan mulai terjadinya leleh pada elemen struktur. Setelah titik ini, kurva memasuki fase inelastis dengan kenaikan gaya geser yang jauh lebih landai, bahkan sempat mengalami penurunan kapasitas pada rentang *step* 6–7, dari 8074,618 kN menjadi 8070,198 kN dengan perpindahan yang relatif tetap. Penurunan ini mengindikasikan terjadinya pelelehan signifikan dan awal pembentukan sendi plastis pada elemen pengontrol yang menyebabkan redistribusi gaya ke elemen lain. Setelah fase ini, kurva kembali naik hingga mencapai gaya geser dasar maksimum 9461,303 kN dengan defleksi lateral pada atap sejauh 434,959 mm.

Tabel 5.11 Nilai Kurva Kapasitas Arah Y

Step	Defleksi Lateral Atap (mm)	Gaya Geser Dasar (kN)
0	0	0
1	113,9	9301,152
2	126,633	10038,203
3	159,698	10594,550
4	281,309	14701,298
5	297,121	15183,749
6	297,133	15177,9088
7	297,133	15177,909
8	297,144	15177,909
9	314,02	15535,574
10	314,021	15535,508
11	340,536	15932,794
12	340,581	15933,223
13	340,613	15933,776



Gambar 5. 15 Grafik Kurva Kapasitas Arah Y

Dari hasil grafik yang disajikan pada Gambar 5.15, kurva kapasitas arah Y menunjukkan perilaku yang lebih kaku dan lebih kuat dibandingkan arah X, dengan gaya geser dasar yang jauh lebih tinggi pada defleksi lateral atap yang jauh lebih kecil. Fase leleh terjadi pada defleksi lateral atap sekitar 126–159 mm dengan gaya geser dasar sebesar 10038,203–10594,550 kN, kemudian kurva terus meningkat hingga mencapai gaya geser dasar maksimum sebesar 15933,776 kN dengan defleksi lateral atap sejauh 340,613 mm. Tidak ditemukan penurunan kapasitas yang signifikan pada arah Y sehingga mengindikasikan bahwa mekanisme keruntuhan pada arah ini berlangsung lebih daktail dan terdistribusi, berbeda dengan arah X yang menunjukkan penurunan kapasitas mendadak akibat konsentrasi kerusakan pada elemen tertentu.

Berdasarkan hasil analisis kedua kurva kapasitas, dapat disimpulkan bahwa struktur memiliki kekakuan dan kapasitas gaya geser dasar yang lebih besar pada arah Y dibandingkan arah X. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa kontribusi dinding geser terhadap kekakuan dan kapasitas lateral lebih dominan pada arah Y, sedangkan arah X relatif lebih fleksibel dan memiliki kapasitas yang lebih rendah. Perbedaan respons pada kedua arah juga dipengaruhi oleh konfigurasi dinding geser yang tidak simetris, yang menyebabkan distribusi kekakuan tidak merata dan menimbulkan eksentrisitas antara pusat massa dan pusat kekakuan. Eksentrisitas tersebut menghasilkan respons torsi ketika struktur menerima beban lateral sehingga respons translasi dan rotasi terjadi secara bersamaan. Akibatnya, distribusi deformasi dan gaya pada elemen struktur menjadi tidak seragam dan dapat memengaruhi pola pembentukan sendi plastis pada tahap inelastik. Dengan demikian, respons torsi akibat ketidaksimetrisan konfigurasi dinding geser menjadi salah satu faktor yang perlu diperhatikan dalam mengevaluasi perilaku seismik struktur, khususnya pada arah X yang menunjukkan kapasitas dan kekakuan lateral lebih rendah dibandingkan arah Y.

5.7 Mekanisme Pembentukan Sendi Plastis

5.7.1 Urutan Pembentukan Sendi Plastis

Kondisi plastis pada suatu penampang terjadi ketika pembebanan yang diberikan meningkat secara bertahap hingga mencapai titik leleh penampang tersebut. Sebelum mencapai kondisi tersebut, yaitu saat beban yang bekerja masih berada di bawah batas leleh, penampang akan menunjukkan perilaku elastis sehingga deformasi yang terjadi masih bersifat elastis. Mekanisme pembentukan sendi plastis dievaluasi berdasarkan status sendi pada setiap elemen struktur mengikuti kriteria FEMA 356, yang membagi status sendi ke dalam kurva *backbone* gaya-deformasi tingkat A-B, B-C, C-D, D-E, dan >E serta tingkat kinerja A-IO, IO-LS, LS-CP, dan >CP. Rekapitulasi pembentukan sendi plastis dari analisis *pushover* untuk kedua arah disajikan pada Tabel 5.12 dan 5.13.

Tabel 5.12 Rekapitulasi Pembentukan Sendi Plastis Arah X

Step	**A-B**	**B-C**	**C-D**	**D-E**	**>E**	**A-IO**	**IO-LS**	**LS-CP**	**>CP**
0	6466	0	0	0	0	6466	0	0	0
1	6466	0	0	0	0	6466	0	0	0
2	6466	0	0	0	0	6466	0	0	0
3	6463	3	0	0	0	6466	0	0	0
4	6460	6	0	0	0	6466	0	0	0
5	6459	7	0	0	0	6466	0	0	0
6	6458	8	0	0	0	6466	0	0	0
7	6456	10	0	0	0	6465	1	0	0
8	6454	10	0	0	0	6465	1	0	0
9	6454	12	0	0	0	6465	1	0	0
10	6454	12	0	0	0	6465	1	0	0
11	6454	12	0	0	0	6465	1	0	0
12	6454	12	0	0	0	6465	1	0	0
13	6452	14	0	0	0	6465	1	0	0
14	6433	33	0	0	0	6465	1	0	0
15	6422	44	0	0	0	6465	1	0	1

Lanjutan Tabel 5.12 Rekapitulasi Pembentukan Sendi Plastis Arah X

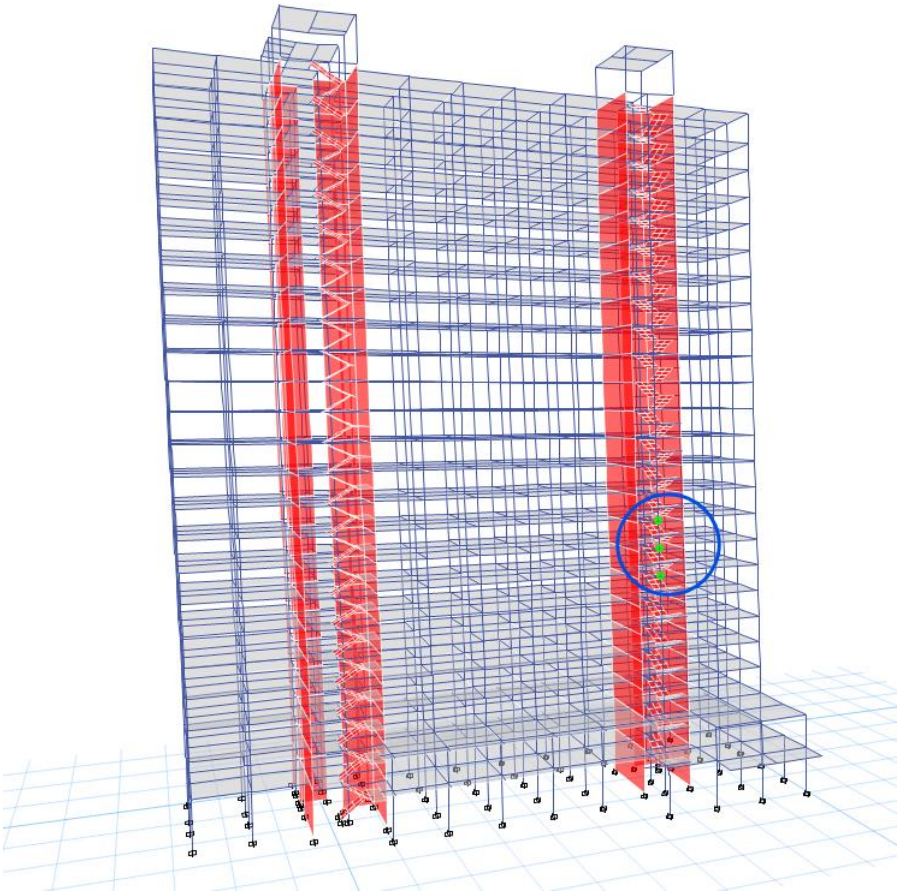
Step	A-B	B-C	C-D	D-E	>E	A-IO	IO-LS	LS-CP	>CP
16	6421	45	0	0	0	6463	2	0	1
17	6421	44	0	0	0	6460	5	0	1
18	6421	44	1	0	0	6458	7	0	1
19	6421	44	0	0	1	6456	9	0	1
20	6421	44	0	0	1	6456	9	0	1

Tabel 5.13 Rekapitulasi Pembentukan Sendi Plastis Arah Y

Step	A-B	B-C	C-D	D-E	>E	A-IO	IO-LS	LS-CP	>CP
0	6466	0	0	0	0	6466	0	0	0
1	6466	0	0	0	0	6466	0	0	0
2	6465	1	0	0	0	6466	0	0	0
3	6465	1	0	0	0	6466	0	0	0
4	6460	6	0	0	0	6466	0	0	0
5	6456	10	0	0	0	6466	0	0	0
6	6456	10	0	0	0	6466	0	0	0
7	6456	10	0	0	0	6466	0	0	0
8	6456	10	0	0	0	6466	0	0	0
9	6453	13	0	0	0	6464	2	0	0
10	6453	13	0	0	0	6464	2	0	0
11	6451	14	1	0	0	6460	4	0	2
12	6451	14	1	0	0	6460	4	0	2
13	6451	14	1	0	0	6460	4	0	2

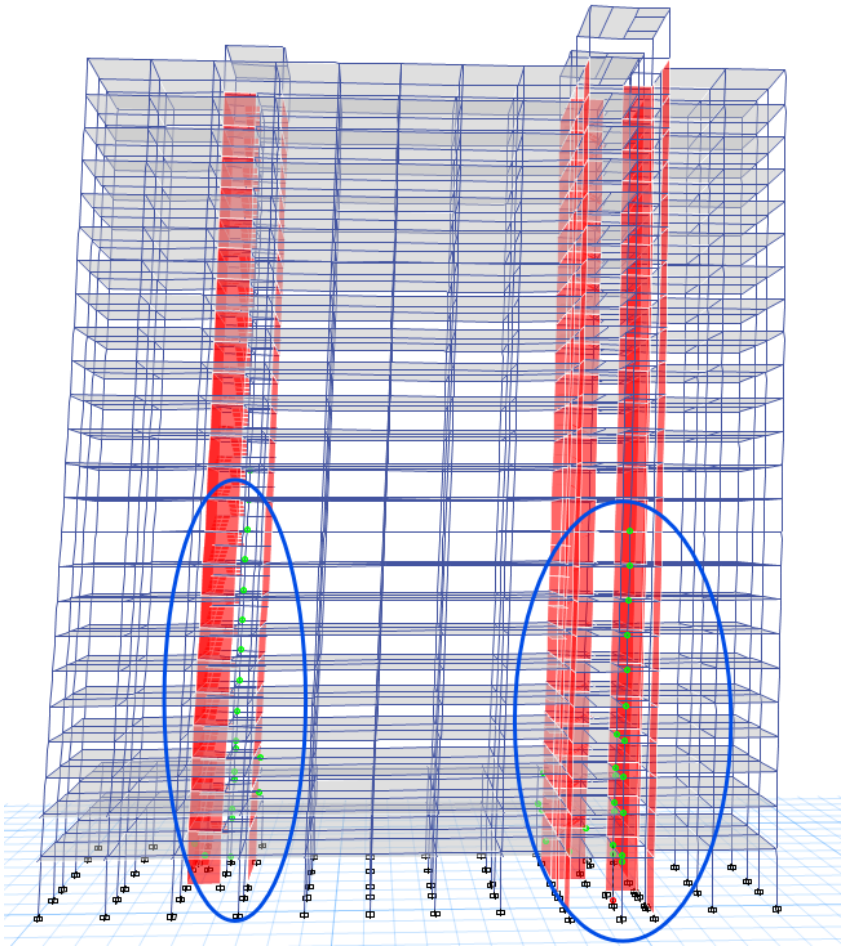
1. Mekanisme sendi plastis arah X

   Berdasarkan hasil analisis *pushover* arah X, pembentukan sendi plastis *mulai* terjadi pada *step* ke-3 yang ditandai dengan munculnya titik-titik sendi plastis berwarna hijau pada elemen kolom. Warna hijau tersebut menunjukkan bahwa sendi plastis telah mencapai tingkat kinerja B, yang mengindikasikan awal terjadinya pelelehan pada elemen struktur. Kondisi pembentukan sendi plastis pada *step* ke-3 disajikan pada Gambar 5.16.



Gambar 5. 16 Terjadinya Sendi Plastis Pertama Arah X

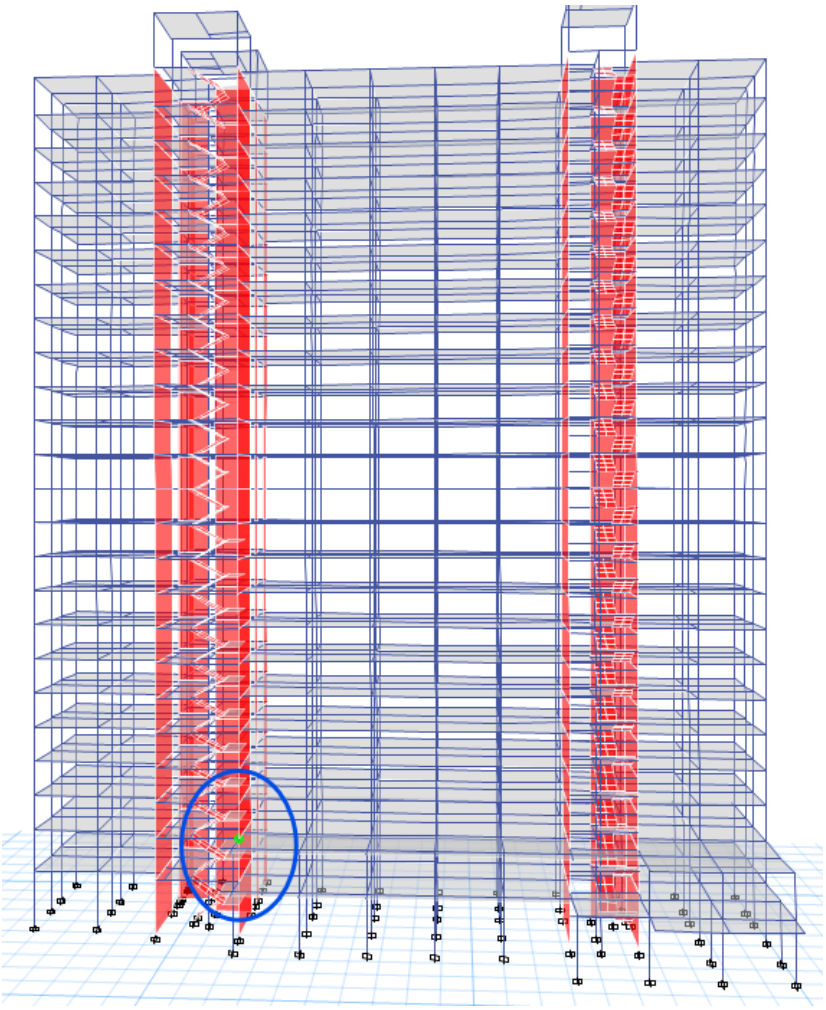
Pembentukan sendi plastis pada arah X mencapai kondisi akhir pada *step* ke-20 dengan 1 elemen kolom telah memasuki tingkat kinerja *Collapse Prevention* (CP). Kondisi tersebut mengindikasikan bahwa elemen mengalami kerusakan berat yang menyebabkan berkurangnya kapasitas kekuatan struktur. Kondisi pembentukan sendi plastis pada *step* ke-20 disajikan pada Gambar 5.17.



Gambar 5. 17 Terjadinya Sendi Plastis Akhir Arah X

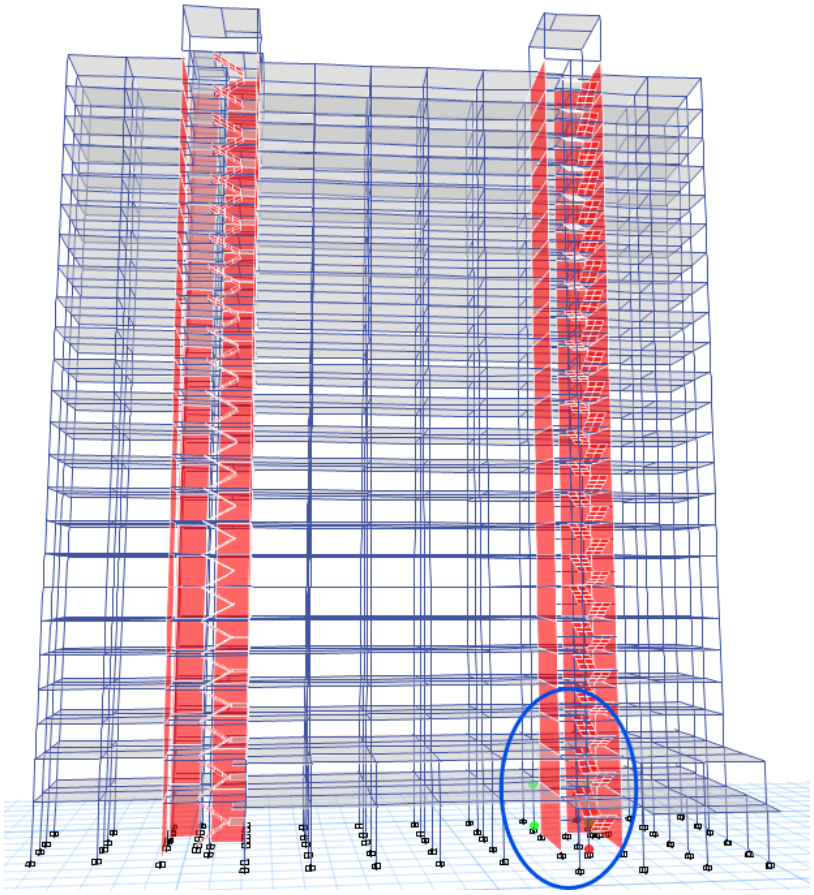
2. Mekanisme sendi plastis arah Y

   Berdasarkan hasil analisis *pushover* arah Y, pembentukan sendi plastis *mulai* terjadi pada *step* ke-2 yang ditandai dengan munculnya titik-titik sendi plastis berwarna hijau pada elemen balok. Warna hijau tersebut menunjukkan bahwa sendi plastis telah mencapai tingkat kinerja B, yang mengindikasikan awal terjadinya pelelehan pada elemen struktur. Kondisi pembentukan sendi plastis pada *step* ke-3 disajikan pada Gambar 5.18.



Gambar 5. 18 Terjadinya Sendi Plastis Pertama Arah Y

Pembentukan sendi plastis pada arah Y mencapai kondisi akhir pada *step* ke-13 dengan terdapat 2 elemen kolom telah memasuki tingkat kinerja *Collapse Prevention* (CP). Kondisi pembentukan sendi plastis pada *step* ke-13 disajikan pada Gambar 5.19.



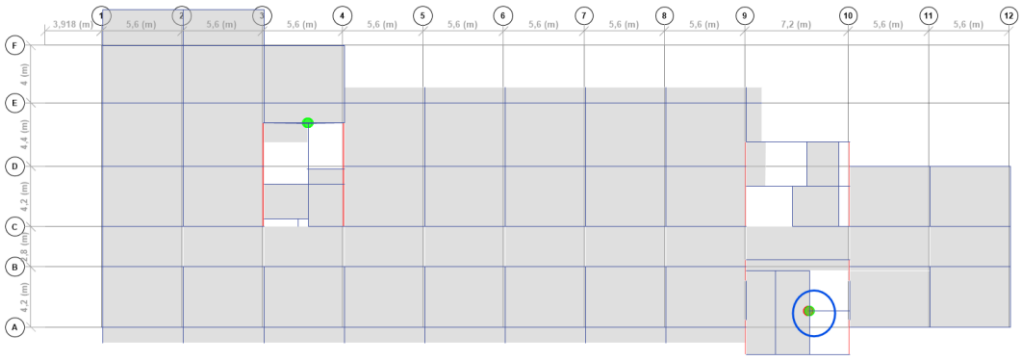
Gambar 5. 19 Terjadinya Sendi Plastis Akhir Arah Y

5.7.2 Mekanisme Keruntuhan

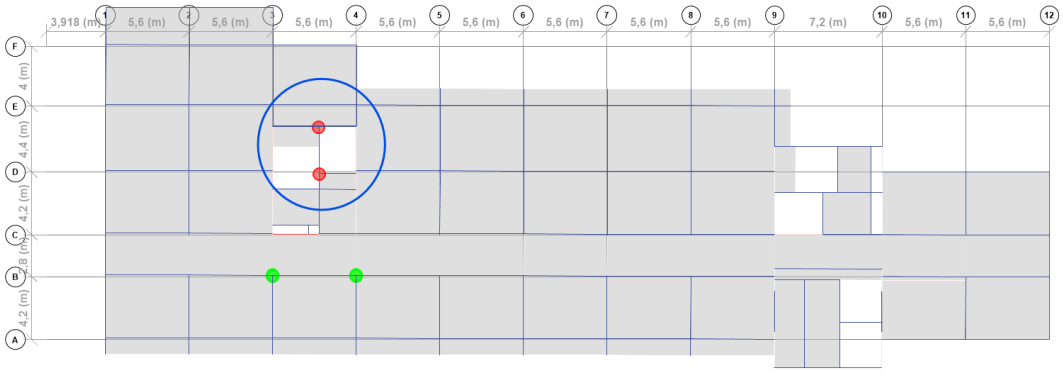
Berdasarkan hasil analisis sendi plastis pada elemen yang melampaui tingkat CP, menunjukkan bahwa elemen pengontrol mekanisme keruntuhan lokal adalah elemen kolom dengan tipe KL pada tingkat 1 untuk arah X dan kolom dengan tipe KL dan KT untuk arah Y. Tipe dan lokasi elemen pengontrol mekanisme keruntuhan disajikan pada Tabel 5.14 dan Gambar 5.20 hingga 5.21.

Tabel 5.14 Elemen Pengontrol Mekanisme Keruntuhan

Arah	Elemen	Lantai	Tingkat Kurva	Tingkat Kinerja
X	Kolom KL	1	>E	>CP
Y	Kolom KL	1	C-D	>CP
Y	Kolom KT	1	C-D	>CP



Gambar 5. 20 Elemen Pengontrol Mekanisme Keruntuhan Arah X



Gambar 5. 21 Elemen Pengontrol Mekanisme Keruntuhan Arah Y

Terkonsentrasinya sendi plastis kritis elemen kolom di tingkat 1 pada kedua arah pembebanan mengindikasikan adanya potensi mekanisme *sway column* yang bersifat lokal pada lantai tersebut. Hal ini disebabkan oleh dimensi penampang yang relatif kecil, gaya aksial yang besar akibat beban gravitasi. Meskipun demikian, jumlah sendi yang melampaui tingkat CP sangat kecil.

5.8 Penentuan Target Perpindahan Berdasarkan FEMA 440

Penentuan target perpindahan (δ_T) dilakukan dengan metode koefisien perpindahan sesuai prosedur penyesuaian FEMA 440, yang memperbaiki keterbatasan prosedur FEMA 356 dalam memperhitungkan efek periode efektif (T_e), rasio kekuatan (R), serta faktor koefisien C_1 dan C_2 secara lebih representatif terhadap perilaku nonlinier struktur. Kurva kapasitas bilinier diidealisasi untuk memperoleh kekakuan awal (K_i), gaya leleh efektif (V_y), dan perpindahan leleh efektif (Δ_y), yang kemudian digunakan untuk menghitung periode efektif (T_e). Adapun perhitungannya sebagai berikut.

1. *Pushover* arah sumbu X
   a. Menghitung periode efektif, T_e

$$K_i = \frac{V_y}{\Delta_y}$$

$$= \frac{6906\ kN}{0{,}2028\ m}$$

$$= 34047{,}28\ \text{kN/m}$$

$$0{,}6V_y = 0{,}6 \times 6906\ kN$$

$$= 4143{,}38\ \text{kN}$$

$$0{,}6\Delta_y = 0{,}6 \times 202{,}8\ mm$$

$$= 121{,}695\ \text{mm}$$

$$K_e = \frac{0{,}6V_y}{0{,}6\Delta_y}$$

$$= \frac{4143{,}38\ kN}{0{,}121\ m}$$

$$= 34047{,}28\ \text{kN/m}$$

$$T_e = T_i\sqrt{\frac{K_i}{K_e}}$$

$$= 3{,}428 \times \sqrt{\frac{34047{,}28\ kN/m}{34047{,}28\ kN/m}}$$

$= 3{,}428s$

b. Penentuan rasio perkuatan, R

$S_a = \frac{S_{D1}}{T_e}$

$= \frac{0{,}417}{3{,}428\ s}$

$= 0{,}122$ g

$R = \frac{S_a}{V_y/W}\ C_m$

$= \frac{0{,}122\ g}{6906\ kN/197629{,}519\ kN}\ x\ 1$

$= 3{,}480$

c. Penentuan koefisien C_0

Faktor modifikasi untuk mengaitkan perpindahan spektral sistem SDOF ekuivalen dengan defleksi lateral atap bangunan sistem MDOF ditentukan dengan mengacu pada Tabel 3.6. Dengan karakteristik struktur bangunan yang merupakan bangunan geser yang memiliki jumlah tingkat sebanyak 25 tingkat dengan pola beban lateral yang seragam, maka digunakan nilai faktor modifikasi (C_0) sebesar 1,2.

d. Penentuan koefisien pembesaran inelastis (C_1)

Berdasarkan Persamaan 3.33, karena nilai periode efektif struktur (T_e) lebih dari 1 detik maka nilai koefisien C_1 dapat diasumsikan sebesar 1.

e. Penentuan koefisien efek degradasi siklik (C_2)

Berdasarkan Persamaan 3.34, karena nilai periode efektif struktur (T_e) lebih dari 0,7 detik maka nilai koefisien C_2 dapat diasumsikan sebesar 1.

f. Penentuan target perpindahan

$\delta_T = C_0 C_1 C_2 S_a \frac{T_e^2}{4\pi^2} g$

$= 1{,}2\ x\ 1\ x\ 1\ x\ 0{,}122\ x\ \frac{3{,}428^2}{4\pi^2}\ x\ 9{,}81$

$= 0{,}426$ m

2. *Pushover* arah sumbu y

   a. Menghitung periode efektif, T_e

$K_i = \frac{V_y}{\Delta_y}$

$= \frac{10071{,}41\ kN}{0{,}123\ m}$

$= 81660{,}69$ kN/m

$0{,}6V_y = 0{,}6 \times 10071{,}41\ kN$

$= 6042{,}84$ kN

$0{,}6\Delta_y = 0{,}6 \times 123\ mm$

$= 73{,}99$ mm

$K_e = \frac{0{,}6V_y}{0{,}6\Delta_y}$

$= \frac{6042{,}84\ kN}{0{,}073\ mm}$

$= 81660{,}69$ kN/m

$T_e = T_i\sqrt{\frac{K_i}{K_e}}$

$= 2{,}106 \times \sqrt{\frac{81660{,}69\ kN/m}{81660{,}69\ kN/m}}$

$= 2{,}106\ s$

   b. Penentuan rasio perkuatan, R

$S_a = \frac{S_{D1}}{T_e}$

$= \frac{0{,}417}{2{,}106\ s}$

$= 0{,}198$ g

$R = \frac{S_a}{V_y/W}\ C_m$

$$= \frac{0{,}198\ g}{10071{,}41\ kN / 197629{,}519\ kN}\ x\ 1$$

$$= 3{,}884$$

c. Penentuan koefisien C_0

Faktor modifikasi untuk mengaitkan perpindahan spektral sistem SDOF ekuivalen dengan defleksi lateral atap bangunan sistem MDOF ditentukan dengan mengacu pada Tabel 3.6. Dengan karakteristik struktur bangunan yang merupakan bangunan geser yang memiliki jumlah tingkat sebanyak 25 tingkat dengan pola beban lateral yang seragam, maka digunakan nilai faktor modifikasi (C_0) sebesar 1,2.

d. Penentuan koefisien pembesaran inelastis (C_1)

Berdasarkan Persamaan 3.33, karena nilai periode efektif struktur (T_e) lebih dari 1 detik maka nilai koefisien C_1 dapat diasumsikan sebesar 1.

e. Penentuan koefisien efek degradasi siklik (C_2)

Berdasarkan Persamaan 3.34, karena nilai periode efektif struktur (T_e) lebih dari 0,7 detik maka nilai koefisien C_2 dapat diasumsikan sebesar 1.

f. Penentuan target perpindahan

$$\delta_T = C_0 C_1 C_2 S_a \frac{T_e^2}{4\pi^2} g$$

$$= 1{,}2\ x\ 1\ x\ 1\ x\ 0{,}198\ x\ \frac{2{,}106^2}{4\pi^2}\ x\ 9{,}81$$

$$= 0{,}261 \text{ m}$$

Rekapitulasi hasil perhitungan target perpindahan pada arah X dan arah Y disajikan pada Tabel 5.15.

Tabel 5.15 Rekapitulasi Target Perpindahan FEMA 440

Parameter	Arah X	Arah Y
Periode efektif, T_e (detik)	3,428	2,106
Rasio kekuatan, R	3,480	3,884
Faktor modifikasi ragam ke perpindahan atap, C_0	1,2	1,2
Faktor modifikasi perpindahan inelastis, C_1	1	1
Faktor modifikasi degradasi siklik,C_2	1	1
Percepatan spektral, S_a (g)	0,122	0,198
Target perpindahan, δ_T (m)	0,426	0,261

Hasil analisis menunjukkan target perpindahan arah X sebesar 0,426 m, sedangkan arah Y sebesar 0,261 m. Nilai tersebut mengindikasikan bahwa struktur memerlukan deformasi yang lebih besar pada arah Y untuk mencapai kondisi keseimbangan antara kapasitas struktur dengan tuntutan gempa. Hal ini disebabkan oleh kekakuan arah X yang lebih kecil sehingga struktur lebih fleksibel ketika menerima pembebanan lateral. Sebaliknya, arah Y memiliki target perpindahan lebih kecil akibat kekakuan lateral yang lebih besar. Nilai kekakuan elastis (K_e) arah Y mencapai 81660,69 kN/m, sedangkan arah x hanya sekitar 34047,28 kN/m. Perbedaan kekakuan tersebut menyebabkan periode efektif arah X lebih panjang dibanding arah Y.

Semakin panjang periode struktur, maka simpangan maksimum akibat gempa umumnya semakin besar. Oleh karena itu, arah X menghasilkan target perpindahan yang lebih tinggi dibanding arah Y. Dengan demikian, hasil target perpindahan menunjukkan bahwa struktur masih mampu mengakomodasi deformasi akibat gempa tanpa kehilangan stabilitas global.

5.9 Penentuan Rasio Simpangan Berdasarkan FEMA 356

Rasio simpangan kinerja berdasarkan FEMA 356 dapat dihitung dengan membagi target perpindahan (δ_T) terhadap tinggi total struktur (H_{total}), kemudian dibandingkan terhadap batasan rasio simpangan kinerja pada Tabel 3.9. Perhitungan tingkat kinerja dapat dilakukan sebagai berikut.

1. Rasio simpangan arah X $= \frac{\delta_T}{H_{total}}$ x 100%

$= \frac{0,426}{78,6}$ x 100%

$=$ 0,54%

2. Rasio simpangan arah Y $= \frac{\delta_T}{H_{total}}$ x 100%

$= \frac{0,261}{78,6}$ x 100%

$=$ 0,33%

Tabel 5.16 Hasil Evaluasi Tingkat Kinerja Struktur

Arah	δ_T (m)	H_{total} (m)	Rasio Simpangan (%)	Kriteria FEMA 356	Tingkat Kinerja
X	0,426	78,6	0,54%	>0,5% dan <1,5%	*Life Safety* (LS)
Y	0,261	78,6	0,33%	<0,5%	*Immediate Occupancy* (IO)

Hasil evaluasi tingkat kinerja struktur menunjukkan bahwa rasio simpangan arah X sedikit melampaui batas *Immediate Occupancy* sebesar 0,54% sehingga berdasarkan FEMA 356 struktur memasuki tingkat kinerja *Life Safety* (LS). Walaupun demikian, nilai rasio simpangan arah X masih jauh berada di bawah batas 1,5% sehingga struktur masih memiliki kapasitas deformasi yang memadai tanpa mengalami kehilangan kekuatan maupun stabilitas yang signifikan. Pada arah Y, nilai rasio simpangan sebesar 0,33% masih berada di bawah batas 0,5% sehingga

struktur memenuhi kategori *Immediate Occupancy* (IO). Kondisi ini menunjukkan bahwa setelah menerima gempa rencana, kerusakan struktural pada arah Y diperkirakan sangat kecil dan bangunan masih dapat difungsikan tanpa memerlukan perbaikan struktural yang masif.

Perbedaan tingkat kinerja antara kedua arah dipengaruhi oleh karakteristik kekakuan lateral struktur. Hasil analisis *pushover* menunjukkan bahwa kapasitas struktur pada arah Y jauh lebih besar dibandingkan arah X, dengan gaya geser maksimum mencapai sekitar 15933,776 kN, sedangkan arah X hanya sekitar 9461,303 kN. Selain itu, arah Y memiliki kekakuan elastis sebesar 81660,69 kN/m, lebih dari dua kali kekakuan arah X yang sebesar 34047,28 kN/m. Kondisi tersebut menyebabkan deformasi arah X menjadi lebih besar ketika menerima beban gempa yang sama.

5.10 Evaluasi Tingkat Kinerja Berdasarkan FEMA 356

Berdasarkan keseluruhan hasil evaluasi rasio simpangan pada target perpindahan dan evaluasi sendi plastis pada seluruh elemen struktur, tingkat kinerja seismik struktur gedung apartemen ini dapat disimpulkan sebagai berikut.

1. Secara global, struktur memenuhi tingkat kinerja *Life Safety* (LS) pada arah x dan *Immediate Occupancy* pada arah Y.
2. Secara lokal, sebagian besar elemen struktur berada pada tingkat A-IO, konsisten dengan hasil evaluasi simpangan global.
3. Terdapat sejumlah elemen kolom pada tingkat 1 yang telah melampaui tingkat *Life* Safety hingga *Collapse Prevention* yang mengindikasikan adanya elemen kritis lokal akibat pengaruh ketidakberaturan torsi dan sudut dalam.

Dengan mempertimbangkan hasil evaluasi rasio simpangan berdasarkan FEMA 356 serta distribusi sendi plastis pada seluruh elemen struktur, dapat disimpulkan bahwa kinerja seismik gedung apartemen secara global berada pada tingkat *Life Safety* (LS), yang dikendalikan oleh respons struktur pada arah X, sedangkan pada arah Y struktur masih memenuhi tingkat *Immediate Occupancy* (IO). Meskipun sebagian besar elemen struktur masih berada pada kondisi elastis hingga *Immediate Occupancy* (A–IO), ditemukan beberapa elemen kolom kritis

pada tingkat 1 yang telah melampaui batas *Collapse Prevention* (CP) yang mengindikasikan adanya konsentrasi deformasi lokal. Oleh karena itu, diperlukan evaluasi lebih lanjut serta perencanaan perkuatan pada kolom-kolom kritis di zona tersebut untuk mengurangi konsentrasi deformasi dan meningkatkan kekuatan struktur terhadap gempa.

BAB VI
KESIMPULAN DAN SARAN

6.1 Kesimpulan

Kesimpulan yang diperoleh dari hasil analisis terhadap kinerja seismik bangunan gedung bertingkat tinggi menggunakan analisis *pushover* berdasarkan FEMA 356 dan FEMA 440 adalah sebagai berikut.

1. Kurva kapasitas struktur menunjukkan perilaku bilinier dengan kekakuan awal dan kapasitas gaya geser dasar yang lebih besar pada arah Y dibandingkan arah X, masing-masing sebesar 15933,776 kN dan 9461,303 kN. Perbedaan respons tersebut dipengaruhi oleh konfigurasi dinding geser yang tidak simetris sehingga menyebabkan distribusi kekakuan yang tidak merata dan respons torsi akibat eksentrisitas antara pusat massa dan pusat kekakuan. Kondisi tersebut menyebabkan respons struktur pada arah X relatif lebih fleksibel dan memiliki kapasitas lateral yang lebih rendah dibandingkan arah Y.
2. Target perpindahan hasil metode koefisien perpindahan FEMA 440 diperoleh untuk arah X sebesar 0,426 m dan arah Y sebesar 0,261 m.
3. Mekanisme sendi plastis secara umum menunjukkan perilaku daktail dengan pembentukan plastisitas yang dominan pada elemen balok. Namun, ditemukan elemen kolom kritis pada tingkat 1 yang mencapai atau melampaui tingkat *Collapse Prevention* (CP). Pada arah X, elemen pengontrol mekanisme keruntuhan lokal berupa kolom tipe KL pada tingkat 1, sedangkan pada arah Y terdapat kolom tipe KL dan KT pada tingkat 1. Kondisi tersebut menunjukkan adanya konsentrasi deformasi lokal pada elemen kolom yang perlu mendapat perhatian dalam evaluasi kinerja struktur.
4. Rasio simpangan pada target perpindahan pada arah X sebesar 0,54% dengan tingkat kinerja *Life Safety* (LS), sedangkan arah Y sebesar 0,33% memenuhi batasan tingkat kinerja *Immediate Occupancy* (IO).

5. Berdasarkan pedoman FEMA 356, tingkat kinerja seismik struktur gedung apartemen ini secara keseluruhan dikategorikan berada pada tingkat *Life Safety* (LS) yang dikendalikan oleh respons struktur pada arah X, sedangkan pada arah Y struktur masih memenuhi tingkat *Immediate Occupancy* (IO).

6.2 Saran

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, beberapa saran untuk pengembangan penelitian selanjutnya disampaikan sebagai berikut.

1. Perlu dilakukan evaluasi terhadap beberapa alternatif konfigurasi dan penempatan dinding geser pada arah X dengan mempertimbangkan keseimbangan distribusi kekakuan dan posisi pusat kekakuan terhadap pusat massa. Alternatif konfigurasi tersebut dapat dievaluasi untuk memperoleh distribusi kekakuan yang lebih seimbang, mengurangi respons torsi, dan meningkatkan kinerja seismik struktur pada arah X.
2. Perlu dilakukan evaluasi dan perencanaan perkuatan terhadap elemen kolom kritis pada tingkat 1, khususnya kolom yang mencapai atau melampaui tingkat *Collapse Prevention* (CP), dengan mempertimbangkan peningkatan kapasitas dan daktilitas elemen serta pengurangan konsentrasi deformasi lokal akibat respons torsi dan ketidakberaturan struktur. Penelitian selanjutnya disarankan menggunakan analisis dinamik nonlinier *Time History* sehingga respons struktur terhadap pembebanan gempa dapat dievaluasi secara lebih akurat dibandingkan dengan analisis *pushover*.
3. Penelitian selanjutnya juga dapat mengkaji pengaruh variasi konfigurasi dinding geser, dimensi elemen struktur, maupun sistem struktur terhadap tingkat kinerja seismik bangunan.
4. Hasil penelitian ini diharapkan dapat menjadi salah satu referensi dalam perencanaan dan evaluasi kinerja seismik bangunan bertingkat, khususnya pada bangunan dengan ketidakberaturan geometri dan konfigurasi dinding geser sehingga dapat diperoleh struktur yang lebih aman terhadap beban gempa.

DAFTAR PUSTAKA

Abdillah, F. 2024. Analisis Kinerja Bangunan Menggunakan Metode Analisis *Pushover* Terhadap Struktur Bangunan Bertingkat Banyak Sesuai Standar SNI 03:1726:2019 Dan ATC-40. *Tugas Akhir*. (tidak diterbitkan). Universitas Islam Indonesia. Yogyakarta.

Ardika, F. 2023. *Gempa Bumi: Penyebab Gempa Bumi dan Perkembangan Teknologi Menghadapi Gempa Bumi*. Elementa Media. Yogyakarta.

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

Badan Standardisasi Nasional. 2019. *Tata Cara Perencanaan Ketahanan Gempa untuk Struktur Bangunan Gedung dan Non Gedung*. SNI-1726-2019. Jakarta.

Badan Standardisasi Nasional. 2020. *Beban Minimum untuk Perancangan Bangunan Gedung dan Struktural Lain*. SNI-1726-2020. Jakarta.

Bahtiar, A.A. 2025. Evaluasi Kinerja Seismik Gedung Bertingkat Banyak dengan Metode Analisis Pushover Berdasarkan Pedoman ATC-40 dan FEMA 356 (Studi Kasus : Oakwood Hotel Yogyakarta). *Tugas Akhir.* (tidak diterbitkan). Universitas Islam Indonesia. Yogyakarta.

Federal Emergency Management Agency. 2000. *Prestandard and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Buildings*. FEMA 356. Washington, D.C.

Federal Emergency Management Agency. 2005. *Improvement of Nonlinear Static Seismic Analysis Procedures*. FEMA 440. Washington, D.C.

Jia, H. *et al.* 2022. Seismic Performance Evaluation of a High-Rise Building with Structural Irregularities. *Buildings*. 12(9). hal. 1484.

Kusuma, R.A. dan Sabariman, H.B. 2022. Analisa Pengaruh Variasi Layout Shear

Wall Terhadap Kinerja Struktur dengan Metode Pushover Analisis Pada Gedung Pelindo Office Tower. *Jurnal Teknik Sipil Universitas Negeri Surabaya*. hal. 3.

Muna, M.N. 2024. Komparasi Variasi Bentuk dan Tata Letak Dinding Geser dalam Analisis Struktur Gedung APSLC UGM dalam Menahan Beban Dinamik dengan Mengacu SNI 1726-2019. *Tugas Akhir*. (tidak diterbitkan). Universitas Islam Indonesia. Yogyakarta.

Nugroho, P.G. 2023. Analisis Kinerja Gedung Perkantoran 4 Lantai Dengan Metode *Pushover Analysis*. *Tugas Akhir*. (tidak diterbitkan). Universitas Islam Indonesia. Yogyakarta

Patria, A.S.N. dan Haq, Y.A. 2024. Pengaruh Konfigurasi Shear Wall terhadap Kapasitas Struktur Gedung Bertingkat. *Menara: Jurnal Teknik Sipil Universitas Negeri Jakarta*. 19(2). hal. 161.

Pierre, A.J. dan Hidayat, I. 2020. Seismic Performance of Reinforced Concrete Structures with Pushover Analysis. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 426(1). hal. 012045.

Prathama, A.H., Teguh, M. dan Saleh, F. 2021. Response Analysis of a Multi-Story Building Structure with a Variety of Horizontal Irregularities and Shear Wall Geometries. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 933(1). hal. 012008.

Salim dan Siswanto, B.A. 2018. *Rekayasa Gempa*. K-Media. Yogyakarta.

Sutoko, R.A.R. 2023. Evaluasi Struktur Gedung Bertingkat Banyak Akibat Alih Fungsi Dengan Analisis *Pushover*. *Tugas Akhir*. (tidak diterbitkan). Universitas Islam Indonesia.

Syafwandi, Munthe, A.T. dan Aryani, D.D. 2024. Analisis Pengaruh Penambahan Shear Wall terhadap Simpangan Struktur Gedung Akibat Gempa Berdasarkan SNI 1726-2012 (Studi Kasus: Universitas Atmajaya – Tangerang). *JCEBT (Journal of Civil Engineering, Building and Transportation)*. 8(1). hal. 152.

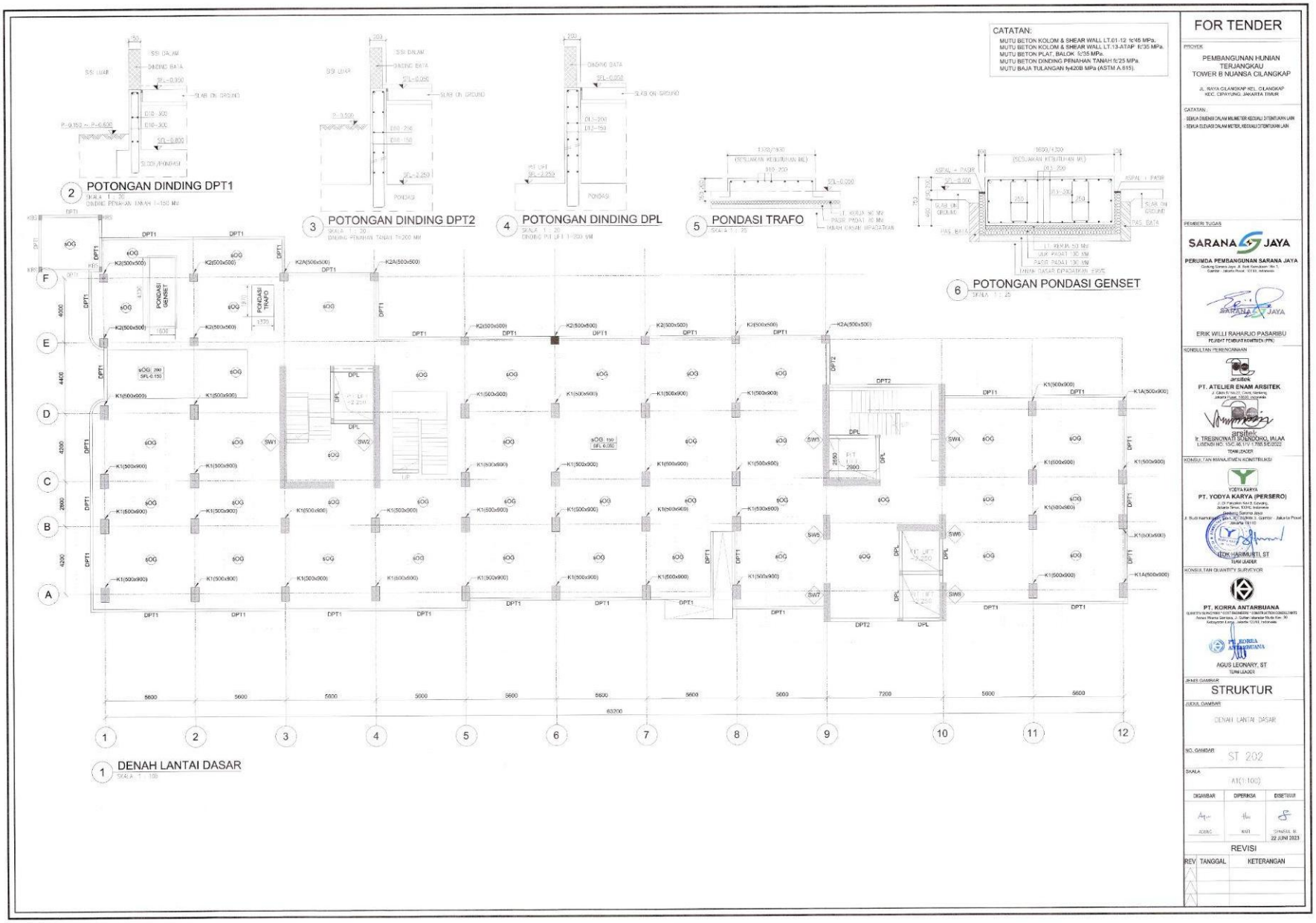
Syahira, M.S. 2023. Evaluasi Kinerja Struktur Atas pada Desain Gedung

Perkantoran Menggunakan Analisis Pushover Berdasarkan ATC-40. *Tugas Akhir*. (tidak diterbitkan). Universitas Islam Indonesia. Yogyakarta.

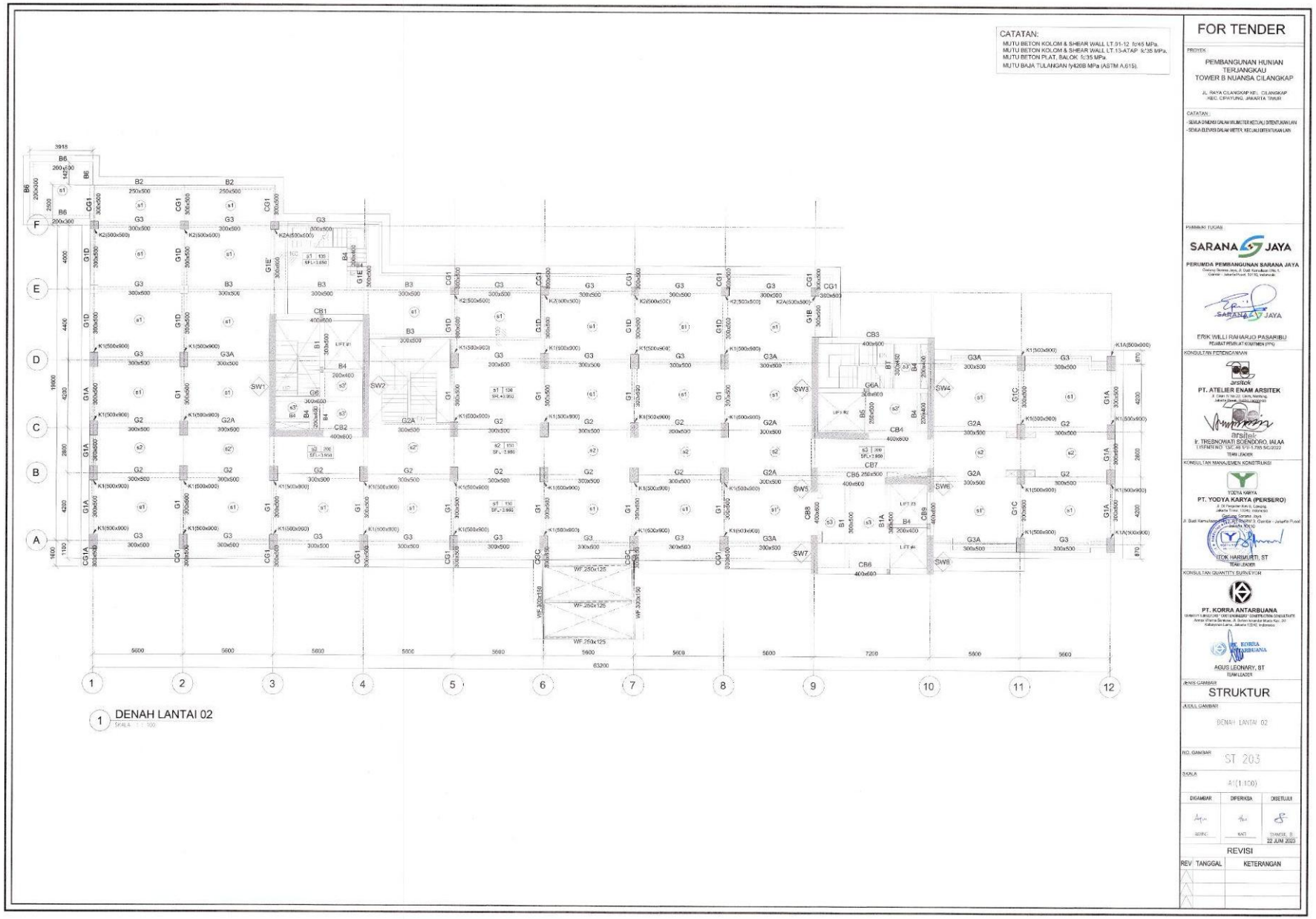
Zhang, X. dan Far, H. 2022. Seismic Behaviour of High-Rise Frame-Core Tube Structures Considering Dynamic Soil–Structure Interaction. *Bulletin of Earthquake Engineering*. 20. hal. 5073–5105.

LAMPIRAN

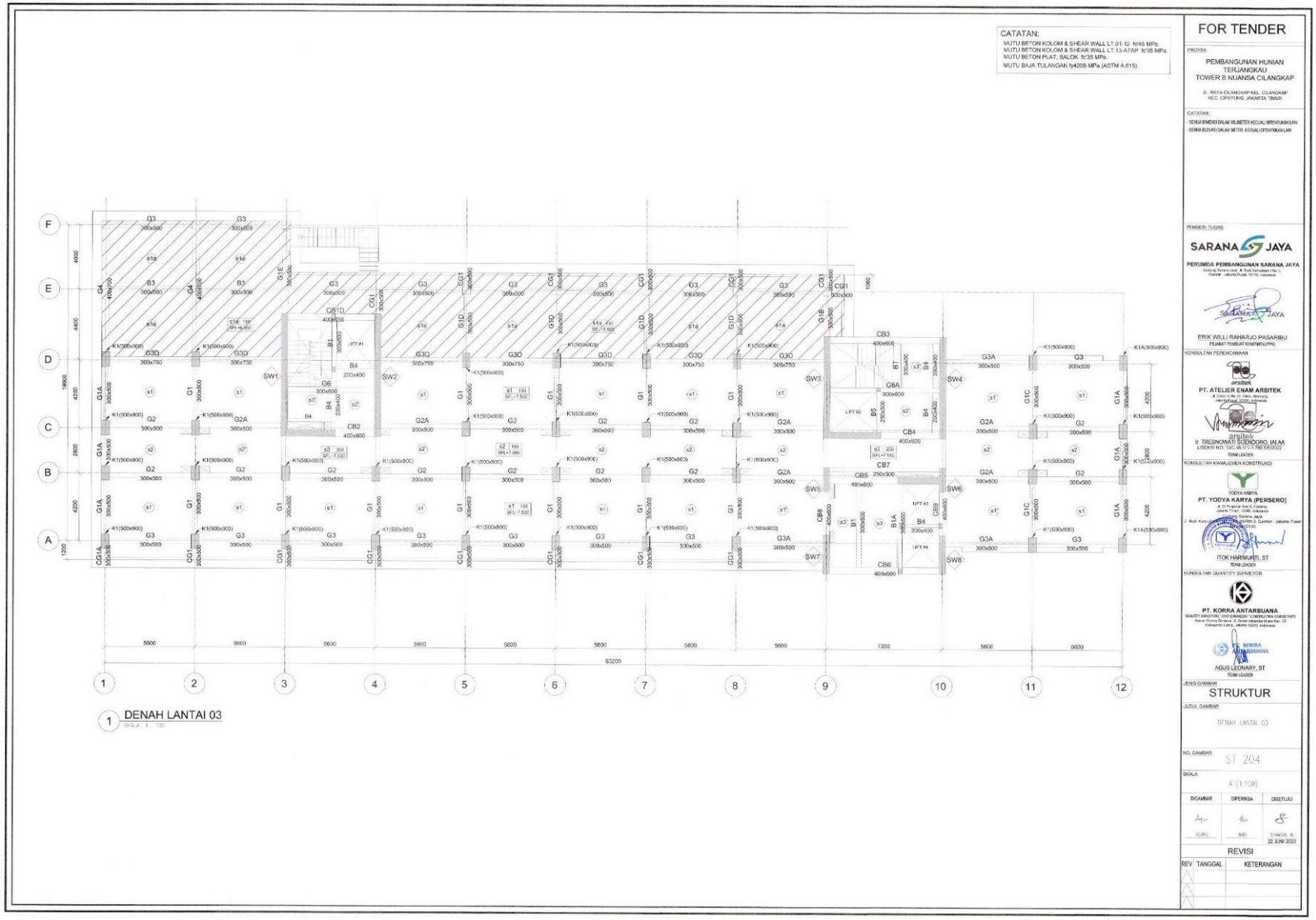
Lampiran 1 Denah Lantai Dasar



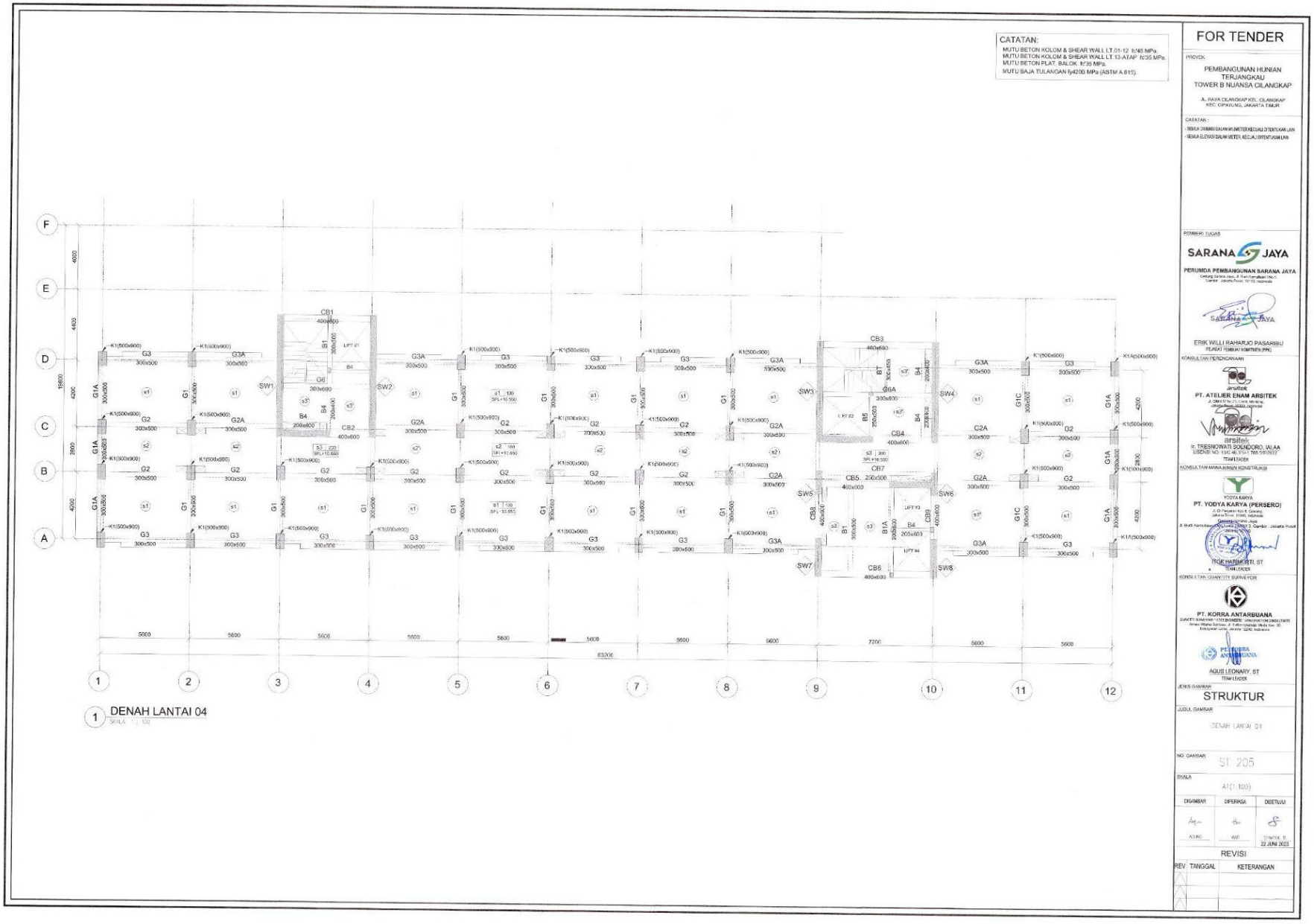
Lampiran 2 Denah Lantai 2



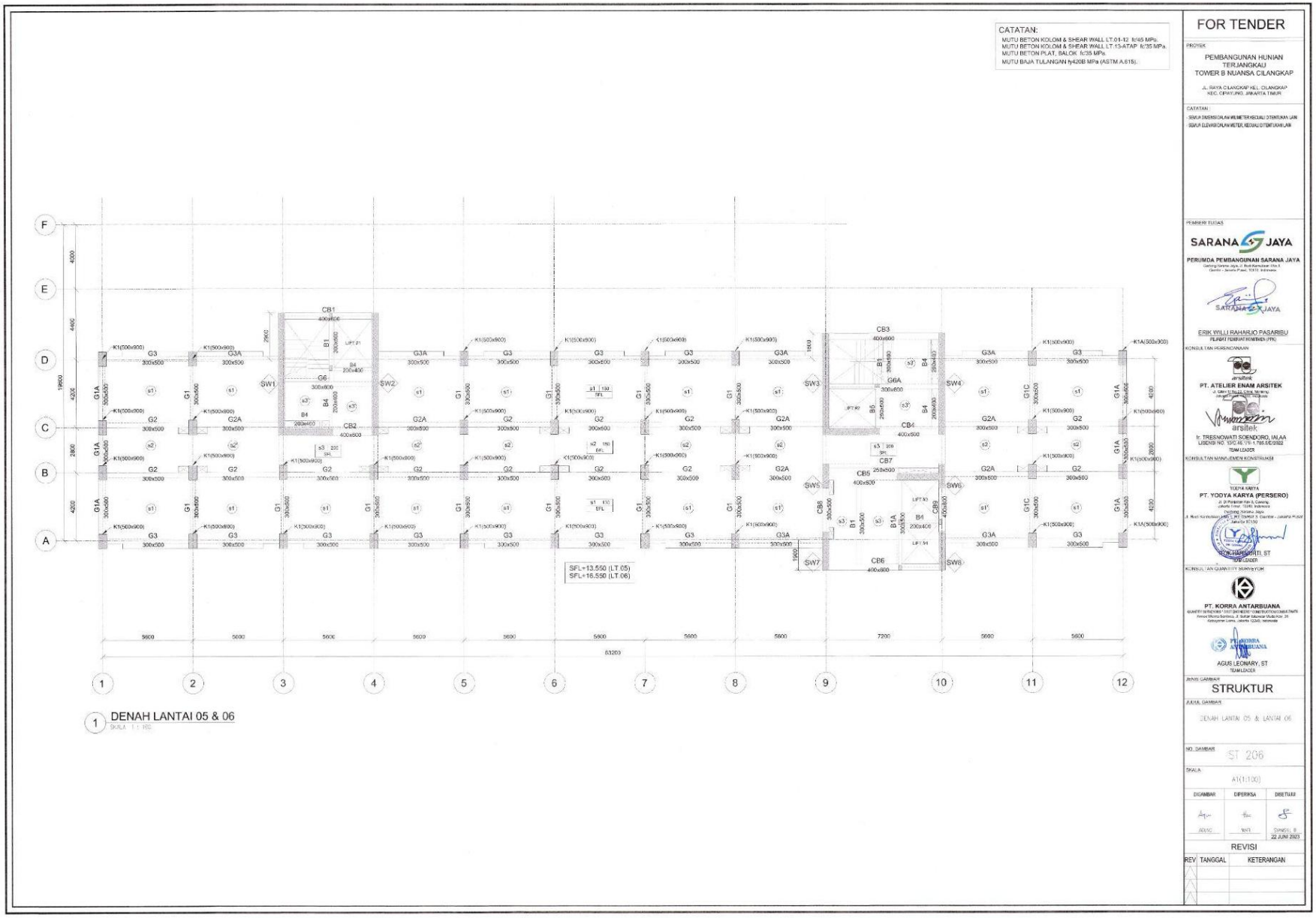
Lampiran 3 Denah Lantai 3



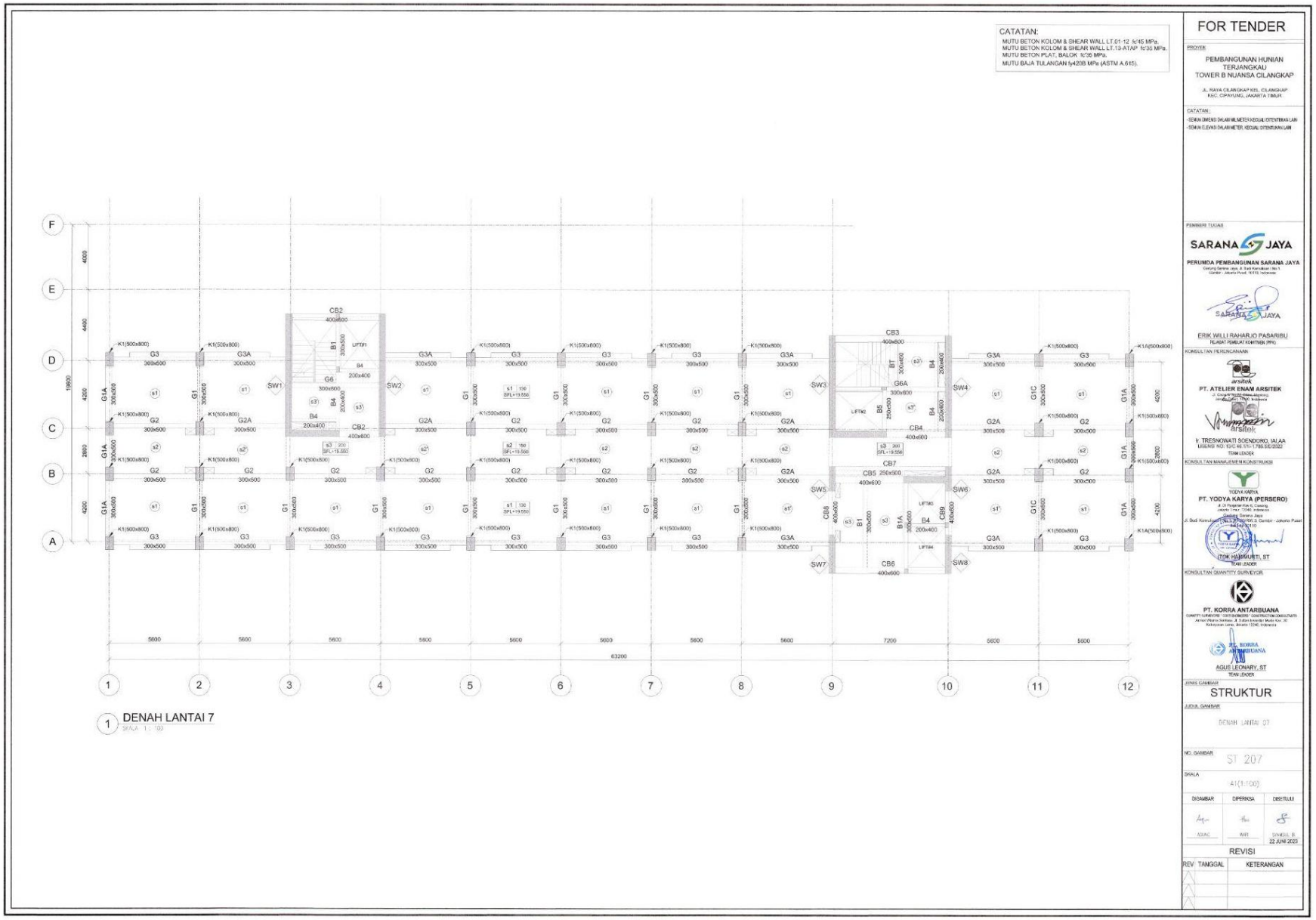
Lampiran 4 Denah Lantai 4



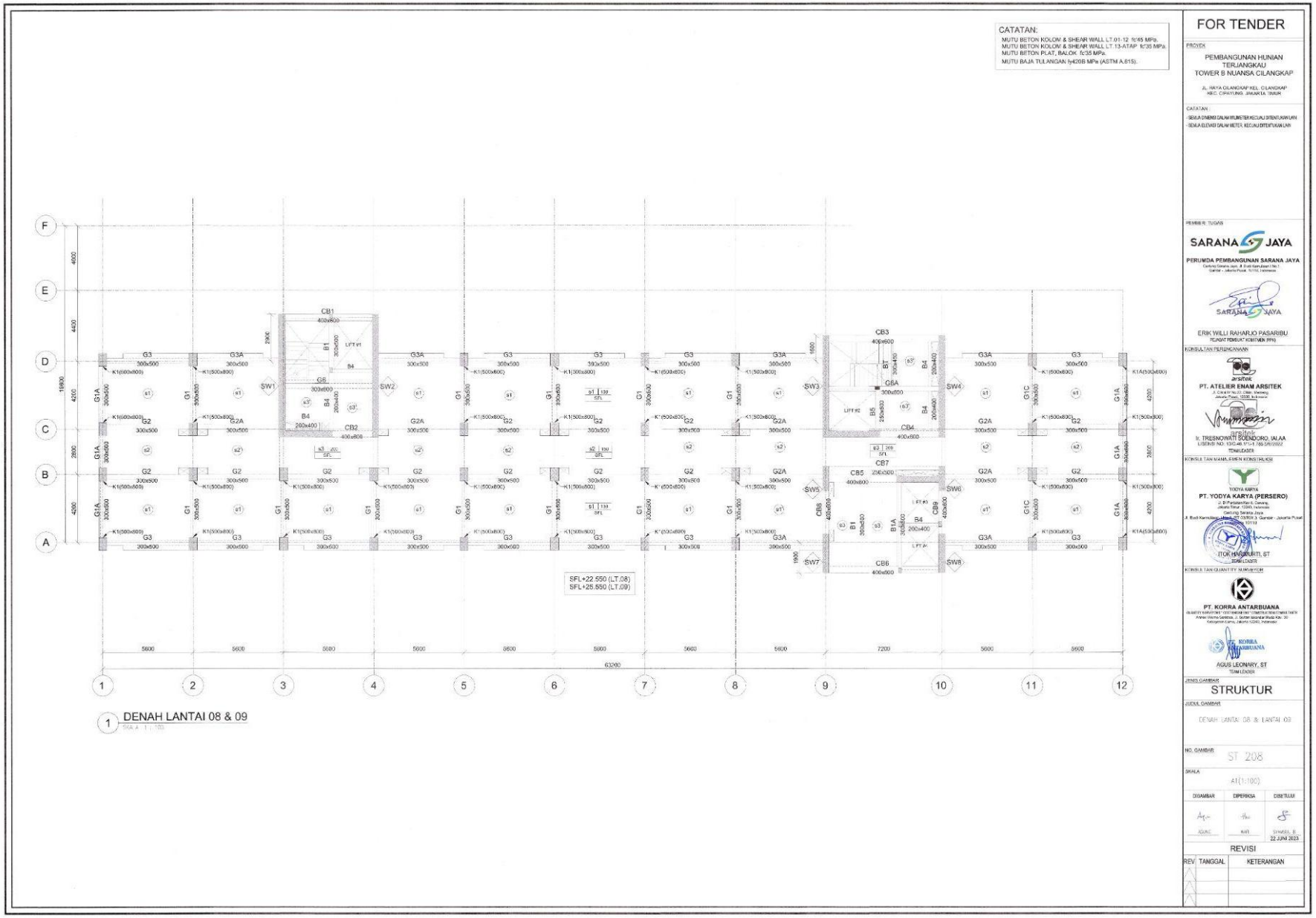
Lampiran 5 Denah Lantai 5 & 6



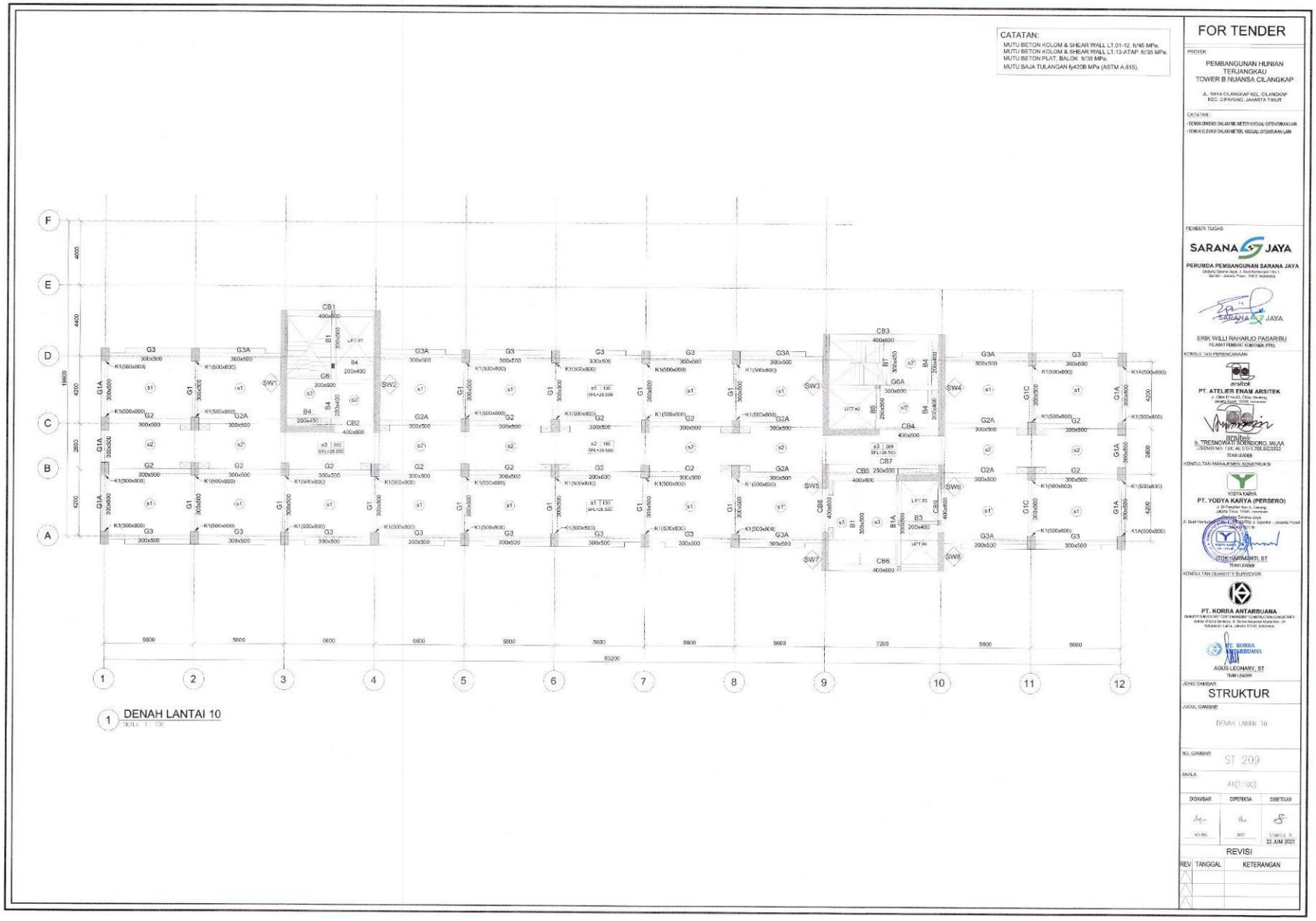
Lampiran 6 Denah Lantai 7



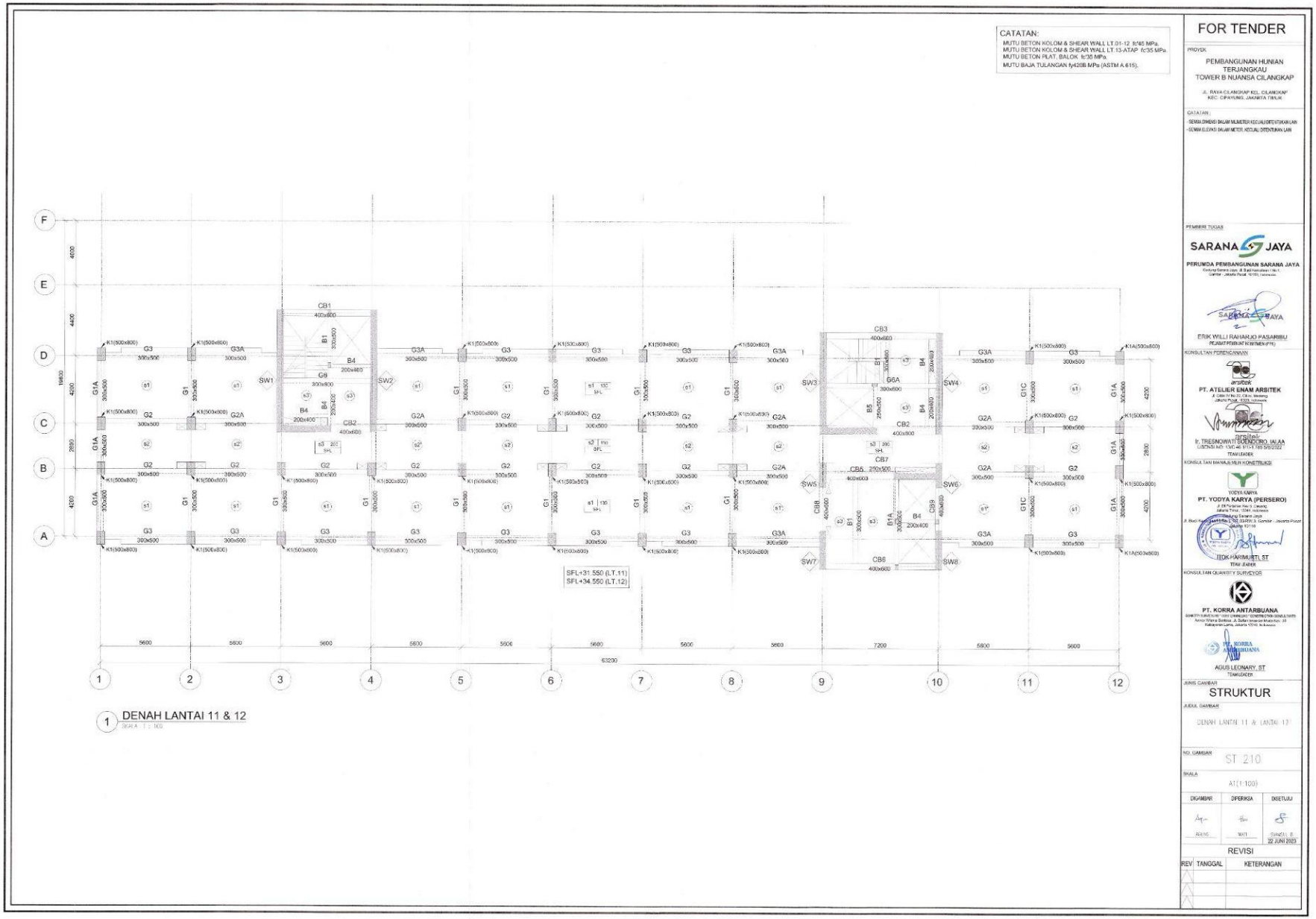
Lampiran 7 Denah Lantai 8 & 9



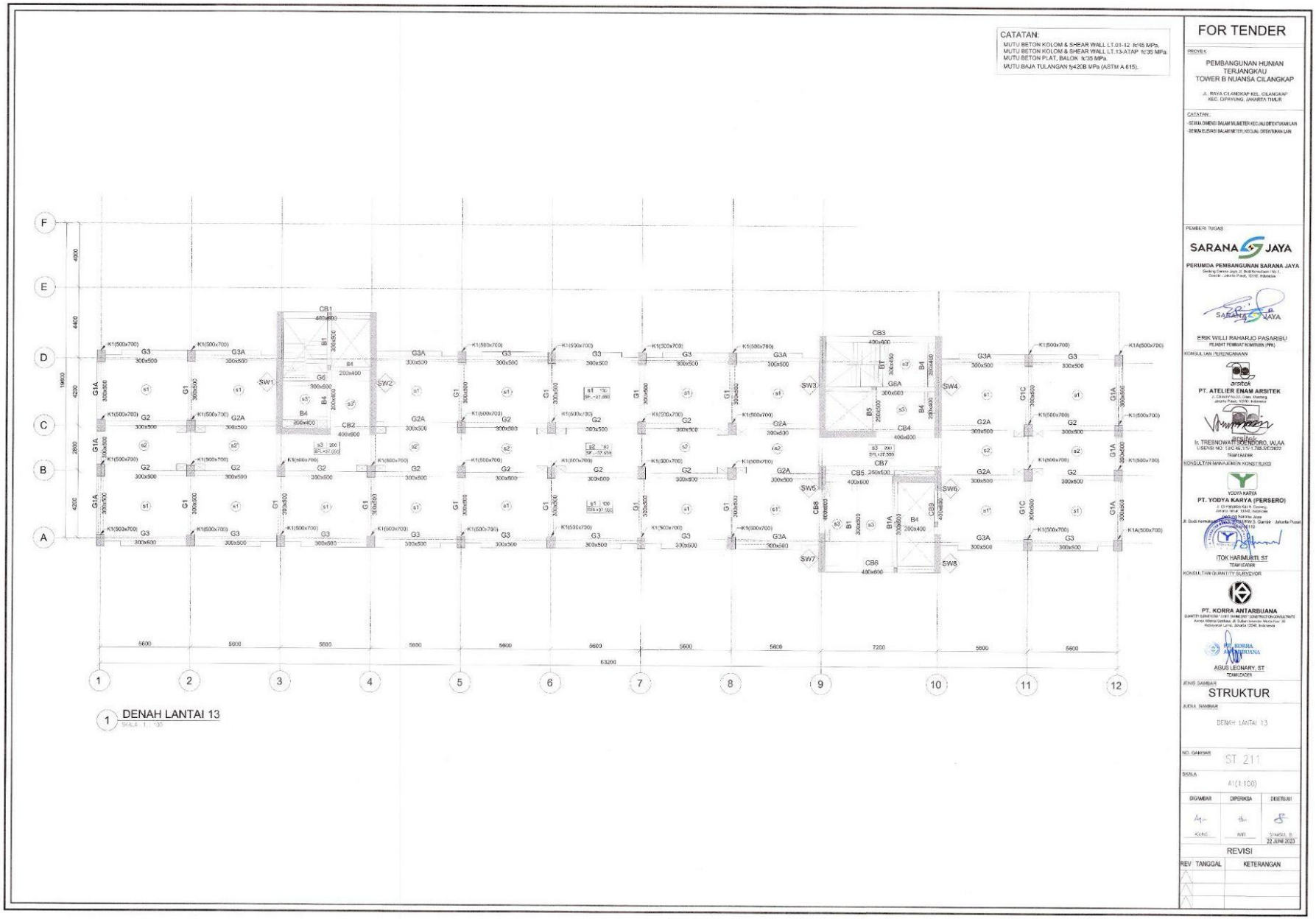
Lampiran 8 Denah Lantai 10



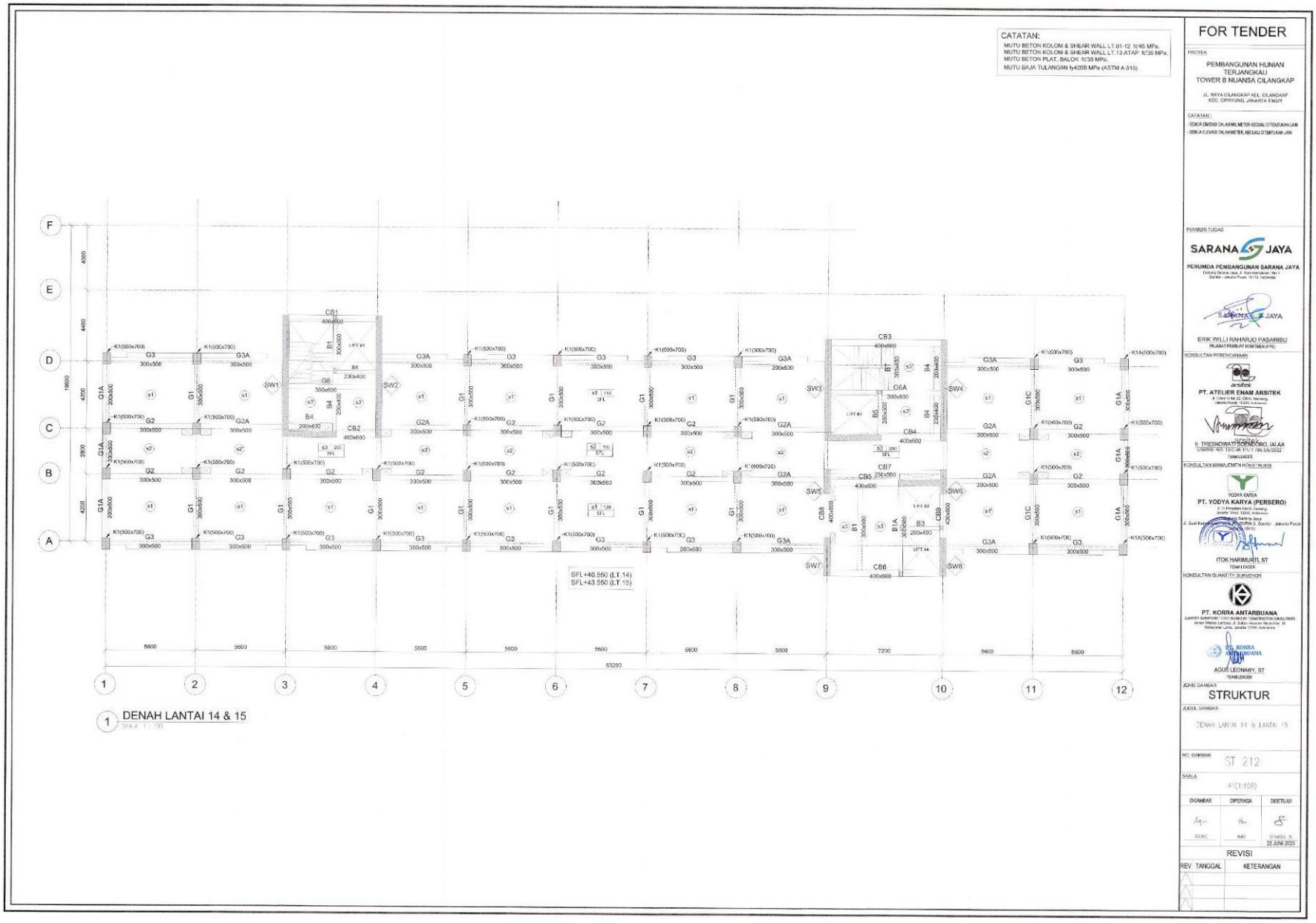
Lampiran 9 Denah Lantai 11 & 12



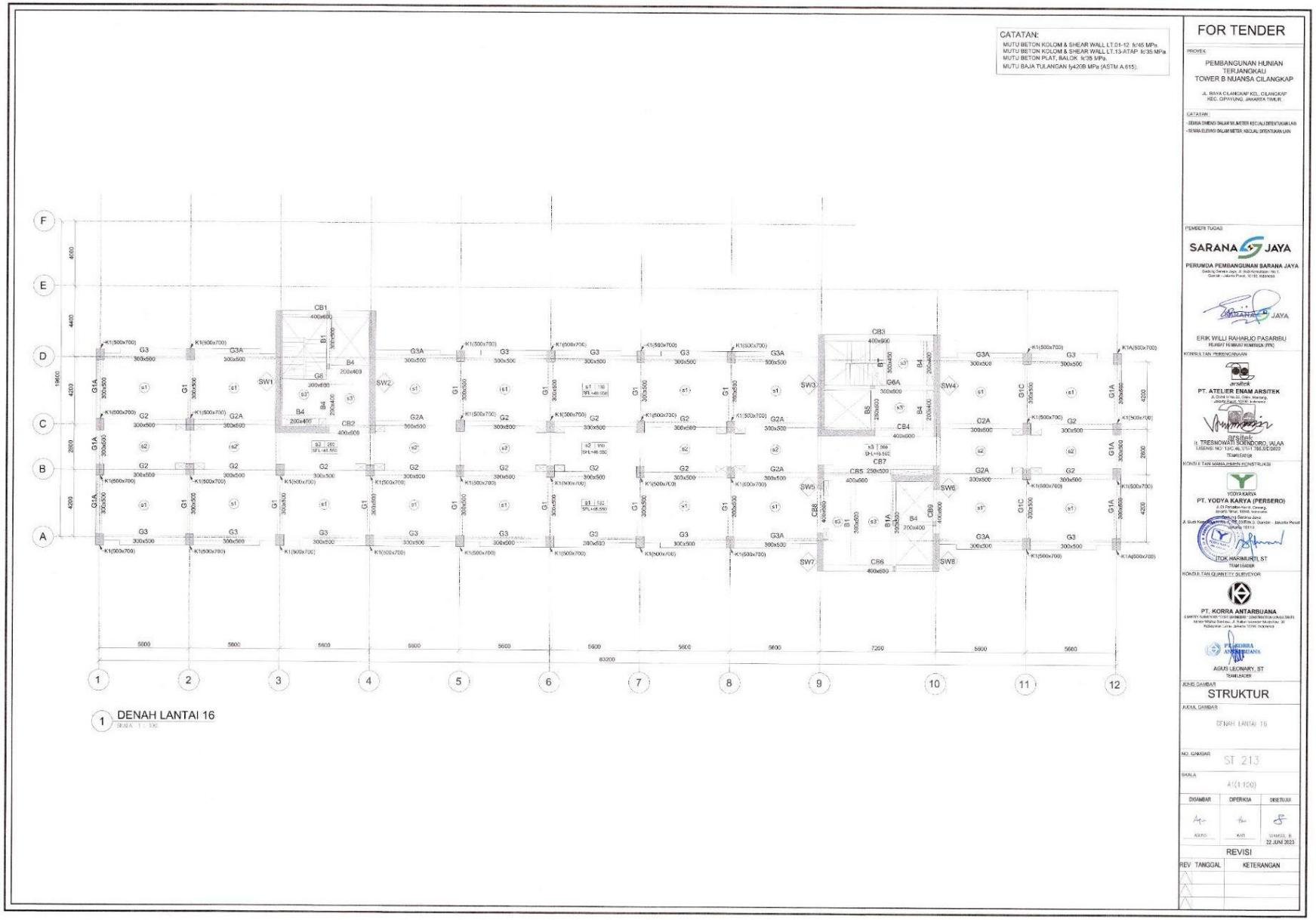
Lampiran 10 Denah Lantai 13



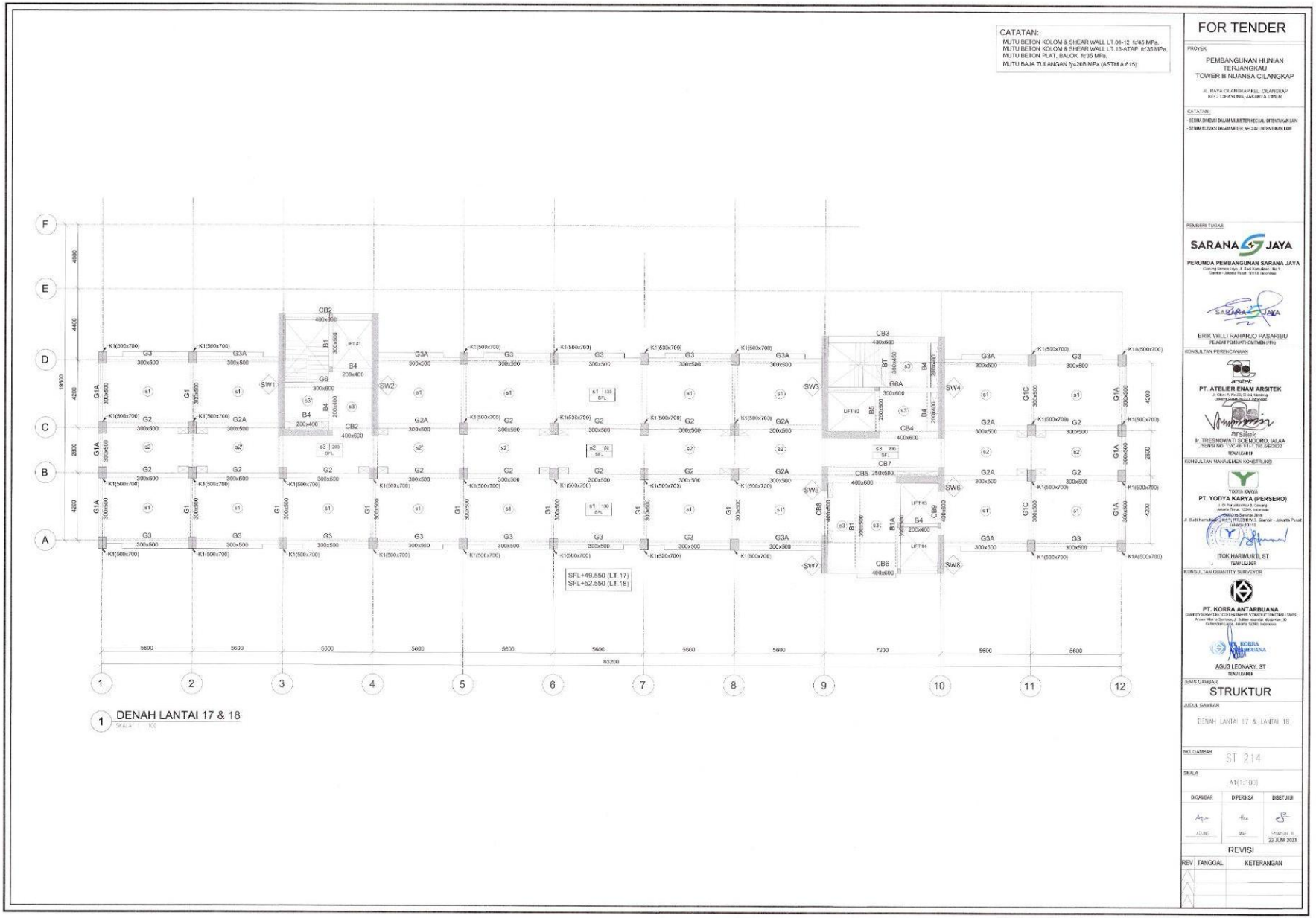
Lampiran 11 Denah Lantai 14 & 15



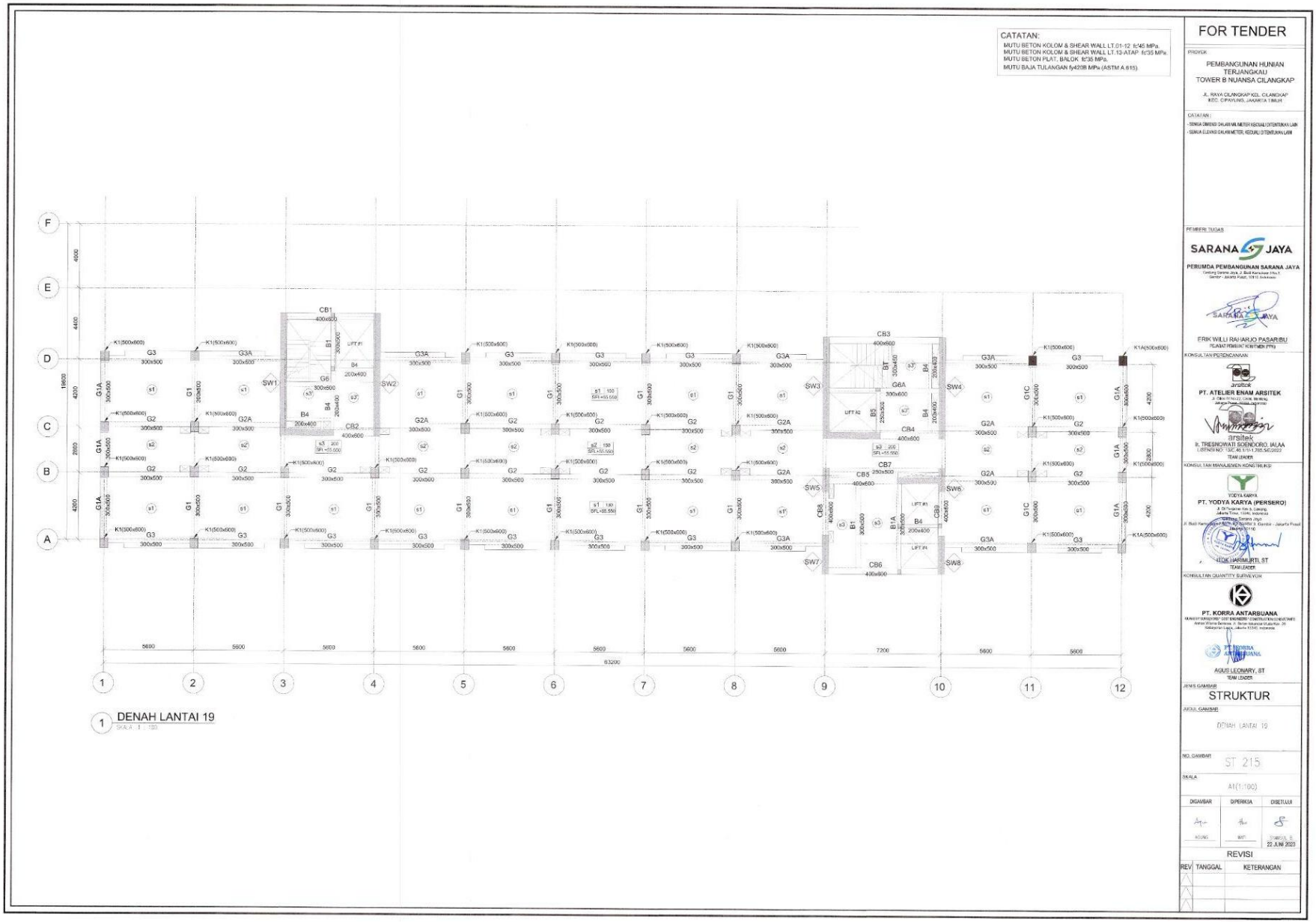
Lampiran 12 Denah Lantai 16



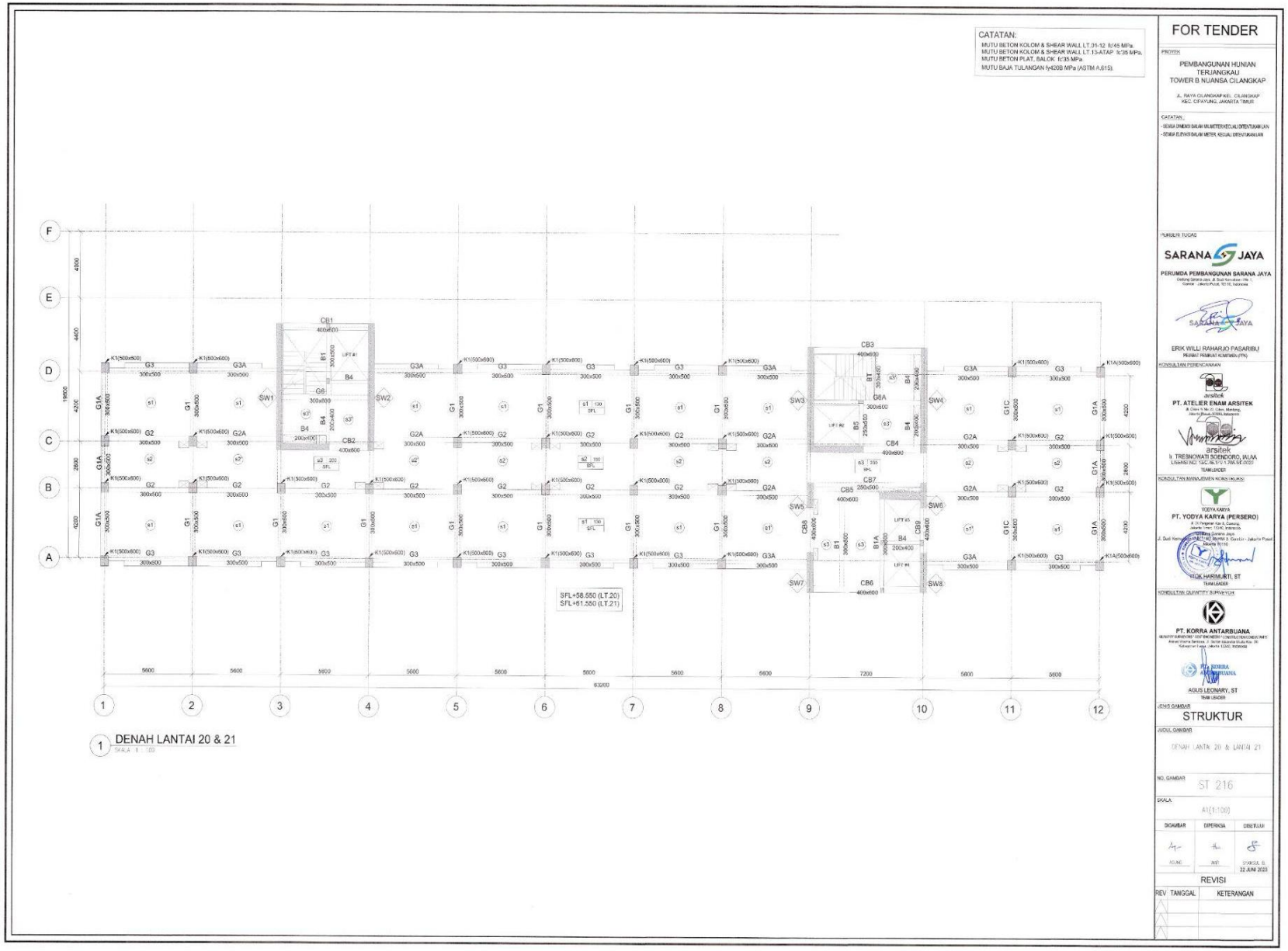
Lampiran 13 Denah Lantai 17 & 18



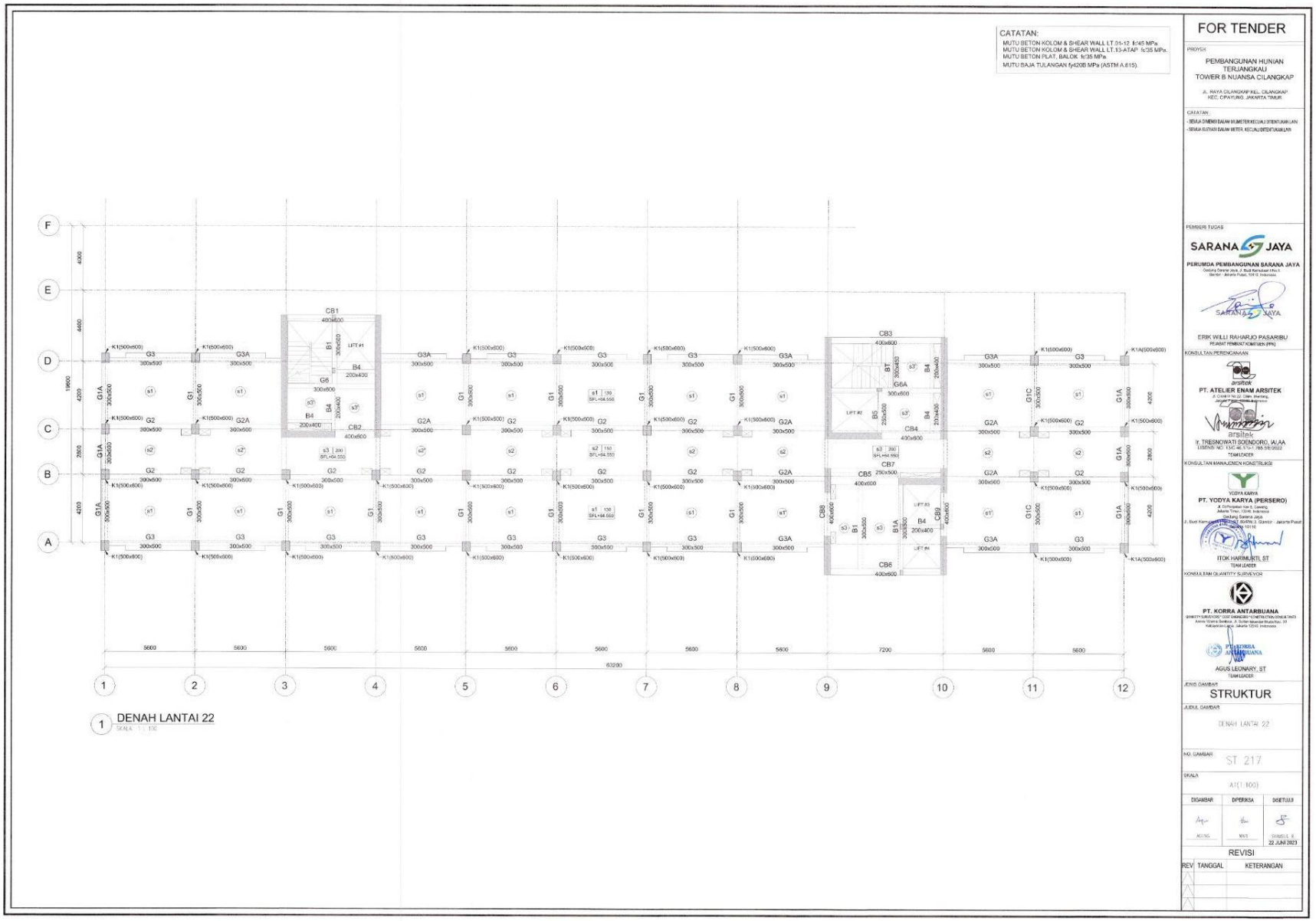
Lampiran 14 Denah Lantai 19



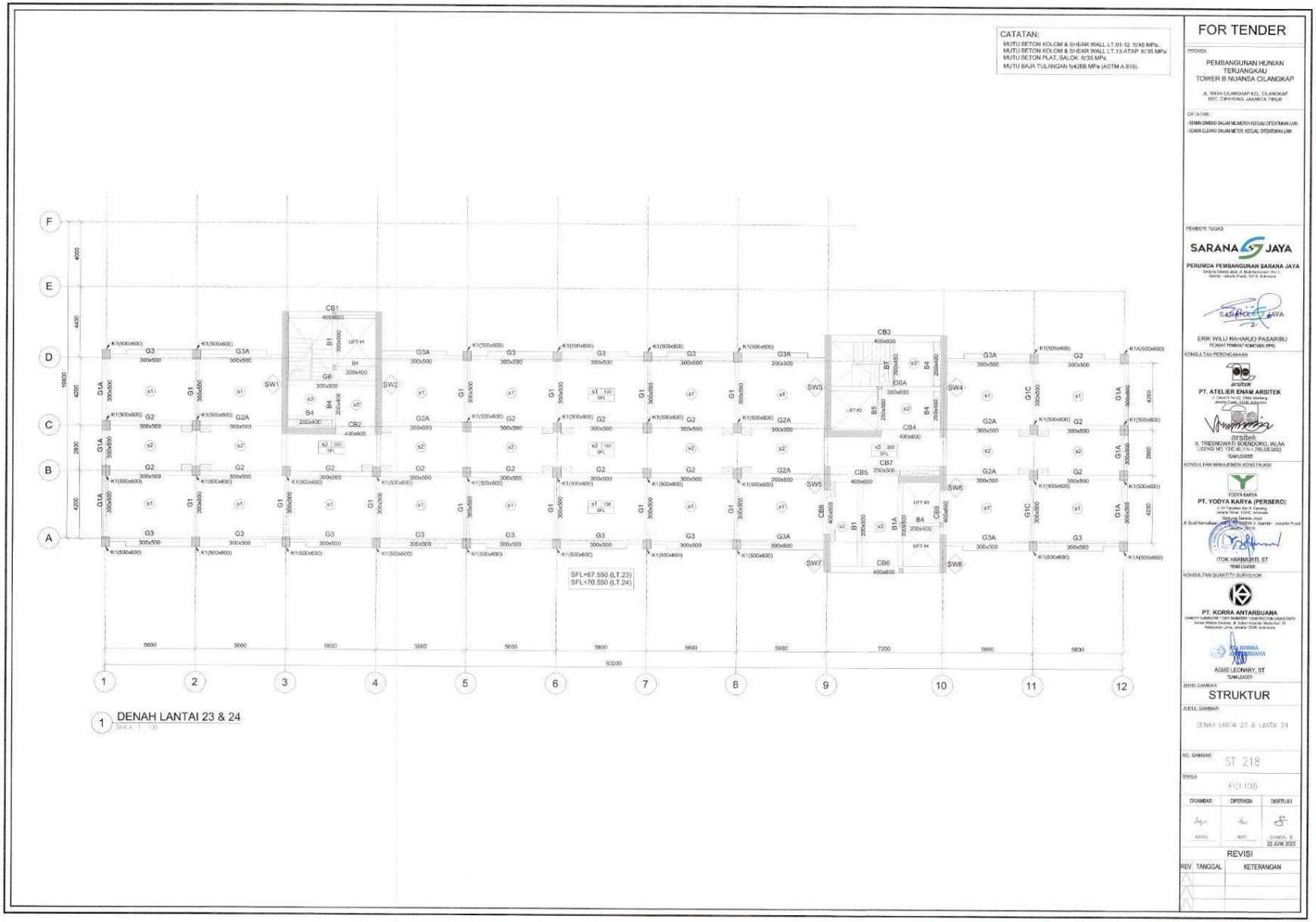
Lampiran 15 Denah Lantai 20 & 21



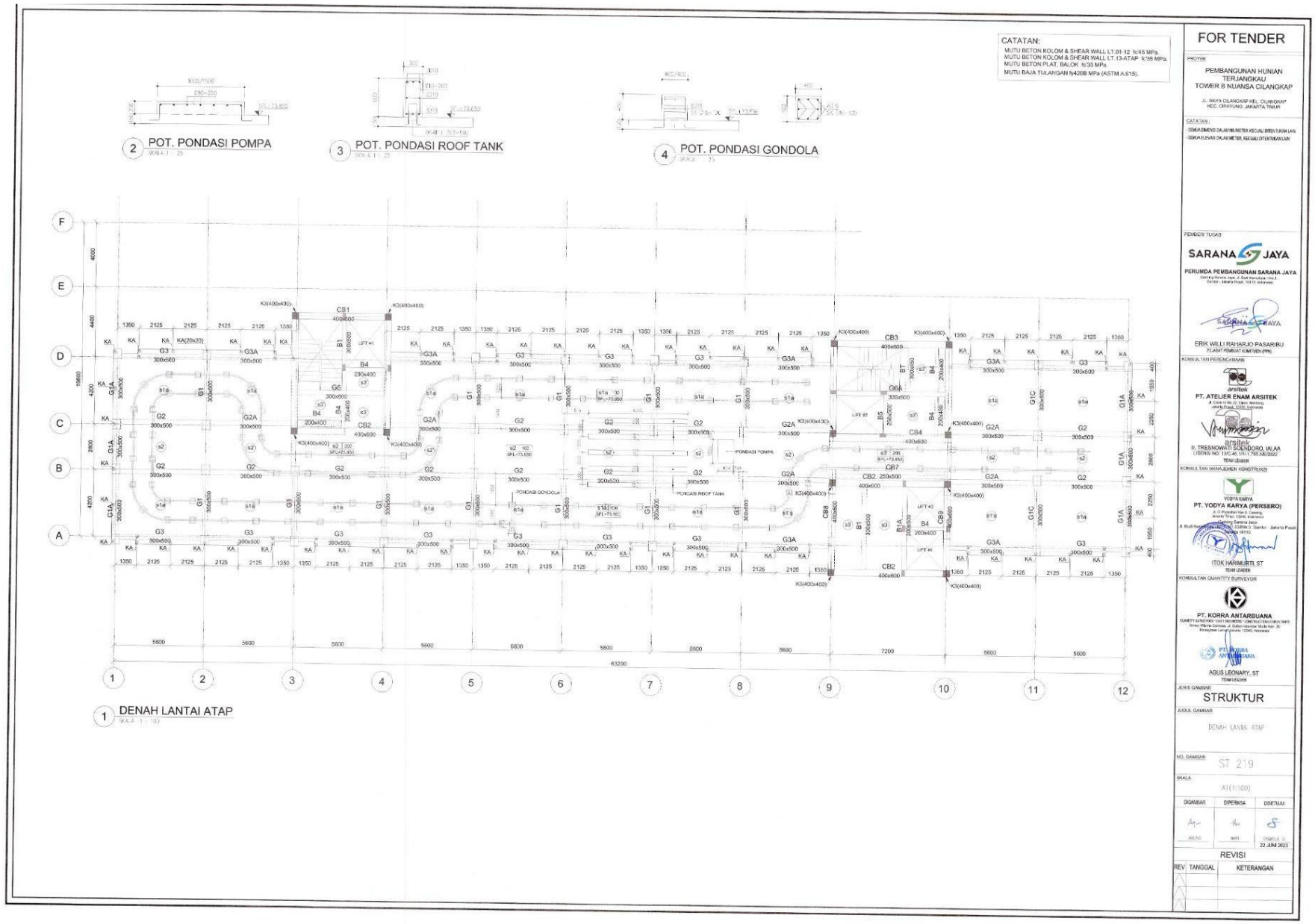
Lampiran 16 Denah Lantai 22



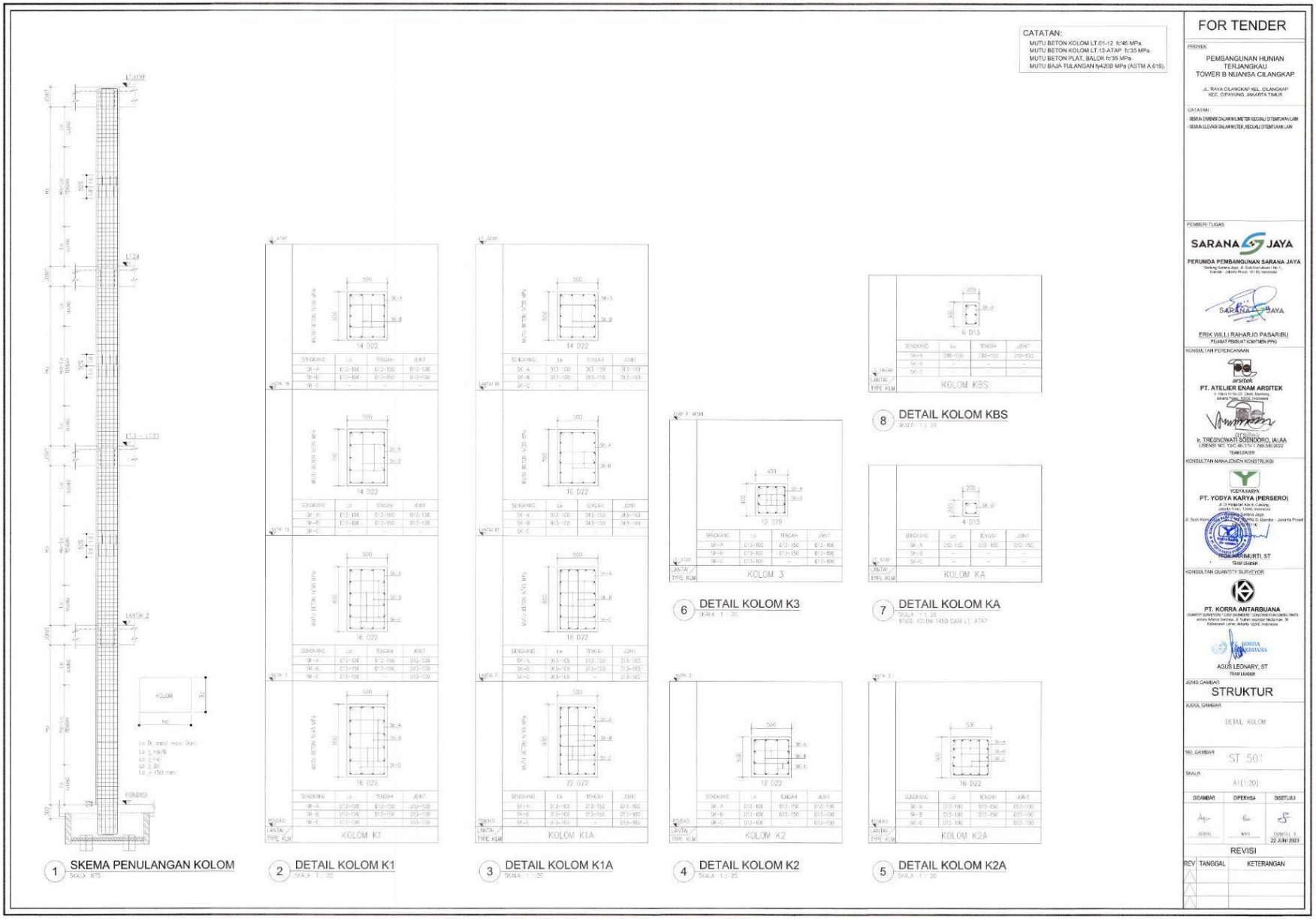
Lampiran 17 Denah Lantai 23 & 24



Lampiran 18 Denah Lantai Atap



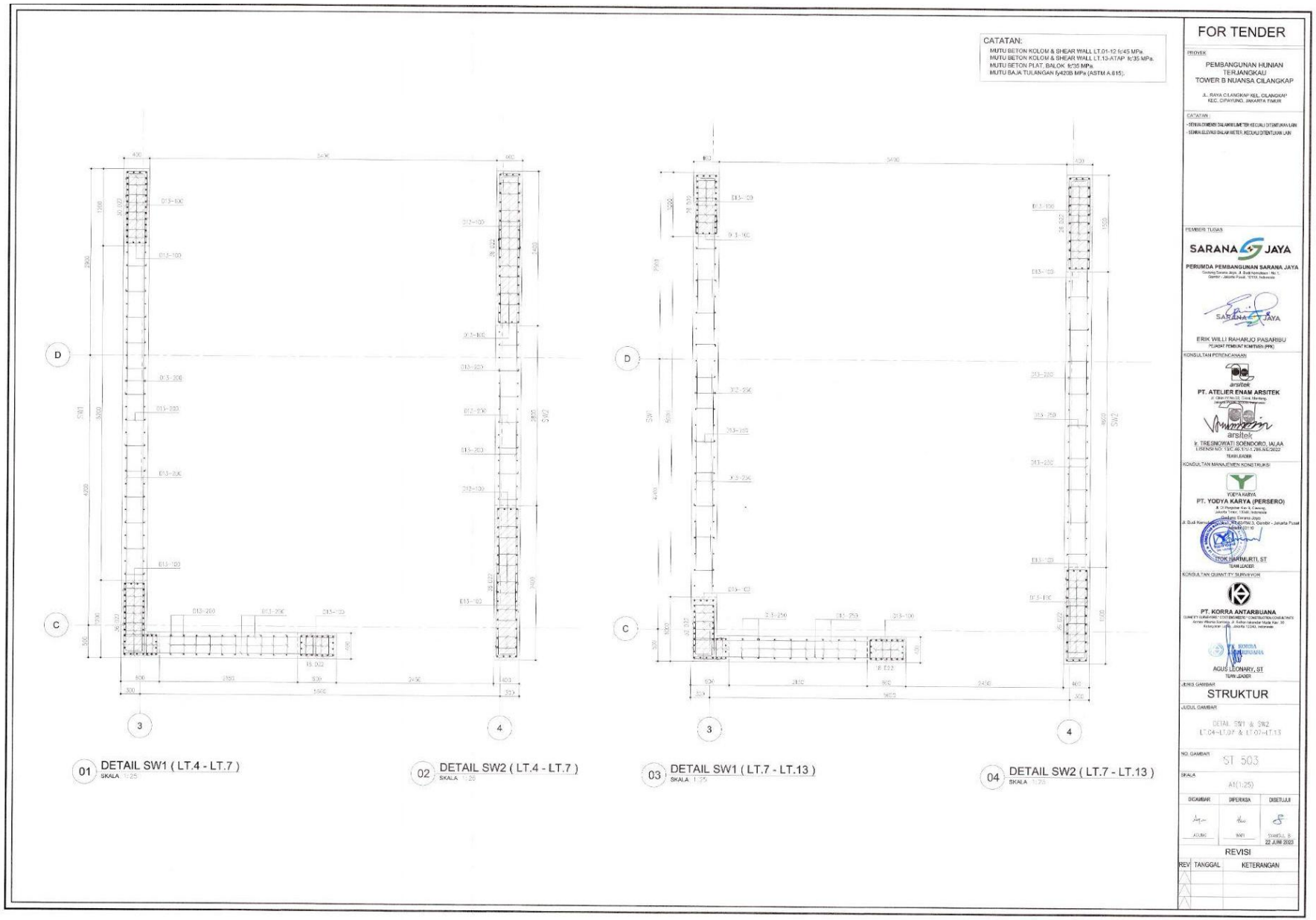
Lampiran 19 Detail Penulangan Kolom



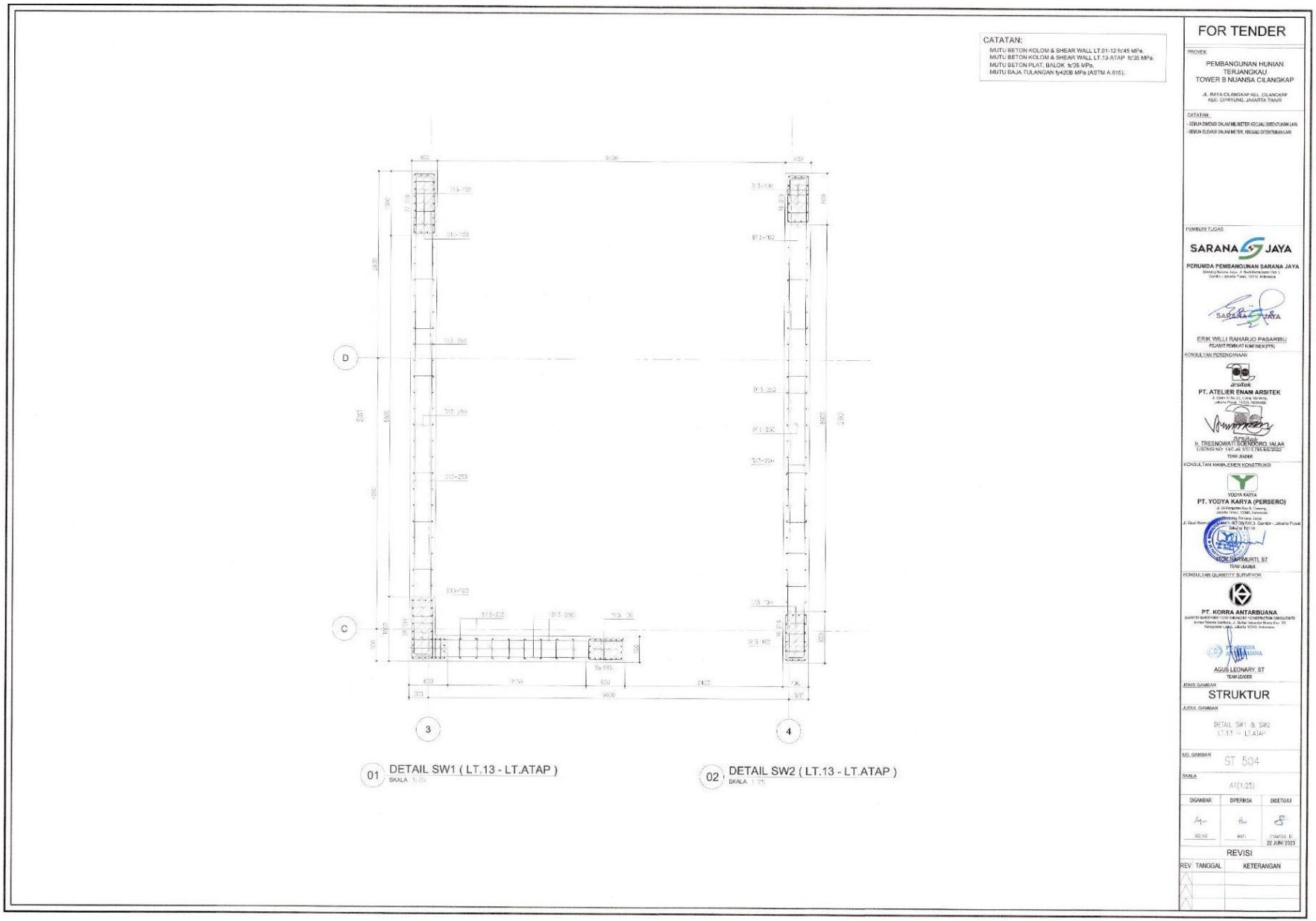
Lampiran 20 Detail Penulangan Dinding Geser Tipe 1 dan 2 Lantai 1 - Lantai 4



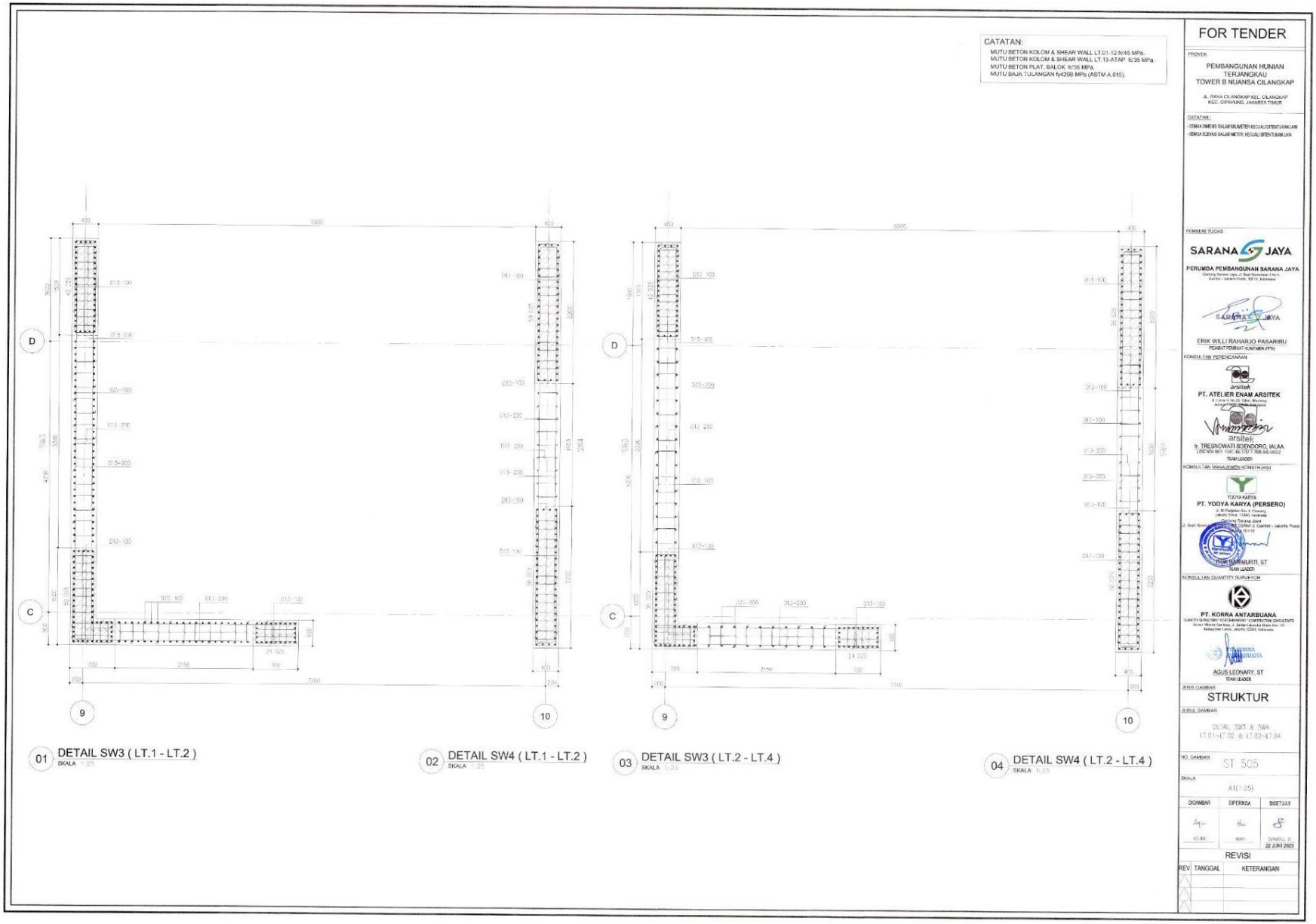
Lampiran 21 Detail Penulangan Dinding Geser Tipe 1 dan 2 Lantai 4 - Lantai 13



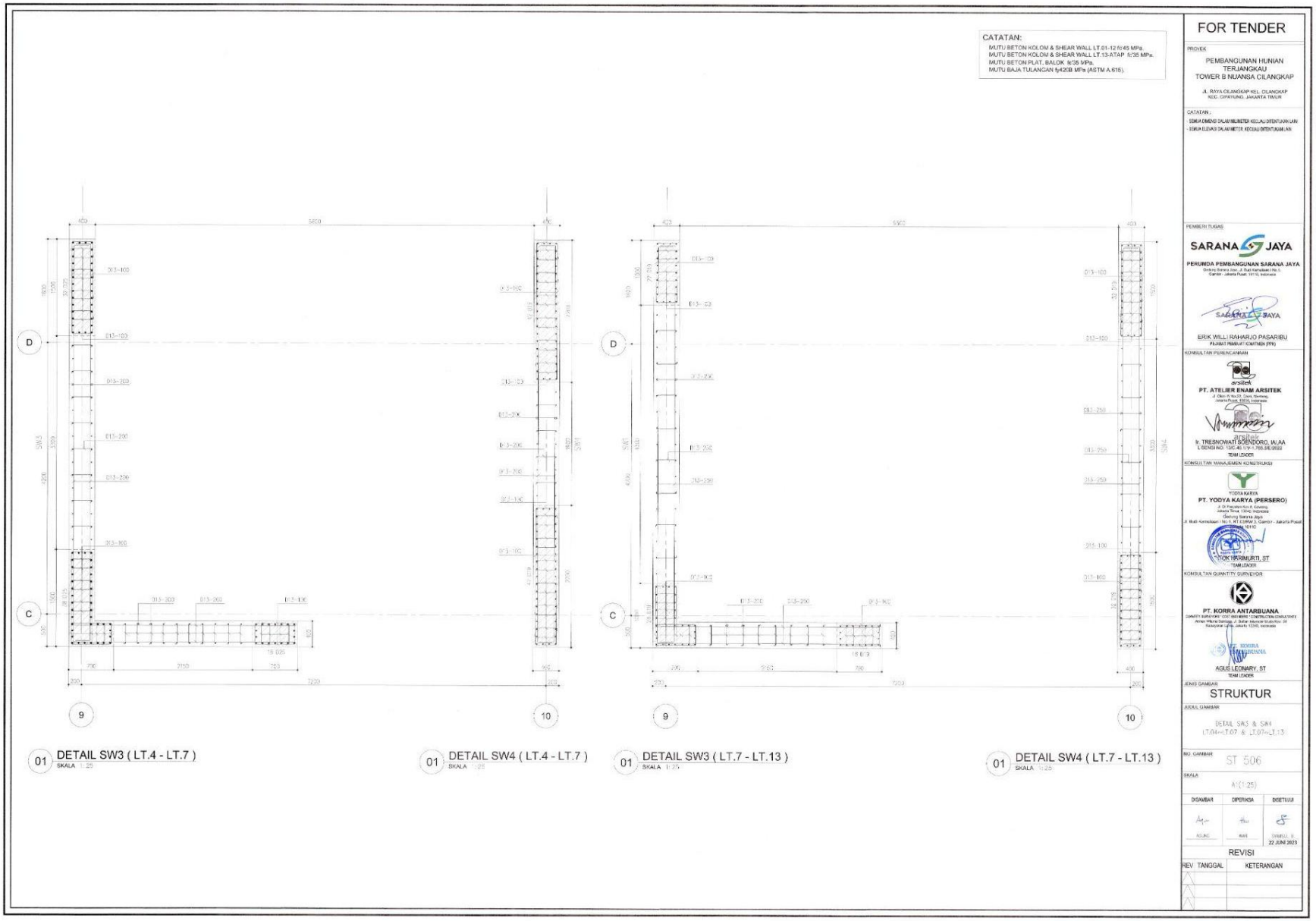
Lampiran 22 Detail Penulangan Dinding Geser Tipe 1 dan 2 Lantai 13 - Lantai Atap



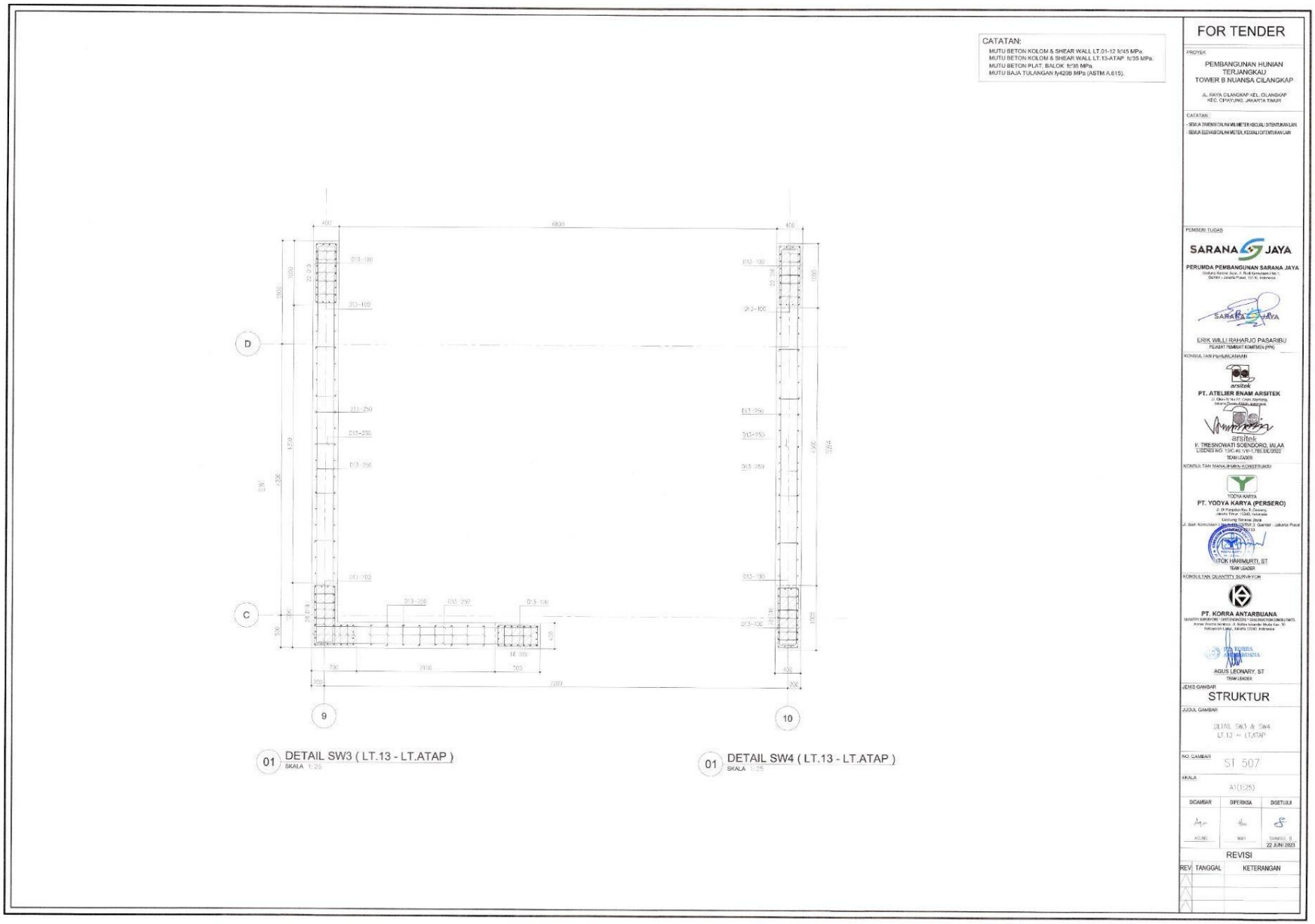
Lampiran 23 Detail Penulangan Dinding Geser Tipe 3 dan 4 Lantai 1 - Lantai 4



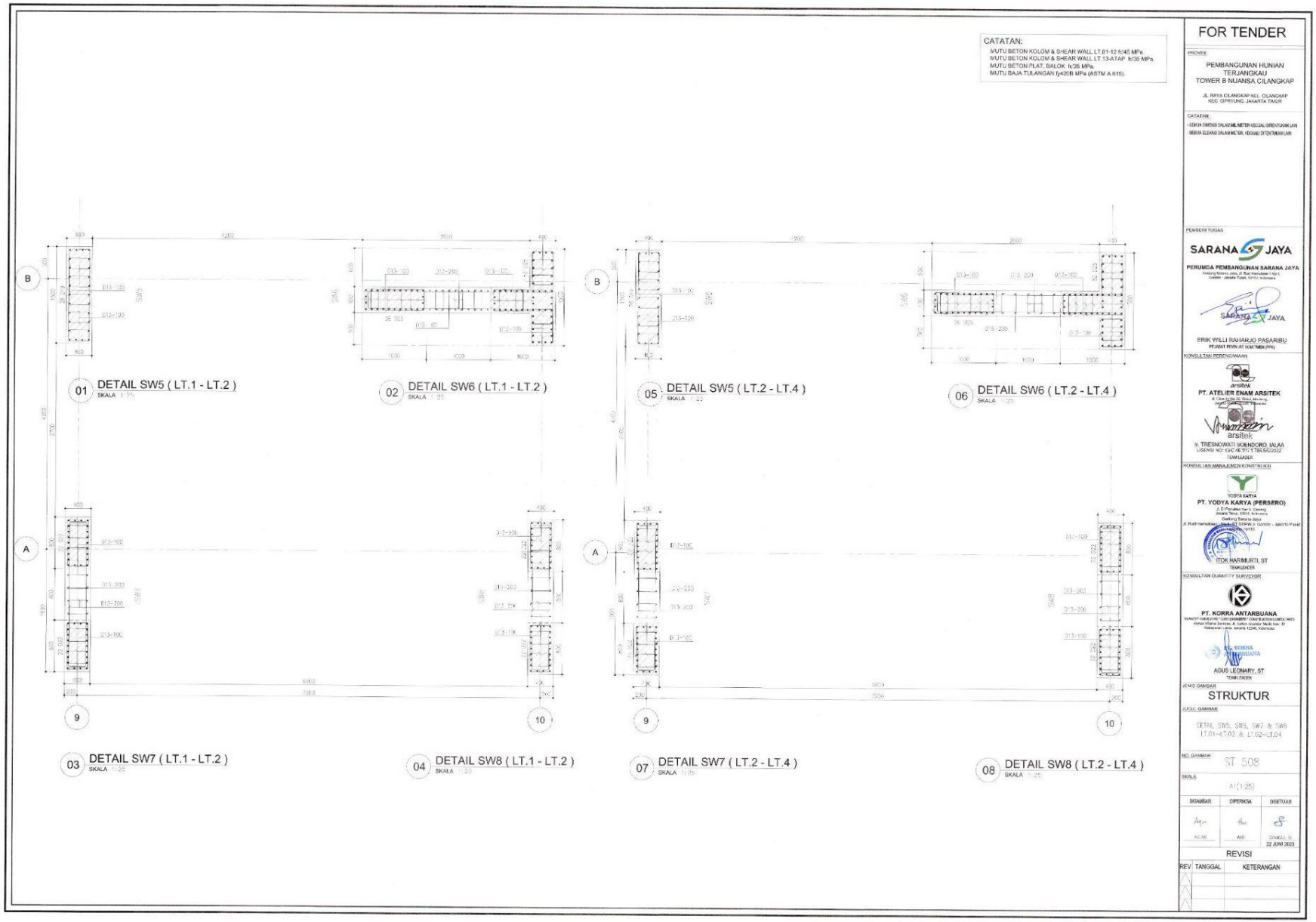
Lampiran 24 Detail Penulangan Dinding Geser Tipe 3 dan 4 Lantai 4 - Lantai 13



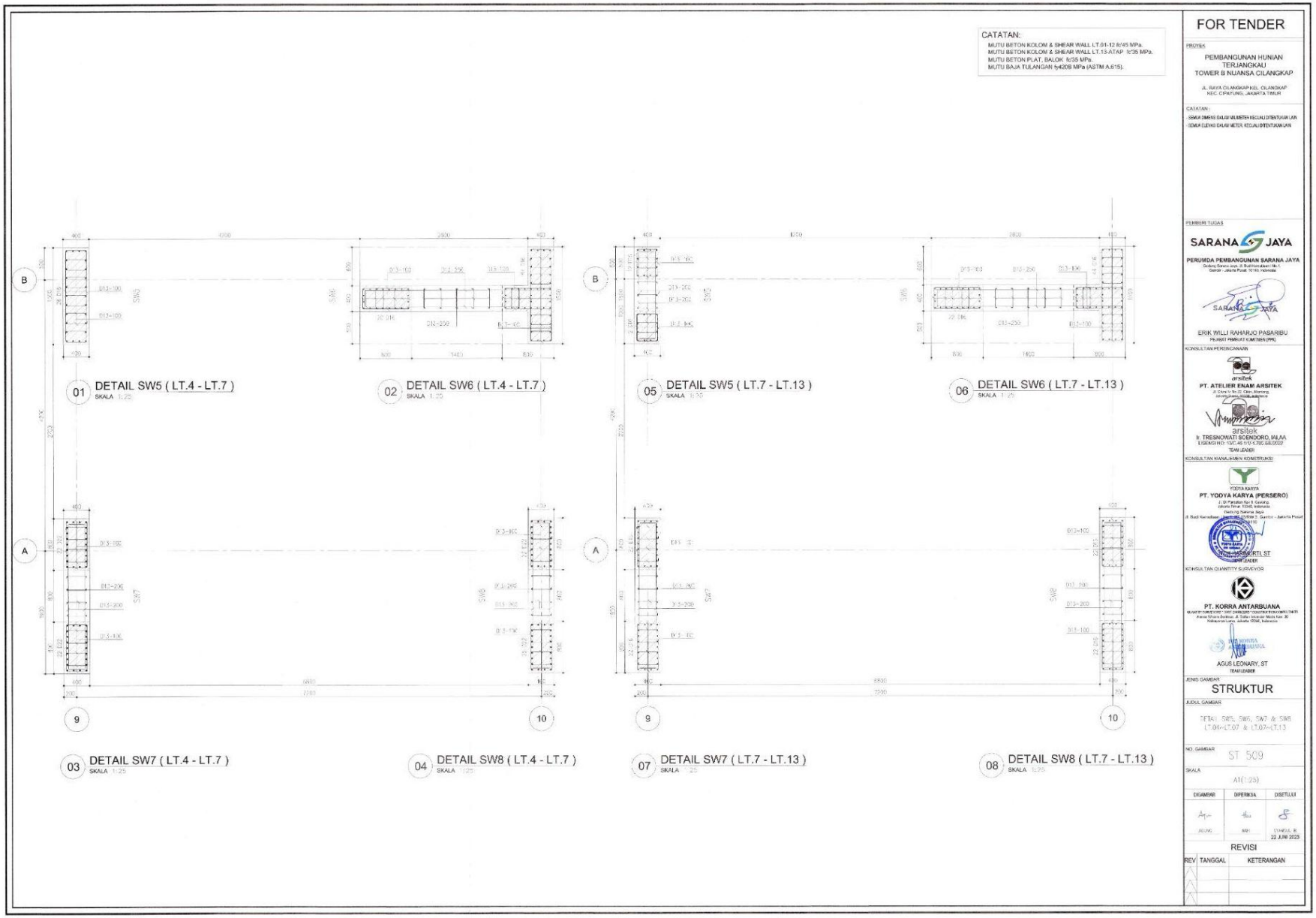
Lampiran 25 Detail Penulangan Dinding Geser Tipe 3 dan 4 Lantai 13 - Lantai Atap



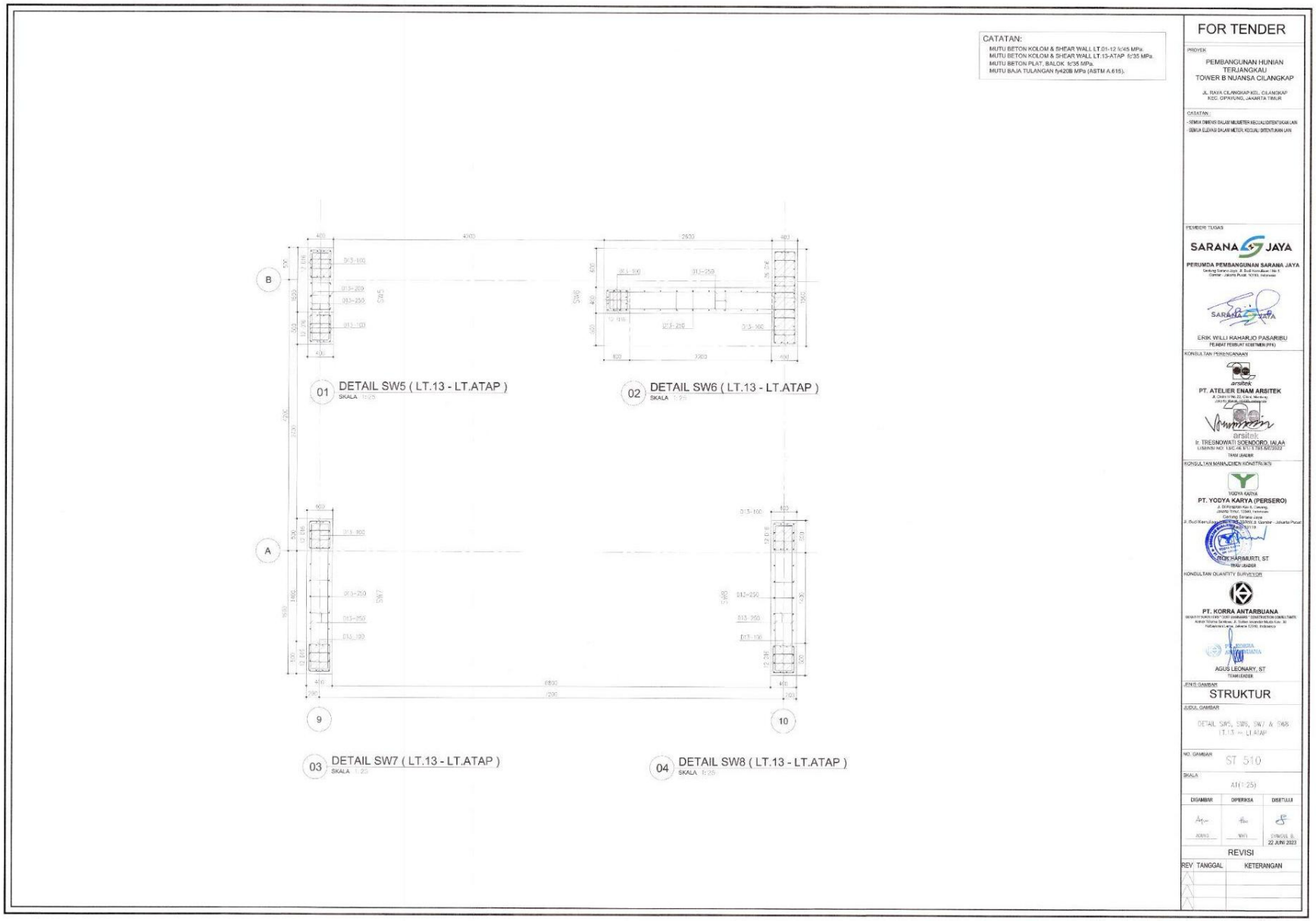
Lampiran 26 Detail Penulangan Dinding Geser Tipe 5 - 8 Lantai 1 - Lantai 4



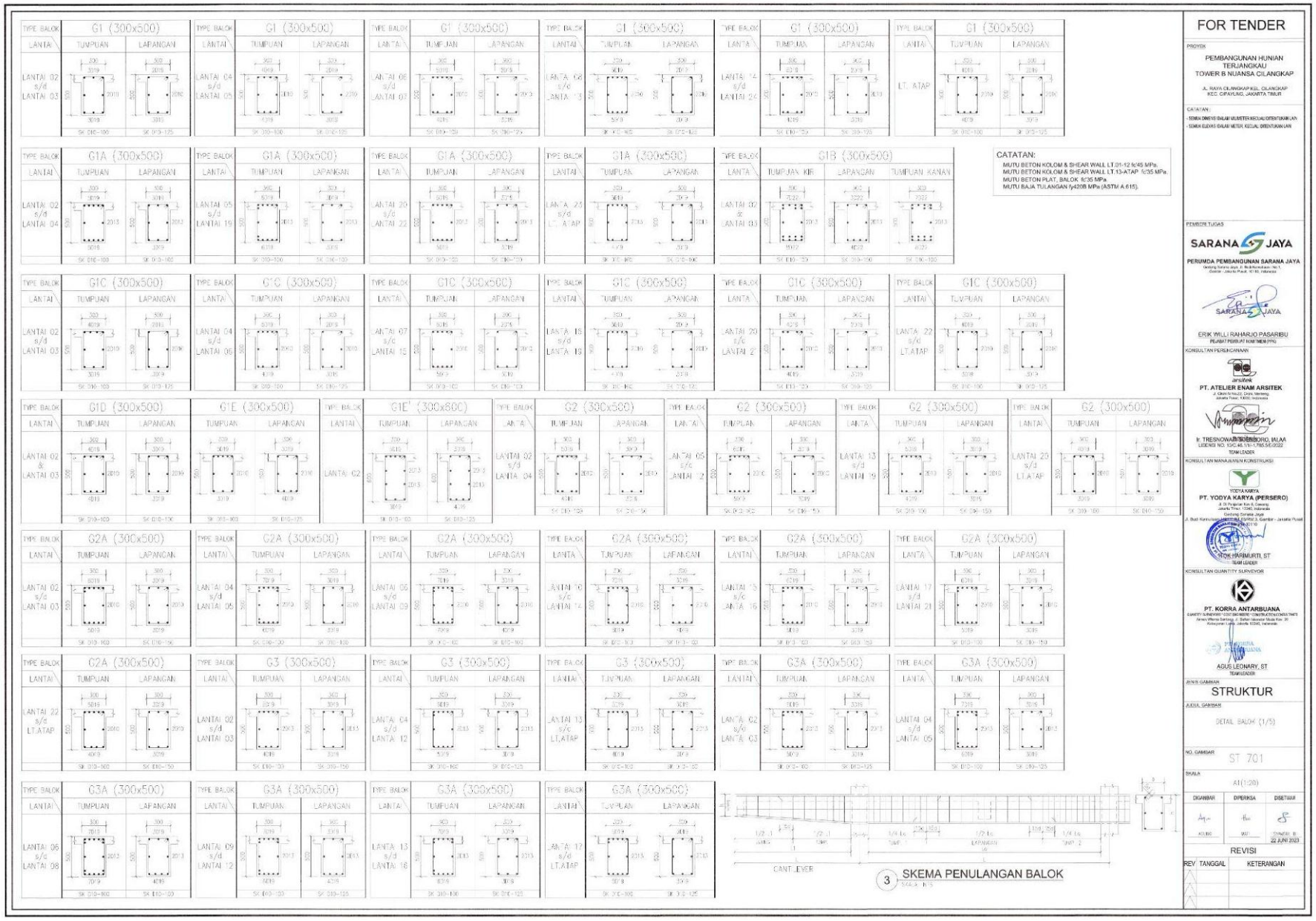
Lampiran 27 Detail Penulangan Dinding Geser Tipe 5 - 8 Lantai 4 - Lantai 13



Lampiran 28 Detail Penulangan Dinding Geser Tipe 5 - 8 Lantai 13 - Lantai Atap



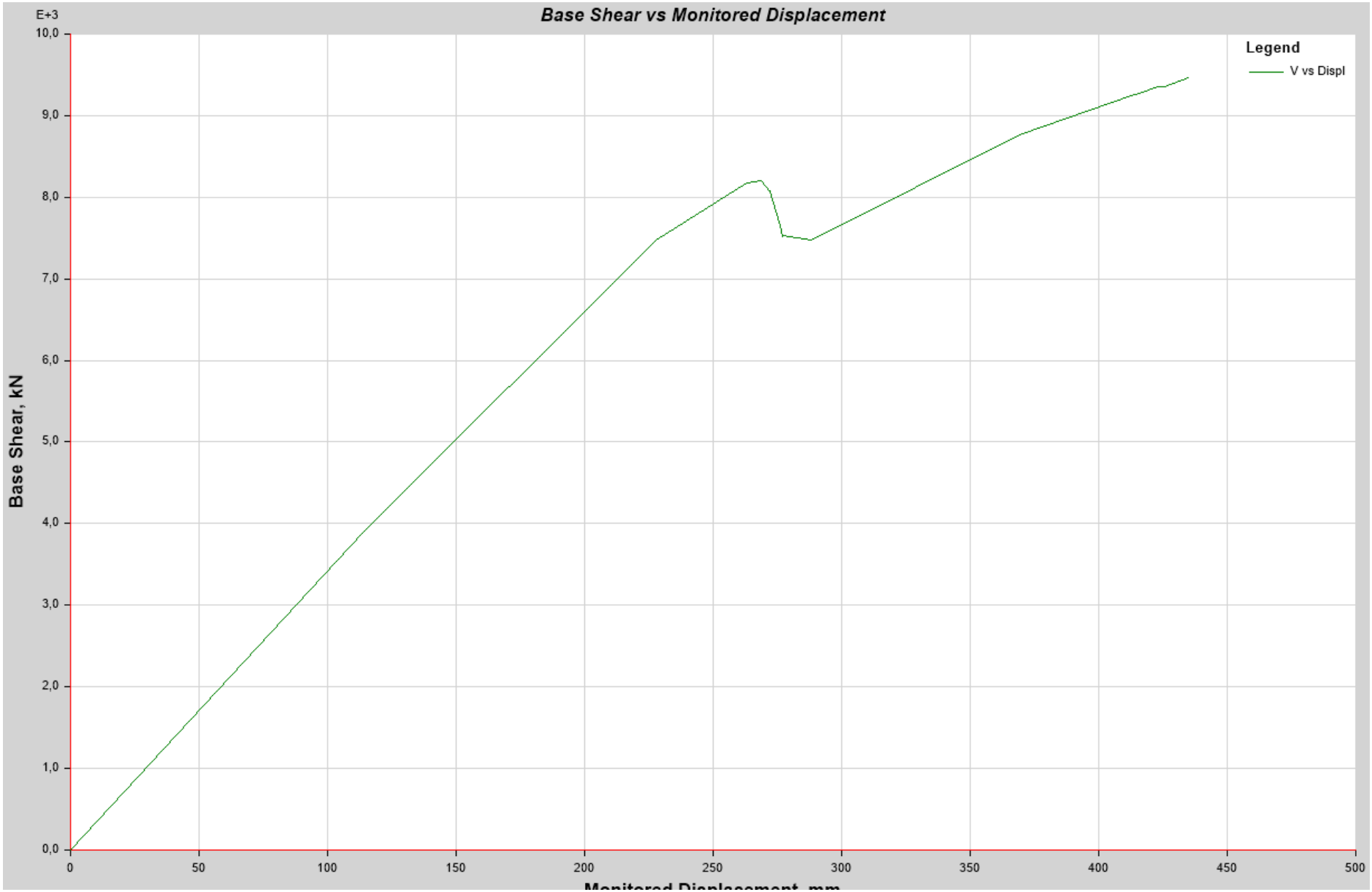
Lampiran 29 Detail Penulangan Balok



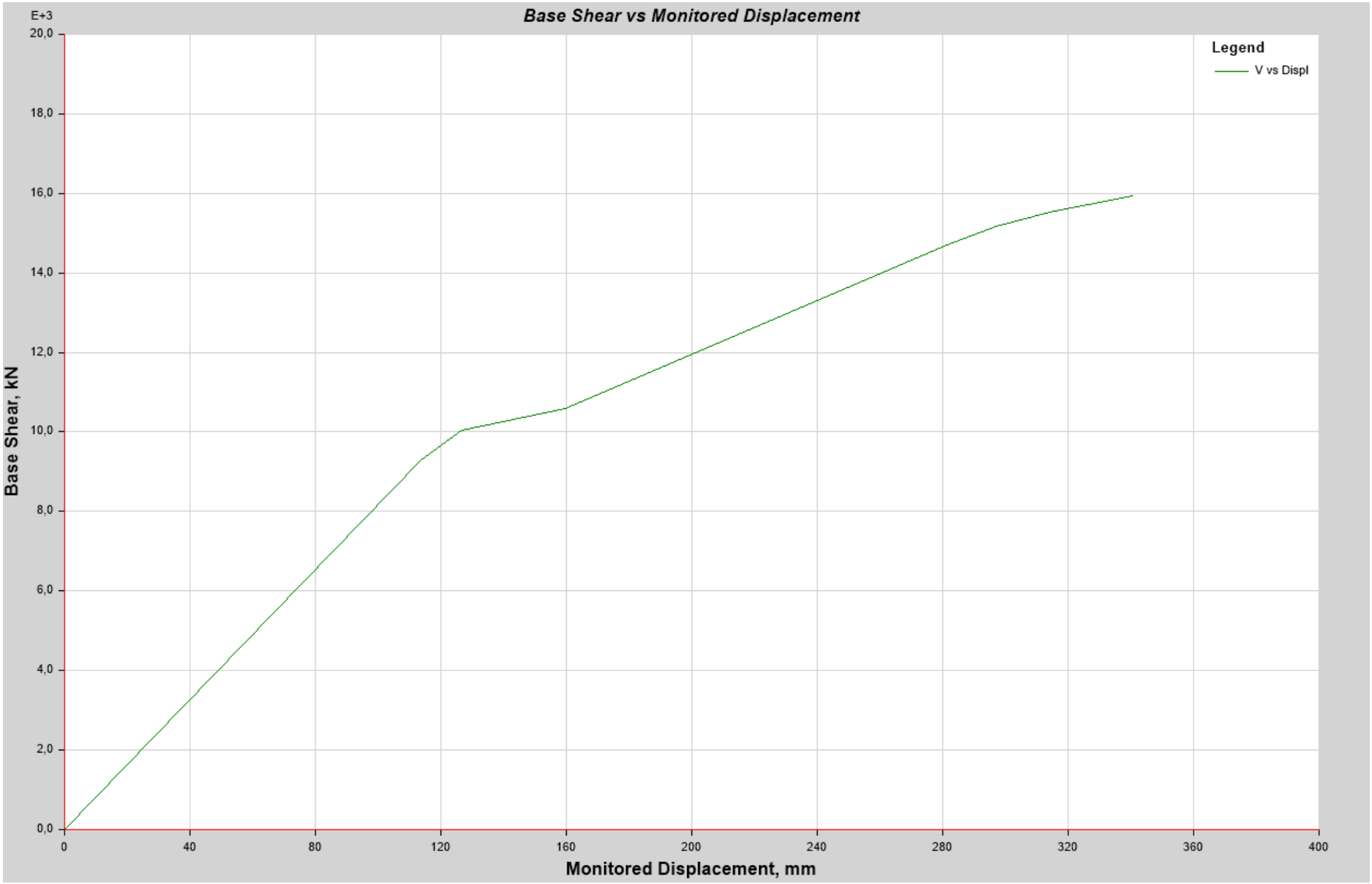
Lampiran 30 Nilai Simpangan Antartingkat

Story	δe_X	δe_Y	δe_X	δe_Y	*h*	Δ_X	Δ_Y	$\Delta limit$
25	103,183	60,072	5,155	6,043	4700	28,353	33,237	94,000
24	98,028	54,029	3,871	2,933	3300	21,291	16,132	66,000
23	94,157	51,096	3,597	2,661	3000	19,784	14,636	60,000
22	90,56	48,435	3,703	2,726	3000	20,367	14,993	60,000
21	86,857	45,709	3,829	2,711	3000	21,060	14,911	60,000
20	83,028	42,998	3,961	2,721	3000	21,786	14,966	60,000
19	79,067	40,277	4,091	2,721	3000	22,501	14,966	60,000
18	74,976	37,556	4,218	2,721	3000	23,199	14,966	60,000
17	70,758	34,835	4,334	2,718	3000	23,837	14,949	60,000
16	66,424	32,117	4,445	2,702	3000	24,448	14,861	60,000
15	61,979	29,415	4,543	2,676	3000	24,987	14,718	60,000
14	57,436	26,739	4,632	2,639	3000	25,476	14,515	60,000
13	52,804	24,1	4,705	2,591	3000	25,878	14,251	60,000
12	48,099	21,509	4,737	2,527	3000	26,054	13,899	60,000
11	43,362	18,982	4,765	2,460	3000	26,208	13,530	60,000
10	38,597	16,522	4,773	2,379	3000	26,252	13,085	60,000
9	33,824	14,143	4,752	2,280	3000	26,136	12,540	60,000
8	29,072	11,863	4,690	2,163	3000	25,795	11,897	60,000
7	24,382	9,7	4,577	2,024	3000	25,174	11,132	60,000
6	19,805	7,676	4,393	1,859	3000	24,162	10,225	60,000
5	15,412	5,817	4,121	1,667	3000	22,666	9,169	60,000
4	11,291	4,15	3,735	1,443	3000	20,543	7,937	60,000
3	7,556	2,707	3,191	1,182	3000	17,551	6,501	60,000
2	4,365	1,525	2,882	1,013	3600	15,851	5,572	72,000

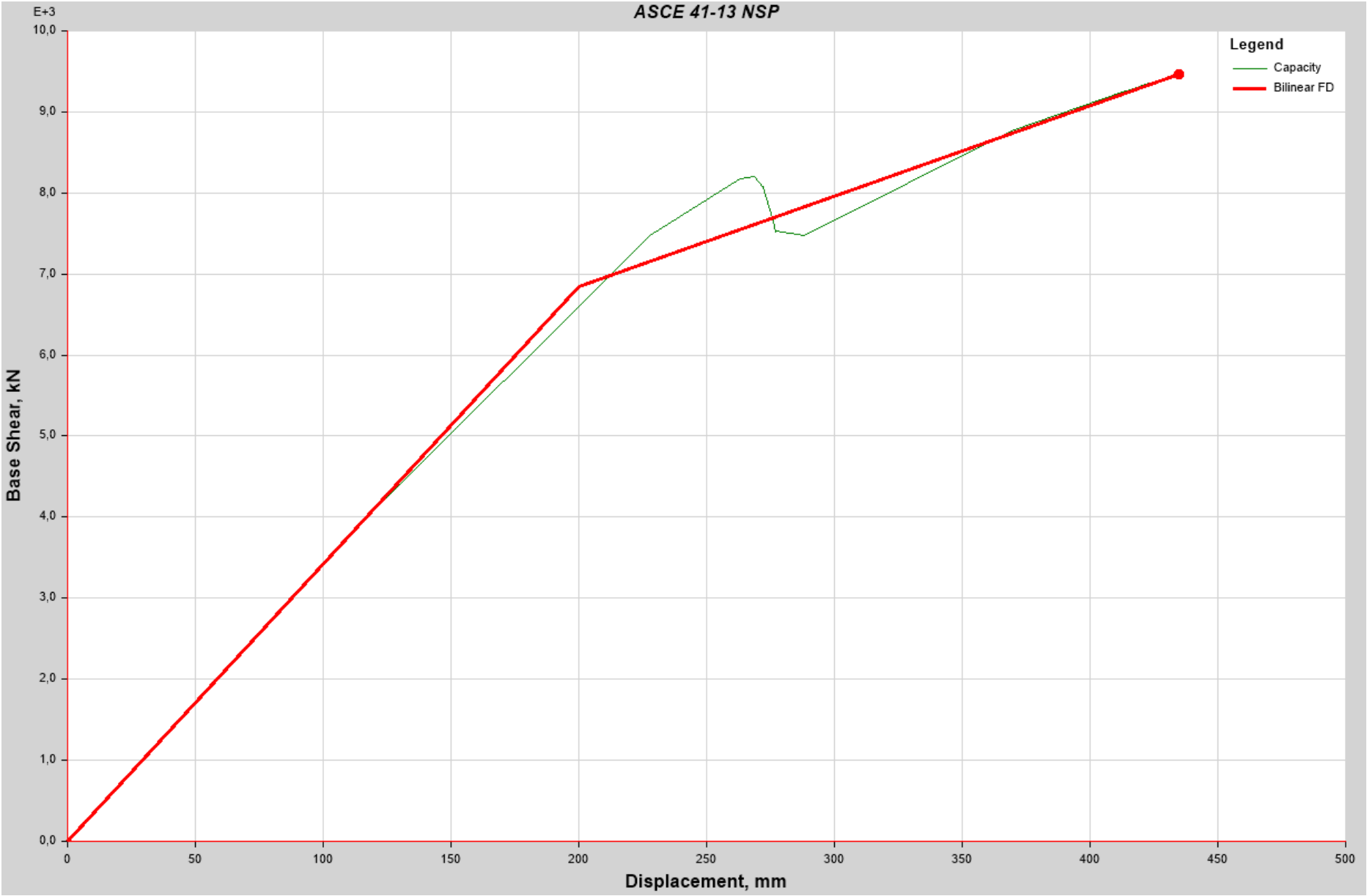
Lampiran 31 *Output* Kurva Kapasitas Arah X



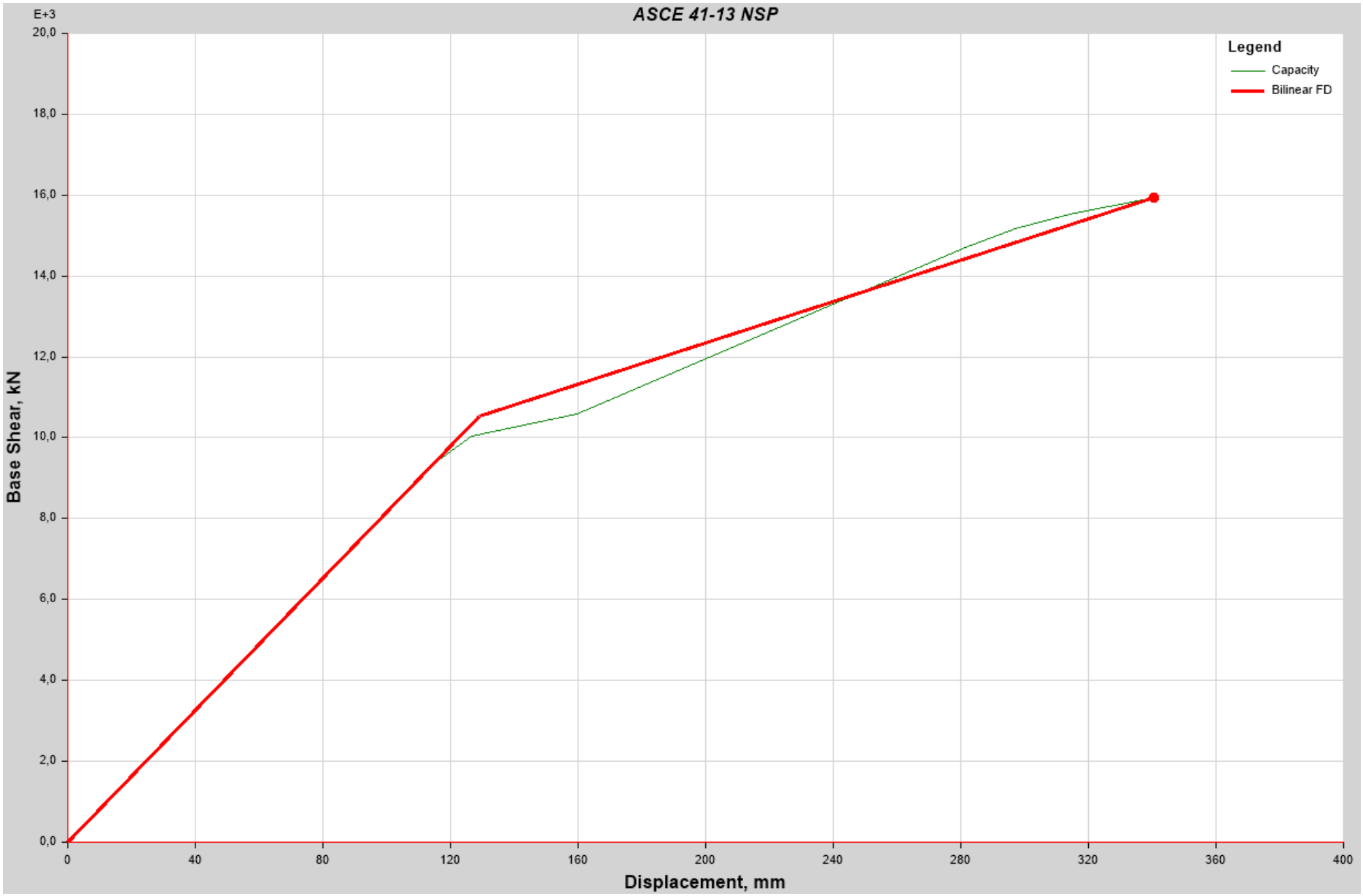
Lampiran 32 *Output* Kurva Kapasitas Arah Y



Lampiran 33 *Output* Kurva Idealisasi Arah X



Lampiran 34 *Output* Kurva Idealisasi Arah Y


ASCE 41-13 NSP
E+3
20,0
18,0
16,0
14,0
12,0
10,0
8,0
6,0
4,0
2,0
0,0
Base Shear, kN
0
40
80
120
160
200
240
280
320
360
400
Displacement, mm
Legend
Capacity
Bilinear FD