

TUGAS AKHIR

STUDI KETIDAKBERATURAN TORSI PADA REDESAIN STRUKTUR GEDUNG 7 LANTAI DENGAN SISTEM GANDA BERDASARKAN SNI 1726:2019

**Diajukan untuk Memenuhi Persyaratan dalam Menyelesaikan
Program Sarjana Program Studi Teknik Sipil
Fakultas Teknik Universitas Islam Sultan Agung**



Disusun Oleh :

**Arif Wicaksono
NIM : 30201900044**

**Aziz Musyafaq
NIM : 30201900049**

**PROGRAM STUDI TEKNIK SIPIL FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS ISLAM SULTAN AGUNG
2023**

LEMBAR PENGESAHAN

STUDI KETIDAKBERATURAN TORSI
PADA REDESAIN STRUKTUR GEDUNG 7 LANTAI
DENGAN SISTEM GANDA BERDASARKAN SNI 1727:2019



Arif Wicaksono
NIM : 30201900044



Aziz Musyafaq
NIM : 30201900049

Telah disetujui dan disahkan di Semarang, Juli 2023

Tim Penguji



Tanda Tangan

1. **Dr. Ir. H. Sumirin, MS.**
NIDN: 0004056302

2. **Ir. H. Prabowo Setiyawan, MT., Ph.D.**
NIDN: 0607046802

3. **Muhamad Rusli Ahyar, ST., M.Eng.**
NIDN: 0625059102

Ketua Program Studi Teknik Sipil
Fakultas Teknik
Universitas Islam Sultan Agung

Muhamad Rusli Ahyar, ST., M.Eng.
NIDN: 0625059102

BERITA ACARA BIMBINGAN TUGAS AKHIR

No: 25 / A.2 / SA – T / III / 2023

Pada hari ini tanggal Juli 2023 berdasarkan surat keputusan Dekan Fakultas Teknik, Universitas Islam Sultan Agung perihal penunjukan Dosen Pembimbing I dan Dosen Pembimbing II :

1. Nama : Dr. Ir. H. Sumirin, MS.
Jabatan Akademik : Lektor Kepala
2. Nama : Ir. H. Prabowo Setiyawan, MT., Ph.D.
Jabatan Akademik : Lektor Kepala

Dengan ini menyatakan bahwa mahasiswa yang tersebut di bawah ini telah menyelesaikan bimbingan Tugas Akhir:

Arif Wicaksono
NIM : 30201900044

Aziz Musyafaq
NIM : 30201900049

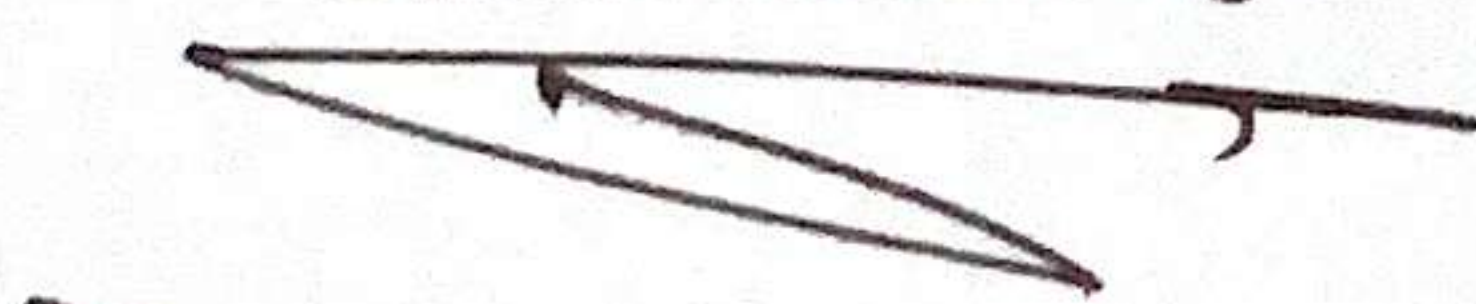
Judul : STUDI KETIDAKBERATURAN TORSI PADA REDESAIN STRUKTUR GEDUNG 7 LANTAI DENGAN SISTEM GANDA BERDASARKAN SNI 1727:2019

Dengan tahapan sebagai berikut :

No	Tahapan	Tanggal	Keterangan
1	Penunjukan dosen pembimbing	08/03/2023	ACC
2	Seminar Proposal	20/06/2023	ACC
3	Pengumpulan data	-	-
4	Analisis data	-	-
5	Penyusunan laporan	-	-
6	Selesai laporan	21/07/2023	ACC

Demikian Berita Acara Bimbingan Tugas Akhir / Stripsi ini dibuat Untuk diketahui dan dipergunakan seperlunya oleh pihak – pihak yang berkepentingan

Dosen Pembimbing I



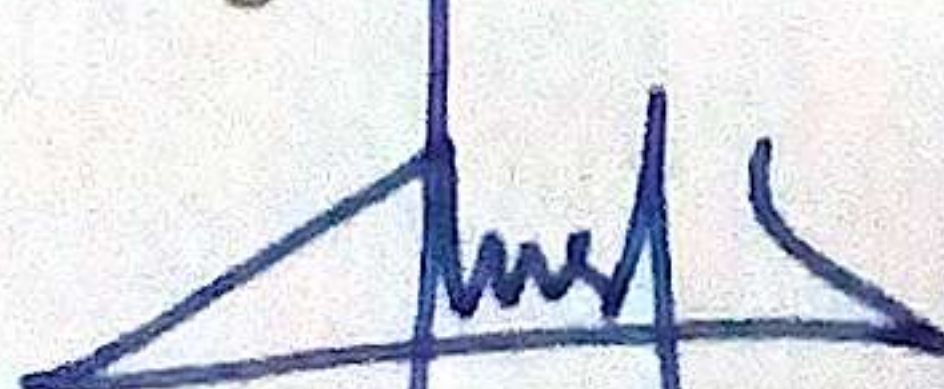
Dr. Ir. H. Sumirin, MS.

Dosen Pembimbing II



Ir. H. Prabowo Setiyawan, MT., Ph.D.

Mengetahui,
Ketua Program Studi Teknik Sipil



Muhamad Rusli Ahyar, ST., M.Eng.

PERNYATAAN KEASLIAN

Saya yang bertanda tangan dibawah ini:

NAMA : Aziz Musyafaq
NIM : 30201900049
JUDUL TUGAS AKHIR : Studi Ketidakberaturan Torsi pada Redesain Struktur Gedung 7 Lantai dengan Sistem Ganda Berdasarkan SNI 1726:2019

Menyatakan dengan sesungguhnya bahwa Tugas Akhir ini merupakan hasil penelitian, pemikiran dan pemaparan asli saya sendiri. Saya tidak mencantumkan tanpa pengakuan bahan - bahan yang telah dipublikasikan sebelumnya atau ditulis oleh orang lain, atau sebagai bahan yang pernah diajukan untuk gelar atau ijazah pada Universitas Islam Sultan Agung Semarang atau perguruan tinggi lainnya.

Apabila dikemudian hari terdapat penyimpangan dan ketidakbenaran dalam pernyataan ini, maka saya bersedia menerima sanksi akademik sesuai dengan peraturan yang berlaku di Universitas Islam Sultan Agung Semarang.

Demikian pernyataan ini saya buat.



Semarang,

Yang membuat pernyataan,


Aziz Musyafaq

NIM : 30201900049

PERNYATAAN BEBAS PLAGIASI

Saya yang bertandatangan dibawah ini :

NAMA : Arif Wicaksono

NIM : 30201900044

Dengan ini menyatakan bahwa Tugas Akhir yang berjudul : Studi Ketidakberaturan Torsi pada Redesain Struktur Gedung 7 Lantai dengan Sistem Ganda Berdasarkan SNI 1726:2019 benar benar bebas dari pelagiat, dan apabila pernyataan ini terbukti benar maka saya bersedia menerima sanksi sesuai ketentuan yang berlaku.

Demikian surat pernyataan ini saya buat untuk dipergunakan sebagaimana mestinya.

Semarang,

Yang membuat pernyataan,



Arif Wicaksono

NIM : 30201900044



PERNYATAAN BEBAS PLAGIASI

Saya yang bertandatangan dibawah ini :

NAMA : Aziz Musyafaq

NIM : 3020190004

Dengan ini menyatakan bahwa Tugas Akhir yang berjudul : Studi Ketidakberaturan Torsi pada Redesain Struktur Gedung 7 Lantai dengan Sistem Ganda Berdasarkan SNI 1726:2019 benar benar bebas dari pelagiat, dan apabila pernyataan ini terbukti benar maka saya bersedia menerima sanksi sesuai ketentuan yang berlaku.

Demikian surat pernyataan ini saya buat untuk dipergunakan sebagaimana mestinya.

Semarang,

Yang membuat pernyataan,



Aziz Musyafaq

NIM : 30201900049



PERNYATAAN KEASLIAN

Saya yang bertanda tangan dibawah ini:

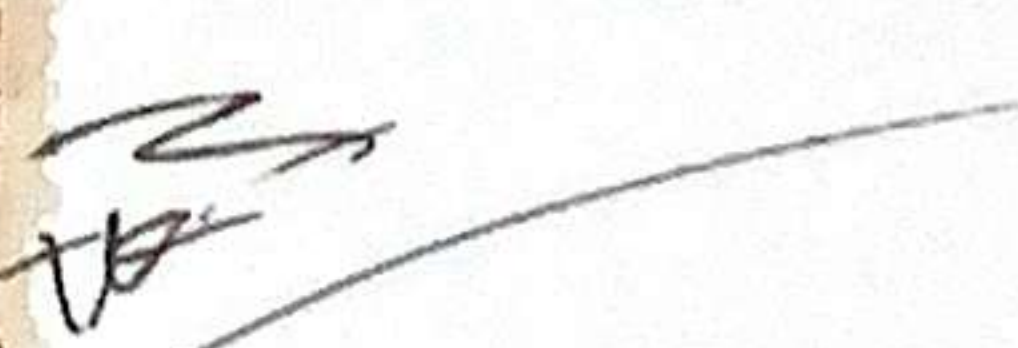
NAMA : Arif Wicaksono
NIM : 30201900044
JUDUL TUGAS AKHIR : Studi Ketidakberaturan Torsi pada Redesain Struktur Gedung 7 Lantai dengan Sistem Ganda Berdasarkan SNI 1726:2019

Menyatakan dengan sesungguhnya bahwa Tugas Akhir ini merupakan hasil penelitian, pemikiran dan pemaparan asli saya sendiri. Saya tidak mencantumkan tanpa pengakuan bahan - bahan yang telah dipublikasikan sebelumnya atau ditulis oleh orang lain, atau sebagai bahan yang pernah diajukan untuk gelar atau ijasah pada Universitas Islam Sultan Agung Semarang atau perguruan tinggi lainnya.

Apabila dikemudian hari terdapat penyimpangan dan ketidakbenaran dalam pernyataan ini, maka saya bersedia menerima sanksi akademik sesuai dengan peraturan yang berlaku di Universitas Islam Sultan Agung Semarang.

Demikian pernyataan ini saya buat.

Semarang,
Yang membuat pernyataan,



Arif Wicaksono
NIM : 30201900044

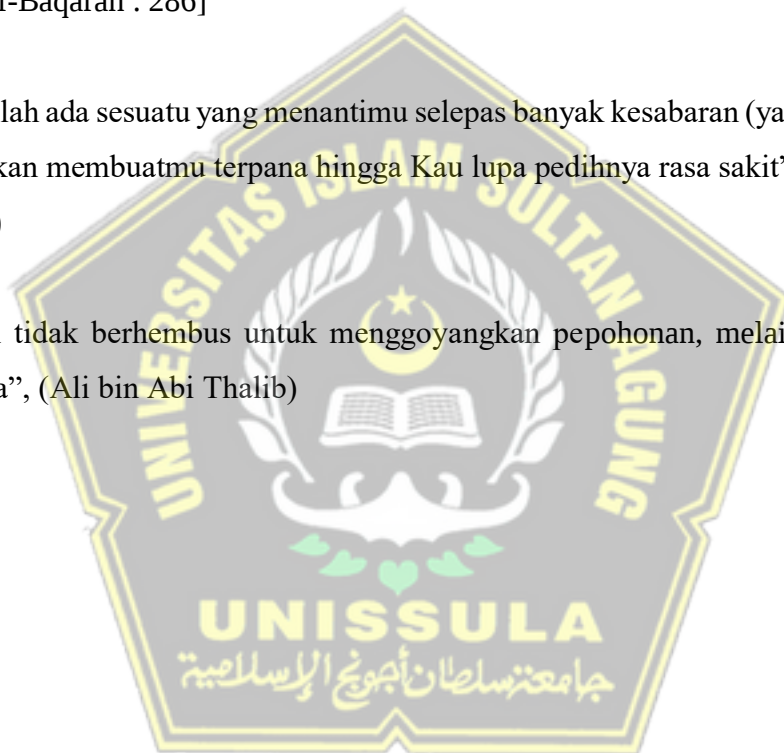
MOTTO

“Kamu adalah umat terbaik yang dilahirkan untuk manusia, menyuruh yang makruf, dan mencegah dari yang mungkar, dan beriman kepada Allah. Sekiranya Ahli kitab beriman, tentulah itu lebih baik bagi mereka. Di antara mereka ada yang beriman, namun kebanyakan mereka adalah orang-orang fasik”. [Q.S. Ali Imron : 110]

“Allah tidak membebani seseorang melainkan sesuai dengan kesanggupannya”. [Q.S Al-Baqarah : 286]

“Yakinlah ada sesuatu yang menantimu selepas banyak kesabaran (yang Kau jalani) yang akan membuatmu terpana hingga Kau lupa pedihnya rasa sakit”. (Ali bin Abi Thalib)

“Angin tidak berhembus untuk menggoyangkan pepohonan, melainkan menguji akarnya”, (Ali bin Abi Thalib)



PERSEMBAHAN

Alhamdulillah, Puji syukur kehadiran Allah SWT atas segala rahmat dan hidayahNya, sehingga saya dapat menyelesaikan Laporan Tugas Akhir ini. Dalam hal ini saya persembahkan dan saya ucapkan terimakasih kepada :

1. Kedua orang tua, Bapak Kecuk Anggoro dan Ibu Wiwin Priyani, yang telah memberikan segenap kasih sayang, dukungan materil, semangat, do'a dan pendidikan mental untuk terus mengejar impian menjadi seseorang yang mulia di dunia dan akhirat.
2. Bapak Dr. Ir. H. Sumirin, MS. dan Bapak Ir. H. Prabowo Setiyawan, MT., Ph.D. selaku Dosen Pembimbing saya yang telah sabar membimbing saya dalam pembuatan laporan ini.
3. Dosen – dosen Fakultas Teknik UNISSULA yang telah mengajarkan saya tentang ilmu – ilmu keteknikan yang sebelumnya saya tidak ketahui dan selalu memberikan motivasi dan arahan kepada saya.
4. Aziz Musyafaq selaku rekan yang telah bekerja keras dan berjuang bersama dalam penyelesaian Tugas Akhir ini.
5. Teman – teman saya Ananda Fadil, Bambang Sindu, Bagus Ainul, Elang Bagus, Alief Muzaki, Ainun Sukron, Azzahra Auryn dan Bunga Ayu yang telah membantu dan memberikan semangat dalam berbagai hal.
6. Teman – teman Fakultas Teknik UNISSULA angkatan 2019 dan yang lainnya yang tidak bisa saya sebutkan satu persatu.

Arif Wicaksono
NIM : 3020190044

PERSEMBAHAN

Alhamdulillah, Puji syukur kehadiran Allah SWT atas segala rahmat dan hidayahNya, sehingga saya dapat menyelesaikan Laporan Tugas Akhir ini. Dalam hal ini saya persembahkan dan saya ucapkan terimakasih kepada :

1. Kedua orang tua tercinta Bapak Sugeng dan Ibu Turyani, atas semua cinta, pengertian, kasih sayang, kesabaran dan do'a.
2. Bapak Dr. Ir. H. Sumirin, MS. dan Bapak Ir. H. Prabowo Setiyawan, MT., Ph.D. selaku Dosen Pembimbing saya yang telah sabar membimbing saya dalam pembuatan laporan ini.
3. Dosen – dosen Fakultas Teknik UNISSULA yang telah mengajarkan saya tentang ilmu – ilmu keteknikan yang sebelumnya saya tidak ketahui dan selalu memberikan motivasi dan arahan kepada saya.
4. Arif Wicaksono selaku rekan yang telah bekerja keras dan berjuang bersama dalam penyelesaian Tugas Akhir ini.
5. Teman terdekat Saya Meiya Eka Putri Hidayat yang selalu memberi dukungan, semangat dan waktu untuk mendampingi Saya menyelesaikan tugas akhir ini.
6. Mentor sekaligus sahabat Saya Fairuz Izdiyar Athallah, ST. yang telah membantu dalam mengerjakan tugas akhir ini.
7. Teman – teman Saya di Teknik Sipil A 2019 yang selalu mendukung dan memberi semangat.
8. Teman – teman Fakultas Teknik UNISSULA angkatan 2019 dan yang lainnya yang tidak bisa saya sebutkan satu persatu.

Aziz Musyafaq
NIM : 3020190044

KATA PENGANTAR

Syukur Alhamdulillah, segala puji bagi Allah SWT, karena hanya dengan rahmat dan karunia-Nya penulis dapat menyelesaikan tugas akhir ini dengan judul “STUDI KETIDAKBERATURAN TORSI PADA REDESAIN STRUKTUR GEDUNG 7 LANTAI DENGAN SISTEM GANDA BERDASARKAN SNI 1727:2019” guna memenuhi salah satu persyaratan untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik Sipil di Universitas Islam Sultan Agung Semarang.

Penulis menyadari kelemahan serta keterbatasan yang ada sehingga dalam menyelesaikan skripsi ini memperoleh bantuan dari berbagai pihak, dalam kesempatan ini Penulis menyampaikan terima kasih kepada :

1. Bapak Ir. H. Rachmat Mudiyo, MT., Ph.D., selaku Dekan Fakultas Teknik Universitas Islam Sultan Agung Semarang.
2. Bapak Muhamad Rusli Ahyar, ST., M.Eng, selaku Ketua Program Studi Teknik Sipil UNISSULA yang telah memberikan kelancaran pelayanan dalam urusan Akademik.
3. Ibu Ir. Nina Anindyawati, MT, selaku dosen Pembimbing Akademik yang selalu memberikan dorongan dalam penulisan skripsi ini.
4. Bapak Dr. Ir. H. Sumirin, MS, selaku Dosen Pembimbing Utama yang selalu memberikan waktu bimbingan dan arahan selama penyusunan skripsi ini.
5. Bapak Ir. H. Prabowo Setiyawan, MT., Ph.D, selaku Dosen Pembimbing Pendamping yang selalu memberikan waktu bimbingan dan arahan selama penyusunan Tugas Akhir ini.
6. Seluruh Dosen Program Studi Teknik Sipil UNISSULA yang telah memberikan ilmunya kepada Penulis

Penulis menyadari bahwa Tugas Akhir ini masih banyak kekurangan baik isi maupun susunannya. Semoga Tugas Akhir dapat bermanfaat tidak hanya bagi penulis juga bagi para Pembaca.

Semarang, Juli 2023

Penyusun

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL.....	i
LEMBAR PENGESAHAN	ii
BERITA ACARA BIMBINGAN TUGAS AKHIR	iii
PERNYATAAN BEBAS PLAGIASI.....	iv
PERNYATAAN BEBAS PLAGIASI.....	v
PERNYATAAN KEASLIAN.....	vi
PERNYATAAN KEASLIAN.....	vii
MOTTO	viii
PERSEMBAHAN	ix
PERSEMBAHAN	x
KATA PENGANTAR	xi
DAFTAR ISI.....	xii
DAFTAR TABEL.....	xvii
DAFTAR GAMBAR.....	xx
DAFTAR NOTASI.....	xxiii
DAFTAR LAMPIRAN.....	xxx
ABSTRAK.....	xxxi
 BAB I	 1
PENDAHULUAN.....	1
1.1. Latar Belakang	1
1.2. Rumusan Masalah	2
1.3. Tujuan.....	2
1.4. Manfaat.....	2
1.5. Batasan Masalah.....	2
1.6. Sistematika Penulisan.....	3
 BAB II	 5
TINJAUAN PUSTAKA.....	5
2.1. Tinjauan Umum.....	5

2.2.	Sistem Struktur Penahan Gempa.....	5
2.2.1.	Sistem Rangka Pemikul Momen (Moment Resisting Frame System)	5
2.2.2.	Dinding Geser (<i>Shear Wall</i>).....	6
2.2.3.	Sistem Ganda (<i>Dual System</i>).....	7
2.3.	Beban yang Bekerja pada Struktur Bangunan Gedung	7
2.3.1.	Beban Mati (<i>Dead Load</i>).....	8
2.3.2.	Beban Hidup (<i>Live Load</i>).....	8
2.3.3.	Beban Gempa	13
2.3.4.	Faktor Beban dan Kombinasi Beban.....	13
2.3.5.	Faktor Reduksi Kekuatan (ϕ)	14
2.4.	Standar Perancangan Struktur Bangunan Gedung	15
2.5.	Perancangan Struktur Tahan Gempa Berdasarkan SNI 1726:2019	15
2.5.1.	Gempa rencana	16
2.5.2.	Kategori Risiko Bangunan dan Faktor Keutamaan Gempa	16
2.5.3.	Klasifikasi Situs.....	18
2.5.4.	Parameter Respons Spektral Percepatan Gempa Tertarget	19
2.5.5.	Parameter Percepatan Spektral Desain.....	22
2.5.6.	Spektrum Respons Desain.....	22
2.5.7.	Kategori Desain Seismik.....	24
2.5.8.	Kombinasi Sistem Pemikul Gaya Seismik pada Arah yang Berbeda	24
2.5.9.	Periode Fundamental Pendekatan	25
2.5.10.	Periode Fundamental Struktur.....	26
2.5.11.	Gaya Geser Dasar Seismik.....	27
2.5.12.	Simpangan Antar Tingkat	28
2.5.13.	Pengaruh P-Delta.....	29
2.5.14.	Analisis Spektrum Respons Ragam	30
2.5.15.	Ketidakteraturan Struktur	30
2.6.	Perancangan Elemen Struktur Beton Bertulang Berdasarkan SNI	34
2.6.1.	Perancangan Pelat.....	34
2.6.2.	Perancangan Balok Sistem Pemikul Momen Khusus (SRPMK)	35
2.6.3.	Perancangan Kolom Sistem Rangka Pemikul Momen Khusus (SRPMK)	38
2.6.4.	Perancangan <i>Strong Column-Weak Beam</i>	41

2.6.5. Perancangan Hubungan Balok Kolom (<i>Joint</i>) pada SRPMK	41
2.6.6. Perancangan Dinding Geser	43
 BAB III	48
METODE ANALISIS	48
3.1. Pengumpulan Data	48
3.2. Satandar Perancangan.....	48
3.3. Tahapan Analisis dan Perancangan.....	48
3.3.1. Tahapan Analisis	48
3.3.1.1. Pemodelan Struktur.....	49
3.3.1.2. Pembebanan Struktur	57
3.3.1.3. Analisis Struktur	69
3.4.1. Tahapan Perancangan.....	69
3.4.1.1. Tahapan Perancangan Pelat	69
3.4.1.2. Tahapan Perancangan Balok.....	69
3.4.1.3. Tahapan Perancangan Kolom	69
3.4.1.4. Tahapan Perancangan <i>Strong Column – Weak Beam</i>	70
3.4.1.5. Tahapan Perancangan Hubungan Balok – Kolom (<i>Joint</i>)	70
3.4.1.6. Tahapan Perancangan Dinding Geser.....	70
3.4. Diagram Alir Perancangan	71
 BAB I V 72	
HASIL DAN PEMBAHASAN.....	72
4.1 Data Struktur Gedung	72
4.1.1. Deskripsi Umum Struktur	72
4.1.2. Perancangan Awal Dimensi Struktur (<i>Preliminary Design</i>).....	75
4.2 Pemodelan Elemen Struktur	84
4.2.1. Pemodelan Pelat.....	84
4.2.2. Pemodelan Balok	84
4.2.3. Pemodelan Kolom.....	85
4.2.4. Pemodelan Dinding Geser.....	86
4.3 Pemodelan Struktur	86

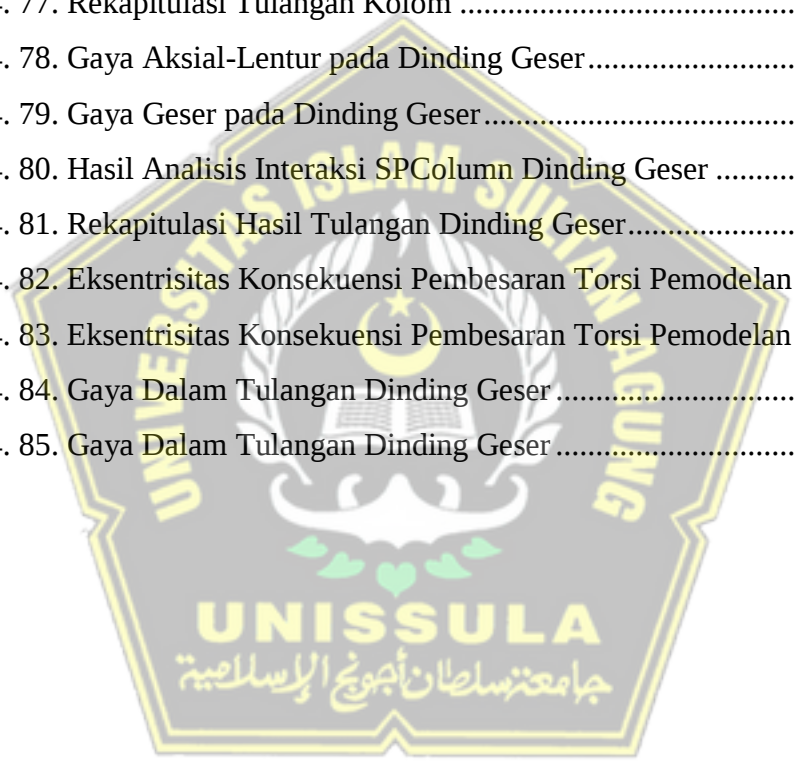
4.3.1. Pengecekan Ketidakberaturan Horizontal dan Vertikal Permodelan.....	87
4.3.2. Cek Simpangan Antar Lantai Pemodelan	102
4.3.3. Cek Sistem Ganda Pemodelan	105
4.3.4. Rekapitulasi Hasil Pengecekan Permodelan	106
4.3.5. Eksentrisitas Gedung.....	107
4.4 Pembebanan Struktur.....	111
4.4.1. Pembebanan Gravitasi.....	111
4.4.2. Pembebanan Gempa.....	112
4.4.3. Kombinasi Pembebanan Struktur.....	117
4.5 Pengecekan Perilaku Struktur Bangunan.....	118
4.5.1. Rasio Partisipasi Massa.....	118
4.5.2. Perhitungan Faktor Skala Gempa.....	120
4.5.3. Pengecekan Gaya Geser.....	124
4.5.4. Pengecekan Simpangan Antar Tingkat (<i>Storey Drift</i>)	125
4.5.5. Pengecekan P-Delta	126
4.6 Perancangan Elemen Struktur Beton Bertulang	128
4.6.1. Perancangan Pelat	128
4.6.2. Perancangan Balok.....	148
4.6.3. Perancangan Kolom	182
4.6.4. Perancangan Strong Column-Weak Beam.....	191
4.6.5. Perancangan Hubungan Balok-Kolom (<i>Joint</i>).....	192
4.6.6. Perancangan Dinding Geser.....	195
 BAB V	 213
KESIMPULAN	213
5.1 Kesimpulan.....	213
5.2 Saran.....	214
 DAFTAR PUSTAKA	 xxxii
LAMPIRAN	xxxiii

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1. Beban Mati Tambahan.....	8
Tabel 2.2. Beban Hidup Terdistribusi Merata Minimum (L_o) dan Beban Hidup Terpusat Minimum.....	9
Tabel 2.3. Kombinasi Beban	14
Tabel 2.4. Faktor Reduksi Kekuatan (ϕ).....	14
Tabel 2.5. Kategori Risiko Bangunan.....	16
Tabel 2.6. Faktor Keutamaan Gempa	18
Tabel 2.7. Klasifikasi Situs (SNI 1726:2019).....	18
Tabel 2.8. Koefisien Situs (F_a)	21
Tabel 2.9. Koefisien Situs (F_v)	21
Tabel 2.10. Kategori Desain Seismik Berdasarkan Parameter Respons Percepatan pada Periode Pendek (S_{Ds}).....	24
Tabel 2.11. Kategori Desain Seismik Berdasarkan Parameter Respons Percepatan pada Periode 1 Detik (S_1).....	24
Tabel 2.12. Faktor R , C_d , dan Ω_0 untuk Sistem Pemikul Gaya Seismik.....	25
Tabel 2.13. Nilai Parameter Periode Pendekatan C_t dan x	26
Tabel 2.14. Koefisien untuk Batas Atas pada Periode yang Dihitung (C_u)	26
Tabel 2.15. Simpangan Antar Tingkat Izin	29
Tabel 2.16. Persyaratan Ketidakberaturan Horizontal pada Struktur	30
Tabel 2.17. Persyaratan Ketidakberaturan Vertikal pada Struktur	32
Tabel 2.17. Persyaratan Ketidakberaturan Vertikal pada Struktur (Lanjutan	33
Tabel 2.18. Ketebalan Minimum Pelat 1 Arah	34
Tabel 2.19. Ketebalan Minimum Pelat	34
Tabel 2.20. A_s min untuk Pelat	35
Tabel 2.21. Tinggi Balok Minimum (h).....	35
Tabel 2.22. Tulangan Transversal untuk Kolom-Kolom Sistem Rangka Pemikul Momen Khusus (SRPMK)	40
Tabel 2.23. Tulangan Transversal untuk Elemen Batas Khusus.....	45
Tabel 4. 1. Data Model Struktur Gedung.....	74
Tabel 4. 2. Tinggi Antar Lantai Bangunan	76

Tabel 4. 3. Mutu Baja Tulangan.....	76
Tabel 4. 4. Mutu Beton Balok, Pelat, Kolom dan Dinding Geser.....	77
Tabel 4. 5. Tebal Minimum Pelat 1 Arah.....	77
Tabel 4. 6. Tebal Minimum Pelat 2 Arah.....	78
Tabel 4. 7. Hasil Preliminary Elemen Pelat	78
Tabel 4. 8. Hasil Preliminary Elemen Balok.....	79
Tabel 4. 9. Beban Total pada Lantai 7	80
Tabel 4. 10. Beban Total pada Lantai 5 - 6.....	80
Tabel 4. 11. Beban Total pada Lantai 3 - 4.....	81
Tabel 4. 12. Beban Total pada Lantai 1 - 2.....	81
Tabel 4. 13. Hasil Preliminary Elemen Kolom	82
Tabel 4. 14. Pengecekan Kolom Langsing.....	82
Tabel 4. 15. Tebal Minimum Dinding	83
Tabel 4. 16. Dimensi Balok Setelah Pengecekan.....	85
Tabel 4. 17. Dimensi Kolom Setelah Pengecekan.....	85
Tabel 4. 18. Dimensi Dinding Geser Setelah Pengecekan.....	86
Tabel 4. 52. Tabel Rekapitulasi Torsi	107
Tabel 4. 53. Tabel Rekapitulasi Simpangan Antar Lantai	108
Tabel 4. 54. Tabel Rekapitulasi Sistem Ganda	108
Tabel 4. 55. Tabel Eksentrisitas Torsi Tak terduga	109
Tabel 4. 56. Tabel Eksentrisitas Torsi Tak terduga	110
Tabel 4. 57. Tabel Eksentrisitas Torsi Tak terduga	111
Tabel 4. 58. Beban Mati Tambahan pada Lantai	112
Tabel 4. 59. Beban Mati Tambahan pada Atap.....	112
Tabel 4. 60. Nilai N-SPT.....	114
Tabel 4. 61. Data Parameter Respons Spektra Terpetakan	115
Tabel 4. 62. Parameter Respons Spektra.....	116
Tabel 4. 63. Kombinasi Pembebanan.....	118
Tabel 4. 64. Rekapitulasi Rasio Partisipasi Modal Massa	119
Tabel 4. 65. Koefisien Respons Seismik.....	121
Tabel 4. 66. Output Gaya Geser Dasar Statik (V).....	121
Tabel 4. 67. Output Gaya Geser Dasar Dinamik (V_I)	121

Tabel 4. 68. Rekapitulasi Hasil Pengecekan Faktor Skala.....	122
Tabel 4. 69. Output Gaya Geser Dinamik Terkoreksi	122
Tabel 4. 70. Gaya Geser Desain.....	123
Tabel 4. 71. Pengecekan Storey Drift Arah X	125
Tabel 4. 72. Pengecekan P-Delta Arah X	126
Tabel 4. 73. Rekapitulasi Hasil Tulangan Pelat	146
Tabel 4. 72. Rekapitulasi Tulangan Balok	178
Tabel 4. 75. Hasil Analisis Interaksi P_n-M_{pr} Kolom K1	181
Tabel 4. 76. Hasil Analisis Interaksi P_n-M Kolom K1 dengan $1,25 f_y$	184
Tabel 4. 77. Rekapitulasi Tulangan Kolom	188
Tabel 4. 78. Gaya Aksial-Lentur pada Dinding Geser	192
Tabel 4. 79. Gaya Geser pada Dinding Geser	193
Tabel 4. 80. Hasil Analisis Interaksi SPColumn Dinding Geser	195
Tabel 4. 81. Rekapitulasi Hasil Tulangan Dinding Geser.....	203
Tabel 4. 82. Eksentrisitas Konsekuensi Pembesaran Torsi Pemodelan 2	204
Tabel 4. 83. Eksentrisitas Konsekuensi Pembesaran Torsi Pemodelan 3	205
Tabel 4. 84. Gaya Dalam Tulangan Dinding Geser	206
Tabel 4. 85. Gaya Dalam Tulangan Dinding Geser	207



DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1. Gambar Struktur Rangka Kaku	6
Gambar 2.2. Gambar Dinding Geser.....	6
Gambar 2.3. Gambar Struktur Rangka Dengan Dinding Geser	7
Gambar 2.4. Parameter Gerak Tanah (S_s) Gempa Maksimum yang dipertimbangkan Risiko-Tertarget (MCE_R)	20
Gambar 2.5. Parameter Gerak Tanah (S_1) Gempa Maksimum yang dipertimbangkan Risiko -Tertarget (MCE_R)	21
Gambar 2.6. Spektrum Respons Desain	23
Gambar 2.7. Peta Transisi Periode Panjang (T_L)	23
Gambar 2.8. Penentuan Simpangan Antar Tingkat	28
Gambar 2.9. Bentuk Ketidakberaturan Horizontal Sistem Pemikul Gaya Seismi ..	32
Gambar 2.10. Bentuk Ketidakberaturan Vertikal Sistem Pemikul Gaya Seismik ..	33
Gambar 2.11. Lebar Efektif Maksimum Balok Lebar (<i>Wide Beam</i>)	36
Gambar 2.12. Contoh Senggang Tertutup (<i>Hoop</i>) yang Dipasang Bertumpuk dan Ilustrasi Batasan Maksimum Spasi Horizontal Penumpu Batang Longitudinal.....	37
Gambar 2.13. Geser Desain untuk Balok dan Kolom	38
Gambar 2.14. Contoh Penulangan Transversal pada Kolom.....	39
Gambar 2.15. Luas <i>Joint</i> Efektif.....	41
Gambar 3.1. Tampilan Awal ETABS	49
Gambar 3.2. <i>Model Initialization</i>	50
Gambar 3.3. <i>Model Grid</i>	50
Gambar 3.4. <i>Edit Grid</i>	51
Gambar 3.5. <i>Tampilan Grid dan Story</i>	51
Gambar 3.6. <i>Input Material Properties</i>	52
Gambar 3.7. <i>Section Shape Concrete</i>	52
Gambar 3.8. <i>Input Dimensi Kolom/Balok</i>	53
Gambar 3.9. <i>Reinforcement Data Column</i>	54
Gambar 3.10. <i>Reinforcement Beam Data</i>	55
Gambar 3.11. <i>Input Dimensi Pelat</i>	56
Gambar 3.12. <i>Plan View Lantai 1-7 Pemodelan Awal</i>	57

Gambar 3.13. <i>Plan View Ring Balk</i> Atap Pemodelan Awal.....	57
Gambar 3.14. <i>Plan View</i> Atap Pemodelan Awal.....	57
Gambar 3.15. <i>3D View</i> Atap Pemodelan Awal.....	58
Gambar 3.16. <i>3D View</i> Pemodelan Awal	58
Gambar 3.17. <i>Define Load Patterns</i>	59
Gambar 3.18. <i>Load Case Data</i>	60
Gambar 3.19. <i>Input Beban Mati Tambahan</i>	61
Gambar 3.20. <i>Input Beban Hidup</i>	61
Gambar 3.21. <i>Input Gaya Lateral EX</i>	62
Gambar 3.22... <i>ASCE 7 – 16 Seismic Loading X-Direction (Time Period Program)</i>	62
Gambar 3.23. <i>Spektrum Respons</i> Desain Kota Semarang.....	64
Gambar 3.24. <i>Parameter Spektral Tanah</i> Sedang Kota Semarang.....	64
Gambar 3.25. <i>Input Gaya Lateral EY</i>	65
Gambar 3.26. <i>ASCE 7 – 16 Seismic Loading Y-Direction (Time Period Program)</i>	65
Gambar 3.27. <i>Respon Spektrum</i> dengan ASCE 7-16	66
Gambar 3.28. <i>Load Case Data SPEC-X</i>	67
Gambar 3.29. <i>Load Case Data SPEC-Y</i>	68
Gambar 4. 1. <i>Denah Perancangan Sistem Struktur</i> 1	75
Gambar 4. 2. <i>Denah Perancangan Sistem Struktur</i> 2.....	75
Gambar 4. 3. <i>Denah Perancangan Sistem Struktur</i> 3.....	76
Gambar 4. 4. <i>Denah rancangan ulang Permodelan</i> 1	87
Gambar 4. 5. <i>Grafik Simpangan Antar Lantai</i>	92
Gambar 4. 6. <i>Denah rancangan ulang Permodelan</i> 2.....	94
Gambar 4. 7. <i>Grafik Simpangan Antar Lantai</i>	99
Gambar 4. 8. <i>Denah rancangan ulang Permodelan</i> 3.....	101
Gambar 4. 9. <i>Grafik Simpangan Antar Lantai</i>	106
Gambar 4. 10. <i>Denah letak torsi tak terduga Permodelan</i> 1.....	109
Gambar 4. 11. <i>Denah letak torsi tak terduga Permodelan</i> 2.....	110
Gambar 4. 12. <i>Denah letak torsi tak terduga permodelan</i> 3.....	111
Gambar 4. 13. <i>Spektrum Respons</i> Desain Lokasi Perancangan	117

Gambar 4. 14. Diagram Gaya Geser Gempa Arah X.....	124
Gambar 4. 15. Diagram Gaya Geser Gempa Arah Y	124
Gambar 4. 16. Diagram Storey Drift Arah X.....	126
Gambar 4. 17. Diagram P-Delta.....	127
Gambar 4. 18. Tipe Pelat.....	127
Gambar 4. 19. Penulangan Pelat	147
Gambar 4. 20. Denah Balok G1 Sampel	147
Gambar 4. 21. Momen Ultimit Tumpuan Balok G1	149
Gambar 4. 22. Gaya Geser Ultimit Tumpuan Balok G1.....	162
Gambar 4. 23. Gaya Torsi Balok G1.....	169
Gambar 4. 24. Potongan Memanjang Balok	177
Gambar 4. 25. Tulangan Tumpuan Balok G1	178
Gambar 4. 26. Tulangan Lapangan Balok G1.....	178
Gambar 4. 27. Denah Kolom K1 Sampel	179
Gambar 4. 28. Tulangan Longitudinal Kolom K1	181
Gambar 4. 29. Diagram Interaksi P_n-M_{pr} SPColumn Kolom K1	181
Gambar 4. 30. Diagram Interaksi P_n-M SPColumn Kolom K1 dengan $1,25 f_y$..	184
Gambar 4. 31. Potongan Memanjang Kolom K1.....	187
Gambar 4. 32. Tulangan Ujung Kolom K1.....	187
Gambar 4. 33. Tulangan Tengan Kolom K1.....	187
Gambar 4. 34. Hubungan Balok Kolom (<i>Joint</i>).....	191
Gambar 4. 35. Denah Dinding Geser Sampel.....	192
Gambar 4. 36. Diagram Interaksi SPColumn Dinding Geser	195
Gambar 4. 37. Detail Tulangan Dinding Geser.....	203

DAFTAR NOTASI

a	= Tinggi blok tegangan persegi ekuivalen (mm)
A_b	= Luas setiap batang atau kawat individu (mm^2)
A_{ch}	= Luas penampang komponen struktur yang diukur sampai tepi luar tulangan transversal (mm^2)
A_{cp}	= Luas yang dibatasi oleh keliling luar penampang beton (mm^2)
A_{cv}	= Luas bruto penampang beton yang dibatasi oleh tebal badan dan panjang penampang dalam arah gaya geser yang ditinjau pada kasus dinding dan luas bruto penampang beton dalam kasus diafragma, tebalnya tidak melebihi lebar diafragma (mm^2)
A_{cw}	= Luas penampang beton pilar tunggal, segmen horizontal dinding, atau balok kopel yang menahan geser (mm^2)
A_g	= Luas bruto penampang (mm^2)
A_j	= Luas penampang efektif pada <i>joint</i> di bidang paralel terhadap bidang tulangan yang menimbulkan geser dalam <i>joint</i> (mm^2)
A_l	= Luas total tulangan longitudinal untuk menahan torsi (mm^2)
A_o	= Luas bruto yang dilingkupi oleh lintasan alir geser (mm^2)
A_{oh}	= Luas yang dilingkupi oleh garis pusat tulangan torsi transversal tertutup terluar (mm^2)
A_s	= Luas tulangan tarik longitudinal nonprategang (mm^2)
A_s'	= Luas tulangan tekan (mm^2)
A_{sh}	= Luas penampang total tulangan transversal (termasuk ikat silang) dalam spasi s dan tegak lurus terhadap dimensi b_c
$A_{s \min}$	= Luas minimum tulangan lentur (mm^2)
A_{st}	= Luas total tulangan longitudinal nonprategang (mm^2)
A_t	= Luas 1 kaki sengkang tertutup menahan torsi dalam spasi s (mm^2)
A_v	= Luas tulangan geser dalam spasi s (mm^2)
$A_{v \min}$	= Luas minimum tulangan geser dalam spasi s (mm^2)
A_x	= Faktor amplifikasi torsi
A_s'	= Luas tulangan tekan (mm^2)
b	= Lebar muka tekan komponen struktur (mm)

b_c	= Dimensi penampang inti komponen struktur yang diukur ke tepi luar tulangan transversal yang membentuk luas A_{sh} (mm)
b_f	= Lebar sayap efektif penampang T (mm)
b_w	= Lebar badan, tebal dinding, diameter penampang lingkaran (mm)
c	= Jarak dari serat tekan terjauh ke sumbu netral (mm)
c_c	= Selimut bersih (<i>clear cover</i>) tulangan (mm)
c_t	= Jarak dari muka interior kolom ke tepi pelat yang diukur parallel terhadap c_1 , tetapi tidak melebihi c_1 (mm)
c_1	= Dimensi kolom persegi atau persegi ekuivalen, kepala kolom (<i>capital</i>), atau braket yang diukur dalam arah bentang dimana momen ditentukan (mm)
c_2	= Dimensi kolom persegi atau persegi ekuivalen, kepala kolom (<i>capital</i>), atau braket yang diukur dalam arah tegak lurus terhadap c_1 (mm)
C	= Konstanta penampang untuk menentukan properti torsi pelat dan balok
C_d	= Faktor pembesaran simpangan lateral
C_s	= Koefisien respons seismik
C_u	= Koefisien untuk batasan atas pada periode yang dihitung
C_v	= Koefisien vertical
d	= Tinggi efektif pelat; jarak dari serat tekan terjauh ke pusat tulangan tarik longitudinal (mm)
d'	= Jarak serat tekan jauh ke pusat tulangan tekan longitudinal (mm)
d_b	= Diameter nominal batang tulangan (mm)
D	= Pengaruh beban mati layan
D_F	= Faktor distribusi momen di bagian atas dan kolom yang didesain
E	= Pengaruh gaya gempa horizontal dan vertikal
E_c	= Modulus Elastisitas beton (MPa)
E_h	= Pengaruh gaya seismik horizontal
E_s	= Modulus elastisitas tulangan dan baja struktural (MPa)
E_v	= Pengaruh gaya seismik vertikal
f'_c	= Kekuatan tekan beton (MPa)

f_r	= Modulus hancur (<i>rupture</i>) beton (MPa)
f_s	= Tegangan tarik dihitung dalam tulangan saat beban layan (MPa)
f_s'	= Tegangan dalam tulangan tekan terkena beban terfaktor (MPa)
f_y	= Kekuatan leleh tulangan (MPa)
f_{yt}	= Kekuatan leleh tulangan transversal yang disyaratkan f_y (MPa)
F_a	= Koefisien situs untuk periode pendek (pada periode 0,2 detik)
F_i, F_x	= Bagian dari gaya geser dasar, V , pada tingkat- i atau tingkat- X
F_p	= Gaya seismik yang bekerja pada elemen atau komponen dari struktur
F_v	= Koefisien situs untuk periode panjang (pada periode 1 detik)
F_x	= Gaya seismik lateral (kN) di level- X
h	= Tebal atau tinggi keseluruhan komponen struktur (mm)
h_n	= Batasan tinggi struktur (m)
h_{sx}	= Tinggi tingkat untuk tingkat- x (mm)
h_w	= Tinggi dinding keseluruhan dari dasar ke tepi atas atau tinggi bersih segmen dinding atau pilar dinding yang ditinjau (mm)
h_x	= Spasi horizontal ikat silang atau kaki sengkang pengegang (<i>hoop</i>) pusat ke pusat maksimum pada semua muka kolom
I_{cr}	= Momen inersia penampang retak ditransformasi ke beton (mm ⁴)
I_e	= Faktor keutamaan gempa; momen inersia efektif untuk perhitungan defleksi (mm ⁴)
I_g	= Momen inersia penampang beton bruto terhadap sumbu pusat, yang mengabaikan tulangan (mm ⁴)
k	= Faktor panjang efektif untuk komponen struktur tekan
k_f	= Faktor kekuatan beton
k_n	= Faktor efektivitas pengekangan
l	= Panjang bentang balok atau pelat satu arah (mm)
l_c	= Panjang komponen tekan, diukur dari pusat ke pusat <i>joint</i> (mm)
l_n	= Panjang bentang bersih diukur muka ke muka tumpuan (mm)
l_o	= Panjang, diukur dari muka joint sepanjang sumbu komponen struktur, dimana tulangan transversal khusus disediakan (mm)
l_w	= Panjang seluruh dinding, atau panjang segmen dinding atau pilar dinding yang ditinjau dalam arah gaya geser (mm)

L	= Pengaruh beban hidup layan
L_r	= Pengaruh beban hidup atap layan
MCE_R	= Gempa maksimum yang dipertimbangkan risiko-tertarget
M_{cr}	= Momen retak (N-mm)
M_{max}	= Momen maksimum terfaktor pada penampang akibat beban luar yang bekerja (N-mm)
M_n	= Kekuatan lentur nominal pada penampang (N-mm)
M_{nb}	= Kekuatan lentur nominal balok termasuk pelat bilamana tertarik, yang merangka ke dalam <i>joint</i> (N-mm)
M_{nc}	= Kekuatan lentur nominal kolom yang merangka ke dalam joint, yang dihitung untuk gaya aksial terfaktor, konsisten dengan arah gaya lateral yang ditinjau, yang menghasilkan kekuatan lentur yang terendah (N-mm)
M_{pr}	= Kekuatan lentur mungkin komponen struktur, dengan atau tanpa beban aksial, yang ditentukan menggunakan properti komponen struktur pada muka joint yang mengasumsikan tegangan tarik dalam batang tulangan longitudinal sebesar paling sedikit $1,25f_y$ dan faktor reduksi kekuatan ϕ sebesar 1,0
M_u	= Momen terfaktor pada penampang (N-mm)
n	= Jumlah batang tulangan
N_i	= Tahanan penetrasi standar sesuai SNI 4153:2008
$\bar{N}$	= Tahanan penetrasi standar rata-rata lapisan 30 m paling atas
$\bar{N}_{ch}$	= Tahanan penetrasi standar rata-rata tanah nonkohesif dalam lapisan 30 m paling atas
N_u	= Gaya aksial terfaktor tegak lurus terhadap penampang yang terjadi serentak dengan V_u atau T_u (N-mm)
p_{cp}	= Keliling luar penampang beton (mm)
p_h	= Keliling pusat tulangan torsi transversal tertutup terluar (mm)
P_n	= Kekuatan aksial nominal penampang (N)
P_u	= Gaya aksial terfaktor (N)
q_u	= Beban terfaktor per satuan luas (N/m ²)
Q_E	= Pengaruh gaya seismik horizontal

r	= Radius girasi penampang komponen struktur tekan (mm)
R	= Koefisien modifikasi respons
s	= Spasi pusat ke pusat suatu benda (mm)
s_o	= Spasi pusat ke pusat tulangan transversal dalam panjang I_e (mm)
S_u	= Kuat geser niralir
$\bar{S}_u$	= Kuat geser niralir rata-rata di dalam lapisan 30 m paling atas
S_{ui}	= Kuat geser niralir suatu lapisan tanah kohesif i di dalam lapisan 30 m paling atas
S_a	= Respons spektra percepatan
S_{DS}	= Parameter percepatan respons spektral pada periode pendek
S_{D1}	= Parameter percepatan respons spektral pada periode 1 detik
S_{MS}	= Parameter percepatan respons spektral <i>MCE</i> pada periode pendek yang sudah disesuaikan terhadap pengaruh kelas situs
S_{M1}	= Percepatan percepatan respons spektral <i>MCE</i> pada periode 1 detik yang sudah disesuaikan terhadap pengaruh kelas situs
S_s	= Parameter percepatan respons spektral <i>MCE</i> dari peta gempa pada periode pendek
S_1	= Parameter percepatan respons spektral <i>MCE</i> dari peta gempa pada periode 1 detik
S_n	= Kekuatan momen, geser, aksial, torsi atau tumpu nominal
t	= Tebal dinding penampang (mm)
T	= Periode fundamental bangunan
T_a	= Periode fundamental pendekatan
T_{cr}	= Momen retak torsi (N-mm)
T_L	= Peta transisi periode panjang
T_n	= Kekuatan momen torsi nominal (N-mm)
T_u	= Momen torsi terfaktor pada penampang (N-mm)
U	= Kekuatan perlu untuk menahan beban terfaktor atau momen dan gaya dalam yang terkait dengan kombinasinya
v_s	= Kecepatan rambat gelombang geser pada regangan geser yang kecil (m/detik) ($< 10^{-3}$ persen)

$\bar{v}_s$	= Kecepatan rambat gelombang geser rata-rata pada regangan geser yang kecil, di dalam lapisan 30 m teratas
v_{si}	= Kecepatan rambat gelombang geser dalam lapisan tanah atau batuan ke- i , di dalam lapisan 30 m paling atas
V	= Geser desain total di dasar struktur dalam arah yang ditinjau
V_c	= Kekuatan geser nominal yang disediakan oleh beton (N)
V_e	= Gaya geser desain untuk kombinasi pembebanan termasuk pengaruh gempa (N)
V_{IX}	= Gaya geser dasar inelastik pada arah X
V_{IY}	= Gaya geser dasar inelastik pada arah Y
V_n	= Kekuatan geser nominal (N)
V_s	= Kekuatan geser nominal diberikan oleh penulangan geser (N)
V_{sway}	= Gaya geser rencana berdasarkan momen kapasitas pada balok
V_t	= Nilai desain dari gaya geser dasar akibat seismik
V_u	= Gaya geser terfaktor penampang (N)
V_x	= Geser seismik desain di tingkat-X
V_X	= ELF gaya geser dasar pada arah X
V_Y	= ELF gaya geser dasar pada arah Y
w_c	= Berat volume beton normal atau berat volume ekuivalen beton ringan (kg/m^3)
w_u	= Beban terfaktor per satuan panjang balok atau pelat satu arah (N/mm)
W	= Berat seismik efektif bangunan
W_t	= Berat total struktur
x	= Dimensi keseluruhan bagian persegi penampang yang lebih pendek (mm)
y	= Dimensi keseluruhan bagian persegi penampang yang lebih panjang (mm)
α	= Sudut yang menentukan orientasi tulangan
α_c	= Koefisien yang menentukan kontribusi relatif kekuatan beton terhadap kekuatan geser dinding nominal
β_1	= Faktor yang menghubungkan tinggi blok tegangan tekan persegi ekuivalen dengan tinggi sumbu netral

δ	= Faktor pembesaran momen untuk mencerminkan pengaruh kurvatur komponen struktur antara ujung-ujung komponen struktur tekan
δ_u	= Perpindahan desain
$\delta_{\max}$	= Perpindahan maksimum (mm) di tingkat-X
δ_{avg}	= Rata-rata perpindahan di titik-titik terjauh struktur di tingkat-X
δ_x	= Defleksi pusat massa di tingkat-X
δ_{xe}	= Defleksi pada lokasi ditentukan dengan analisis elastik
Δ	= Simpangan antar tingkat desain
Δ_a	= Simpangan antar tingkat yang diizinkan
ε_t	= Regangan tarik netto dalam lapisan terjauh baja tarik longitudinal pada kekuatan nominal, tidak termasuk regangan akibat dari prategang efektif, rangkai, susut, dan suhu
ε_{ty}	= Nilai regangan tarik netto pada lapisan terluar dari tulangan tarik longitudinal yang digunakan untuk menentukan penampang terkontrol tekan
θ	= Sudut antara sumbu strut, diagonal tekan, atau bidang tekan dan kord (chord) tarik komponen struktur; Koefisien stabilitas untuk pengaruh P-Delta
ρ	= Rasio A_s terhadap bd ; Faktor redundansi struktur
ϕ	= Faktor reduksi kekuatan
λ	= Faktor modifikasi yang merefleksikan properti mekanis tereduksi dari beton ringan, semuanya relatif terhadap beton normal dengan kekuatan tekan yang sama; Faktor pengaruh waktu
Ω_0	= Faktor kuat lebih; Faktor amplifikasi untuk memperhitungkan kekuatan lebih sistem penahan gaya seismik yang ditetapkan sesuai dengan tata cara bangunan gedung umum yang diadopsi secara legal

DAFTAR LAMPIRAN

LAMPIRAN GAMBAR	xxxiv
LAMPIRAN SEMINAR PROPOSAL	xxxv
LAMPIRAN SEMINAR HASIL	xxxvi
LAMPIRAN TURNITIN	xxxvii



**STUDI KETIDAKBERATURAN TORSI
PADA REDESAIN STRUKTUR GEDUNG 7 LANTAI
DENGAN SISTEM GANDA BERDASARKAN SNI 1726:2019**

ABSTRAK

Bangunan gedung bertingkat yang memiliki konfigurasi Sistem Ganda umumnya akan berpengaruh terhadap pusat kekakuan massa struktur. Apabila diafragma tidak fleksibel (*Rigid*) maka harus menyertakan momen torsi bawaan yang dihasilkan dari lokasi massa struktur ditambah momen torsi tak terduga akibat perpindahan pusat massa dari lokasi aktual yang diasumsikan pada masing masing arah dengan jarak sebesar 5% dari salah satu sumbu total luasan struktur gedung.

Dalam melakukan analisis ketidakberaturan torsi menggunakan ETABS V20.0.0 dan mengacu pada SNI 1726:2019. Dalam studi kasus ini dilakukan dengan merancang 3 struktur dengan konfigurasi yang berbeda dengan tujuan mendapatkan nilai torsi tertarget dari masing masing permodelan. Torsi yang didapat perlu dilakukan pembesaran apabila struktur tersebut mengalami ketidakberaturan torsi dengan ketentuan pada bangunan yang mengalami pembesaran sebesar 5% untuk memenuhi pembesaran torsi tak terduga dan lokasi eksentrisitas pembesaran torsi harus sesuai dengan pasal 7.8.4.3 SNI 1726:2019

Setelah mendapatkan hasil torsi bawaan yang telah dianalisis serta menerapkan konsekuensi pembesaran torsi hingga mendapatkan nilai letak lokasi eksentrisitas pada pusat kekakuan massa yang telah dilakukan perhitungan nilai pembesaran torsi. Maka perancangan struktur tersebut telah memenuhi sarat ketidakberaturan horizontal tentang pembesaran torsi tak terduga. Digunakan permodelan dengan torsi terbesar untuk melanjutkan pada tahap perancangan elemen.

Kata kunci : *Redisain; Sistem Struktur Tahan Gempa; Sistem Ganda; Torsi*

**TORSIONAL IRREGULARITY STUDY
IN THE REDESIGN OF A 7-STORY BUILDING
WITH DUAL SYSTEM BASED ON SNI 1726:2019**

ABSTRACT

A multi-story building with a Dual System configuration generally affects the center of mass rigidity of the structure. If the diaphragm is not flexible (rigid), then it is necessary to consider the inherent torsion moments resulting from the mass locations in the structure, along with unexpected torsional moments due to the displacement of the mass center assumed in each direction with a distance of 5% from one of the total building area axes.

In conducting the torsional irregularity analysis, ETABS V20.0.0 is used, following the guidelines of SNI 1726:2019. In this case study, three structures are designed with different configurations to achieve the targeted torsion values for each modeling. If the structure experiences torsional irregularities, the obtained torsion values need to be increased according to the stipulations in the building enlargement process, which accounts for 5% unexpected torsion enlargement, and the location of the torsional enlargement eccentricity must comply with the provisions in Article 7.8.4.3 of SNI 1726:2019.

After obtaining the analyzed inherent torsion results and applying the consequences of torsion enlargement to determine the location of the eccentricity at the center of mass rigidity, the calculation for the value of torsion enlargement is performed. Thus, the structural design has fulfilled the requirements for horizontal irregularities concerning unexpected torsion enlargement. The model with the largest torsion value is used to proceed with the element design phase.

Keywords: Redesign; Seismic Resistant Structural System; Dual System; Torsion.

BAB I

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Dengan meningkatnya kebutuhan belajar mengajar, penting untuk menyediakan fasilitas yang dapat mendukung kegiatan tersebut. Universitas Islam Sultan Agung Semarang menyediakan fasilitas ini dengan membangun sebuah gedung pendidikan tujuh lantai di daerah Terboyo Kulon, Semarang. Wilayah tersebut umumnya terdiri dari tanah lunak dan rentan terhadap bencana gempa bumi. Oleh karena itu, perancangan struktur bangunan harus memperhitungkan kekuatan dan kestabilan struktur terhadap beban gempa yang akan diterima.

Untuk menghadapi kondisi tanah lunak dan potensi gempa bumi di daerah tersebut, perancangan struktur bangunan harus dilakukan dengan cermat. Penggunaan material yang sesuai, teknik konstruksi yang tepat dan penempatan elemen struktural yang memadai harus menjadi pertimbangan utama. Dalam hal ini, pilihan material yang kuat dan tahan gempa serta teknik konstruksi yang dapat meredam getaran gempa sangat penting untuk memastikan keamanan dan kestabilan gedung. Selain itu, penempatan elemen struktural yang baik juga menjadi faktor kunci dalam menghadapi tantangan lingkungan.

Dalam menentukan sistem dan karakteristik bangunan gedung yang menggunakan struktur beton bertulang di wilayah dengan risiko rawan gempa dapat dirancang dengan beberapa sistem. Salah satu sistem yang dapat digunakan yaitu Sistem Rangka Pemikul Momen Khusus (SRPMK) dengan karakteristik beban lateral yang disalurkan melalui mekanisme lentur antara kolom dan balok. (Sofian & Arrosyid, 2019)

Dalam melakukan perancangan struktur gedung bertingkat dapat terjadi ketidakberaturan. Berdasarkan SNI 1726:2019, ketidakberaturan struktur harus dibatasi sesuai dengan beberapa ketentuan yang diatur pada pasal di dalamnya. Dengan adanya ketidakberaturan pada struktur perlu dilakukan analisis dan dirancang beberapa alternatif desain dari gedung tersebut. Hasil dari analisis struktur tersebut dapat diketahui bentuk ketidakberaturan yang ada dan batasan yang mengatur ketidakberaturan tersebut.

1.2. Rumusan Masalah

Rumusan masalah dalam Perancangan Gedung Pendidikan ini adalah sebagai berikut :

1. Bagaimana meredesain Sistem Ganda struktur gedung 7 lantai dengan besaran torsi yang berbeda menggunakan *software* ETABS V20.0.0 berdasarkan SNI 1726:2019?
2. Bagaimana menganalisis Sistem Ganda struktur gedung 7 lantai yang memiliki ketidakberaturan torsi berbeda?
3. Bagaimana merancang dimensi dan penulangan Sistem Ganda struktur gedung 7 lantai yang memiliki ketidakberaturan torsi?

1.3. Tujuan

Tujuan dari penyusunan Tugas Akhir ini adalah sebagai berikut :

1. Meredesain Sistem Ganda struktur gedung 7 lantai dengan besaran torsi yang berbeda menggunakan *software* ETABS V20.0.0 berdasarkan SNI 1726:2019.
2. Menganalisis Sistem Ganda struktur gedung 7 lantai yang memiliki ketidakberaturan torsi berbeda.
3. Merancang dimensi dan penulangan Sistem Ganda struktur gedung 7 lantai yang memiliki ketidakberaturan torsi.

1.4. Manfaat

Manfaat dari penyusunan Tugas Akhir ini adalah sebagai berikut :

1. Dapat mengetahui adanya ketidakberaturan dari analisis konfigurasi Sistem Rangka Pemikul Momen Khusus dan Dinding Geser berdasarkan SNI 1726:2019.
2. Dapat mengetahui pengaruh konfigurasi yang berbeda terhadap ketidakberaturan struktur serta dapat merancang struktur yang efisien berdasarkan SNI 1726-2019.

1.5. Batasan Masalah

Tugas Akhir ini membahas tentang pengaruh ketidakberaturan terhadap kestabilan Gedung Pendidikan 7 Lantai sesuai dengan SNI. Adapun batasan masalah dalam Tugas Akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Struktur yang ditinjau adalah Struktur Atas dari Gedung Fakultas Kedokteran Gigi Universitas Islam Sultan Agung Semarang.
2. Peraturan SNI yang digunakan adalah sebagai berikut:
 - SNI 1726:2019 tentang Tata Cara Perencanaan Ketahanan Gempa untuk Struktur Bangunan Gedung dan Nongedung.
 - SNI 1727:2020 tentang Beban Desain Minimum dan Kriteria Terkait untuk Bangunan Gedung dan Struktur Lain.
 - SNI 1729:2020 tentang Spesifikasi untuk Bangunan Gedung Baja Struktural.
 - SNI 2847:2019 tentang Persyaratan Beton Struktural Untuk Bangunan Gedung dan Penjelasan.
3. Analisis dan Perancangan Struktur menggunakan *Software* ETABS V20.0.0.
4. Jenis ketidakberaturan struktur yang ditinjau adalah ketidakberaturan horizontal.

1.6. Sistematika Penulisan

Laporan Tugas Akhir terdiri dari 5 BAB yang disusun sebagai berikut :

- | | |
|---------|--|
| BAB I | PENDAHULUAN
Bab ini menerangkan tentang latar belakang, rumusan masalah, maksud dan tujuan, batasan masalah serta sistematika Tugas Akhir. |
| BAB II | TINJAUAN PUSTAKA
Bab ini menerangkan tentang persyaratan struktur tahan gempa, konsep beban gempa, analisis dan perhitungan struktur tahan gempa. |
| BAB III | METODE ANALISIS
Bab ini menerangkan tentang peraturan SNI yang digunakan, pengumpulan data, analisis dan perancangan, diagram alir serta <i>software</i> yang digunakan. |
| BAB IV | ANALISIS DAN PERANCANGAN
Bab ini menerangkan cara analisis dan perancangan struktur berdasarkan ETABS. |

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

Bab ini menerangkan tentang kesimpulan dari tinjauan ketidakberaturan serta saran ataupun kritik dari Penyusun.



BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Tinjauan Umum

Bangunan gedung bertingkat tersusun dari 2 bagian struktur yaitu Struktur Bawah dan Struktur Atas. Struktur bawah merupakan bagian dari bangunan yang berada di dalam tanah yang berfungsi meneruskan beban ke dalam tanah sedangkan Struktur Atas merupakan bagian dari bangunan yang berada diatas tanah.

Dalam melakukan perancangan gedung bertingkat harus memperhatikan beberapa ketentuan yaitu Sistem Struktur Penahan Gempa, beban yang bekerja pada struktur (beban mati, beban hidup dan beban gempa), material atau bahan yang digunakan, cara analisis dan perancangan elemen struktur gedung tersebut.

2.2. Sistem Struktur Penahan Gempa

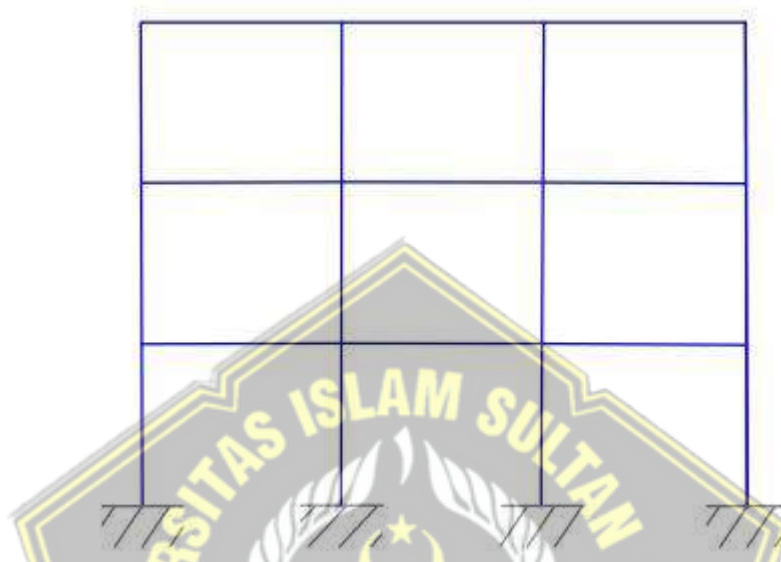
Sistem struktur merupakan serangkaian dari berbagai macam komponen struktural yang saling terhubung. Sistem struktur dirancang untuk memikul gaya – gaya yang bekerja pada struktur termasuk gaya momen, gaya geser dan gaya aksial. Beberapa sistem yang dapat digunakan diantaranya Sistem Dinding Penumpu, Sistem Rangka Gedung dan Sistem Ganda. Sistem yang digunakan akan berkaitan dengan beberapa faktor yaitu Kategori Desain Deismik, Koefisien Modifikasi Respons (R^a), Faktor Kuat Lebih Sistem (Ω^b) dan Faktor Pembesaran Defleksi (C_d^c).

Sistem Struktur Penahan Gempa diperlukan dalam melakukan perancangan struktur gedung yang dibangun pada daerah yang memiliki resiko terjadi gempa bumi. Dalam menerapkan Sistem Penahan Gempa pada Struktur Rangka umumnya melibatkan penggunaan perkuatan struktural tambahan yaitu Dinding Geser, Sistem *Tube* dan Sistem Bresing. Dalam melakukan perancangan untuk meningkatkan kekuatan dan kekakuan struktur harus diperhitungkan dengan mengacu pada SNI 2847:2019.

2.2.1. Sistem Rangka Pemikul Momen (*Moment Resisting Frame System*)

Berdasarkan SNI 1726:2019 Sistem Rangka Pemikul Momen adalah sebuah sistem pada Struktur Rangka Kaku yang elemen dan sambungan strukturnya mampu

menahan beban lateral. Sistem ini terbagi menjadi 3 yaitu Sistem Rangka Pemikul Momen Biasa (SRPMB), Sistem Rangka Pemikul Momen Menengah (SRPMM) dan Sistem Rangka Pemikul Momen Khusus (SRPMK). Sistem tersebut diterapkan pada Struktur Rangka Kaku. Gambar Struktur Rangka Kaku dapat dilihat pada Gambar 2.1.



Gambar 2.1. Gambar Struktur Rangka Kaku

2.2.2. Dinding Geser (Shear Wall)

Dinding Geser adalah salah satu elemen struktur berupa *slab* beton bertulang yang tersusun menerus secara vertikal dan diletakkan pada sisi tertentu sebuah gedung. Dinding Geser berfungsi untuk meningkatkan kekakuan struktur dan menopang gaya lateral akibat gempa (Fauziah dkk, 2013). Gambar Dinding Geser dapat dilihat pada Gambar 2.2.

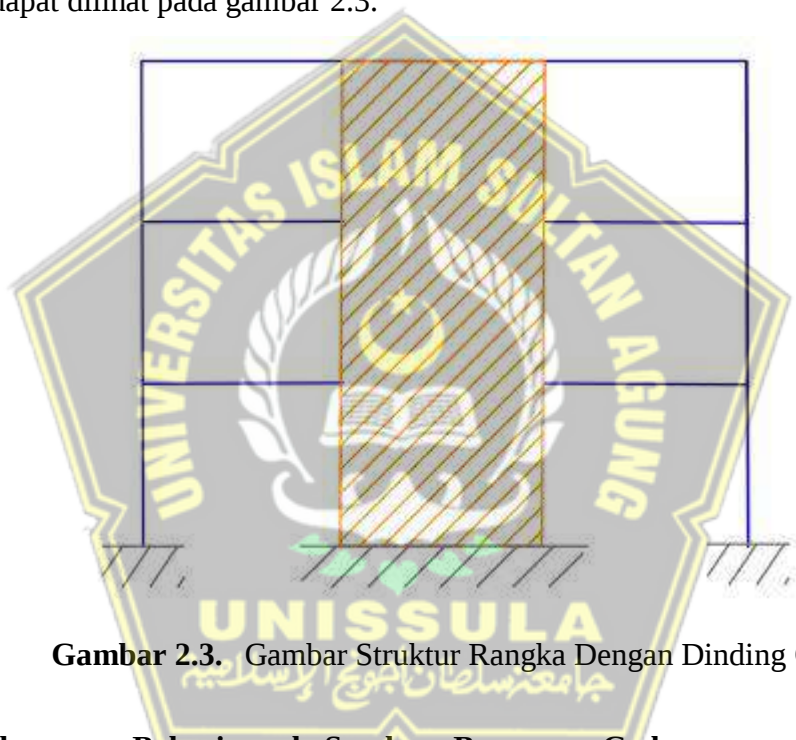


Gambar 2.2. Gambar Dinding Geser

2.2.3. Sistem Ganda (Dual System)

Sistem ganda merupakan gabungan dari dua sistem yang bekerja sama dalam memberikan kekakuan dan stabilitas bangunan pada gaya yang diterima. Sistem ini menggabungkan dua sistem struktural yang berbeda yaitu sistem rangka dan dinding geser untuk memanfaatkan kelebihan masing – masing sistem.

Dalam sistem ini Rangka Kaku Pemikul Momen harus mampu memikul paling sedikit 25% gaya seismik desain. Untuk gaya seismik keseluruhan harus diterima oleh kombinasi rangka pemikul momen dan dinding geser dengan distribusi yang proporsional terhadap kekakuannya. Gambar Struktur Rangka dengan Dinding Geser dapat dilihat pada gambar 2.3.



Gambar 2.3. Gambar Struktur Rangka Dengan Dinding Geser

2.3. Beban yang Bekerja pada Struktur Bangunan Gedung

Beban menurut SNI 1727:2020 merupakan gaya atau aksi lainnya akibat berat seluruh elemen bangunan, penghuni dan barang-barang yang dimilikinya, efek lingkungan, perbedaan pergerakan dan gaya kekangan akibat perubahan dimensi. Secara sederhana, beban juga dapat diartikan sebagai gaya yang akan bekerja pada suatu luasan struktur.

Ada beberapa macam beban yang terdapat pada struktur bangunan bertingkat. Menurut arah bekerjanya dapat diklasifikasikan menjadi dua yaitu beban vertikal (gravitasi) dan beban horizontal (lateral). Beban vertikal mencakup beban mati

(*dead load*), beban hidup (*live load*) dan beban air hujan (*rain load*) sedangkan beban gempa (*earthquake load*) dan beban angin (*wind load*).

2.3.1. Beban Mati (*Dead Load*)

Beban mati merupakan beban tetap atau beban permanen yang ditimbulkan oleh berat sendiri bangunan dan elemen struktural lainnya, termasuk kolom, balok, dinding, lantai, atap dan elemen lainnya. Beban yang diakibatkan dari berat elemen tambahan yang melekat pada struktur dan bersifat permanen disebut Beban Mati Tambahan (Arifin dkk, 2015). Beban Mati Tambahan dapat dilihat pada Tabel 2.1.

Tabel 2.1. Beban Mati Tambahan

No.	Jenis Beban Mati	Beban (kN/m ²)
1.	Beban Pasir setebal 1 cm	0,16
2.	Beban Spesi setebal 3 cm	0,66
3.	Beban Keramik setebal 1 cm	0,22
4.	Beban <i>Plafond</i>	0,2
5.	Beban Mekanikal & Elektrikal	0,25

(sumber : Tabel C3.1 SNI 1727:2020)

2.3.2. Beban Hidup (*Live Load*)

Beban hidup adalah seluruh beban yang dapat berubah dan tidak permanen. Terjadinya beban tersebut akibat adanya aktifitas yang dilakukan pengguna atau penghuni bangunan serta beban yang berasal dari lingkungan, seperti beban angin dan beban hujan.

Beban hidup yang diperlukan merupakan beban maksimum yang dirancang dan beban maksimum yang diharapkan terjadi akibat penghunian dan penggunaan bangunan gedung, akan tetapi tidak boleh kurang dari beban merata minimum. Berat dari beban hidup tersebut diatur oleh SNI 1727:2020 yang dapat dilihat pada Tabel 2.2.

Tabel 2.2. Beban Hidup Terdistribusi Merata Minimum (L_o) dan Beban Hidup Terpusat Minimum

Hunian atau Penggunaan	Merata, L_o psf (kN/m ²)	Terpusat lb (kN)
Apartemen (lihat rumah tinggal)		
Sistem lantai akses		
Ruang kantor	50 (2,4)	2,000 (8,9)
Ruang komputer	100 (4,79)	2,000 (8,9)
Gudang persenjataan dan ruang latihan	150 (7,18)	
Ruang pertemuan		
Kursi tetap (terikat di lantai)	60 (2,87)	
Lobi	100 (4,79)	
Kursi dapat dipindahkan	100 (4,79)	
Panggung pertemuan	100 (4,79)	
Lantai Podium	150 (7,18)	
Tribun penonton Stadion dan arena dengan kursi tetap (terikat di lantai)	100 (4,79)	
Ruang pertemuan lainnya	60 (2,87)	
Balkon dan dek	1,5 kali beban hidup untuk daerah yang dilayani. Tidak perlu melebihi 100 psf (4,79 kN/m ²)	
Jalur untuk akses pemeliharaan	40 (1,92)	300 (1,33)
Koridor		
Lantai pertama	100 (4,79)	
Lantai lain	Sama seperti pelayanan hunian kecuali disebutkan lain	
Ruang makan dan restoran	100 (4,79)	
Hunian (lihat rumah tinggal)		
Dudukan mesin Elevator (pada area 2 in.x 2 in. [50 mm x 50 mm])		300 (1,33)
Konstruksi pelat lantai finishing ringan (pada area 1 in.x 1 in. [25 mm x 25 mm])		200 (0,89)
Jalur penyelamatan saat kebakaran	100 (4,79)	
Hunian satu keluarga saja	40 (1,92)	
Tangga permanen		Lihat Pasal 4.5.4

(Berlanjut)

Tabel 2.2. Beban Hidup Terdistribusi Merata Minimum (L_o) dan Beban Hidup Terpusat Minimum (Lanjutan)

Hunian atau Penggunaan	Merata, L_o psf (kN/m ²)	Terpusat lb (kN)
Garasi/Parkir (Lihat Pasal 4.10) Mobil penumpang saja Truk dan bus	40 (1,92) Lihat Pasal 4.10.2	Lihat Pasal 4.10.2 Lihat Pasal 4.10.2
Pegangan tangga dan pagar pengaman Batang pegangan	Lihat 4.5.1	Lihat 4.5.1 Lihat 4.5.2
Helipad (Lihat Pasal 4.11) Helikopter dengan berat lepas landas sebesar 3.000 lb (13,35 kN) atau kurang Helikopter dengan berat lepas landas Lebih dari 3.000 lb (13,35 kN)	40 (1,92) 60 (2,87)	Lihat Pasal 4.11.2 Lihat Pasal 4.11.2
Rumah sakit Ruang operasi, laboratorium Ruang pasien Koridor diatas lantai pertama	60 (2,87) 40 (1,92) 80 (3,83)	1.000 (4,45) 1.000 (4,45) 1.000 (4,45)
Hotel (lihat rumah tinggal)		
Perpustakaan Ruang baca Ruang penyimpanan Koridor di atas lantai pertama	60 (2,87) 150 (7,18) 80 (3,83)	1.000 (4,45) 1.000 (4,45) 1.000 (4,45)
Pabrik Ringan Berat	125 (6,00) 250 (11,97)	2.000 (8,90) 3.000 (13,35)
Gedung perkantoran Ruang arsip dan komputer harus dirancang untuk beban yang lebih berat berdasarkan pada perkiraan hunian Lobi dan koridor lantai pertama Kantor Koridor di atas lantai pertama	 100 (4,79) 50 (2,40) 80 (3,83)	 2.000 (8,90) 2.000 (8,90) 2.000 (8,90)
Lembaga hukum Blok sel Koridor	40 (1,92) 100 (4,79)	

(Berlanjut)

Tabel 2.2. Beban Hidup Terdistribusi Merata Minimum (L_o) dan Beban Hidup Terpusat Minimum (Lanjutan)

Hunian atau Penggunaan	Merata, L_o psf (kN/m ²)	Terpusat lb (kN)
Tempat rekreasi Tempat <i>bowling</i> , <i>billiard</i> , dan penggunaan sejenis Ruang dansa dan ballroom Gimnasium	75 (3,59) 100 (4,79) 100 (4,79)	
Rumah tinggal Hunian satu dan dua keluarga Loteng yang tidak dapat dihuni tanpa gudang Loteng yang tidak dapat dihuni dengan gudang Loteng yang dapat dihuni dan ruang tidur Semua ruang kecuali tangga Semua hunian rumah tinggal lainnya Ruang pribadi dan koridornya Ruang publik Koridor ruang publik	10 (0,48) 20 (0,96) 30 (1,44) 40 (1,92) 40 (1,92) 100 (4,79) 100 (4,79)	
Atap Atap datar, berbung dan lengkung Atap yang digunakan Penghuni Atap untuk tempat berkumpul Atap vegetatif dan atap lansekap Atap bukan untuk hunian Atap untuk tempat berkumpul Atap untuk penggunaan lainnya Awning dan kanopi Atap konstruksi <i>fabric</i> yang didukung oleh Struktur Rangka Kaku Ringan Rangka Penumpu Layar Penutup	20 (0,96) Sama dengan penggunaan yang dilayani 100 (4,70) 20 (0,96) 100 (4,79) Sama dengan penggunaan yang dilayani 5 (0,24) 5 (0,24) berdasarkan area tributari dari atap yang didukung oleh komponen struktur rangka	200 (0,89)

(Berlanjut)

Tabel 2.2. Beban Hidup Terdistribusi Merata Minimum (L_o) dan Beban Hidup Terpusat Minimum (Lanjutan)

Hunian atau Penggunaan	Merata, L_o psf (kN/m ²)	Terpusat lb (kN)
Semua konstruksi lainnya Komponen struktur atap utama, yang terhubung langsung dengan pekerjaan lantai tempat bekerja	20 (0,96)	
Titik panel tunggal dari kord bawah rangka batang atap atau suatu titik sepanjang komponen struktur utama pendukung atap diatas pabrik, gudang penyimpanan dan pekerjaanya, dan garasi bengkel		2.000 (8,90)
Semua komponen struktur atap utama lainnya		300 (1,33)
Semua permukaan atap dengan beban pekerja pemeliharaan		300 (1,33)
Sekolah Ruang kelas Koridor di atas lantai pertama Koridor lantai pertama	40 (1,92) 80 (3,83) 100 (4,79)	1.000 (4,45) 1.000 (4,45) 1.000 (4,45)
Scuttles, rusuk untuk atap kaca dan langit-langit yang dapat diakses		200 (0,89)
Jalan di pinggir untuk pejalan kaki, jalan lintas kendaraan, dan lahan/jalan untuk truk-truk	250 (11,97)	8.000 (35,60)
Tangga dan jalan keluar Rumah tinggal untuk satu dan dua keluarga saja	100 (4,79) 40 (1,92)	300 (1,33) 300 (1,33)
Gudang diatas langit-langit	20 (0,96)	
Gudang penyimpanan dan pekerja (harus dirancang untuk beban lebih berat jika diperlukan) Ringan Berat	125 (6,00) 250 (11,97)	

(Berlanjut)

Tabel 2.2. Beban Hidup Terdistribusi Merata Minimum (L_o) dan Beban Hidup Terpusat Minimum (Lanjutan)

Hunian atau Penggunaan	Merata, L_o psf (kN/m ²)	Terpusat lb (kN)
Toko		
Eceran		1.000 (4,45)
Lantai pertama		1.000 (4,45)
Lantai di atasnya		1.000 (4,45)
Grosir, di semua lantai		
Penghalang kendaraan		Lihat Pasal 4.5.3
Susunan jalan dan panggung yang ditinggikan (selain jalan keluar)	60 (2,87)	
Pekarangan dan teras, jalur pejalan kaki	100 (4,79)	

2.3.3. Beban Gempa

Beban gempa adalah beban yang disebabkan oleh seluruh beban statik ekuivalen yang bekerja pada struktur. Beban statik ekuivalen disebabkan oleh pergerakan pada tanah akibat gempa. Beban gempa yang dimaksud yaitu Beban Statik Ekuivalen dan Beban Respon Spektrum (Arifin dkk, 2015).

Gempa rencana yang harus ditinjau dalam perencanaan dan evaluasi struktur bangunan gedung dan nongedung serta berbagai bagian dan peralatannya secara umum. Gempa rencana ditetapkan sebagai gempa dengan kemungkinan terlampaui besarnya selama umur struktur bangunan 50 tahun adalah sebesar 2 %. (SNI 1726:2019)

2.3.4. Faktor Beban dan Kombinasi Beban

Pemberian kombinasi beban berguna agar struktur gedung maupun bukan gedung mampu menerima dan memikul beban yang lebih besar daripada beban aktual dari struktur tersebut, sehingga struktur tidak mengalami kegagalan. Kombinasi beban menurut SNI 2847:2019 dapat dilihat pada Tabel 2.3.

Tabel 2.3. Kombinasi Beban

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

Keterangan:

D = beban mati

L = beban hidup

Lr = beban hidup di atap

R = beban hujan

W = beban angin

2.3.5. Faktor Reduksi Kekuatan (ϕ)

Faktor Reduksi Kekuatan digunakan untuk memperhitungkan kemungkinan terjadinya penurunan kekuatan akibat variasi yang terdapat pada kekuatan material dan dimensi pada saat pelaksanaan, pengaruh penyederhanaan dan asumsi di dalam persamaan desain, tingkat daktilitas, potensi mode kegagalan dari komponen, kebutuhan keandalan dan signifikansi kegagalan serta ketersediaan lintasan beban alternatif pada komponen di dalam struktur. Faktor Reduksi Kekuatan (ϕ) yang digunakan dalam perancangan dapat dilihat pada Tabel 2.4.

Tabel 2.4. Faktor Reduksi Kekuatan (ϕ)

Gaya atau elemen struktur		ϕ	Pengecualian
a.)	Momen, gaya aksial, atau kombinasi momen dan gaya aksial	0,65 – 0,90 sesuai 21.2.2	Di dekat ujung komponen pratarik (<i>pretension</i>) dimana <i>strand</i> belum sepenuhnya bekerja, ϕ harus sesuai dengan 21.2.3

b.)	Geser	0,75	Persyaratan tambahan untuk struktur tahan gempa terdapat pada 21.2.4
c.)	Torsi	0,75	-
d.)	Tumpu (<i>bearing</i>)	0,65	-
e.)	Zona angkur pascatarik (<i>post-tension</i>)	0,85	-
f.)	<i>Bracket</i> dan korbél	0,75	-
g.)	<i>Strut, ties</i> , zona nodal, dan daerah tumpuan yang dirancang dengan <i>strut-and-tie</i> di Pasal 23	0,75	-
h.)	Komponen sambungan beton pracetak terkontrol leleh oleh elemen baja dalam tarik	0,90	-
i.)	Beton polos	0,60	-
j.)	Angkur dalam elemen beton	0,45 – 0,75 sesuai Pasal 17	-

2.4. Standar Perancangan Struktur Bangunan Gedung

Perancangan struktur bangunan gedung perlu memenuhi standar yang diatur dalam SNI 2847:2019 tentang Persyaratan Beton Struktural untuk Bangunan Gedung dan SNI 1726:2019 tentang Tata Cara Perencanaan Ketahanan Gempa untuk Struktur Bangunan Gedung dan Non Gedung. Untuk mengetahui kekuatan struktur yang dibutuhkan perlu dilakukan analisis struktur. Setelah melakukan analisis struktur akan menghasilkan gaya momen, gaya geser dan gaya aksial yang akan digunakan sebagai dasar dalam merancang Struktur.

2.5. Perancangan Struktur Tahan Gempa Berdasarkan SNI 1726:2019

Perancangan struktur bangunan tahan gempa memerlukan perencanaan dan perhitungan untuk meminimalkan risiko kerusakan bangunan akibat gempa. SNI 1726:2019 mengenai “Tata Cara Perencanaan Ketahanan Gempa untuk Struktur Bangunan Gedung dan Non Gedung” digunakan sebagai pedoman dalam perancangan bangunan tahan gempa.

2.5.1. Gempa rencana

Gempa rencana dalam perencanaan dan evaluasi struktur bangunan gedung dan non gedung serta berbagai bagian dan peralatannya secara umum ditetapkan sebagai gempa dengan kemungkinan terlampaui besarnya selama umur struktur bangunan 50 tahun adalah sebesar 2 %.

2.5.2. Kategori Risiko Bangunan dan Faktor Keutamaan Gempa

Kategori risiko merupakan pengelompokan bangunan-bangunan gedung atau struktur-struktur lainnya untuk menentukan besaran beban-beban gempa berdasarkan risiko terjadinya gempa yang tidak dapat diterima. Faktor keutamaan merupakan suatu faktor yang memperhitungkan tingkat risiko terhadap keselamatan jiwa, kesehatan dan kesejahteraan terkait kerusakan properti atau kehilangan fungsi/kegunaan suatu fasilitas. Kategori risiko bangunan dan faktor keutamaan gempa dapat dilihat pada Tabel 2.5 dan Faktor Keutamaan Gempa dapat dilihat pada Tabel 2.6.

Tabel 2.5. Kategori Risiko Bangunan

Jenis Pemanfaatan	Kategori risiko
Gedung dan non gedung mempunyai risiko rendah terhadap jiwa manusia pada saat terjadi kegagalan, termasuk, tapi tidak dibatasi untuk, antara lain : Fasilitas pertanian, perkebunan, peternakan, dan perikanan • Fasilitas sementara • Gudang penyimpanan • Rumah jaga dan struktur kecil lainnya	I
Semua gedung dan struktur lain, kecuali yang termasuk dalam kategori risiko I,III,IV, termasuk, tapi tidak dibatasi untuk : • Perumahan • Rumah toko dan rumah kantor • Pasar • Gedung perkantoran • Gedung apartemen/ rumah susun • Pusat perbelanjaan/ mall • Bangunan industri • Fasilitas manufaktur • Pabrik	II

(Berlanjut)

Tabel 2.5. Kategori Risiko Bangunan (Lanjutan)

Jenis Pemanfaatan	Kategori risiko
Gedung dan non gedung yang memiliki risiko tinggi terhadap jiwa manusia pada saat terjadi kegagalan, termasuk, tapi tidak dibatasi untuk: • Bioskop • Gedung pertemuan • Stadion • Fasilitas kesehatan yang tidak memiliki unit bedah dan unit gawat darurat • Fasilitas penitipan anak • Penjara • Bangunan untuk orang jompo Gedung dan non gedung, tidak termasuk kedalam kategori risiko IV, yang memiliki potensi untuk menyebabkan dampak ekonomi yang besar dan/atau gangguan massal terhadap kehidupan masyarakat sehari-hari bila terjadi kegagalan, termasuk, tapi tidak dibatasi untuk: • Pusat pembangkit listrik biasa • Fasilitas penanganan air • Fasilitas penanganan limbah • Pusat telekomunikasi Gedung dan non gedung yang tidak termasuk dalam kategori risiko IV, (termasuk, tetapi tidak dibatasi untuk fasilitas manufaktur, proses, penanganan, penyimpanan, penggunaan atau tempat pembuangan bahan bakar berbahaya, bahan kimia berbahaya, limbah berbahaya, atau bahan yang mudah meledak) yang mengandung bahan beracun atau peledak di mana jumlah kandungan bahannya melebihi nilai batas yang disyaratkan oleh instansi yang berwenang dan cukup menimbulkan bahaya bagi masyarakat jika terjadi kebocoran.	III
Gedung dan non gedung yang dikategorikan sebagai fasilitas yang penting, termasuk, tetapi tidak dibatasi untuk: • Bangunan-bangunan monumental • Gedung sekolah dan fasilitas pendidikan • Rumah ibadah • Rumah sakit dan fasilitas kesehatan lainnya yang memiliki fasilitas bedah dan unit gawat darurat • Tempat perlindungan terhadap gempa bumi, tsunami, angin badai, dan tempat perlindungan darurat lainnya	IV

(Berlanjut)

Tabel 2.5. Kategori Risiko Bangunan (Lanjutan)

Jenis Pemanfaatan	Kategori risiko
• Fasilitas kesiapan darurat, komunikasi, pusat operasi dan fasilitas lainnya untuk tanggap darurat • Tempat perlindungan terhadap gempa bumi, tsunami, angin badai, dan tempat perlindungan darurat lainnya • Fasilitas kesiapan darurat, komunikasi, pusat operasi dan fasilitas lainnya untuk tanggap darurat • Pusat pembangkit energi dan fasilitas publik lainnya yang dibutuhkan pada saat keadaan darurat • Struktur tambahan (termasuk menara telekomunikasi, tangki penyimpanan bahan bakar, menara pendingin, struktur stasiun listrik, tangki air pemadam kebakaran atau struktur rumah atau struktur pendukung air atau material atau peralatan pemadam kebakaran) yang disyaratkan untuk beroperasi pada saat keadaan darurat Gedung dan non gedung yang dibutuhkan untuk mempertahankan fungsi struktur bangunan lain yang masuk ke dalam kategori risiko IV.	IV

Tabel 2.6. Faktor Keutamaan Gempa

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

2.5.3. Klasifikasi Situs

Kegiatan klasifikasi suatu situs dilakukan untuk memberikan kriteria desain seismik berupa faktor-faktor amplifikasi pada bangunan berdasarkan kondisi tanah di lapangan. Hasil dari kegiatan klasifikasi situs dinamakan kelas situs. Ketentuan mengenai tipe kelas situs dapat dilihat pada Tabel 2.7.

Tabel 2.7. Klasifikasi Situs (SNI 1726:2019)

Kelas situs	V_s (m/detik)	N atau N_{ch}	S_u (kPa)
SA (batuan keras)	>1500	N/A	N/A
SB (batuan)	750 sampai 1500	N/A	N/A

(Berlanjut)

Tabel 2.7. Klasifikasi Situs (SNI 1726:2019)(Lanjutan)

Kelas situs	V_s (m/detik)	N atau N_{ch}	S_u (kPa)
SC (tanah keras, sangat padat dan batuan lunak)	350 sampai 750	>50	≥ 100
SD (tanah sedang)	175 sampai 350	15 sampai 50	50 sampai 100
SE (tanah lunak)	< 175	<15	< 50
	Atau setiap profil tanah yang mengandung lebih dari 3 m tanah dengan karakteristik sebagai berikut : 1. Indeks plastisitas, $P_I > 20$ 2. Kadar air, $w \geq 40\%$ 3. Kuat geser niralir $S_u < 25$ kPa		
SF (tanah khusus, yang membutuhkan investigasi geoteknik spesifik dan analisis respons spesifik-situs yang mengikuti 0)	Setiap profil lapisan tanah yang memiliki salah satu atau lebih dari karakteristik berikut: • Rawan dan berpotensi gagal atau runtuh akibat beban gempa seperti mudah likuifaksi, lempung sangat sensitif, tanah tersementasi lemah • Lempung sangat organik dan/atau gambut (ketebalan $H > 3$ m)		

Keterangan :

$\bar{v}_s$ = Kecepatan rata-rata gelombang geser

$\bar{N}_s$ = Tahanan penetrasi standar rata-rata

$\bar{S}_u$ = Kuat geser niralir rata-rata

2.5.4. Parameter Respons Spektral Percepatan Gempa Tertarget

Faktor amplifikasi seismik pada periode 0,2 detik dan periode 1 detik diperlukan untuk menentukan Respons Spektral Percepatan Gempa Tertarget (MCE_R). Faktor amplifikasi meliputi faktor amplifikasi getaran terkait percepatan pada getaran periode pendek (F_a) dan periode 1 detik (F_v). Nilai F_a dan F_v dapat dilihat pada Tabel 2.8 dan Tabel 2.9. Parameter respons spektral percepatan pada periode pendek (S_{MS}) dan periode 1 detik (S_{M1}) yang sesuai dengan pengaruh klasifikasi situs dapat ditentukan melalui Persamaan 2.1 dan Persamaan 2.2.

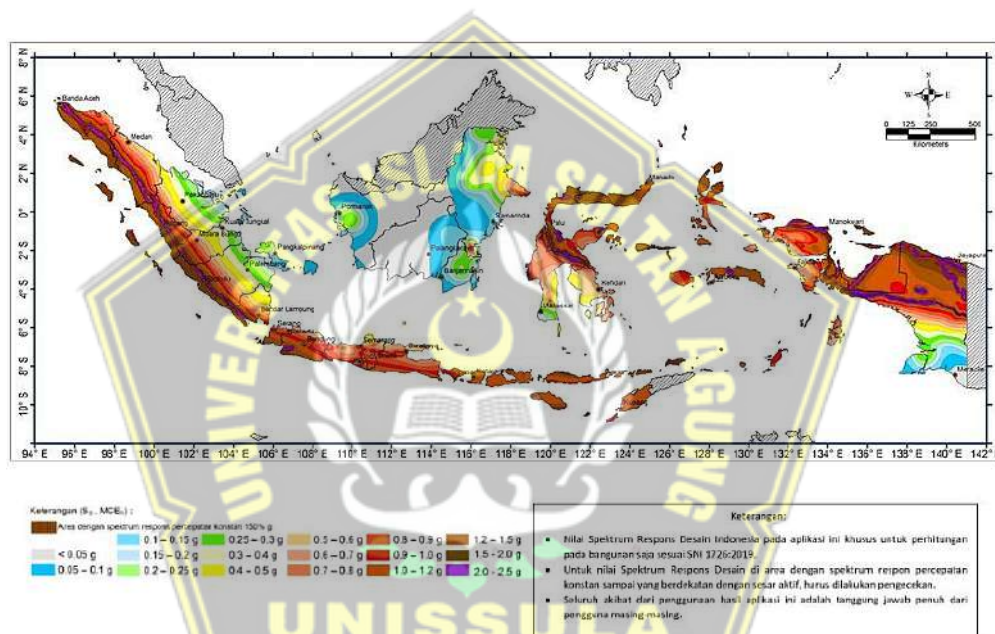
$$S_{MS} = F_a S_s \dots\dots\dots (2.1)$$

$$S_{M1} = F_v S_1 \dots\dots\dots (2.2)$$

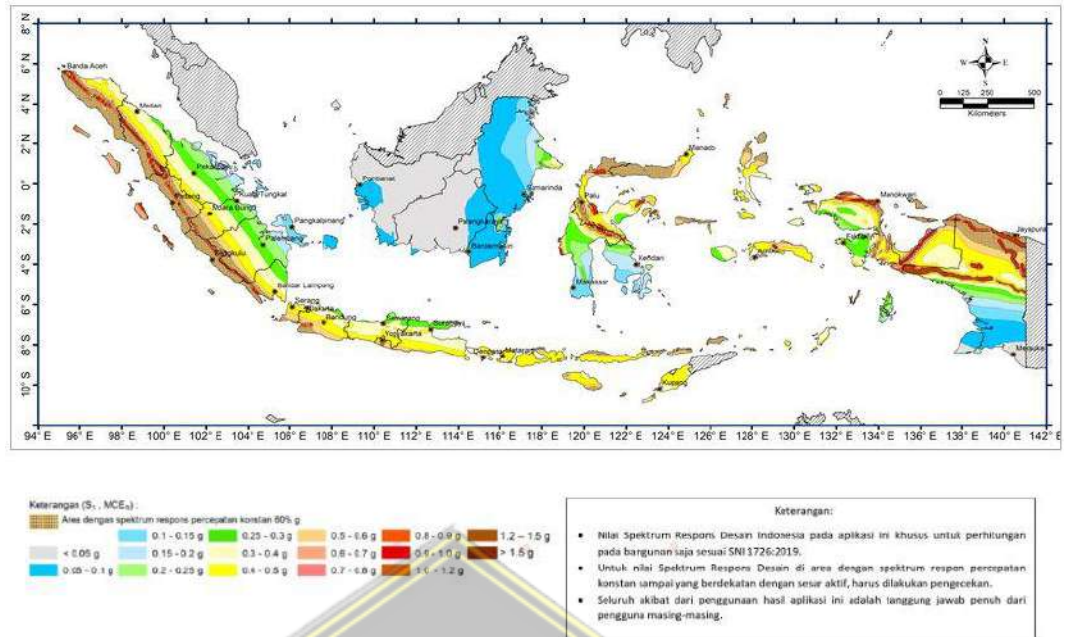
Keterangan :

S_s = Parameter Respons Spektral Percepatan Gempa (MCE_R) terpetakan untuk periode pendek (dapat dilihat pada Gambar 2.4)

S_1 = Parameter Respons Spektral Percepatan Gempa (MCE_R) terpetakan untuk periode 1,0 detik (dapat dilihat pada Gambar 2.5)



Gambar 2.4. Parameter Gerak Tanah (S_s) Gempa Maksimum yang Dipertimbangkan Risiko-Tertarget (MCE_R)



Gambar 2.5. Parameter Gerak Tanah (S_1) Gempa Maksimum yang Dipertimbangkan Risiko-Tertarget (MCE_R)

Tabel 2.8. Koefisien Situs (F_a)

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

Tabel 2.9. Koefisien Situs (F_v)

Kelas Situs	Parameter respon spektra percepatan gempa maksimum yang dipertimbangkan risiko-tertarget (MCE_R) terpetakan pada periode 1 detik, S_1					
	$S_1 \leq 0,1$	$S_1 = 0,2$	$S_1 = 0,3$	$S_1 = 0,4$	$S_1 = 0,5$	$S_1 \geq 0,6$
SA	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
SB	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
SC	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,4
SD	2,4	2,2	2,0	1,9	1,8	1,7
SE	4,2	3,3	2,8	2,4	2,2	2,0

2.5.5. Parameter Percepatan Spektral Desain

Nilai Parameter Percepatan Spektral Desain periode pendek (S_{DS}) dan periode 1 detik (S_{D1}) dapat dicari sesuai ketentuan pada Persamaan 2.3 dan Persamaan 2.4.

$$S_{DS} = \frac{2}{3} S_{MS} \dots\dots\dots (2.3)$$

$$S_{D1} = \frac{2}{3} S_{M1} \dots\dots\dots (2.4)$$

Keterangan:

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

S_{M1} = Parameter respons spektral percepatan pada periode 1 detik

2.5.6. Spektrum Respons Desain

Nilai Spektrum Respon Percepatan Desain (S_a) dapat dicari berdasarkan ketentuan pada Persamaan 2.6 sampai Persamaan 2.7.

a) Untuk periode (T) yang lebih kecil dari T_0

$$S_a = S_{DS} (0,4 + 0,6 \frac{T}{T_0}) \dots\dots\dots (2.5)$$

b) Untuk periode (T) lebih besar dari atau sama dengan T_0 dan lebih kecil atau sama dengan T_s

$$S_a = S_{DS} \dots\dots\dots (2.6)$$

c) Untuk periode (T) lebih besar dari atau sama dengan T_s tetapi lebih kecil dari atau sama dengan T_L

$$S_a = \frac{S_{D1}}{T} \dots\dots\dots (2.7)$$

d) Untuk periode (T) lebih besar dari T_L

$$S_a = \frac{S_{D1} T_L}{T^2} \dots\dots\dots (2.8)$$

Keterangan :

T = Periode Getar Fundamental struktur

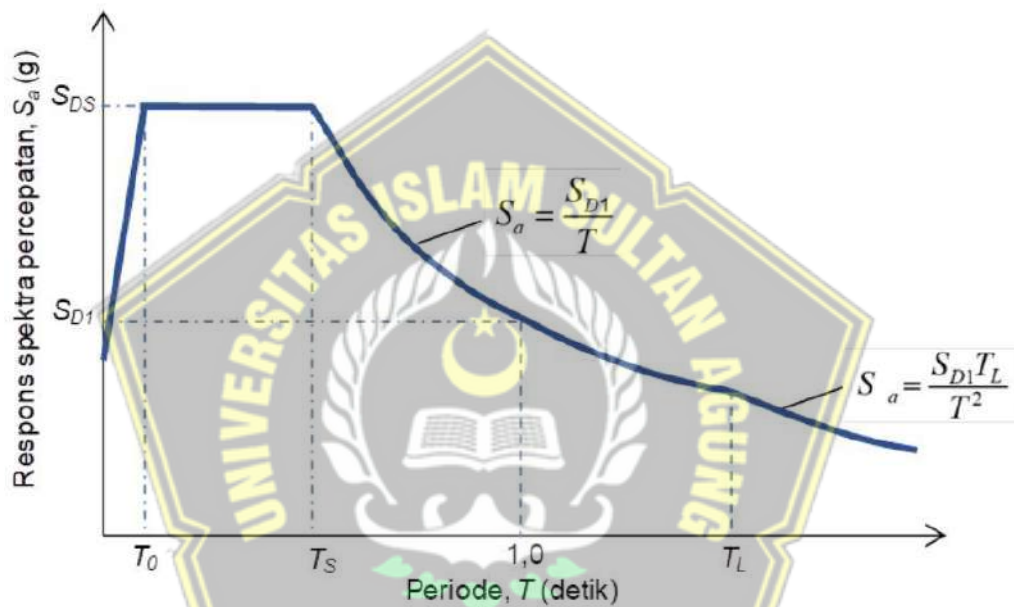
$$T_0 = 0,2 \frac{S_{D1}}{S_{DS}}$$

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

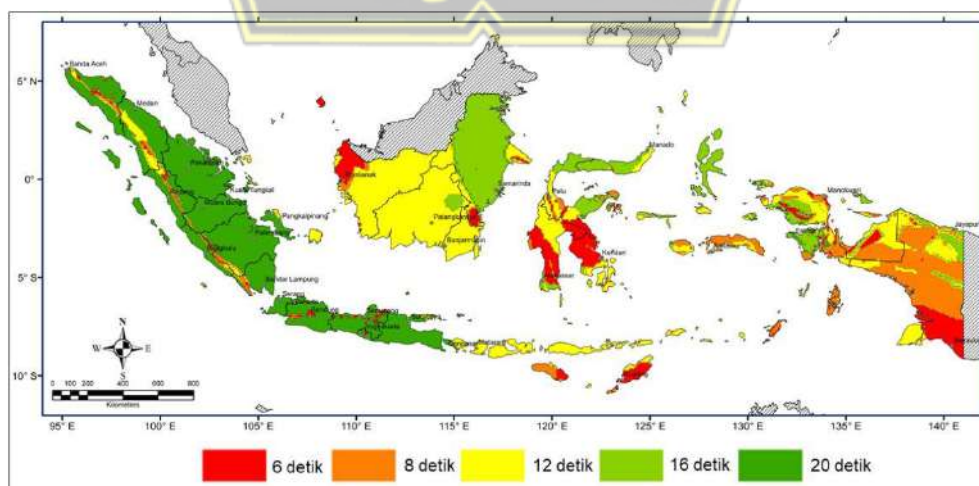
T_L = Peta transisi periode panjang yang ditunjukkan pada Gambar 2.3 yang nilainya diambil dari Gambar 2.4

S_{DS} = Parameter respons spektral percepatan desain pada periode pendek

S_{D1} = Parameter respons spektral percepatan desain pada 1 detik



Gambar 2.6. Spektrum Respons Desain



Gambar 2.7. Peta Transisi Periode Panjang (T_L)

2.5.7. Kategori Desain Seismik

Penentuan kategori desain seismik berdasarkan nilai S_{DS} dan S_{D1} yang telah didapatkan dengan cara menentukan kategori risiko bangunan. Semakin tinggi huruf pada tabel kategori risiko maka semakin tinggi pula risiko gempa yang terjadi pada struktur bangunan. Ketentuan mengenai kategori desain seismik dapat dilihat pada Tabel 2.10 dan Tabel 2.11.

Tabel 2.10. Kategori Desain Seismik Berdasarkan Parameter Respons Percepatan pada Periode Pendek (S_{DS})

Nilai S_{DS}	Kategori risiko	
	I atau II atau III	IV
$S_{DS} < 0,167$	A	A
$0,167 \leq S_{DS} < 0,33$	B	C
$0,33 \leq S_{DS} < 0,5$	C	D
$0,50 \leq S_{DS}$	D	D

Tabel 2.11. Kategori Desain Seismik Berdasarkan Parameter Respons Percepatan pada Periode 1 Detik (S_1)

Nilai S_{D1}	Kategori risiko	
	I atau II atau III	IV
$S_{D1} < 0,067$	A	A
$0,067 \leq S_{D1} < 0,133$	B	C
$0,133 \leq S_{D1} < 0,2$	C	D
$0,20 \leq S_{D1}$	D	D

2.5.8. Kombinasi Sistem Pemikul Gaya Seismik pada Arah yang Berbeda

Sistem Pemikul Gaya Seismik yang berbeda boleh digunakan untuk menahan gaya seismik di masing-masing arah kedua sumbu ortogonal struktur. Koefisien Modifikasi Respons (R), faktor kuat lebih sistem (C_d), dan faktor pembesaran defleksi (Ω_0) harus diterapkan pada setiap sistem bila menggunakan sistem tersebut. Ketentuan mengenai nilai R , C_d , dan Ω_0 dapat dilihat pada Tabel 2.12.

Tabel 2.12. Faktor R , C_d , dan Ω_0 untuk Sistem Pemikul Gaya Seismik

Sistem pemikul gaya seismik	Koefisien modifikasi respons, R	Faktor Kuat lebih sistem, Ω_0	Faktor pembesaran defleksi C_d	Batasan sistem struktur dan batasan tinggi struktur, h_n (m)					
				Kategori desain seismik					
				B	C	D	E	F	
C. Sistem rangka pemikul momen									
Rangka beton bertulang pemikul momen khusus	8	3	5,5	TB	TB	TB	TB	TB	
Rangka beton bertulang pemikul momen menengah	5	3	4,5	TB	TB	TI	TI	TI	
Rangka beton bertulang pemikul momen biasa	3	3	2,5	TB	TI	TI	TI	TI	
D. Sistem ganda dengan rangka pemikul momen khusus yang mampu menahan paling sedikit 25% gaya seismik yang ditetapkan									
Dinding geser beton bertulang khusus	7	2,5	5,5	TB	TB	TB	TB	TB	
Dinding geser beton bertulang biasa	6	2,5	5	TB	TB	TI	TI	TI	

2.5.9. Periode Fundamental Pendekatan

Nilai Periode Fundamental Pendekatan (T_a) dapat dicari berdasarkan ketentuan pada Persamaan 2.9. Koefisien C_t dan x dapat dilihat pada Tabel 2.13.

$$T_a = C_t h_n^x \dots\dots\dots (2.9)$$

Keterangan:

h_n = Ketinggian struktur (m)

Untuk ketinggian struktur tidak lebih dari 12 tingkat yang menggunakan sistem Pemikul Gaya Seismik Rangka Pemikul Momen berbahan beton atau baja dengan

rata-rata tinggi tingkat sekurang-kurangnya 3 m, nilai T_a dapat dicari berdasarkan ketentuan pada Persamaan 2.10.

$$T_a = 0,1 N \dots\dots\dots (2.10)$$

Keterangan:

N = Jumlah tingkat

Tabel 2.13. Nilai Parameter Periode Pendekatan C_t dan x

Tipe Struktur	C_t	x
<i>Sistem rangka pemikul momen dimana rangka memikul 100 % gaya seismik yang disyaratkan dan tidak dilingkupi atau dihubungkan dengan komponen yang lebih kaku dan akan mencegah rangka dari defleksi jika dikenai gaya seismik:</i> • Rangka baja pemikul momen • Rangka beton pemikul momen	0,028 (0,0724) 0,016 (0,0466)	0,8 0,9
Rangka baja dengan bresing eksentris	0,03 (0,0731)	0,75
Rangka baja dengan bresing terkekang terhadap tekuk	0,03 (0,0731)	0,75
Semua sistem struktur lainnya	0,02 (0,0488)	0,75

2.5.10. Periode Fundamental Struktur

Nilai Periode Fundamental Struktur (T) tidak diperbolehkan melebihi hasil perkalian koefisien batasan atas pada periode yang dihitung (C_u) dan periode fundamental pendekatan (T_a). Nilai C_u ditentukan berdasarkan nilai S_{D1} yang telah didapatkan yang dapat dilihat pada Tabel 2.14.

Tabel 2.14. Koefisien untuk Batas Atas pada Periode yang Dihitung (C_u)

Parameter percepatan respon spektra desain pada 1 detik, S_{D1}	Koefisien C_u
$\geq 0,4$	1,4
0,3	1,4
0,2	1,5
0,15	1,6
$\leq 0,1$	1,7

2.5.11. Gaya Geser Dasar Seismik

Nilai Gaya Geser Dasar Seismik (V) dalam arah yang ditetapkan dapat dicari berdasarkan ketentuan pada Persamaan 2.11.

$$V = C_s W \dots\dots\dots (2.11)$$

Keterangan:

C_s = Koefisien respon seismik

W = Berat seismik efektif

Nilai koefisien respons seismik (C_s) dapat dicari berdasarkan ketentuan pada Persamaan 2.12.

$$C_s = \frac{S_{DS}}{\left(\frac{R}{I_e}\right)} \dots\dots\dots (2.12)$$

Keterangan:

S_{DS} = Parameter percepatan respons spektral desain rentang periode pendek

R = Koefisien modifikasi respons

I_e = Faktor keutamaan gempa

Nilai C_s yang dihitung menggunakan Persamaan 2.12 tidak diharuskan melebihi:

- Untuk $T \leq T_L$

$$C_s = \frac{S_{D1}}{T\left(\frac{R}{I_e}\right)} \dots\dots\dots (2.13)$$

- Untuk $T > T_L$

$$C_s = \frac{S_{D1} T_L}{T^2\left(\frac{R}{I_e}\right)} \dots\dots\dots (2.14)$$

Nilai C_s diharuskan tidak kurang dari :

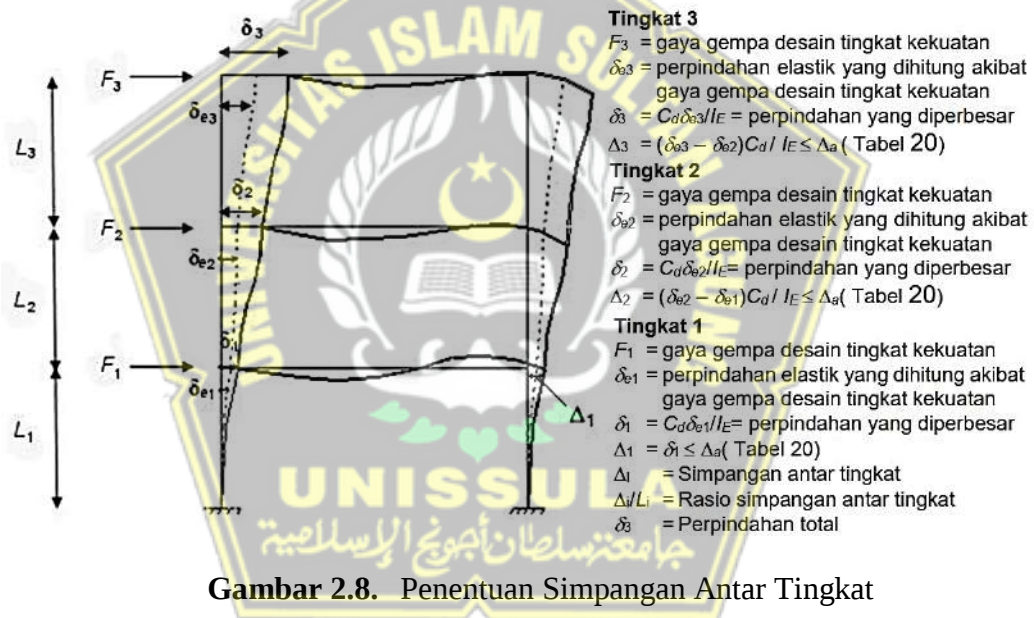
$$C_s = 0,044 S_{DS} I_e \geq 0,01 \dots\dots\dots (2.15)$$

Untuk lokasi struktur yang berada di daerah dimana nilai S_1 sama dengan atau lebih besar dari $0,6g$, maka nilai C_s dapat dicari berdasarkan Persamaan 2.16.

$$C_s = \frac{0,5 S_1}{\left(\frac{R}{I_e}\right)} \dots\dots\dots (2.16)$$

2.5.12. Simpangan Antar Tingkat

Penentuan simpangan antar tingkat desain (Δ) wajib dihitung sebagai perbedaan simpangan pada pusat massa di atas dan di bawah tingkat yang ditinjau. Jika pusat massa pada arah vertikal tidak segaris, maka diizinkan untuk menghitung simpangan di dasar tingkat berdasarkan proyeksi vertikal dari pusat massa lantai di atasnya. Jika desain tegangan izin dipergunakan, Δ wajib dihitung menggunakan gaya seismik desain tanpa reduksi untuk desain tegangan izin.



Gambar 2.8. Penentuan Simpangan Antar Tingkat

Simpangan pusat massa di tingkat-X (δ_x) (mm) wajib ditentukan berdasarkan ketentuan pada Persamaan 2.17.

$$\delta_x = \frac{C_d \cdot \delta_{xe}}{I_e} \dots\dots\dots (2.17)$$

Keterangan:

C_d = Faktor pembesaran simpangan

δ_{xe} = Defleksi pada lokasi yang disyaratkan dan ditentukan sesuai dengan analisis elastis

I_e = Faktor keutamaan gempa

Simpangan antar tingkat desain (Δ) tidak diperbolehkan melampaui simpangan antar tingkat izin (Δ_a) yang dapat dilihat pada Tabel 2.15.

Tabel 2.15. Simpangan Antar Tingkat Izin

Struktur	Kategori risiko		
	I atau II	III	IV
Konstruksi 4 lantai atau kurang yang tidak terbuat dari dinding geser bata dan memiliki dinding bagian dalam, partisi, langit-langit, dan sistem dinding luar yang dapat mentolerir perubahan ketinggian antar tingkat.	$0,025 h_{sx}$	$0,020 h_{sx}$	$0,015 h_{sx}$
Struktur dinding geser kantilever batu bata	$0,010 h_{sx}$	$0,010 h_{sx}$	$0,010 h_{sx}$
Struktur dinding geser batu bata lainnya	$0,007 h_{sx}$	$0,007 h_{sx}$	$0,007 h_{sx}$
Semua struktur lainnya	$0,020 h_{sx}$	$0,015 h_{sx}$	$0,010 h_{sx}$

2.5.13. Pengaruh P-Delta

Analisis pengaruh P-delta pada geser tingkat dan momen, gaya dan momen elemen struktur yang dihasilkan, dan simpangan antar tingkat yang diakibatkannya tidak perlu diperhitungkan apabila Koefisien Stabilitas (θ) sama dengan atau kurang dari 0,10. Nilai Koefisien Stabilitas (θ) dapat dicari berdasarkan ketentuan pada Persamaan 2.18.

$$\theta = \frac{P_x \cdot \Delta \cdot I_e}{V_x \cdot H_{sx} \cdot C_d} \dots\dots\dots (2.18)$$

Keterangan:

- P_x = Beban desain vertikal total pada dan di atas tingkat-x, (kN); bila dihitung, faktor beban individu tidak perlu melebihi 1,0
- Δ = Simpangan antar tingkat desain, terjadi secara serentak dengan V_x (mm)
- I_e = Faktor keutamaan gempa
- V_x = Gaya geser seismik yang bekerja antara tingkat dan x -1 (kN)
- H_{sx} = Tinggi tingkat di bawah tingkat (mm)
- C_d = Faktor pembesaran defleksi

2.5.14. Analisis Spektrum Respons Ragam

Analisis Spektrum Respons Ragam dilakukan untuk menentukan ragam getar alami suatu struktur. Analisis memerlukan jumlah ragam yang cukup untuk mendapatkan partisipasi massa ragam terkombinasi sebesar 100% dari massa struktur. Untuk mencapai ketentuan tersebut, ragam satu badan kaku (*single rigid body*) dengan periode 0,05 detik diizinkan untuk mengambil semua ragam dengan periode di bawah 0,05 detik.

2.5.15. Ketidakberaturan Struktur

Bentuk suatu struktur bangunan dapat diklasifikasikan berdasarkan ketidakberaturannya. Klasifikasi ketidakberaturan suatu bangunan diwajibkan berpedoman pada konfigurasi horizontal dan vertikal dari struktur bangunan.

2.5.15.1. Ketidakberaturan Horizontal

Ketidakberaturan horizontal merupakan ketidakberaturan yang terjadi apabila suatu bangunan memperlihatkan satu atau lebih bentuk ketidakberaturan struktur secara horizontal. Persyaratan dan bentuk ketidakberaturan horizontal suatu struktur dapat dilihat pada Tabel 2.16 dan Gambar 2.9.

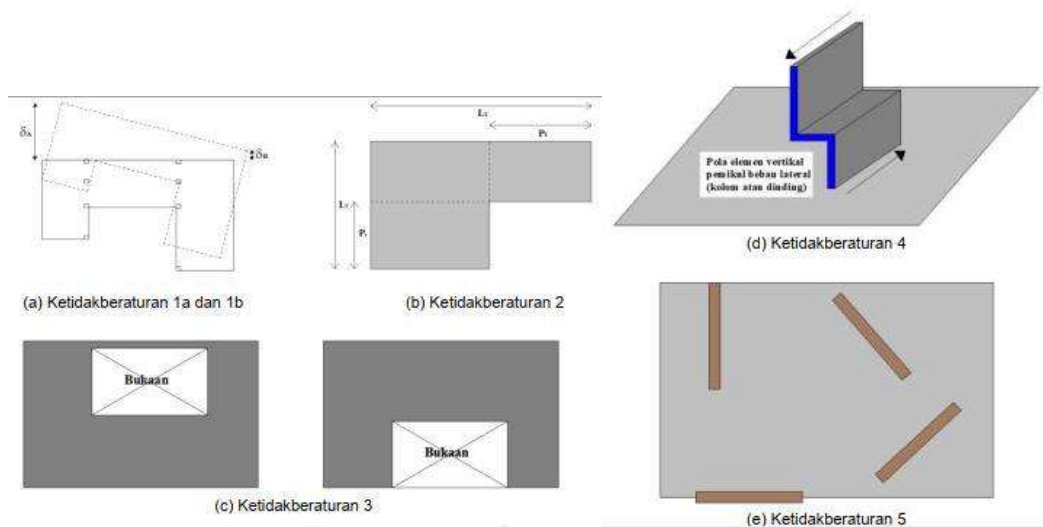
Tabel 2.16. Persyaratan Ketidakberaturan Horizontal pada Struktur

	Tipe dan penjelasan ketidakberaturan	Pasal Referensi	Penerapan kategori desain seismik
1a.	Ketidakberaturan torsi Apabila simpangan antar tingkat maksimum, yang dihitung termasuk torsi tak terduga dengan $A_x = 1,0$, di salah satu ujung struktur melintang terhadap suatu sumbu $> 1,2$ kali simpangan antar tingkat rata-rata di kedua ujung struktur. Persyaratan ketidakberaturan torsi dalam pasal-pasal referensi berlaku hanya untuk struktur dimana diafragmanya kaku atau setengah kaku.	7.3.3.4 7.7.3 7.8.4.3 7.12.1 Tabel 16 11.3.4	D, E, dan F B, C, D, E, dan F C, D, E, dan F C, D, E, dan F D, E, dan F B, C, D, E, dan F

(Berlanjut)

Tabel 2.16. Persyaratan Ketidakberaturan Horizontal pada Struktur (Lanjutan)

	Tipe dan penjelasan ketidakberaturan	Pasal Referensi	Penerapan kategori desain seismik
1b.	Ketidakberaturan torsi berlebihan Apabila simpangan antar tingkat maksimum yang dihitung termasuk akibat torsi tak terduga dengan $A_x = 1,0$, di salah satu ujung struktur melintang terhadap suatu sumbu $> 1,4$ kali simpangan antar tingkat rata-rata di kedua ujung struktur. Persyaratan ketidakberaturan torsi berlebihan dalam pasal-pasal referensi berlaku hanya untuk struktur dimana diafragma kaku atau setengah kaku.	7.3.3.1 7.3.3.4 7.3.4.2 7.7.3 7.8.4.3 17.12.1 Tabel 16	E dan F D B, C, dan D C dan D C dan D D B, C, dan D
2.	Ketidakberaturan sudut dalam Apabila kedua dimensi proyeksi denah struktur dari lokasi sudut dalam $> 15\%$ dimensi denah struktur dalam arah yang ditinjau.	7.3.3.4 Tabel 16	D, E, dan F D, E, dan F
3.	Ketidakberaturan diskontinuitas diafragma Apabila terdapat suatu diafragma yang memiliki diskontinuitas atau variasi kekakuan mendadak, termasuk yang mempunyai daerah terpotong atau terbuka $> 50\%$ daerah diafragma bruto yang tertutup, atau perubahan kekakuan diafragma efektif $> 50\%$ dari suatu tingkat ke tingkat selanjutnya.	7.3.3.4 Tabel 16	D, E, dan F D, E, dan F
4.	Ketidakberaturan akibat pergeseran tegak lurus terhadap bidang Apabila terdapat diskontinuitas dalam lintasan tahanan gaya lateral, seperti pergeseran tegak lurus terhadap bidang pada setidaknya satu elemen vertikal pemikul gaya lateral.	7.3.3.3 7.3.3.4 7.7.3 Tabel 16 11.3.4	B, C, D, E, dan F D, E, dan F B, C, D, E, dan F D, E, dan F B, C, D, E, dan F
5.	Ketidakberaturan sistem non paralel Apabila elemen vertikal pemikul gaya lateral tidak paralel terhadap sumbu – sumbu ortogonal utama Sistem Pemikul Gaya Seismik.	7.5.3 7.7.3 Tabel 16 11.3.4	C, D, E, dan F B, C, D, E, dan F D, E, dan F B, C, D, E, dan F



Gambar 2.9. Bentuk Ketidakberaturan Horizontal Sistem Pemikul Gaya Seismik

2.5.15.2. Ketidakberaturan Vertikal

Ketidakberaturan vertikal merupakan ketidakberaturan yang terjadi apabila suatu bangunan memperlihatkan satu atau lebih bentuk ketidakberaturan struktur secara vertikal. Persyaratan dan bentuk ketidakberaturan vertikal suatu struktur dapat dilihat pada Tabel 2.17 dan Gambar 2.10.

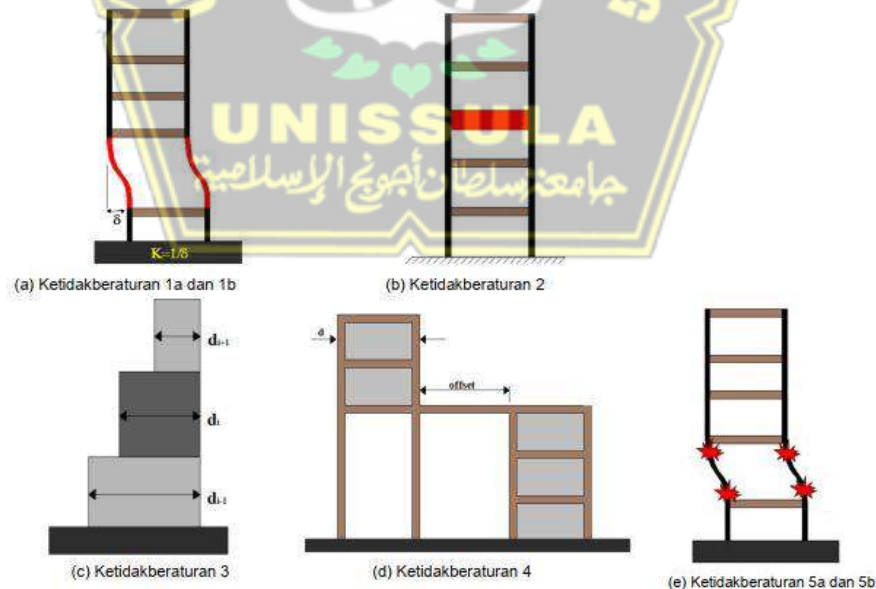
Tabel 2.17. Persyaratan Ketidakberaturan Vertikal pada Struktur

	Tipe dan penjelasan ketidakberaturan	Penerapan kategori desain seismik
1a.	Ketidakberaturan Kekakuan Tingkat Lunak Apabila ada suatu tingkat dengan kekakuan lateral $< 70\%$ kekakuan lateral tingkat di atasnya atau $< 80\%$ kekakuan rata-rata tiga tingkat di atasnya.	D, E dan F
1b.	Ketidakberaturan Kekakuan Tingkat Lunak Berlebihan Apabila ada suatu tingkat dengan kekakuan lateral $< 60\%$ kekakuan lateral tingkat di atasnya atau $< 70\%$ kekakuan rata-rata tiga tingkat di atasnya.	E dan F D, E dan F
2.	Ketidakberaturan Berat (Massa) Apabila massa efektif di sembarang tingkat $> 150\%$ massa efektif tingkat didekatnya. Atap yang lebih ringan dari lantai di bawahnya tidak perlu ditinjau.	D, E dan F

(Berlanjut)

Tabel 2.17. Persyaratan Ketidakberaturan Vertikal pada Struktur (Lanjutan)

	Tipe dan penjelasan ketidakberaturan	Penerapan kategori desain seismik
3.	Ketidakberaturan Geometri Vertikal Apabila dimensi horizontal Sistem Pemikul Gaya Seismik di sembarang tingkat > 130% dimensi horizontal Sistem Pemikul Gaya Seismik tingkat didekatnya.	D, E dan F
4.	Ketidakberaturan Akibat Diskontinuitas Bidang pada Elemen Vertikal Pemikul Gaya Lateral Apabila pergeseran arah bidang elemen pemikul gaya lateral > panjang elemen itu atau terdapat reduksi kekakuan elemen pemikul di tingkat di bawahnya.	B, C, D, E dan F D, E dan F D, E dan F
5a.	Ketidakberaturan Tingkat Lemah Akibat Diskontinuitas pada Kekuatan Lateral Tingkat Apabila kekuatan lateral suatu tingkat < 80% kekuatan lateral tingkat di atasnya.	E dan F D, E dan F
5b.	Ketidakberaturan Tingkat Lemah Berlebihan Akibat Diskontinuitas pada Kekuatan Lateral Tingkat Apabila kekuatan lateral suatu tingkat < 65% kekuatan lateral tingkat di atasnya. Kekuatan lateral tingkat adalah kekuatan total semua elemen pemikul seismik yang berbagi geser tingkat pada arah yang ditinjau.	D, E dan F B dan C D, E dan F



Gambar 2.10. Bentuk Ketidakberaturan Vertikal Sistem Pemikul Gaya Seismik

2.6. Perancangan Elemen Struktur Beton Bertulang Berdasarkan SNI

Perancangan elemen struktur bangunan memerlukan perencanaan dan perhitungan untuk meminimalkan risiko kerusakan bangunan. SNI 2847:2019 mengenai “Persyaratan Beton Struktural untuk Bangunan Gedung” digunakan sebagai pedoman dalam perancangan elemen struktur bangunan.

2.6.1. Perancangan Pelat

Ketebalan minimum pelat tidak tergantung pada pembebanan dan Modulus Elastisitas beton yang mempunyai pengaruh signifikan pada lendutan. Batasan ketebalan minimum pelat yang digunakan dalam merancang dimensi pelat dapat dilihat berdasarkan ketentuan pada Tabel 2.18 dan Tabel 2.19.

Tabel 2.18. Ketebalan Minimum Pelat 1 Arah

Kondisi Perlekatan	Tebal minimum pelat (h) ^[1]
Perlekatan Sederhana	$L/20$
Satu ujung menerus	$L/24$
Kedua ujung menerus	$L/28$
Kantilever 2 Arah	$L/10$

(sumber : tabel 7.3.1.1 SNI 2847:2019)

Tabel 2.19. Ketebalan Minimum Pelat

f_y (MPa) ^[1]	Tanpa Drop Panel			Dengan Drop Panel		
	Panel Eksterior		Panel Interior	Panel Eksterior		Panel Interior
	Tanpa Balok Tepi	Dengan Balok Tepi		Tanpa Balok Tepi	Dengan Balok Tepi	
280	$L_n/33$	$L_n/36$	$L_n/36$	$L_n/36$	$L_n/40$	$L_n/40$
420	$L_n/30$	$L_n/33$	$L_n/33$	$L_n/33$	$L_n/36$	$L_n/36$
520	$L_n/28$	$L_n/31$	$L_n/31$	$L_n/31$	$L_n/34$	$L_n/34$

(sumber : Tabel 8.3.1.1 SNI 2847:2019)

Tulangan lentur dibutuhkan untuk menahan momen lentur yang bekerja pada pelat. Ketentuan mengenai luas minimum tulangan lentur ($A_{s_{min}}$) dapat dilihat pada Tabel 2.20.

Tabel 2.20. As min untuk Pelat

Tipe Tulangan	f_y (MPa)	As min	
Batang ulir	< 420	$0,0020A_g$	
Batang ulir / Kawat las	≥ 420	Terbesar dari	$\frac{0,0018 \times 420}{f_y} A_g$
		:	$0,0014A_g$

2.6.2. Perancangan Balok Sistem Pemikul Momen Khusus (SRPMK)

Balok Sistem Rangka Pemikul Momen Khusus merupakan bagian sistem pemikul gaya seismik yang dirancang untuk menahan lentur dan geser. Apabila terkena gaya tekan aksial terfaktor lebih dari $(A_g f_c / 10)$ akibat tiap kombinasi beban, setiap komponen rangka harus diproporsionalkan serta didetailkan.

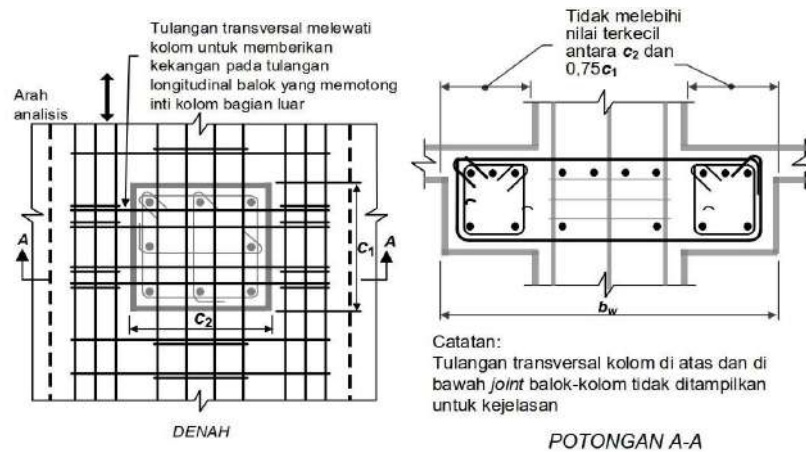
Batasan dimensi Balok Sistem Rangka Pemikul Momen Khusus digunakan untuk menentukan lebar efektif maksimum balok yang dapat mentransfer gaya ke sambungan balok-kolom. Lebar efektif maksimum balok dapat dilihat pada Gambar 2.8. Dimensi balok diharuskan memenuhi ketentuan sesuai Pasal 18.6.2 sebagai berikut:

- a) Batasan tinggi minimum dimensi balok sesuai Tabel 2.21.

Tabel 2.21. Tinggi Balok Minimum (h)

Kondisi Perlekatan	Tinggi balok minimum (h)
Perlekatan Sederhana	$L/16$
Menerus Satu Sisi	$L/18,5$
Menerus Dua Sisi	$L/21$
Kantilever	$L/8$

- b) Bentang bersih (L_n) diharuskan minimal $4d$
- c) Lebar penampang (b_w) harus sekurangnya nilai terkecil dari $0,3h$ dan 250 mm
- d) Proyeksi lebar balok yang melebihi lebar kolom penumpu pada tiap sisi kolom tidak diizinkan melebihi nilai terkecil dari c_2 dan $0,75 c_1$



Gambar 2.11. Lebar Efektif Maksimum Balok Lebar (*Wide Beam*)

Tulangan lentur pada Balok Sistem Rangka Pemikul Momen Khusus diharuskan memenuhi ketentuan sesuai Pasal 9.6.1 sebagai berikut:

- a) Jumlah tulangan lentur di sebelah atas atau di sebelah bawah penampang (A_s) tidak diizinkan kurang dari Persamaan 2.19 dan Persamaan 2.20.

$$\frac{0,25 \sqrt{f_c}}{f_y} b_w \times d \dots\dots\dots (2.19)$$

(diambil yang terbesar) $\leq A_s \leq 0,025.b_w.d$

$$\frac{1,4}{f_y} b_w \times d \dots\dots\dots (2.20)$$

Minimal harus dipasang dua buah tulangan longitudinal, baik di sisi atas maupun di sisi bawah.

- b) Kekuatan momen positif pada muka kolom harus tidak kurang dari setengah kekuatan momen negatif pada muka kolom sesuai Persamaan 2.21 dan Persamaan 2.22.

$$\phi M_n^+ \text{ ki} \geq \frac{1}{2} \phi M_n^- \text{ ki} \text{ (tumpuan kiri)} \dots\dots\dots (2.21)$$

$$\phi M_n^+ \text{ ka} \geq \frac{1}{2} \phi M_n^- \text{ ka} \text{ (tumpuan kanan)} \dots\dots\dots (2.22)$$

Kekuatan lentur negatif dan kuat lentur positif pada setiap penampang di sepanjang bentang harus lebih dari $\frac{1}{4}$ kekuatan momen maksimum pada kedua penampang kolom tersebut sesuai Persamaan 2.23.

$$(\phi M_n^+ \text{ atau } \phi M_n^-) \geq \frac{1}{4} (\phi M_n \text{ terbesar di setiap titik)} \dots\dots\dots (2.23)$$

- c) Sambungan tulangan lentur hanya diizinkan apabila bagian sambungan dilekatkan dengan tulangan spiral. Jaraknya tidak lebih dari $d/4$ atau 100 mm

dapat digunakan untuk mengikat daerah sambungan layang. Sambungan lewatan tidak diizinkan untuk digunakan pada:

- Daerah hubungan balok-kolom
- Daerah hingga sejarak $2 \times$ tinggi balok dari muka kolom
- Tempat yang berdasarkan analisis menunjukkan kemungkinan terjadinya leleh lentur akibat perpindahan inelastis struktur rangka.

Penempatan sengkang pengegang pertama sesuai Pasal 18.6.4.4 diharuskan tidak lebih 50 mm dari muka kolom penumpu. Penempatan sengkang pengegang dapat dilihat pada Gambar 2.9. Jarak sengkang pengegang tidak diizinkan melebihi nilai terkecil dari hal berikut:

- a) $d/4$
- b) Enam kali diameter terkecil batang tulangan lentur utama
- c) 150 mm

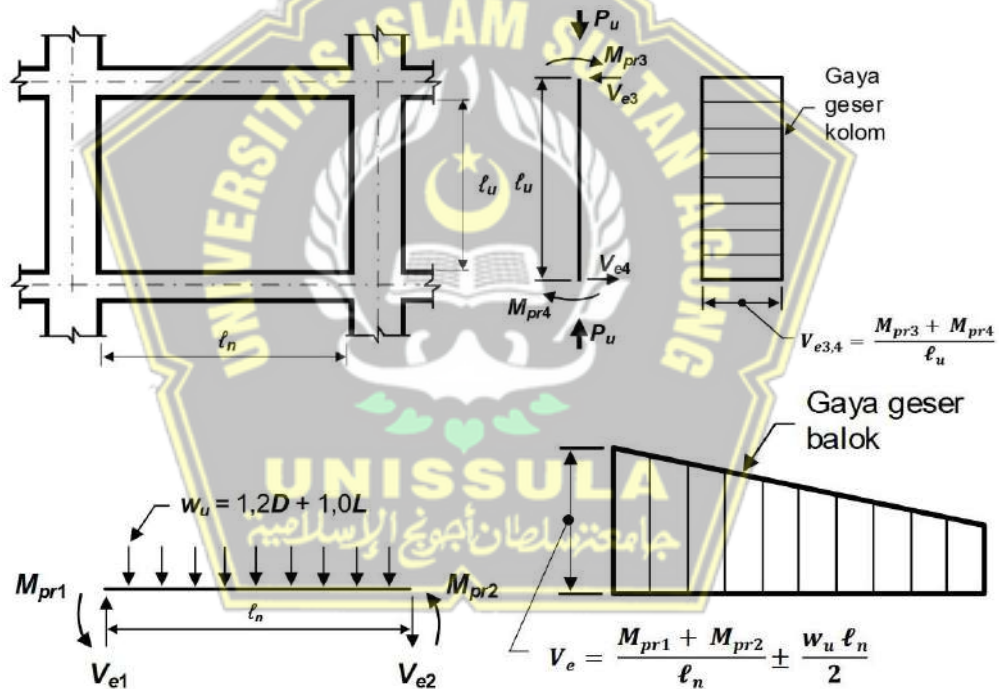


Gambar 2.12. Contoh Sengkang Tertutup (*Hoop*) yang Dipasang Bertumpuk dan Ilustrasi Batasan Maksimum Spasi Horizontal Penumpu Batang Longitudinal

Perhitungan Gaya Geser Desain (V_e) harus ditinjau dari gaya-gaya di bagian balok di antara kedua muka *joint*. Gaya Geser Desain dapat dilihat pada Gambar 2.12. Momen-momen dengan tanda berlawanan yang mungkin terjadi terkait kekuatan momen lentur maksimum (M_{pr}) harus diperkirakan bekerja pada muka-muka *joint* dan balok dibebani dengan beban gravitasi tributari terfaktor di sepanjang bentangnya.

Tulangan transversal sepanjang daerah teridentifikasi harus didesain untuk menahan geser dengan asumsi $V_c = 0$ sesuai dengan ketentuan Pasal 18.6.5.2 sebagai berikut:

- Gaya geser akibat gempa yang dihitung mewakili setidaknya setengah kekuatan geser perlu maksimum pada bentang tersebut.
- Gaya tekan aksial terfaktor (P_u) dengan pengaruh gempa kurang dari $A_g f_c' / 20$



Gambar 2.13. Geser Desain untuk Balok dan Kolom

2.6.3. Perancangan Kolom Sistem Rangka Pemikul Momen Khusus (SRPMK)

Perancangan Kolom Sistem Rangka Pemikul Momen Khusus (SRPMK) mempunyai beberapa ketentuan sebagai berikut:

- Batasan dimensi kolom sesuai Pasal 18.7.2.1 harus memenuhi:

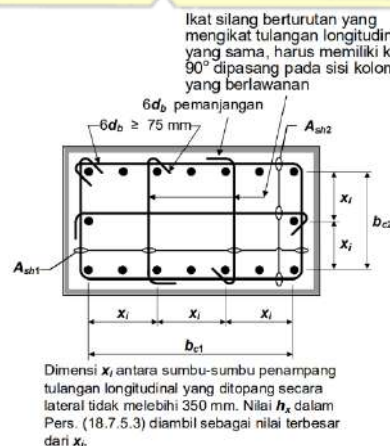
- a) Penampang terkecil kolom harus mempunyai dimensi paling sedikit 300 mm yang diukur pada garis lurus melewati pusat geometri.
 - b) Perbandingan dimensi penampang terkecil kolom terhadap dimensi tegak lurus minimal 0,4.
2. Kekuatan lentur kolom sesuai Pasal 18.7.3.2 harus memenuhi Persamaan 2.24.
- $$\sum M_{nc} = (1,2) \sum M_{nb} \dots\dots\dots (2.24)$$

Keterangan:

$\sum M_{nc}$ = Total kekuatan lentur nominal kolom-kolom yang merangka ke dalam *joint*, yang dievaluasi pada muka-muka *joint*.

$\sum M_{nb}$ = Total kekuatan lentur nominal balok yang merangka ke dalam *joint*, yang dievaluasi pada muka-muka *joint*.

3. Luas tulangan longitudinal (A_{st}) sesuai Pasal 18.7.4.1 tidak diizinkan kurang dari $0,01A_g$ dan tidak lebih besar dari $0,06A_g$.
4. Tulangan transversal dipasang sepanjang l_0 dari masing-masing muka *joint* pada kolom. Penulangan transversal pada kolom dapat dilihat pada Gambar 2.13. Panjang l_0 sesuai Pasal 18.7.5.1 tidak diizinkan kurang dari nilai terbesar antara hal-hal sebagai berikut:
 - a) Tinggi kolom pada muka *joint* atau pada penampang dimana dimungkinkan terjadinya pelelehan lentur
 - b) $1/6$ tinggi bersih kolom
 - c) 450 mm



Gambar 2.14. Contoh Penulangan Transversal pada Kolom

5. Spasi tulangan transversal sesuai Pasal 18.7.5.3 tidak diizinkan melebihi nilai terkecil dari hal-hal berikut :

- 0,25 dimensi terkecil penampang kolom
- Enam kali diameter tulangan longitudinal terkecil
- s_0 , yang dihitung dengan Persamaan 2.25.

$$s_0 = 100 + \left(\frac{350 - h_x}{3} \right) \dots\dots\dots (2.25)$$

Nilai s_0 tidak boleh melebihi 150 mm dan tidak perlu kurang dari 100 mm.

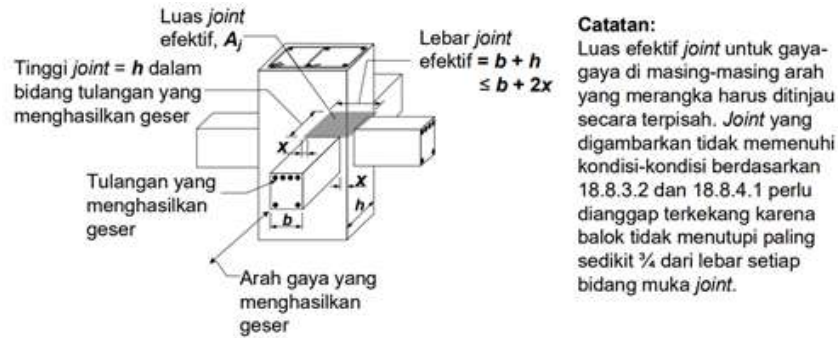
Ketentuan mengenai tulangan transversal dapat dilihat pada Tabel 2.22.

Tabel 2.22. Tulangan Transversal untuk Kolom-Kolom Sistem Rangka Pemikul Momen Khusus (SRPMK)

Tulangan Transversal	Kondisi	Persamaan yang berlaku	
A_{sh}/s_{bc} untuk sengkang pengekang persegi	$P_u \leq 0,3A_g \times f_c$ dan $f_c \leq 70 \text{ MPa}$	Terbesar antara (a) dan (b)	$0,3 \left(\frac{A_g}{A_{ch}} - 1 \right) \frac{f_c}{f_{yt}} \quad (a)$ $0,09 \frac{f_c}{f_{yt}} \quad (b)$
	$P_u \leq 0,3A_g \times f_c$ dan $f_c \leq 70 \text{ MPa}$	Terbesar antara (a), (b) dan (c)	$0,2 k_f \times k_n \frac{P_u}{f_{yt} \times A_{ch}} \quad (c)$
ρ_s untuk spiral atau sengkang pengekang lingkaran	$P_u \leq 0,3A_g \times f_c$ dan $f_c \leq 70 \text{ MPa}$	Terbesar antara (d) dan (e)	$0,45 \left(\frac{A_g}{A_{ch}} - 1 \right) \frac{f_c}{f_{yt}} \quad (a)$ $0,12 \frac{f_c}{f_{yt}} \quad (b)$
			$0,35 k_f \times k_n \frac{P_u}{f_{yt} \times A_{ch}} \quad (c)$

6. Perkalian antara tinggi *joint* dengan lebar *joint* efektif menghasilkan luas penampang efektif suatu *joint* (A_j). Luas penampang efektif *joint* (A_j) dapat dilihat pada Gambar 2.14. Tinggi *joint* dan lebar *joint* efektif diharuskan selebar kolom (h). Lebar *joint* efektif diharuskan selebar kolom kecuali terdapat balok yang merangka ke dalam kolom yang lebih lebar. Lebar *joint* efektif sesuai Pasal 18.8.4.3 tidak diperbolehkan melebihi nilai terkecil dari hal-hal berikut :

- Lebar balok ditambah tinggi *joint*.
- Dua kali jarak tegak lurus yang lebih kecil dari sumbu longitudinal balok ke sisi kolom.



Gambar 2.15. Luas Joint Efektif

2.6.4. Perancangan Strong Column-Weak Beam

Persyaratan mekanisme perancangan *Strong Column-Weak Beam* (Kolom Kuat-Balok Lemah) sesuai dengan Persamaan 2.26.

$$\sum M_{nc} \geq 1,2 \sum M_{nb} \dots\dots\dots (2.26)$$

Keterangan:

$\sum M_{nc}$ = Momen total muka sambungan yang dihubungkan dengan kekuatan lentur nominal kolom yang menopang sambungan dan dihitung untuk beban aksial terfaktor, sesuai dengan arah gaya lateral yang ditinjau, yang menghasilkan kekuatan lentur terendah.

$\sum M_{nb}$ = Momen total muka sambungan yang dihubungkan kuat lentur nominal balok (termasuk pelat dalam tarik) yang menopang persimpangan.

2.6.5. Perancangan Hubungan Balok Kolom (Joint) pada SRPMK

Hubungan balok kolom (*joint*) merupakan daerah pertemuan antara kolom dan balok yang harus dirancang dan didetailkan dengan baik. Analisis perhitungan hubungan balok-kolom dengan langkah-langkah sebagai berikut:

1. Cek syarat panjang *joint*

Dimensi kolom sejajar tulangan balok beton standar dan beton ringan harus kurang dari 20 dan 26 kali diameter tulangan terbesar dari dimensi tulangan.

2. Cek tulangan geser untuk *confinement*

Jumlah tulangan *confinement* dapat menggunakan seperti pada detail tulangan geser kolom pada ℓ_o .

3. Hitung gaya momen pada *joint*

Momen balok yang timbul, sesuai dengan Persamaan 2.27.

$$M_c = 0,5 \times (M_{pr}^+ - M_{pr}^-) \dots\dots\dots (2.27)$$

Keterangan:

M_c = Jumlah kuat lentur nominal kolom yang merangka pada suatu hubungan balok – kolom yang nantinya menghasilkan M_n

M_{pr} = kekuatan lentur mungkin komponen struktu, dengan atau tanpa beban aksial, yang ditentukan menggunakan properti komponen struktur pada muka *joint* yang mengasumsikantegangan tarik dalam batang tulangan longitudinal sebesar paling sedikit $1,25 f_y$ dan faktor reduksi kekakuan sebesar 0,1

4. Hitung gaya geser pada kolom, sesuai dengan Persamaan 2.28.

$$V_{goyangan} = \frac{M_c + M_c}{l_n} \dots\dots\dots (2.28)$$

Keterangan:

l_n = panjang batang bersih diukur dari muka ke muka tumpuan

5. Hitung gaya pada tulangan balok longitudinal

- Luas tulangan atas, sesuai Persamaan 2.29.

$$T_1 = 1,25 \times A_s \times f_y \dots\dots\dots (2.29)$$

Keterangan:

A_s = Luas tulangan tarik longitudinal nonprategang

- Gaya tekan bekerja pada beton di sisi kiri *joint*, sesuai Persamaan 2.30.

$$C_1 = T_1 \dots\dots\dots (2.30)$$

- Luas tulangan bawah, sesuai Persamaan 2.31.

$$T_2 = 1,25 \times A_s \times f_y \dots\dots\dots (2.31)$$

- Gaya tekan bekerja pada beton di sisi kanan *joint*, sesuai Persamaan 2.32.

$$C_2 = T_2 \dots\dots\dots (2.32)$$

6. Hitung kuat geser pada *joint*, sesuai Persamaan 2.33.

$$V_j = T_1 + T_2 - V_{\text{goyangan}} \dots\dots\dots (2.33)$$

7. Hitung kuat geser terkekang keempat sisinya, sesuai Persamaan 2.34 dan 2.35.

$$V_n = 1,7 \lambda \times \sqrt{f'_c} \times A_g \dots\dots\dots (2.34)$$

$$\phi V_n = 0,85 \times V_n \dots\dots\dots (2.35)$$

Dari analisis perhitungan yang dilakukan, kuat geser yang dikekang keempat sisinya (Persamaan 2.34 & 2.35) harus lebih besar daripada gaya geser *joint* yang ditimbulkan (Persamaan 2.33).

2.6.6. Perancangan Dinding Geser

Perancangan Dinding Geser atau Sistem Dinding Struktural Khusus sesuai Pasal 18.10 harus memenuhi beberapa ketentuan sebagai berikut:

1. Dinding Geser Beton Bertulang Khusus digunakan untuk menahan kombinasi geser, momen dan gaya aksial. Syarat tulangan geser desain adalah apabila $V_u > 0,083 A_{cv} \lambda \sqrt{f'_c}$ maka disyaratkan rasio tulangan minimal harus diambil 0,0025 untuk tulangan longitudinal dan tulangan transversal serta jarak tulangan dinding struktural tidak diperbolehkan lebih dari 450 mm.

2. Dinding Geser harus menggunakan minimal 2 lapis tulangan jika:

$$V_u > 0,17 A_{cv} \lambda \sqrt{f'_c} \dots\dots\dots (2.36)$$

$$h_w/L_w \geq 2,0 \dots\dots\dots (2.37)$$

Keterangan:

h_w = Tinggi dinding keseluruhan

L_w = Panjang dinding keseluruhan

3. Kekuatan Geser Dinding Struktural (V_n) harus mengikuti Persamaan 2.38.

$$V_n < A_{cv} (\alpha_c \lambda \sqrt{f'_c} + \rho_t f_y) \dots\dots\dots (2.38)$$

Keterangan:

$$\alpha_c = 0,25 \text{ untuk } h_w/L_w \leq 1,5$$

$$= 0,17 \text{ untuk } h_w/L_w \geq 2,0$$

$$= \text{interpolasi linier antara } 0,25 \text{ dan } 0,17 \text{ untuk } 1,5 < h_w/L_w < 2,0$$

4. Pada segmen dinding horizontal dan balok kopel, V_n sesuai Pasal 18.10.4.5 harus mengikuti Persamaan 2.39.

$$V_n \leq 0,83 A_{cw} \sqrt{f'_c} \dots\dots\dots (2.39)$$

Keterangan:

A_{cw} = luas penampang beton segmen dinding horizontal atau balok kopel

5. Elemen-elemen batas dinding struktural khusus sesuai Pasal 18.10.6.4 harus memenuhi persyaratan sebagai berikut:

- a) Elemen batas harus diperpanjang pada arah horizontal dari serat tekan terluar sejauh minimal nilai terbesar dari $(c - 0,1 L_w)$ dan $c/2$.
- b) Lebar daerah tekan lentur (b), sepanjang jarak horizontal yang dihitung, termasuk sayap bilamana ada dan harus diambil minimal $h_u / 16$.
- c) Untuk dinding dengan $h_w/L_w \geq 2,0$ yang dirancang mempunyai penampang kritis tunggal untuk beban-beban lentur dan aksial, dan dengan $c/L_w \geq 3/8$, lebar daerah tekan lentur (b) di sepanjang daerah dinding diharuskan lebih besar dari atau sama dengan 300 mm.
- d) Pada penampang bersayap, elemen batas termasuk lebar sayap efektif yang mengalami tekan harus diperpanjang minimal 300 mm ke badan dinding.
- e) Tulangan transversal elemen batas diharuskan memenuhi persyaratan, kecuali apabila nilai h_x tidak lebih dari nilai terkecil antara 350 mm dan $2/3$ ketebalan elemen batas, serta batasan spasi tulangan transversal harus diambil $1/3$ dari dimensi terkecil elemen batas.
- f) Jumlah tulangan transversal diharuskan sesuai dengan Tabel 2.23.

Tabel 2.23. Tulangan Transversal untuk Elemen Batas Khusus

Tulangan transversal	Persamaan yang berlaku		
A_{sh} / S_{bc} untuk sengkang pengekang persegi	Nilai terbesar	$0,3 \left(\frac{A_g}{A_{ch}} - 1 \right) \frac{f'_c}{f_{yt}}$	(a)
		$0,09 \frac{f'_c}{f_{yt}}$	(b)
ρ_s untuk spiral atau sengkang pengekang lingkaran	Nilai terbesar	$0,45 \left(\frac{A_g}{A_{ch}} - 1 \right) \frac{f'_c}{f_{yt}}$	(c)
		$0,12 \frac{f'_c}{f_{yt}}$	(d)

2.6.6.1. Tulangan Minimum

Persyaratan tulangan minimum yang digunakan dalam perancangan Dinding Geser adalah sebagai berikut:

1. Rasio minimum Luas Tulangan Vertikal terhadap Luas Bruto beton ρ_l , harus:
 - a. 0,0012 untuk batang tulangan ulir yang tidak lebih besar dari D-16 dengan f_y tidak kurang dari 420 MPa, atau
 - b. 0,0015 untuk batang tulangan ulir lainnya, atau
 - c. 0,0012 untuk tulangan kawat las yang tidak lebih besar dari $\emptyset$ -16 atau D-16
2. Rasio minimum luas tulangan horizontal terhadap luas beton ρ_t , harus:
 - a. 0,0020 untuk batang tulangan ulir yang tidak lebih besar dari D-16 dengan f_y tidak kurang dari 420 MPa, atau
 - b. 0,0025 untuk batang tulangan ulir lainnya; atau
 - c. 0,0020 untuk tulangan kawat las yang tidak lebih besar dari $\emptyset$ -16 atau D-16

2.6.6.2. Batas Ketinggian Bangunan yang Ditingkatkan untuk Dinding Geser Beton Bertulang

Batasan ketinggian bangunan yang dikembangkan dengan Kategori Desain Seismik D atau E dapat dinaikkan dari 48 m menjadi 72 m. Persyaratan yang harus dipenuhi oleh struktur apabila mempunyai Dinding Geser Beton Bertulang sebagai Sistem Penahan Gaya Gempa yang dicor di tempat:

- a. Konstruksi harus mematuhi definisi Tabel 2.16 tentang kelainan torsi yang parah (ketidakteraturan horizontal tipe 1b).
- b. Dinding Geser Beton Bertulang yang dicor di tempat khusus harus mampu menopang tidak lebih dari 60% dari total gaya seismik di setiap arah di semua bidang terlepas dari dampak torsi tak terduga.

2.6.6.3. Pengangkur Dinding Struktur

Struktur Pelat dan bahan-bahan konstruksi lain yang memberi tahanan lateral atau penopang dinding harus diamankan ke dinding struktur untuk menahan beban vertikal atau tahanan geser lateral dalam komponen struktur. Pengangkur harus mampu memikul gaya horizontal yang dihitung paling sedikit 0,2 kali berat luas dinding dalam sambungan tetapi tidak lebih dari 0,24. Gaya ini harus diterapkan tegak lurus terhadap bidang dinding.

Dinding struktural harus terhubung langsung ke struktur pendukung dan mampu menahan gaya desain sesuai Persamaan 2.40.

$$F_p = 0,4 S_{DS} \times K_a \times I_e \times W_p \dots\dots\dots (2.40)$$

F_p tidak boleh diambil kurang dari $0,2 K_a \times I_e \times W_p$

$$K_a = 1,0 \frac{L_f}{30} \dots\dots\dots (2.41)$$

K_a tidak perlu diambil sebesar 2,0

Keterangan:

- F_p = Gaya desain pada angkur-angkur individu
- S_{DS} = Parameter Percepatan Respon Spektra Desain pada periode pendek
- I_e = Faktor keutamaan gempa (Tabel 2.6)
- K_a = Faktor amplifikasi untuk fleksibilitas diafragma
- L_f = Bentang diafragma fleksibel (dalam m) yang memberikan tumpuan lateral pada dinding; bentang tersebut diukur antara elemen-elemen vertikal yang menyediakan tumpuan lateral terhadap diafragma tersebut pada arah yang ditinjau.
- W_p = Berat dinding sesuai luasan pada daerah angkur

Bila angkur tidak terletak di atap dan seluruh diafragma tidak fleksibel, maka nilai yang diperoleh dari $F_p = 0,4 S_{DS} \times K_a \times I_e \times W_p$ diizinkan untuk dikalikan dengan faktor $\frac{1+2z/h}{3}$, dimana z adalah tinggi angkur di atas dasar struktur dan h adalah tinggi atap di atas dasar.

Dinding struktural harus didesain untuk menahan lentur antara angkur-angkur apabila spasi angkur melebihi 1200 mm.

2.6.6.4. Pengekangan pada Dinding Geser

Pengekangan pada Dinding Geser terjadi pada daerah elemen pembatas (*boundary element*). Elemen pembatas ini ditentukan dengan Persamaan 2.42.

$$c > \frac{L_w}{600 \times \left(\frac{\delta_u}{h_w}\right)} ; \frac{\delta_u}{h_w} > 0,007 \dots\dots\dots (2.42)$$

Keterangan:

c = Panjang dari serat terluar beton ke garis normal. Untuk nilai δ_u didapatkan dari *drift* hasil analisa menggunakan program

h_w = Tinggi Dinding Geser

Jika nilai $\frac{\delta_u}{h_w} < 0,007$, maka nilai yang digunakan adalah 0,007.

Jika $c > \frac{L_w}{600 \times \left(\frac{\delta_u}{h_w}\right)}$, maka Dinding Geser tidak memerlukan tulangan pengegang.

Tulangan pengegang harus dipasang sepanjang elemen pembatas (*boundary element*). Untuk panjang elemen pembatas harus dipasang secara horizontal tidak kurang dari :

- $c - L_w$
- $\frac{c}{2}$

Luas tulangan pengekangan pada Dinding Geser dapat ditentukan dengan menggunakan Persamaan 2.43 dan Persamaan 2.44.

$$A_{sh} = 0,3 \frac{s \times b_c \times f_{cr}}{f_y} \left[\left(\frac{A_g}{A_{ch}} \right) - 1 \right] \dots\dots\dots (2.43)$$

$$A_{sh} = 0,9 \frac{s \times b_c \times f_{cr}}{f_y} \dots\dots\dots (2.43)$$

Keterangan:

A_{sh} = Luas penampang total tulangan transversal (termasuk ikat silang) dalam spasi, s , dan tegak lurus terhadap b_c

b_c = Dimensi penampang inti komponen struktur yang diukur ke tepi luar tulangan tranversal yang membentuk luas A_{sh} (mm)

BAB III

METODE ANALISIS

3.1. Pengumpulan Data

Dalam tahapan analisis menggunakan Data Primer maupun Data Sekunder. Data Primer merupakan data tentang rangkaian struktur gedung meliputi konfigurasi, detail dan denah rancangan struktur gedung yang diperoleh langsung dari pihak-pihak terkait yang dapat digunakan sebagai sumber dalam pembuatan Laporan Tugas Akhir. Data sekunder merupakan data yang berisi tentang data tanah yang digunakan untuk menentukan klasifikasi kelas tanah agar struktur tersebut bisa menggunakan Kategori Desain Seismik (KDS) tertarget. Fungsi pengumpulan data adalah untuk proses perancangan struktur bangunan. Data yang digunakan yaitu :

1. Data Primer
 - a. Data Gambar (*Detail Engineering Design*) DED
2. Data Sekunder
 - b. Data Sondir
 - c. Data (*Standart Penetration Test*) SPT

3.2. Standar Perancangan

Standar yang digunakan dalam perancangan, yaitu :

1. (SNI 1726:2019) tentang Ketentuan Struktur Gedung Tahan Gempa
2. (SNI 1727:2020) tentang Beban Desain Minimum Bangunan Gedung
3. (SNI 2847:2019) tentang Persyaratan Beton untuk Bangunan Gedung

3.3. Tahapan Analisis dan Perancangan

Ada beberapa tahapan analisis dan perancangan pada proses pembuatan tugas akhir ini yang dilakukan, yaitu:

3.3.1. Tahapan Analisis

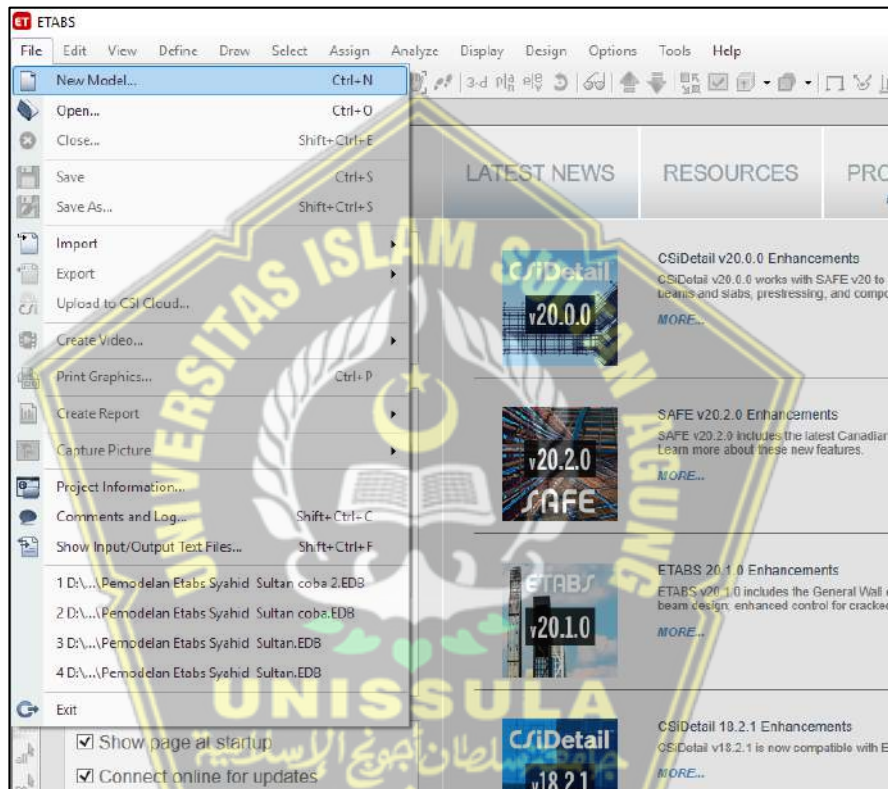
Pada tahapan analisis struktur bertujuan untuk mengidentifikasi gaya dalam seperti gaya geser, gaya aksial dan momen yang diperoleh dengan menggunakan aplikasi ETABS V20.0.0. Gaya dalam yang dianalisis nantinya akan digunakan untuk menghitung elemen struktur bangunan seperti tulangan pelat, balok, kolom, dan Dinding Geser.

3.3.1.1. Pemodelan Struktur

Pemodelan struktur bangunan menggunakan bantuan program perangkat lunak ETABS V20.0.0 berdasarkan gambar kerja dan program dapat membantu sebagai tolok ukur dalam perancangan sehingga proses keluaran dapat dihasilkan gaya Momen, Lintang dan Normal sebagai akibat dari beban yang telah diberikan.

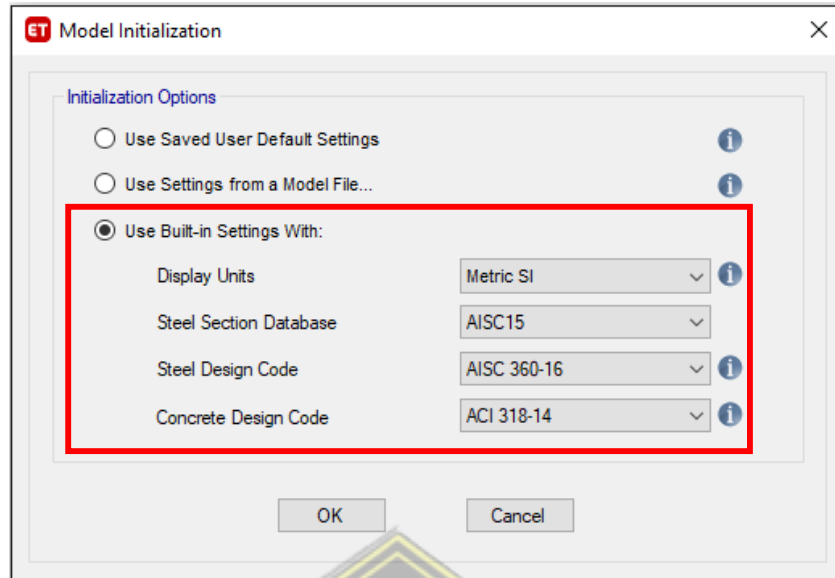
Langkah-langkah pemodelan struktur bangunan dengan bantuan program perangkat lunak ETABS adalah sebagai berikut:

1. Buka perangkat lunak ETABS → klik menu *File* → klik *New Model*.



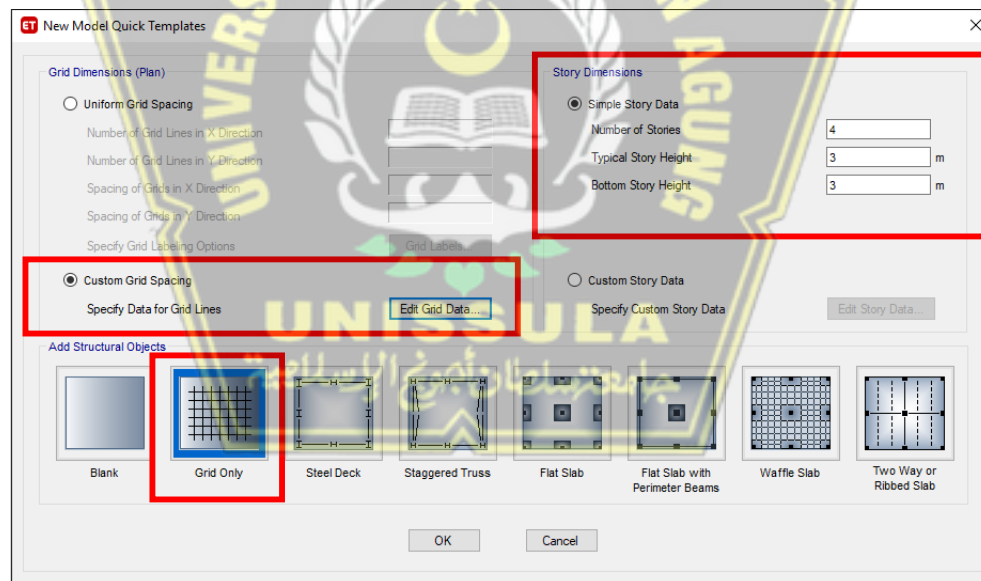
Gambar 3.1. Tampilan Awal ETABS

2. Pilih *Use Built-in Settings With* → pilih *Metric SI* pada bagian *Display Units* → pilih *ACI 318-14* pada bagian *Concrete Design Code* → klik OK.



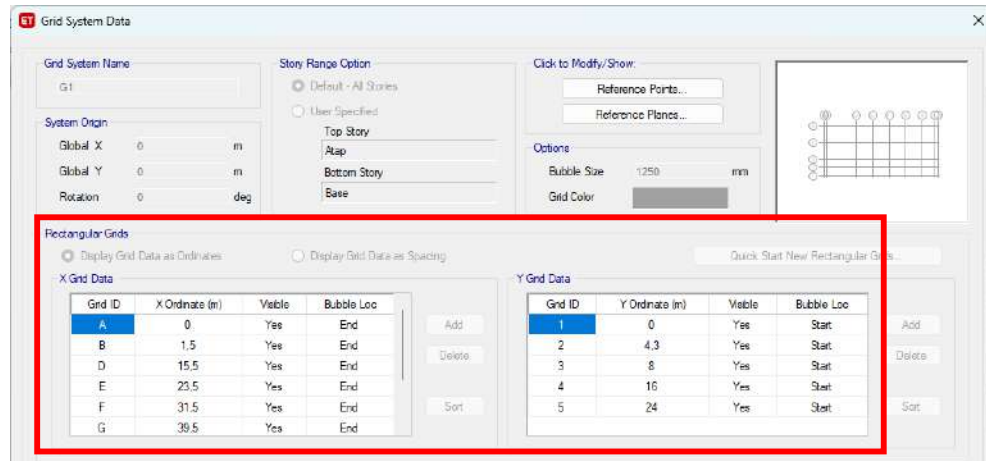
Gambar 3.2. Model Initialization

3. Tentukan jumlah dan tinggi lantai pada bagian *Story Dimensions* → pilih *Grid Only* pada bagian *Add Structural Objects* → klik *Custom Grid Spacing* → klik *Edit Grid Data*.



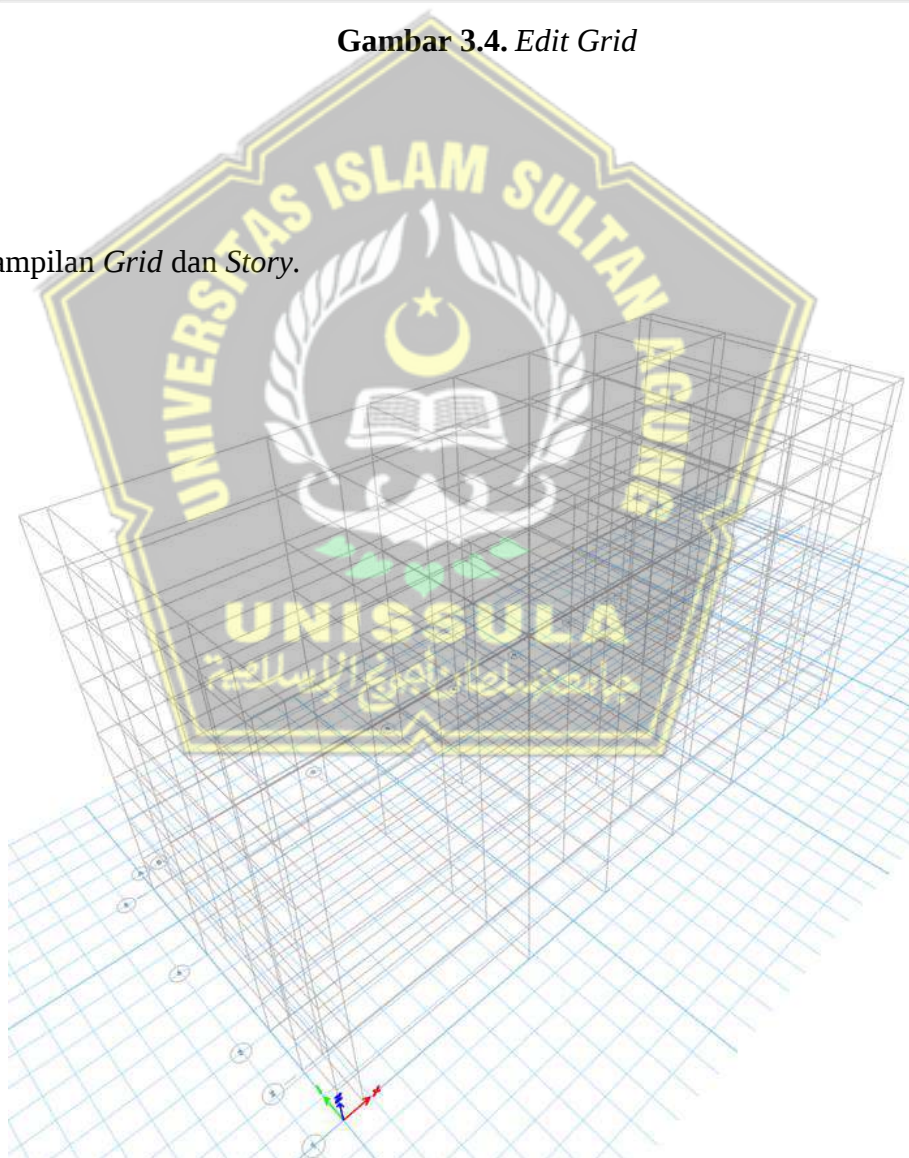
Gambar 3.3. Model Grid

4. Tentukan jarak *grid* sesuai denah struktur yang akan dibuat → klik OK.



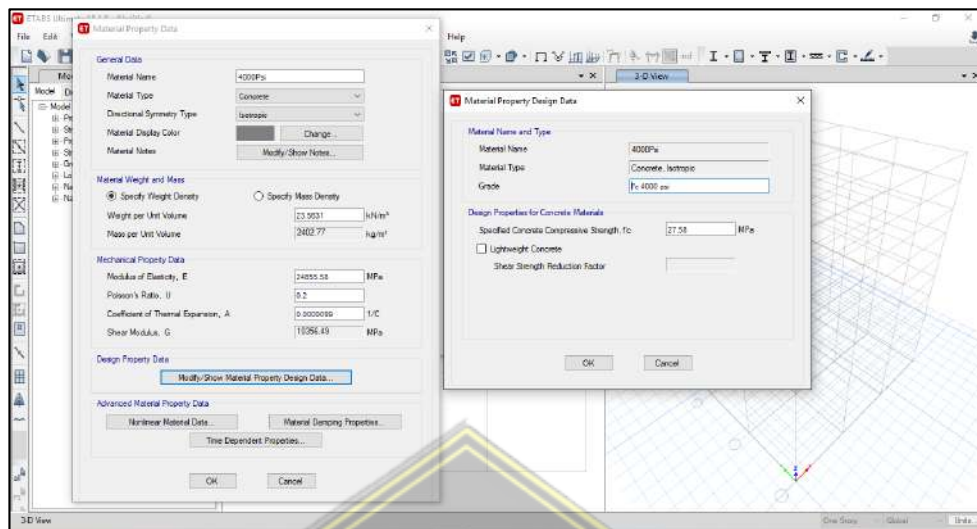
Gambar 3.4. Edit Grid

5. Tampilan *Grid* dan *Story*.



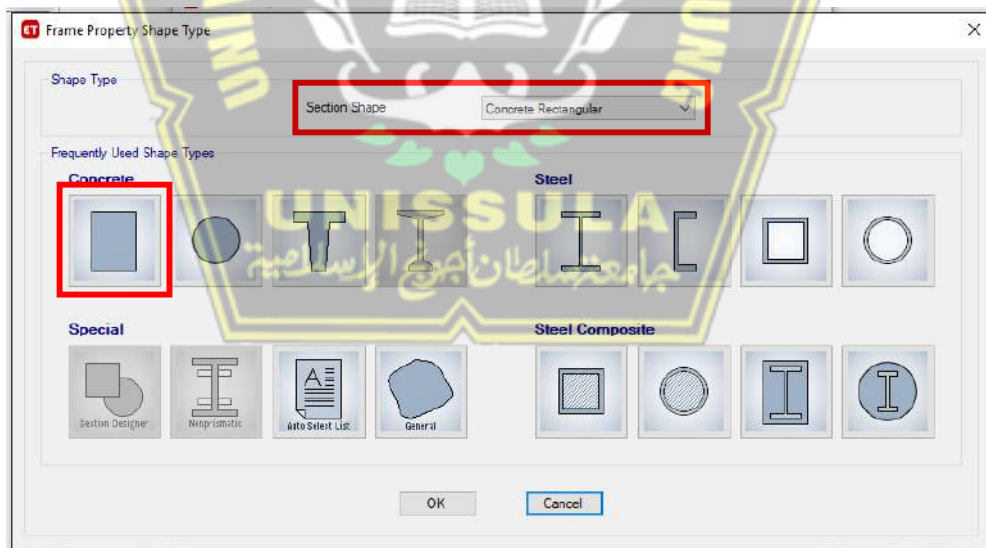
Gambar 3.5. Tampilan Grid dan Story

6. Untuk memasukkan jenis material : klik *Define* → klik *Material Properties* → pilih *4000 Psi* (untuk beton) → klik *Modify/Show Material* → klik OK.



Gambar 3.6. *Input Material Properties*

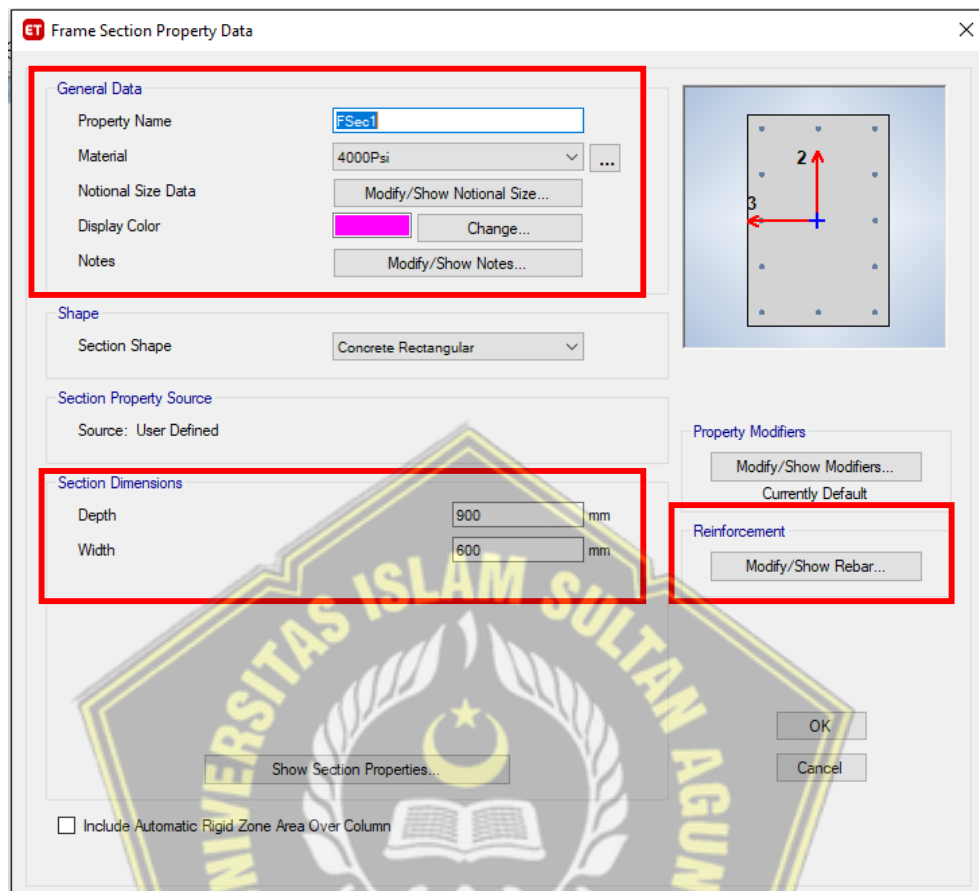
7. Untuk memasukkan dimensi kolom/balok : klik *Define* → klik *Section Properties* → klik *Frame Sections* → klik *Add New Property* → pilih *Concrete Rectangular* pada bagian *Section Shape* → pilih bentuk penampang kolom/balok yang direncanakan.



Gambar 3.7. *Section Shape Concrete*

8. Ubah nama kolom/balok pada bagian *Property Name* → tentukan mutu beton untuk kolom/balok pada bagian *Material* → tentukan dimensi kolom/balok yang

direncanakan pada *Depth* dan *Width* pada bagian *Section Dimensions* → klik OK.



Gambar 3.8. *Input Dimensi Kolom/Balok*

9. Untuk kolom : klik *Modify/Show Rebar* → pilih *P – M2 – M3 Design* pada bagian *Design Type* → tentukan jenis material untuk tulangan pada bagian *Rebar Material* → pilih *Reinforcement to be design* pada bagian *Check/Design*.

ET Frame Section Property Reinforcement Data

Design Type

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

Rebar Material

Longitudinal Bars: A615Gr60

Confinement Bars (Ties): A615Gr60

Reinforcement Configuration

- ☒ Rectangular
- ☐ Circular

Confinement Bars

- ☒ Ties
- ☐ Spirals

Check/Design

- ☐ Reinforcement to be Checked
- ☒ Reinforcement to be Designed

Longitudinal Bars

Clear Cover for Confinement Bars: 40 mm

Number of Longitudinal Bars Along 3-dir Face: 3

Number of Longitudinal Bars Along 2-dir Face: 5

Longitudinal Bar Size and Area: 20 mm, 314 mm²

Corner Bar Size and Area: 20 mm, 314 mm²

Confinement Bars

Confinement Bar Size and Area: 10 mm, 79 mm²

Longitudinal Spacing of Confinement Bars (Along 1-Axis): 150 mm

Number of Confinement Bars in 3-dir: 3

Number of Confinement Bars in 2-dir: 3

OK Cancel

Gambar 3.9. Reinforcement Data Column

10. Untuk rancangan balok : klik *Modify/Show Rebar* → pilih *M3 Design Only* pada bagian *Design Type* → tentukan jenis material untuk tulangan pada bagian *Rebar Material* → pilih *Reinforcement to be design* pada bagian *Check/Design*.

ET Frame Section Property Reinforcement Data

Design Type

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

Rebar Material

Longitudinal Bars: A615Gr60

Confinement Bars (Ties): A615Gr60

Cover to Longitudinal Rebar Group Centroid

Top Bars: 60 mm

Bottom Bars: 60 mm

Reinforcement Area Overwrites for Ductile Beams

Top Bars at I-End: 0 mm²

Top Bars at J-End: 0 mm²

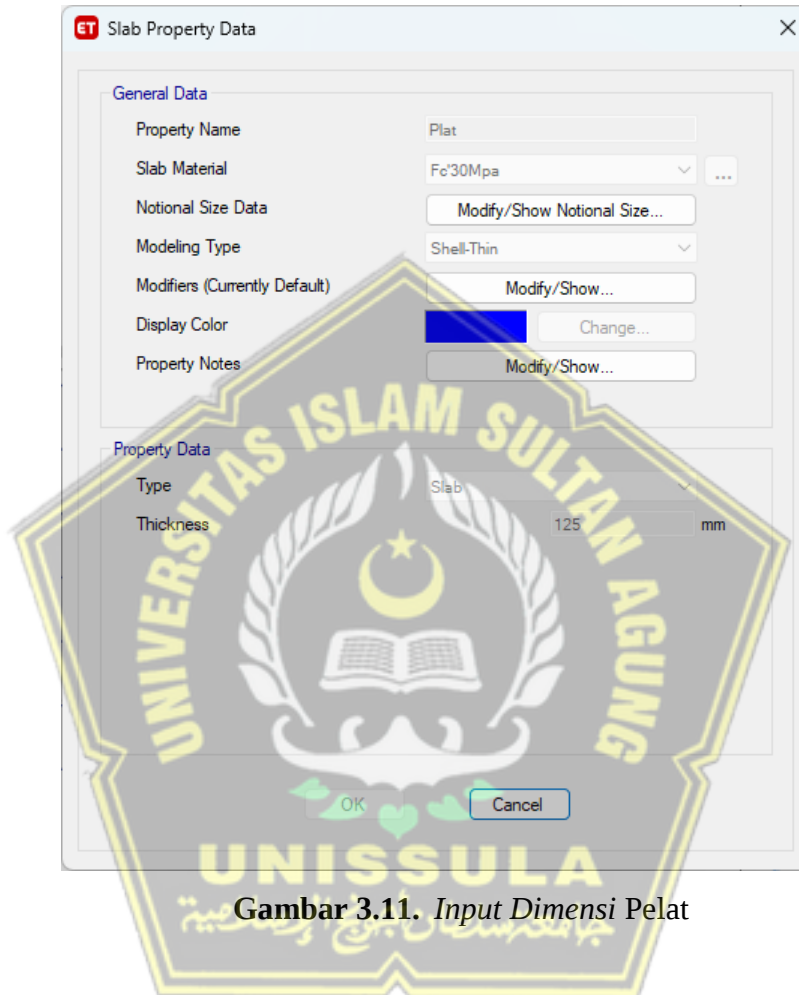
Bottom Bars at I-End: 0 mm²

Bottom Bars at J-End: 0 mm²

OK Cancel

Gambar 3.10. Reinforcement Beam Data

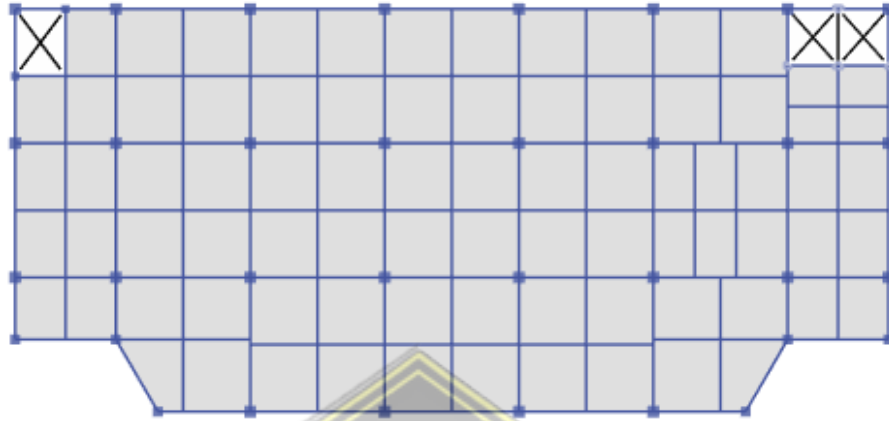
11. Untuk memasukkan dimensi pelat : klik *Define* → klik *Section Properties* → klik *Slab Sections* → klik *Add New Property* → ubah nama pelat pada bagian *Property Name* → tentukan mutu beton untuk pelat pada bagian *Slab Material* → pilih *Membrane* pada bagian *Modeling Type* → pilih *Slab* pada bagian *Type* → tentukan tebal pelat pada bagian *Thickness* → klik OK



Gambar 3.11. *Input Dimensi Pelat*

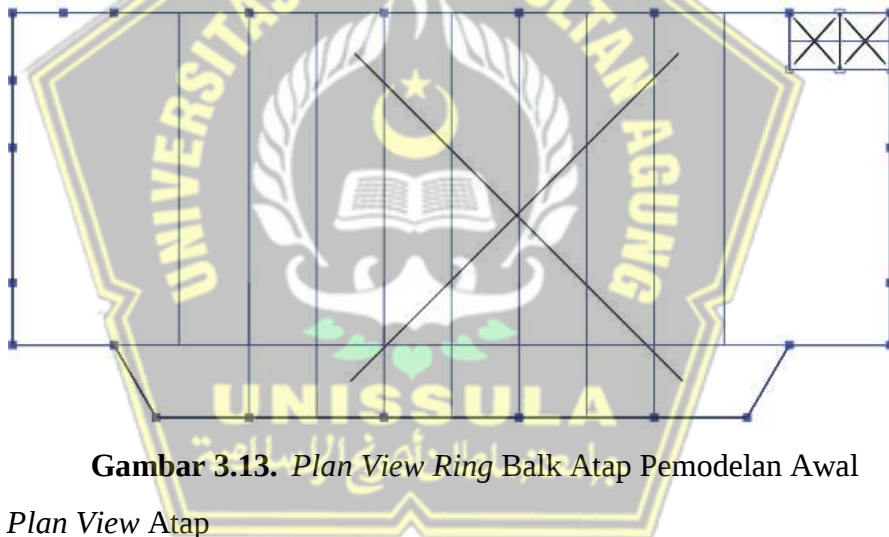
12. Tampilan dari pemodelan struktur bangunan pada perangkat lunak ETABS V20.0.0 adalah sebagai berikut:

- *Plan View Lantai 1-7*



Gambar 3.12. *Plan View Lantai 1-7 Pemodelan Awal*

- *Plan View Ring Balk Atap*



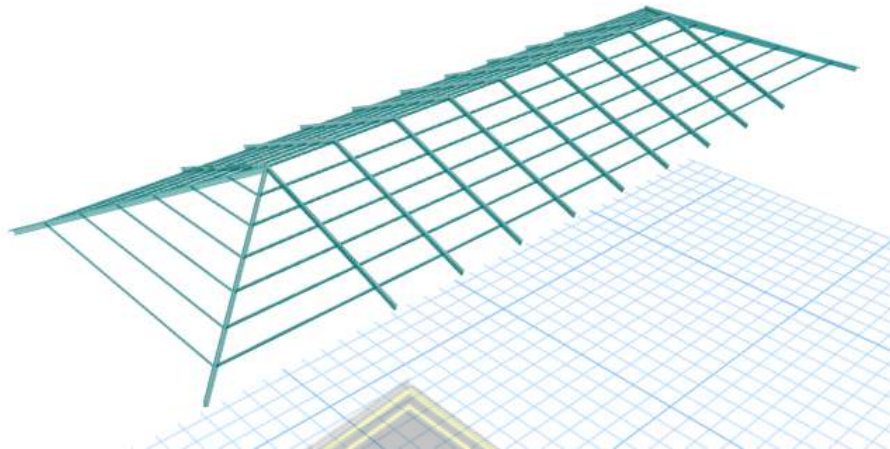
Gambar 3.13. *Plan View Ring Balk Atap Pemodelan Awal*

- *Plan View Atap*



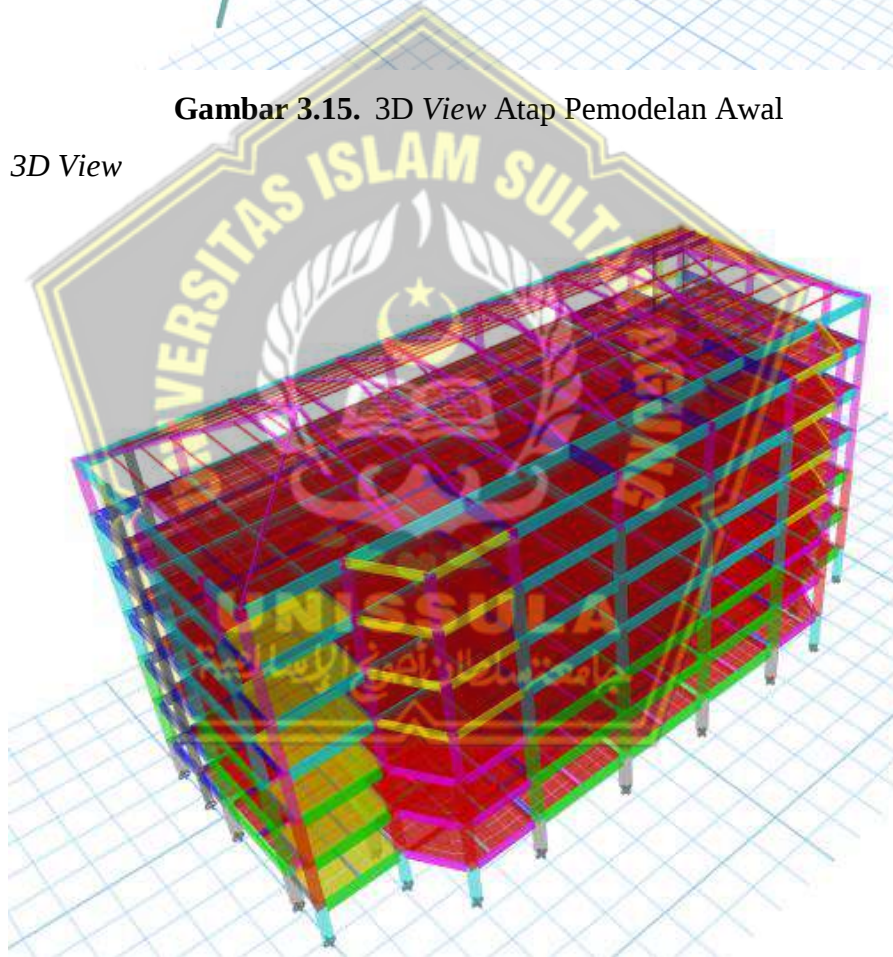
Gambar 3.14. *Plan View Atap Pemodelan Awal*

- 3D View Atap



Gambar 3.15. 3D View Atap Pemodelan Awal

- 3D View



Gambar 3.16. 3D View Pemodelan Awal

3.3.1.2. Pembebanan Struktur

Pembebanan struktur meliputi pembebanan statik berupa beban mati (*dead load*) dan beban hidup (*live load*) serta pembebanan gempa (*earthquake load*).

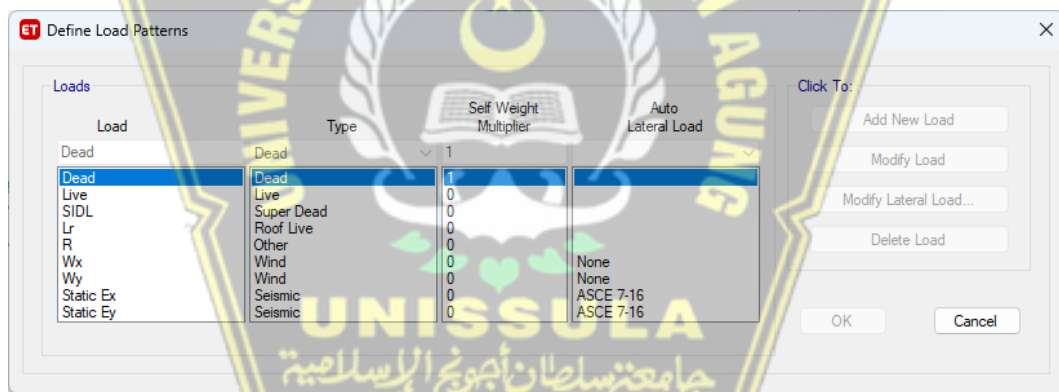
a) Pembebanan Statik

Pembebanan Statik Ekuivalen terdiri dari beban keseluruhan yang bekerja dalam struktur yaitu beban mati dan beban hidup. Pada tahap pembebanan analisis struktur adalah Beban Mati Struktur, Beban Mati Tambahan dan Beban Hidup.

Beban Mati struktur didefinisikan dengan beban yang diakibatkan oleh komponen elemen struktur penyusun rancangan bangunan seperti kolom, balok dan pelat. Beban Mati tambahan adalah beban yang diakibatkan elemen tambahan seperti lantai serta *mechanical electrical plumbing* bangunan karena sifatnya yang semi permanen.

Beban Hidup didefinisikan sebagai beban yang terjadi disebabkan oleh hunian atau penggunaan pada gedung serta aktivitas termasuk beban pada lantai yang berasal dari barang-barang yang dapat berpindah tempat dan komponen mesin serta peralatan yang tidak merupakan bagian yang tak terpisahkan dari struktur bangunan.

Pendefinisian beban statik pada ETABS V20.0.0 terdapat pada menu *Define – Load Patterns*. Perhatikan kotak dialog *Define Load Patterns* pada Gambar 3.17.



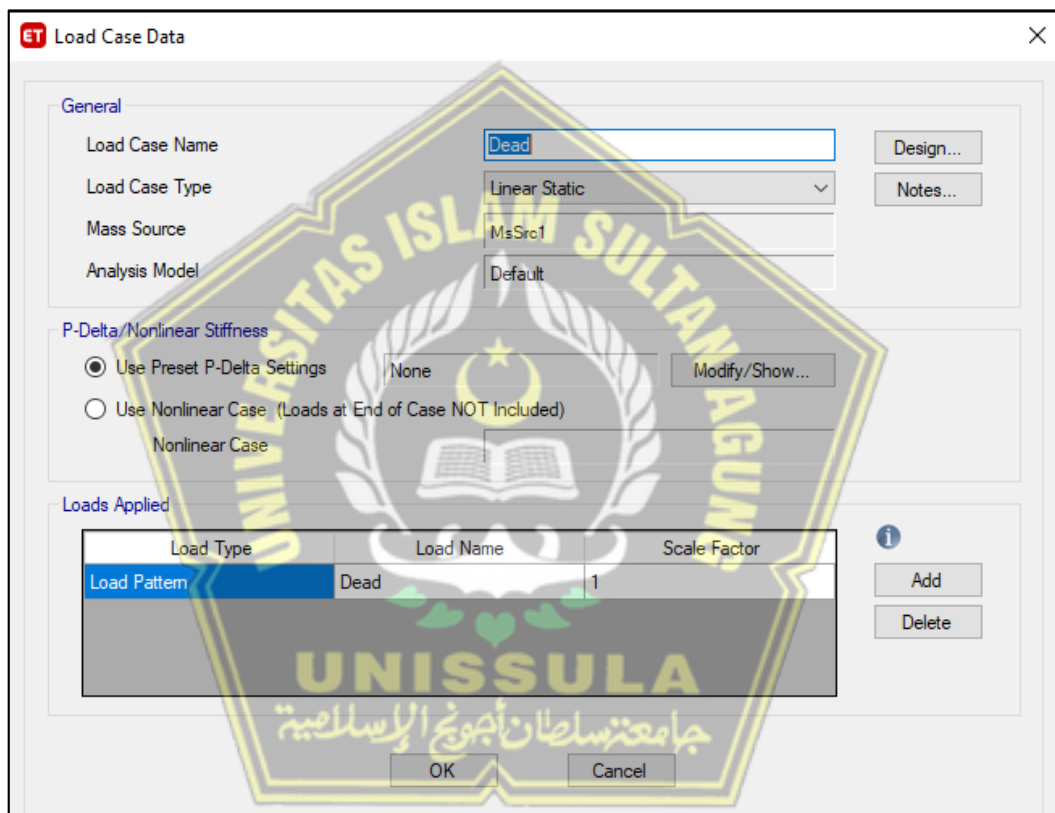
Gambar 3.17. *Define Load Patterns*

- Pada *Load : Dead*, bisa merubah nama *Dead* menjadi *DL (Dead Load)* lalu klik *Modify Load*. *Type* untuk beban mati adalah *Dead* dan *Self Weight Multiplier* untuk beban mati adalah 1 (untuk beban mati struktural yang akan dihitung secara otomatis oleh ETABS dan juga memasukkan beban mati tambahan yaitu akan memasukkannya sendiri).
- Pada *Load : Live*, bisa merubah nama *Live* menjadi *LL (Live Load)* lalu.click to *Modify Load*. *Type* untuk beban hidup adalah *Live* dengan *Self Weight Multiplier* = 0.(karena akan kita *input* sendiri beban hidup sesuai dengan fungsi bangunan).

- Jika ingin membedakan beban mati tambahan sebagai beban statis tersendiri, dapat *input* beban SIDL dengan *Type Super Dead* dan *Self Weight Multiplier* = 0 kemudian kita tambahkan dengan klik *Add New Load*.

Setelah mendefinisikan beban pada *load patterns* kita dapat mengecek hasil *input* pada menu *Define – Load Cases* yang dapat dilihat pada Gambar 3.18.

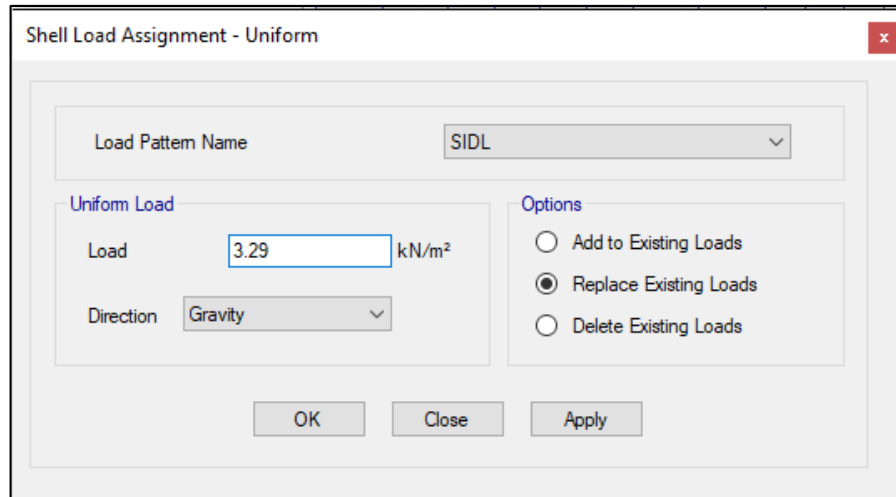
Pilih *Load Case Name Dead* → klik *Modify/Show Case* → pada kotak dialog *Load Case Data* di bagian *Load Case Name* ganti menjadi *DL* agar sesuai dengan nama pada *Load Patterns* sebelumnya → klik *OK*.



Gambar 3.18. *Load Case Data*

- *Input* Beban Mati Tambahan

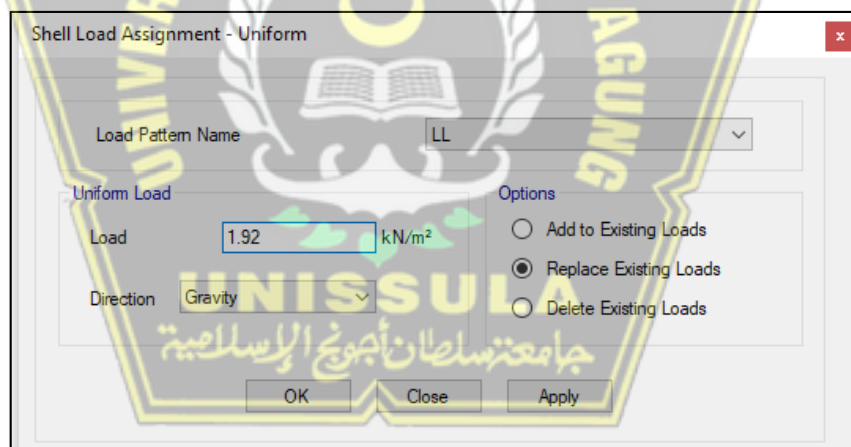
Klik menu *Select* → pilih *Select* → pilih *Properties* → klik *Slab Sections* → pilih pelat yang akan dimasukan beban → klik *Select* → klik *Close*. Klik menu *Assign* → pilih *Shell Loads* → klik *Uniform* → *input* beban → klik *Apply* → klik *OK*



Gambar 3.19. Input Beban Mati Tambahan

- *Input Beban Hidup*

Klik menu *Select* → pilih *Select* → pilih *Properties* → klik *Slab Sections* → pilih pelat yang akan dimasukan beban → klik *Select* → klik *Close*. Klik menu *Assign* → pilih *Shell Loads* → klik *Uniform* → input beban → klik *Apply* → klik *OK*

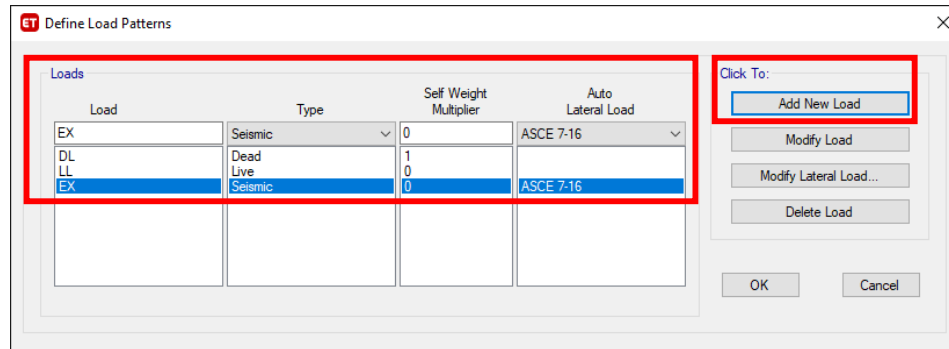


Gambar 3.20. Input Beban Hidup

b) Pembebanan Gempa

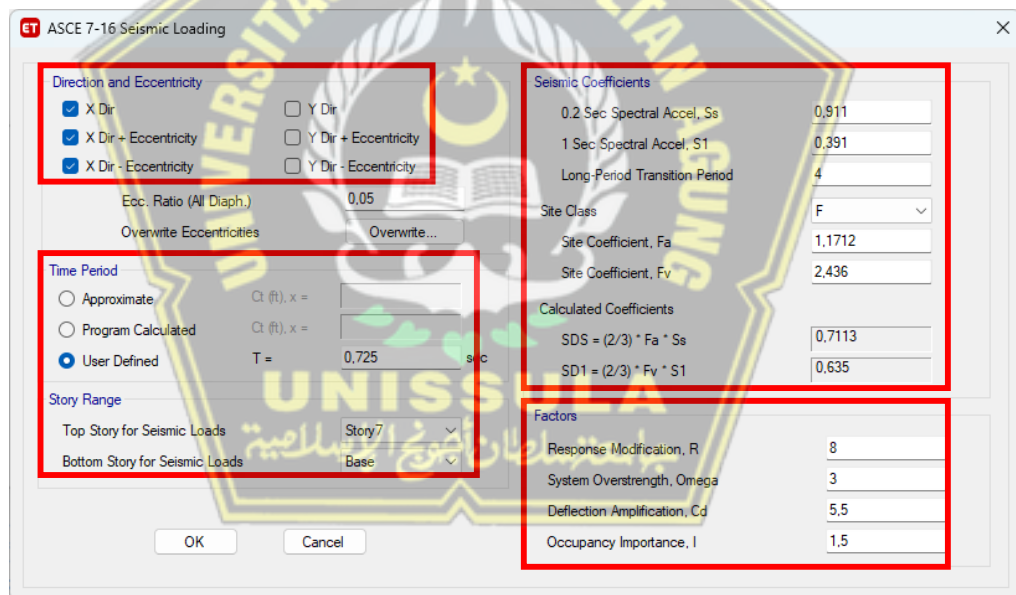
Langkah – langkah untuk memasukkan Pembebanan Gempa Statik Ekuivalen pada ETABS adalah sebagai berikut:

1. Klik *Define* → klik *Load Patterns* → input Gaya Lateral Arah X (EX) seperti Gambar 3.21 → klik *Add New Load* → klik *OK*



Gambar 3.21. Input Gaya Lateral EX

- *Load* = isi EX dengan gempa statik arah X
 - *Type* = *Seismic* (gempa)
 - *Self Weight Multiplier* = 0
 - *Auto Lateral Load* = ASCE 7 – 16 (Berdasarkan SNI 1726:2019)
2. Klik *Modify Lateral Load* sehingga tampil kotak dialog seperti Gambar 3.22 → input sesuai Gambar 3.22



Gambar 3.22. ASCE 7 – 16 Seismic Loading X-Direction (Time Period Program)

- *Direction and Eccentricity* : pilih *X Dir*
- Metode Pemilihan *Time Period* :
 - a. *Approximate* = apabila memilih metode ini maka perhitungan *Time Period* program berdasarkan formula perioda pendekatan atau perioda minimum sesuai dengan fungsi $C_t(ft)$, x .

b. *Program Calculated* = apabila memilih metode ini maka program akan langsung menghitung otomatis waktu getar/periode desain dengan mempertimbangkan batas atas dan batas bawah periode.

c. *User Defined* = apabila memilih metode ini kita dapat langsung memberikan nilai periode desain yang telah kita hitung sebelumnya.

Penentuan nilai C_t dan x dalam fungsi C_t (ft), x dapat dilihat pada Tabel 3.1

Tabel 3.1. Parameter Periode Pendekatan C_t dan x

Tipe Struktur	C_t	x
Sistem rangka pemikul momen dimana rangka memikul 100 % gaya seismik yang disyaratkan dan tidak dilingkupi atau dihubungkan dengan komponen yang lebih kaku dan akan mencegah rangka dari defleksi jika dikenai gaya seismik:		
• Rangka baja pemikul momen	0,028 (0,0724)	0,8
• Rangka beton pemikul momen	0,016 (0,0466)	0,9
Rangka baja dengan bresing eksentris	0,03 (0,0731)	0,75
Rangka baja dengan bresing terkekang terhadap tekuk	0,03 (0,0731)	0,75
Semua sistem struktur lainnya	0,02 (0,0488)	0,75

(sumber : Tabel 18 SNI 1726:2019)

Berdasarkan tabel di atas, untuk *Concrete moment-resisting frames* nilai $C_t = 0,02$ dengan nilai *metric ekuivalen* (0,0488) dan $x = 0,75$. Maka untuk sistem Sistem Ganda, fungsi periode pendekatannya adalah C_t (ft), $x = 0,0488; 0,75$.

- *Story Range* :

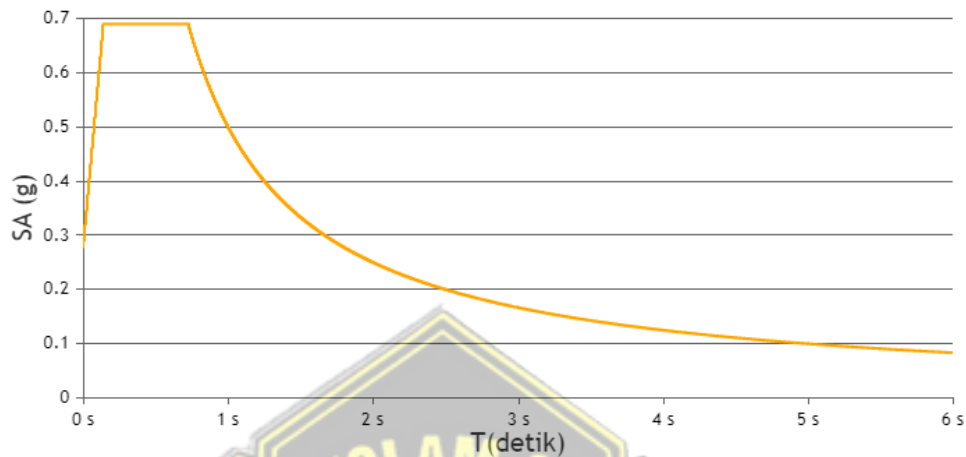
- Top Story for Seismic Loads* = Story 7 (Lantai paling atas)
- Bottom Story for Seismic Loads* = Base (Lantai dasar penjepitan lateral)

- *Factors* :

- Response Modification (R)* = 7
- System Overstrength (Ω_0)* = 2,5
- Deflection Amplification (C_d)* = 5,5
- Occupancy Important (I_e)* = 1,5

- *Seismic Coefficients* :

Spektrum Respons Desain Kota Semarang di daerah Terboyo Kulon didapatkan hasil berdasarkan situs Desain Spektra Indonesia dapat dilihat pada Gambar 3.23.



Gambar 3.23. Spektrum Respons Desain Kota Semarang

Parameter spektral tanah sedang Kota Semarang berdasarkan web Desain Spektra Indonesia dapat dilihat pada Gambar 3.24.

Kelas	SD - Tanah Sedang	T0(detik)	Ts(detik)	Sds(g)	Sd1(g)
Rentang T(s)	Value: 6	0.14	0.71	0.70	0.50
PGA MCEG	0.4142	(g) bedrock			
SS MCEr	0.9374	(g) bedrock			
S1 MCEr	0.3913	(g) bedrock			
TL	20	Detik			

Gambar 3.24. Parameter Spektral Tanah Sedang Kota Semarang

Keterangan:

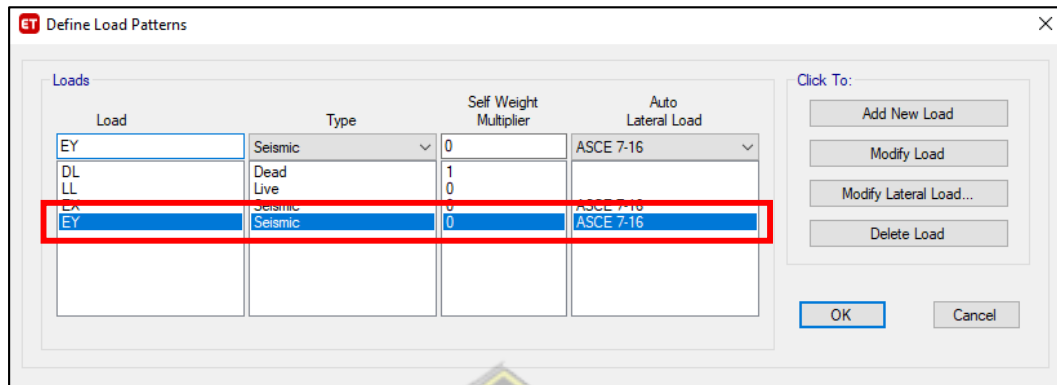
0,2 Sec Spectral Accel (S_s) = 0,7273

1 Sec Spectral Accel (S_1) = 0,3322

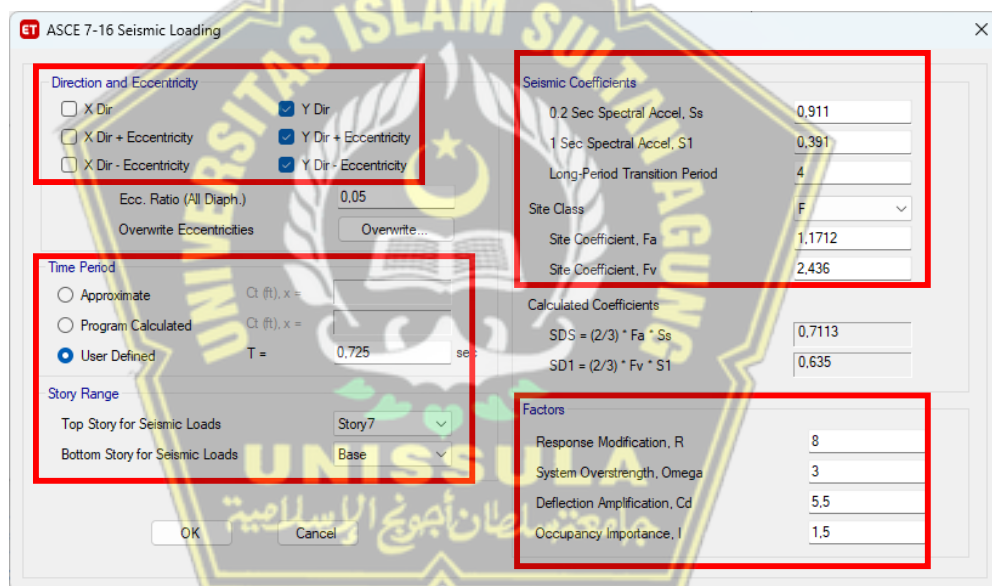
Long Period-Transition Period = 20 sec

Site Class = D (Situs SE, Tanah Lunak)

Langkah-langkah untuk membuat beban gempa statik arah-Y hampir sama seperti beban gempa statik arah-X. Perbedaannya dapat dilihat pada Gambar 3.25 dan Gambar 3.26.



Gambar 3.25. *Input Gaya Lateral EY*



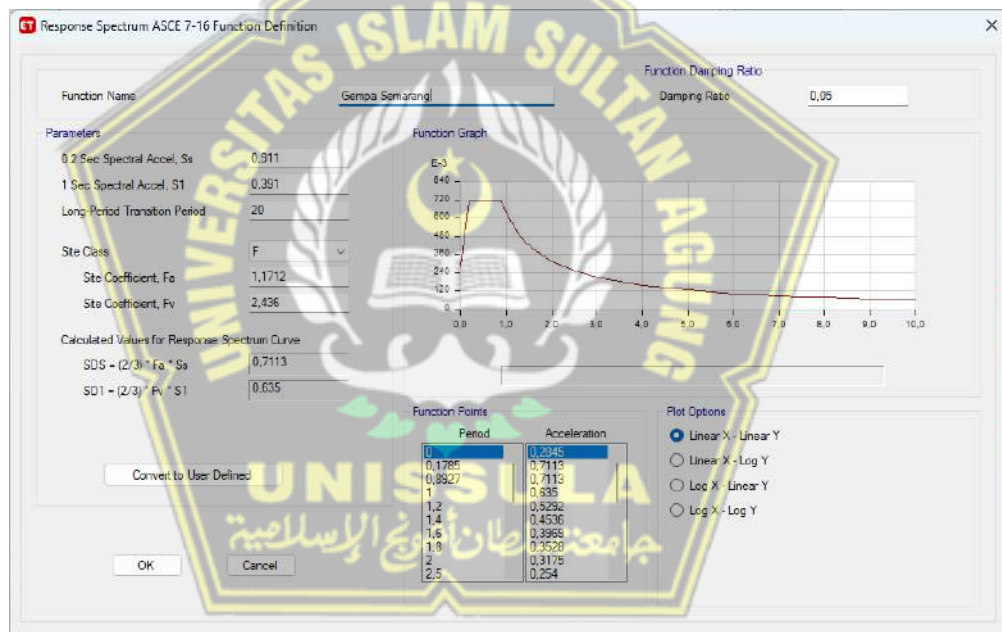
Gambar 3.26. *ASCE 7 – 16 Seismic Loading Y-Direction (Time Period Program)*

Selain pembebanan gempa statik ekuivalen, terdapat pula pembebanan gempa dinamik respons spektral. Pembebanan gempa dengan respon spektral bertujuan untuk mengetahui perilaku dinamik pola gaya geser bangunan tinggi yang dipengaruhi oleh banyaknya kontribusi moda/modal. Analisis gempa dinamis dalam perencanaan harus disertakan untuk bangunan dengan ketidakaturan. Perilaku dinamis akan menentukan dan dapat menjadi standar untuk mendapatkan

nilai gaya geser desain seiring dengan bertambahnya ketinggian bangunan dan jumlah mode kontribusi yang bertambah. Hasil analisis gempa dinamik dibandingkan dengan hasil analisis statik ekuivalen, sehingga diperoleh nilai gaya geser dengan distribusi yang baik sepanjang tinggi bangunan..

Beban gempa dinamik respons spektral dapat dianalisis langsung menggunakan program ETABS dengan terlebih dahulu membuat kurva respons spektrum sesuai dengan parameter spektral luas bangunan dan jenis tanah. Langkah-langkah untuk memasukkan respons spektral pemuatan gempa dinamis pada ETABS sebagai berikut:

1. Klik *Define* → pilih *Functions* → klik *Response Spectrum* → pilih *ASCE 7-16* pada bagian *Choose Function Type to Add* → klik *Add New Function* → isi kotak dialog *Response Spectrum ASCE 7-16* sesuai Gambar 3.27 → klik *OK*



Gambar 3.27. Respon Spektrum dengan ASCE 7-16

Keterangan:

Function Name : ASCE 7-16 SPEKTRA SEMARANG

Damping Ratio : 0,05 (5%)

0,2 Sec Spectral Accel (S_s) : 0,7273

1 Sec Spectral Accel (S_1) : 0,3322

Site Class : D (tanah lunak, situs SE)

Plot Options : Linear X – Linear Y

2. Klik *Define* → *Load Cases* → klik *Add New Case* → isi kotak dialog *Load Case Data* sesuai Gambar 3.28 → klik OK

ET Load Case Data

General

Load Case Name: Unscaled X

Load Case Type: Response Spectrum

Mass Source: Previous (MsSrc1)

Analysis Model: Default

Loads Applied

Load Type	Load Name	Function	Scale Factor
Acceleration	U1	Gempa Semarang	1838,75

Other Parameters

Modal Load Case: Modal

Modal Combination Method: CQC

☐ Include Rigid Response

Rigid Frequency, f1:

Rigid Frequency, f2:

Periodic + Rigid Type:

Earthquake Duration, td:

Directional Combination Type: SRSS

Absolute Directional Combination Scale Factor:

Modal Damping: Constant at 0,05

Diaphragm Eccentricity: 0,05 for All Diaphragms

OK Cancel

Gambar 3.28. *Load Case Data SPEC-X*

Beban Gempa Dinamik Respons Spektrum Arah X :

- *Load Case Name* : SPEC-X
- *Load Case Type* : pilih *Response Spectrum*
- *Loads Applied* : pilih *Add* pada sebelah kanan tabel.
 - a. *Load Type* = *Acceleration*
 - b. *Load Name* = U1 (arah X)
 - c. *Function* = pilih *ASCE 7-16 SPEKTRA SEMARANG*
 - d. *Scale Factor* = $G \times I_e/R = 9810 \text{ mm/sec}^2 \times 1,5/7 = 1838,75$

- Other Parameters :

- a. Modal Load Case = Modal
- b. Modal Combination Method = pilih asumsi CQC
- c. Directional Combination Type = pilih asumsi SRSS
- d. Modal Damping = Constant at 0,05 (5%)

Langkah-langkah untuk membuat beban gempa dinamik respons spektrum arah Y hampir sama seperti beban gempa dinamik respons spektrum arah-X. Perbedaannya dapat dilihat pada Gambar 3.29.

ET Load Case Data

General

Load Case Name: Unscaled Y

Load Case Type: Response Spectrum

Mass Source: Previous (MsSrc1)

Analysis Model: Default

Loads Applied

Load Type	Load Name	Function	Scale Factor
Acceleration	U2	Gempa Semarang	1838,75

Other Parameters

Modal Load Case: Modal

Modal Combination Method: CQC

☐ Include Rigid Response

Rigid Frequency, f1:

Rigid Frequency, f2:

Periodic + Rigid Type:

Earthquake Duration, td:

Directional Combination Type: SRSS

Absolute Directional Combination Scale Factor:

Modal Damping: Constant at 0,05

Diaphragm Eccentricity: 0,05 for All Diaphragms

Buttons: Design..., Notes..., Add, Delete, Advanced, Modify/Show..., OK, Cancel

Gambar 3.29. Load Case Data SPEC-Y

3.3.1.3. Analisis Struktur

Analisis struktur berupa gaya-gaya dalam bertujuan untuk mengetahui gaya-gaya dalam akibat beban yang bekerja pada struktur yang selanjutnya akan digunakan untuk menghitung kebutuhan tulangan. Gaya dalam meliputi gaya geser, gaya aksial, dan momen. Selain itu, juga digunakan untuk menentukan besarnya perpindahan lateral. Analisis gaya dalam menggunakan bantuan program ETABS.

Analisis struktur terhadap beban gempa dilakukan menggunakan Respons Spektrum untuk memperoleh kurva respons spektrum sesuai dengan lokasi gempa berdasarkan situs yang berasal dari Direktorat Jenderal Kementerian PUPR yaitu rsa.ciptakarya.pu.go.id/2021. Nilai F_a dan F_v dibutuhkan dalam perhitungan analisis respons spektrum.

Berdasarkan SNI 1726-2019 struktur bangunan dapat dikategorikan sebagai bangunan gedung beraturan dan tidak beraturan. Kriteria SNI harus didasari pada konfigurasi struktur bangunan gedung secara horizontal dan vertikal. Menjelaskan bahwa bangunan gedung yang tidak beraturan adalah bangunan yang umumnya memiliki lebih dari 1 komponen massa atau balok dengan denah struktur yang tidak sederhana, meskipun tetap simetris, baik 2 arah maupun 1 arah.

3.4.1. Penentuan Pemilihan Struktur

Setelah melakukan analisis untuk mengetahui permodelan yang akan digunakan untuk tahap perancangan ada beberapa peraturan tentang perancangan struktur gedung tahan gempa yang sesuai dengan SNI 1726:2019 agar permodelan tersebut dapat lanjut dalam tahap perancangan, yaitu:

- Permodelan harus menerima konsekuensi pembesaran torsi apabila mengalami ketidakberaturan horizontal.
- Permodelan harus memenuhi ketentuan syarat Sistem Ganda
- Permodelan harus memenuhi syarat Simpangan Antar Lantai
- Permodelan merupakan struktur dengan konsekuensi pembesaran torsi paling besar akan tetapi tetap memenuhi syarat ketentuan struktur gedung tahan gempa sesuai dengan SNI 1726:2019

3.4.2. Tahapan Perancangan

Elemen struktur atas berupa pelat, balok, kolom, hubungan balok-kolom (*joint*), dan dinding geser dianalisis agar memperoleh gaya-gaya dalam untuk mendesain penulangan untuk menahan gaya yang terjadi.

3.4.1.1. Tahapan Perancangan Pelat

Ada tahapan-tahapan yang perlu untuk dilakukan dalam perancangan pelat, yaitu:

- Menentukan properti material dan penampang pelat
- Pengambilan data gaya dalam pelat dari ETABS
- Mendesain penulangan lentur pelat
- Pengecekan kapasitas geser pelat
- Pengecekan lendutan pelat
- Rekapitulasi hasil penulangan pelat

3.4.1.2. Tahapan Perancangan Balok

Ada tahapan-tahapan yang perlu untuk dilakukan dalam perancangan balok, yaitu:

- Menentukan properti material dan penampang balok
- Pengambilan data gaya dalam balok dari ETABS
- Mendesain penulangan longitudinal balok
- Mendesain penulangan transversal balok
- Mendesain penulangan torsi balok
- Rekapitulasi hasil penulangan balok

3.4.1.3. Tahapan Perancangan Kolom

Ada tahapan-tahapan yang perlu untuk dilakukan dalam perancangan kolom, yaitu:

- Menentukan properti material dan penampang kolom
- Pengambilan data gaya dalam kolom dari ETABS
- Mendesain penulangan longitudinal kolom
- Mendesain penulangan transversal kolom
- Rekapitulasi hasil penulangan kolom

3.4.1.4. Tahapan Perancangan Strong Column – Weak Beam

Ada tahapan-tahapan yang perlu untuk dilakukan dalam perancangan *Strong Column-Weak Beam*, yaitu:

- Menentukan nilai momen kapasitas balok ($\sum M_{nb}$)
- Menentukan nilai momen kapasitas kolom ($\sum M_{nc}$)
- Pengecekan syarat $\sum M_{nc} \geq 1,2 \sum M_{nb}$

3.4.1.5. Tahapan Perancangan Hubungan Balok – Kolom (Joint)

Ada tahapan-tahapan yang perlu untuk dilakukan dalam perancangan hubungan balok-kolom (*joint*), yaitu:

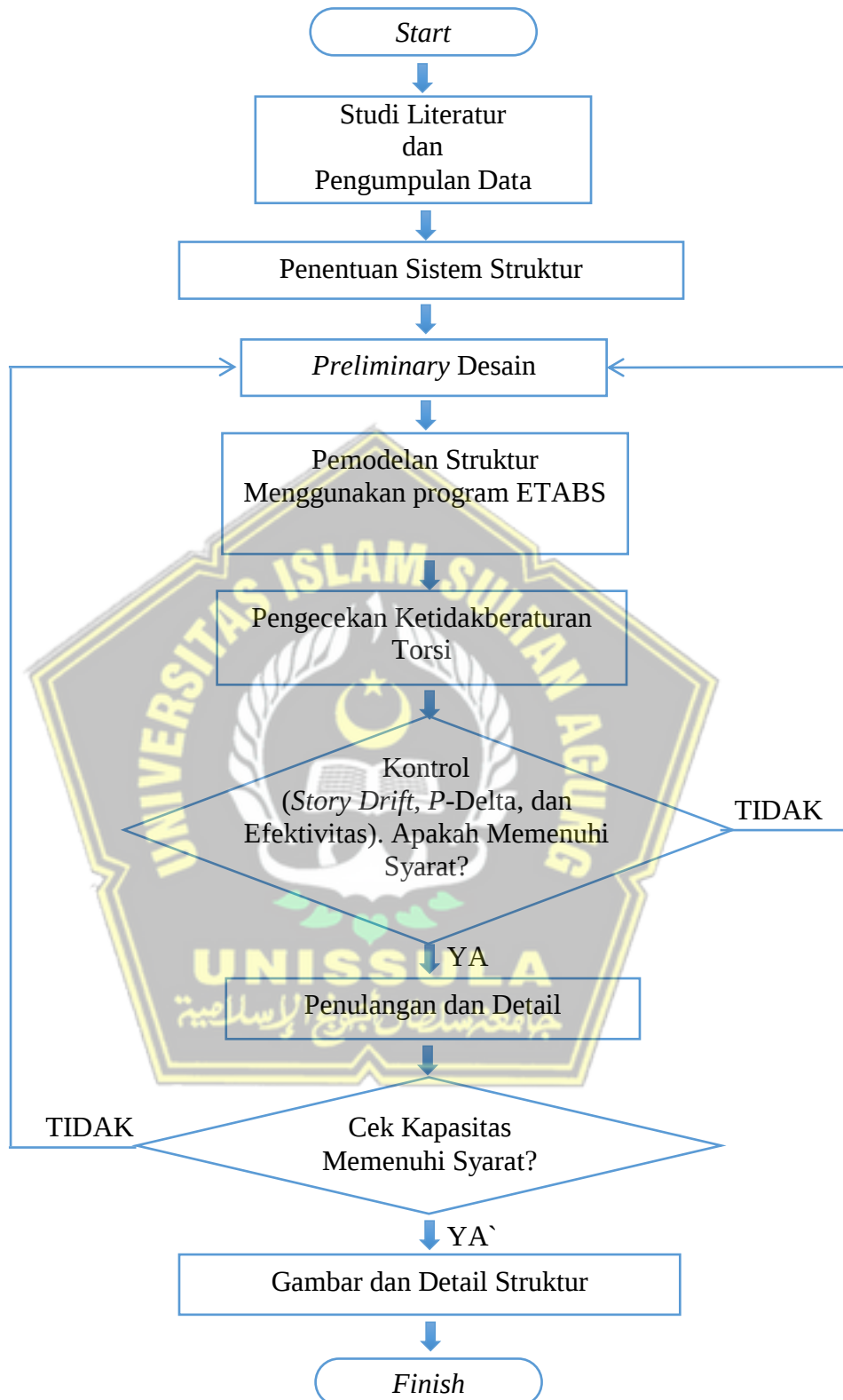
- Pengecekan syarat panjang *joint*
- Menentukan tulangan geser untuk *confinement*
- Menentukan gaya geser pada *joint*
- Menentukan gaya geser pada kolom
- Menentukan kuat geser pada *joint*
- Menentukan kuat geser yang dikekang keempat sisi
- Pengecekan syarat kuat geser terkekang lebih besar dari gaya geser *joint*

3.4.1.6. Tahapan Perancangan Dinding Geser

Ada tahapan-tahapan yang perlu untuk dilakukan dalam perancangan dinding geser, yaitu:

- Menentukan properti material dan penampang Dinding Geser
- Pengambilan data gaya dalam dinding geser dari ETABS
- Pengecekan syarat geometri Dinding Geser
- Menentukan kebutuhan tulangan minimum Dinding Geser
- Pengecekan terhadap gaya dalam aksial-lentur (*SPCcolumn*)
- Pengecekan kapasitas geser Dinding Geser
- Pengecekan kebutuhan elemen batas khusus Dinding Geser
- Mendesain penulangan elemen batas khusus Dinding Geser
- Rekapitulasi hasil penulangan Dinding Geser.

3.4. Diagram Alir



Gambar 3.30. Diagram Alir

BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Data Struktur Gedung

4.1.1. Deskripsi Umum Struktur

Studi ini dilakukan pada gedung bertingkat 7 lantai yang akan dirancang ulang dengan mengatur tata letak kolom dan shearwall. Dalam proses perancangan ulang Penulis melakukan *trial and error* dengan beberapa percobaan hingga mendapatkan 3 permodelan yang terbaik. Dari 3 permodelan ini masing masing Gedung memiliki karakteristik torsi bawaan yang berbeda, mulai dari tanpa ada nya torsi hingga mengalami ketidakberaturan torsi dengan mendekati Kategori 1b.

Pada model pertama, dirancang ulang dengan Sistem Ganda (SRPMK dan SDKS) yang dirancang sedemikian rupa agar tidak terjadi ketidakberaturan torsi. Pada model kedua, dirancang ulang dengan Sistem Ganda (SRPMK dan SDKS) yang mengalami torsi lebih dari 1,2 atau permodelan tersebut terjadi ketidakberaturan 1a. Pada model ketiga dirancang ulang dengan Sistem Ganda (SRPMK dan SDKS) dengan mengurangi beberapa kekuatan struktur agar permodelan mengalami ketidakberaturan torsi mendekati Kategori 1b, atau lebih dari 1,4 namun perlu ada beberapa peraturan agar sistem struktur tersebut memenuhi standar SNI 1726-2019 tentang Ketentuan Bangunan Gedung Tahan Gempa.

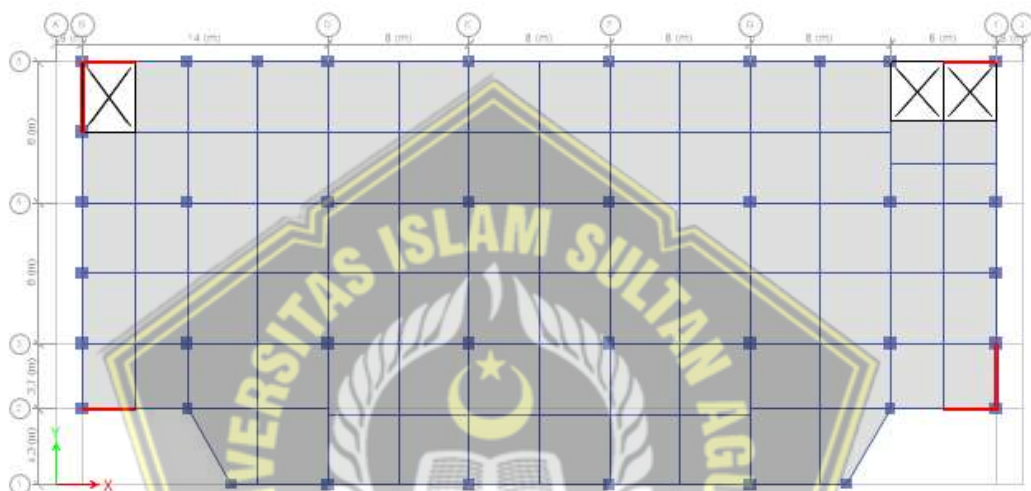
Bangunan ini berfungsi sebagai gedung perkuliahan yang berlokasi di Terboyo Kulon, Kec. Genuk, Kota Semarang, Jawa Tengah. Bangunan ini terdiri dari 7 lantai yang berfungsi sebagai ruang kelas perkuliahan. Secara umum, bangunan ini dirancang dengan material beton bertulang. Bangunan ini berbentuk persegi panjang dengan ketinggian total dengan atap yaitu 31,05 meter. Data model struktur gedung dapat dilihat pada Tabel 4.1.

Tabel 4. 1. Data Model Struktur Gedung

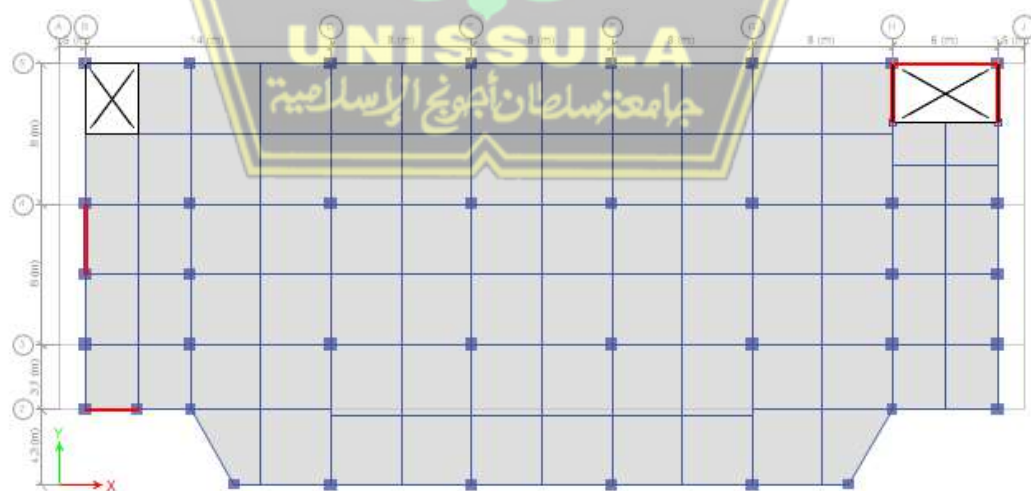
Fungsi Bangunan	Gedung Perkuliahan
Lokasi	Terboyo Kulon, Semarang
Jumlah Lantai	7 Lantai
Tinggi Total	31,05 m

Sistem Struktur 1	Sistem Ganda (SRPMK dan SDSK) tanpa torsi
Sistem Struktur 2	Sistem Ganda (SRPMK dan SDSK) dengan torsi Kategori 1a
Sistem Struktur 3	Sistem Ganda (SRPMK dan SDSK) dengan torsi mendekati Kategori 1b

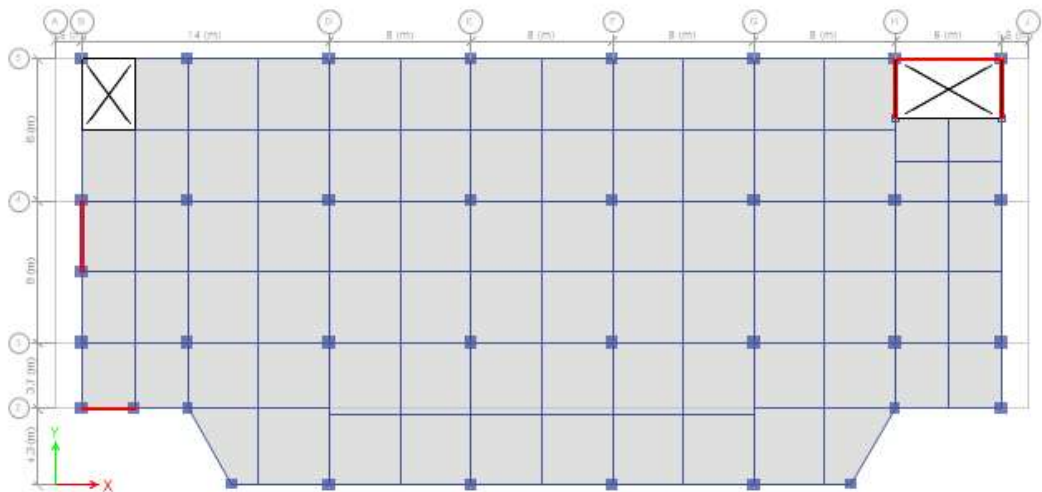
Berikut Perancangan sistem struktir 1,2 dan 3 dapat dilihat pada Gambar 4.1, Gambar 4.2 dan Gambar 4.3 sebagai berikut:



Gambar 4. 1. Denah Perancangan Sistem Struktur 1



Gambar 4. 2. Denah Perancangan Sistem Struktur 2



Gambar 4. 3. Denah Perancangan Sistem Struktur 3

Berikut data tinggi antar lantai dan spesifikasi material yang digunakan :

- Tinggi antar lantai, sesuai Tabel 4.2.

Tabel 4. 2. Tinggi Antar Lantai Bangunan

Lantai	Tinggi Antar Lantai (m)
Lantai 1	3,3
Lantai 2	4
Lantai 3	4
Lantai 4	4
Lantai 5	4
Lantai 6	4
Lantai 7	4
Atap	3,1

- Spesifikasi material yang digunakan :
1) Mutu Baja Tulangan, sesuai Tabel 4.3

Tabel 4. 3. Mutu Baja Tulangan

No	Jenis Tulangan	f_y (MPa)	f_u (MPa)	f_{ye} (MPa)	f_{ue} (MPa)
1	BJTS ($D \geq 10$ mm)	420	620	462	682
2	BJTP ($\emptyset \leq 10$ mm)	240	370	264	407

2) Mutu Beton, sesuai Tabel 4.4

Balok, Pelat, Kolom dan Dinding Geser

Tabel 4. 4. Mutu Beton Balok, Pelat, Kolom dan Dinding Geser

f'_c	30	MPa
E	27081	MPa

Perhitungan modulus elastisitas (E) diperoleh berdasarkan Persamaan 4.1

$$E = 4700 \sqrt{f'_c} \text{ (MPa)} \dots\dots\dots(4.1)$$

4.1.2. Perancangan Awal Dimensi Struktur (*Preliminary Design*)

Perancangan awal dimensi pada elemen struktur (*preliminary design*) merupakan tahap awal Perancangan bangunan struktur tahan gempa berupa penentuan dimensi awal dari masing-masing elemen struktur berdasarkan standar SNI 2847:2019, yaitu Persyaratan Beton Struktural untuk Bangunan Gedung.

4.1.2.1. *Preliminary Elemen Pelat*

Perancangan awal dimensi pelat mengacu kepada panjang bentang rencana. Menurut SNI 2847:2019 Pasal 7.3 dan 8.3, standar minimum dimensi pelat 1 arah dan 2 arah dicantumkan pada Tabel 4.5.

Tabel 4. 5. Tebal Minimum Pelat 1 Arah

Kondisi Perlekatan	Tebal minimum pelat (h) ^[1]
Perlekatan Sederhana	$L/20$
Satu ujung menerus	$L/24$
Kedua ujung menerus	$L/28$
Kantilever	$L/10$

(sumber : Tabel 7.3.1.1 SNI 2847:2019)

Catatan:

L merupakan panjang bentang dalam mm

^[1]Berlaku untuk berat normal dan $f_y = 420$ MPa. Untuk kasus lain :

- 1) Untuk $f_y > 420$ MPa, persamaan pada Tabel 4.12 wajib dikalikan dengan $(0,4 + f_y / 700)$

- 2) Untuk pelat non prategang dari beton ringan dengan $w_c = 1440$ sampai 1840 kg/m^3 , persamaan pada Tabel 4.6 wajib dikalikan dengan nilai terbesar dari : a) $1,65 - 0,0003 w_c$ dan b) 1,09

Tabel 4. 6. Tebal Minimum Pelat 2 Arah

f_y (MPa) ^[1]	Tanpa Drop Panel			Dengan Drop Panel		
	Panel Eksterior		Panel Interior	Panel Eksterior		Panel Interior
	Tanpa Balok Tepi	Dengan Balok Tepi		Tanpa Balok Tepi	Dengan Balok Tepi	
280	$L_n/33$	$L_n/36$	$L_n/36$	$L_n/36$	$L_n/40$	$L_n/40$
420	$L_n/30$	$L_n/33$	$L_n/33$	$L_n/33$	$L_n/36$	$L_n/36$
520	$L_n/28$	$L_n/31$	$L_n/31$	$L_n/31$	$L_n/34$	$L_n/34$

(sumber : Tabel 8.3.1.1 SNI 2847:2019)

Pada penentuan tebal minimum pelat untuk 1 arah, yakni perbandingan sisi terpanjang dengan sisi terpendek lebih besar dari 2 digunakan rumus $L/28$ dengan L adalah sisi terpendek pelat. Sementara, pada penentuan tebal minimum pelat untuk 2 arah, yakni perbandingan sisi terpanjang dengan sisi terpendek lebih kecil dari 2 digunakan rumus $L_n/33$ dengan L_n adalah jarak bersih ke arah memanjang yang diukur dari muka ke muka tumpuan. Hasil *preliminary* elemen pelat pada perancangan bangunan 7 lantai ini dapat dilihat pada Tabel 4.7.

Tabel 4. 7. Hasil *Preliminary* Elemen Pelat

Nomor Pelat	L_y (mm)	L_x (mm)	L_y/L_x	Keterangan	L (mm)	L_n (mm)	H_{min} (mm)	H (mm)
1	4000	3700	1,25	2 arah	4000	3300	94	125
2	8000	8000	1,00	2 arah	8000	7300	94	125
3	4000	4300	1,33	2 arah	4000	3300	64	125
4	8000	6000	1,63	2 arah	3000	2100	64	125

Dari Tabel 4.8 di atas, dapat diketahui dimensi pelat yang dapat digunakan yaitu 125 mm.

4.1.2.2. Preliminary Elemen Balok

Pada perhitungan dimensi awal elemen balok, digunakan rumus tinggi balok minimum untuk balok induk adalah $L/14$ dan untuk balok anak $L/16$. Selanjutnya, untuk nilai lebar balok, digunakan rumus $H/2$. Tipe balok yang digunakan adalah balok persegi panjang.

Hasil *preliminary* elemen balok dapat diketahui berdasarkan Tabel 4.8 sebagai berikut:

Tabel 4. 8. Hasil *Preliminary* Elemen Balok

Nama	Status Balok	Tipe Balok	L (mm)	H_{min}	$H_{dipakai}$	B_{min}	$B_{dipakai}$
G1	Induk	Persegi panjang	8000	571	700	350	350
G2	Induk	Persegi panjang	8000	571	600	300	300
G3	Induk	Persegi panjang	4000	285	500	250	300
G4	Induk	Persegi panjang	6000	357	400	200	300
G5	Anak	Persegi panjang	3700	500	500	250	250
B1	Anak	Persegi panjang	8000	375	600	250	250
B2	Anak	Persegi Panjang	8000	375	400	250	250
B3	Anak	Persegi Panjang	4000	285	400	200	200
B4	Anak	Persegi Panjang	4000	285	300	150	150

4.1.2.3. Preliminary Elemen Kolom

Preliminary elemen struktur kolom dihitung berdasarkan Persamaan 4.2 sebagai berikut:

$$A_g \geq \frac{P_u}{0,35 f_c'} \dots\dots\dots (4.2)$$

Keterangan:

A_g = luas penampang kotor kolom

P_u = beban total yang bekerja pada kolom

f_c' = kuat tekan kolom

Perancangan dimensi kolom yang digunakan dibagi menjadi empat dimensi kolom yang berbeda di setiap 2 lantai. Perhitungan beban yang bekerja pada kolom dihitung dengan mengalikan beban per meter persegi yang bekerja di atas kolom dengan luas daerah pengaruh dalam meter persegi. Pembebanan yang ditinjau adalah pada lantai 1, lantai 3, lantai 5 dan lantai 7. Pembebanan serta perhitungan dimensi kolom dapat dilihat pada Tabel 4.9 sampai Tabel 4.13.

Tabel 4. 9. Beban Total pada Lantai 7

Beban		Beban Per Lantai (kN)	Jumlah lantai	Total Beban Per Elemen (kN)	Total Beban (kN)
DL	Balok Induk	4402,38	1	4402,38	17025,84
	Balok Anak	2148,92	1	2148,92	
	Pelat	10474,55	1	10474,55	
	Kolom			0,00	
SIDL	Lt 7	118,35	1	118,35	118,35
L_r	Atap	252,48	1	252,48	252,48
LL	Lt 7				
P_u (kN)					17396,67

Perhitungan untuk dimensi kolom lantai 7 adalah:

$$A_g = \frac{17396,67}{0,35 \times 30} = 165683 \text{ mm}^2$$

$$\text{Sisi kolom} = \sqrt{165683} = 407,041 \text{ mm}$$

Dari perhitungan di atas, didapatkan dimensi kolom pada lantai 7 adalah 500 mm x 500 mm.

Tabel 4. 10. Beban Total pada Lantai 5 - 6

Beban		Beban Per Lantai (kN)	Beban Per Lantai (kN/m)	Jumlah Lantai	Total Tinggi (m)	Total Beban Per Elemen (kN)	Total Beban (kN)
DL	Balok Induk	2292,79		2		4585,58	17769,9
	Balok Anak	751,475		2		1502,95	
	Pelat	3397,65		2		6795,3092	
	Kolom		1221,51		4	4886,0484	
SIDL	Lt 7	3795,18		1		3795,18	3795,18
L _r	Atap					0	0
LL	Lt 7	2826,02		1		2826,016	2826,02
Total P_u di lantai atas (kN)							17396,7
P_u (kN)							24391,1

Perhitungan untuk dimensi kolom lantai 5 hingga lantai 6 adalah:

$$A_g = \frac{24391,1}{0,35 \times 30} = 232296 \text{ mm}^2$$

$$\text{Sisi kolom} = \sqrt{232296} = 481971 \text{ mm}$$

Dari perhitungan di atas, didapatkan dimensi kolom pada lantai 5 hingga 6 adalah 600 mm x 600 mm.

Tabel 4. 11. Beban Total pada Lantai 3 - 4

Beban		Beban Per Lantai (kN)	Beban Per Lantai (kN/m)	Jumlah Lantai	Total Tinggi (m)	Total Beban Per Elemen (kN)	Total Beban (kN)
DL	Balok Induk	2262,56		2		4525,1172	19277,315
	Balok Anak	751,239		2		1502,4786	
	Pelat	3397,65		2		6795,3092	
	Kolom		1613,6		4	6454,41	
SIDL	Lt 7	3795,18		1		3795,18	3795,18
L _r	Atap					0	0
LL	Lt 7	2826,02		1		2826,016	2826,016
Total P _u di lantai atas (kN)							24391,1
P _u (kN)							25898,51

Perhitungan untuk dimensi kolom lantai 3 hingga lantai 4 adalah:

$$A_g = \frac{25898,5}{0,35 \times 30} = 246652 \text{ mm}^2$$

$$\text{Sisi kolom} = \sqrt{246652} = 496,641 \text{ mm}$$

Dari perhitungan di atas, didapatkan dimensi kolom pada lantai 3 hingga 4 adalah 700 mm x 700 mm.

Tabel 4. 12. Beban Total pada Lantai 1 - 2

Beban		Beban Per Lantai (kN)	Beban Per Lantai (kN/m)	Jumlah Lantai	Total Tinggi (m)	Total Beban Per Elemen (kN)	Total Beban (kN)
DL	Balok Induk	2262,56		2		4525,1172	18147,793
	Balok Anak	751,239		2		1502,4786	
	Pelat	3397,65		2		6795,3092	
	Kolom		1331,22		4	5324,888	
SIDL	Lt 7	3795,18		1		3795,18	3795,18
L _r	Atap					0	0
LL	Lt 7	2826,02		1		2826,016	2826,016
Total P _u di lantai atas (kN)							25898,511
P _u (kN)							24768,989

Perhitungan untuk dimensi kolom lantai 1 hingga lantai 2 adalah:

$$A_g = \frac{24768,98}{0,35 \times 30} = 235895 \text{ mm}^2$$

$$\text{Sisi kolom} = \sqrt{235895} = 485,693 \text{ mm}$$

Dari perhitungan di atas, didapatkan dimensi kolom pada lantai 1 hingga 4 adalah 700 mm x 700 mm.

Berikut adalah rangkuman hasil *preliminary* elemen strukur kolom yang digunakan dalam perancangan bangunan tinggi tahan gempa 7 lantai yang dapat dilihat pada Tabel 4.13.

Tabel 4. 13. Hasil *Preliminary* Elemen Kolom

Lokasi	Tipe	P _u	A _g	S	Dimensi Sisi Kolom
		(kN)	(mm ²)	(mm)	(mm)
Lantai 7	1	17396,67	165683	407,041	500
Lantai 5-6	2	24391,1	232296	481971	600
Lantai 3-4	4	25898,51	246652	496,641	700
Lantai 1-2	5	24768,98	235895	485,693	700

Tahap akhir dari *preliminary* kolom adalah pengecekan terhadap kelangsingan kolom yang didasarkan pada dimensi kolom serta ketinggian kolom tersebut. Berikut syarat kolom dikatakan tidak langsing berdasarkan Persamaan 4.3.

$$\lambda = \frac{k \times l_u}{r} = \frac{k \times l_u}{0,3s} \leq 22 \dots\dots\dots (4.3)$$

Keterangan:

k = faktor panjang tekuk (jepit-jepit = 0,65)

l_u = tinggi kolom

s = sisi kolom

Dari hasil pengecekan, diperoleh semua elemen kolom merupakan kolom pendek. Hasil pengecekan kelangsingan kolom dapat dilihat pada Tabel 4.14.

Tabel 4. 14. Pengecekan Kolom Langsing

Lokasi	l_u maksimum	s (mm)	$\frac{k \times l_u}{r}$	Keterangan
	pada lantai yang			
	bersangkutan (mm)			
Lantai 1	3300	700	9,82	Kolom Pendek
Lantai 2	4000	700	9,82	Kolom Pendek
Lantai 3	4000	700	11,05	Kolom Pendek
Lantai 4	4000	700	11,05	Kolom Pendek
Lantai 5	4000	600	12,63	Kolom Pendek
Lantai 6	4000	600	12,63	Kolom Pendek
Lantai 7	4000	500	14,73	Kolom Pendek

4.1.2.4. Preliminary Elemen Dinding Geser

Dinding geser merupakan elemen struktur yang umum digunakan dalam perancangan bangunan tinggi tahan gempa karena kekakuan dinding geser yang besar sehingga energi yang dapat diserap oleh dinding geser besar.

Dinding geser memiliki ketebalan yang sama di sepanjang tinggi bangunan. Tebal dinding geser direncanakan berdasarkan tinggi per lantai (h_w) terbesar dibagi 25 atau panjang dinding geser (L_w) dibagi 25, diantara nilai tersebut dipilih yang

terkecil dan tidak boleh lebih kecil dari 100 mm. Menurut SNI 2847:2019 Pasal 11.3, standar minimum tebal dinding dapat dilihat pada Tabel 4.15.

Tabel 4. 15. Tebal Minimum Dinding

Tipe dinding	Ketebalan minimum (<i>h</i>)		
Tumpu	Terbesar dari	100 mm	(a)
		1/25 nilai terkecil dari panjang dan tinggi tidak tertumpu	(b)
Bukan tumpu	Terbesar dari	100 mm	(c)
		1/30 nilai terkecil dari panjang dan tinggi tidak tertumpu	(d)
Basemen dan fondasi eksterior		190 mm	(e)

(sumber : Tabel 11.3.1.1 SNI 2847:2019)

Berikut perhitungan ketebalan dinding geser :

- $t \text{ dinding} = \frac{h_w}{25} = \frac{4000}{25} = 163 \text{ mm}$

- $t \text{ dinding} = \frac{l_w}{25} = \frac{6000}{25} = 320 \text{ mm}$

Syarat kedua untuk tebal minimum elemen dinding geser berdasarkan Pasal 18.8.5 pada SNI 2847:2019, yaitu untuk panjang penyaluran (l_{dh}) dihitung berdasarkan Persamaan 4.4.

$$l_{dh} = \frac{f_y \times d_b}{5,4 \lambda \times \sqrt{f_c'}} \dots\dots\dots (4.4)$$

Sedangkan untuk mencari tebal minimum dinding dihitung berdasarkan Persamaan 4.5.

$$\text{Tebal minimum} = l_{dh} + t_{cover} \dots\dots\dots (4.5)$$

Dengan:

f_y = kekuatan leleh tulangan (MPa)

d_b = diameter nominal batang tulangan (mm)

λ = faktor modifikasi (0,75 untuk beton ringan, 1 untuk beton normal)

f_c' = kuat tekan beton (MPa)

t_{cover} = tebal cover dinding (mm)

Untuk tebal minimum dinding geser berdasarkan syarat kedua ini, yakni dengan menjumlahkan l_{dh} dengan tebal cover dinding geser yang digunakan.

- $l_{dh} = \frac{420 \times 16}{5,4 \times 1 \times \sqrt{30}} = 227,3 \text{ mm}$
- $t_{cover} = 20 \text{ mm}$

Tebal minimum dinding geser = $l_{dh} + t_{selimut} = 247,3 \text{ mm}$

Dari hasil perhitungan di atas, dimensi tebal dinding geser yang digunakan dalam *preliminary* adalah 250 mm.

4.2 Pemodelan Elemen Struktur

Pemodelan elemen struktur terdiri dari empat bagian, yaitu pemodelan pelat, pemodelan balok, pemodelan kolom dan pemodelan dinding geser.

4.2.1. Pemodelan Pelat

Pemodelan awal pelat satu arah dan dua arah menggunakan program ETABS dengan memodelkan sebagai *slab* dengan *shell-thin*. Berdasarkan *preliminary* desain, tebal pelat yang digunakan adalah 125 mm. Untuk memperhitungkan pengaruh keretakan beton ketika terjadinya gempa, momen inersia penampang pelat dan torsi direduksi sebesar 25% untuk menyeimbangkan nilai reduksi terhadap inersia elemen struktur. Elemen pelat akan dimodelkan *semi-rigid* pada program ETABS untuk menghitung gaya yang bekerja pada pelat.

4.2.2. Pemodelan Balok

Balok akan dimodelkan sebagai elemen *frame* dengan *rigid joint* sehingga momen-momen maksimum tempat terbentuknya sendi plastis berada di ujung-ujung balok. Terdapat dua elemen balok yang dimodelkan, yaitu balok induk dan balok anak. Dimensi balok yang digunakan dalam desain dapat dilihat pada Tabel 4.16 sebagai berikut:

Tabel 4. 16. Dimensi Balok Setelah Pengecekan

Nama	Status Balok	Tipe Balok	L (mm)	$H_{\min}$	H_{dipakai}	$B_{\min}$	B_{dipakai}
G1	Induk	Persegi panjang	8000	643	700	350	350
G2	Induk	Persegi panjang	8000	571	600	300	300
G3	Induk	Persegi panjang	7000	500	500	250	300
B1	Induk	Persegi panjang	5000	357	400	200	300
B2	Anak	Persegi panjang	8000	500	500	250	250

Untuk memperhitungkan pengaruh keretakan beton ketika gempa terjadi, momen inersia dari penampang balok dan torsi direduksi sebesar 25% untuk menyeimbangkan nilai reduksi terhadap inersia elemen struktur.

4.2.3. Pemodelan Kolom

Perancangan bangunan ini menggunakan empat tipe dimensi kolom dengan perbedaan dimensi setiap dua lantai. Kolom dimodelkan sebagai *frame* dan ujung-ujung kolom didesain jepit-jepit. Pada elemen kolom, momen inersia efektif kolom direduksi hingga 70% dari momen inersia awal untuk memperhitungkan keretakan beton akibat gempa. Torsi juga direduksi sebesar 25% untuk menyeimbangkan nilai reduksi terhadap inersia elemen struktur. Dimensi kolom yang digunakan dalam desain dapat dilihat pada Tabel 4.17.

Tabel 4. 17. Dimensi Kolom Setelah Pengecekan

Lokasi	Tipe	Dimensi Kolom Sisi Horizontal	Dimensi Kolom Sisi Vertikal
		mm	mm
Lantai 1-2	K1	700	900
Lantai 3-4	K2	600	800
Lantai 5-6	K3	500	700

4.2.4. Pemodelan Dinding Geser

Dinding geser dimodelkan dengan ketebalan yang sama di sepanjang tinggi bangunan. Dengan bantuan program ETABS, dinding geser dimodelkan sebagai elemen *wall* dengan tipe *shell-thin*. Selanjutnya akan dilakukan pengecekan dengan menggunakan program *SPColumn* untuk mengecek kapasitas dinding geser. Berikut dimensi dinding geser yang digunakan dalam desain dapat dilihat pada Tabel 4.18.

Tabel 4. 18. Dimensi Dinding Geser Setelah Pengecekan

Tipe	Jumlah	Panjang	Tebal
		mm	mm
1	4	4000	150

Untuk memperhitungkan pengaruh keretakan beton (*cracking*) , momen inersia penampang dinding geser efektif diambil sebesar 70% dari momen inersia jika kondisi tidak retak atau 35% dari momen inersia penampang dinding geser efektif adalah sebesar 70%, kemudian nantinya dilakukan pengecekan masing - masing dinding geser. Torsi juga direduksi sebesar 25% untuk menyeimbangkan nilai reduksi terhadap inersia elemen struktur.

4.3 Pemodelan Struktur

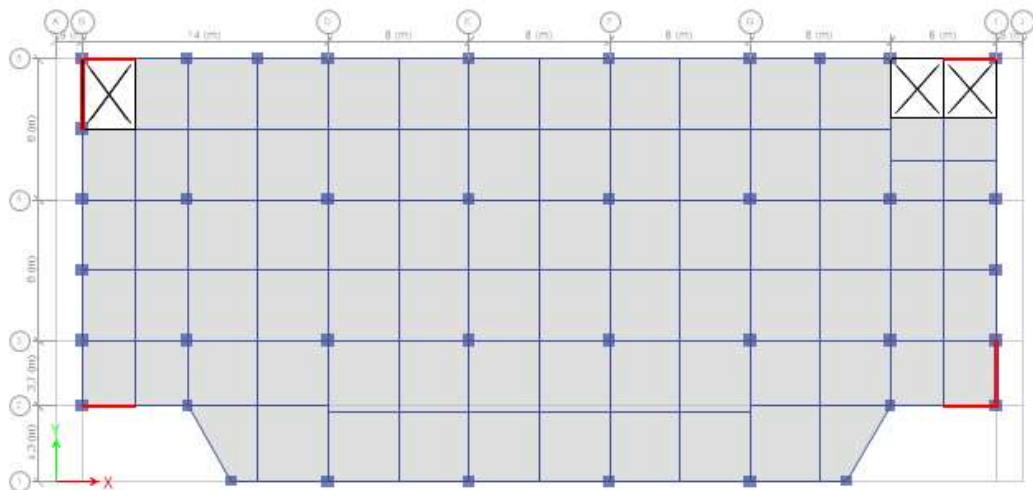
Pemodelan gedung pada akhirnya dirancang sebagai struktur gedung Sistem Ganda. Pemodelan awal dilakukan dengan bantuan program ETABS dengan dimodelkan sebuah sistem *grid*, dengan *grid* sebagai garis titik berat dan elemen struktur yang

dimodelkan. Hasil dari ketiga permodelan yang dirancang ulang akan mendapat hasil ketentuan bangunan gedung tahan gempa, antara lain Ketidakberaturan Horizontal dan Vertikal, Simpangan Antar Lantai dan Sistem Ganda. Pada akhirnya Penulis akan menggunakan salah satu dari ketiga permodelan dengan torsi terbesar untuk perhitungan selanjutnya dengan syarat ketentuan tahan gempa pada SNI 1726-2019 tetap terpenuhi.

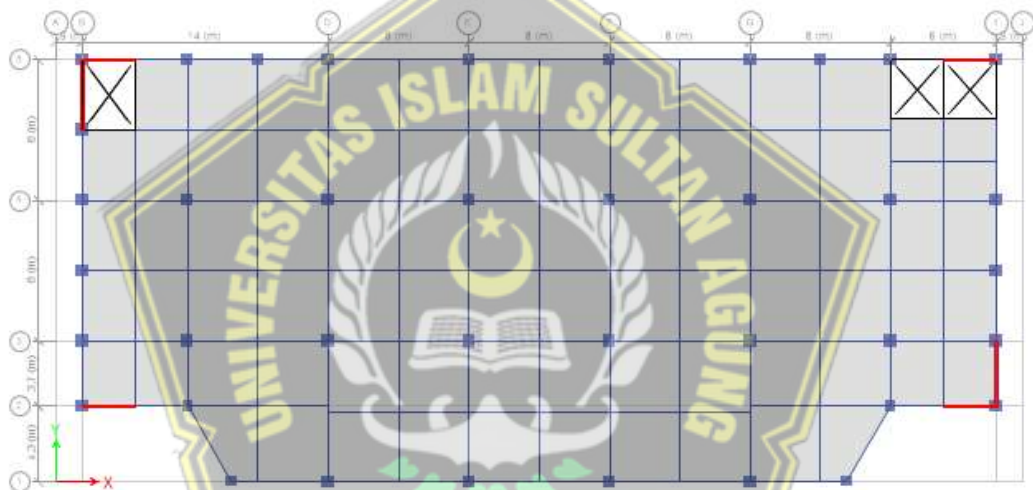
4.3.1. Pengecekan Ketidakberaturan Horizontal dan Vertikal Permodelan

Pada permodelan pertama ini Penulis melakukan rancangan ulang agar bangunan gedung ini tidak mengalami ketidakberaturan torsi. Upaya yang Penulis upayakan untuk menambah kekakuan pada gedung ini dengan menambahkan perkuatan pada tepi struktur gedung serta koridor dengan shearwall.

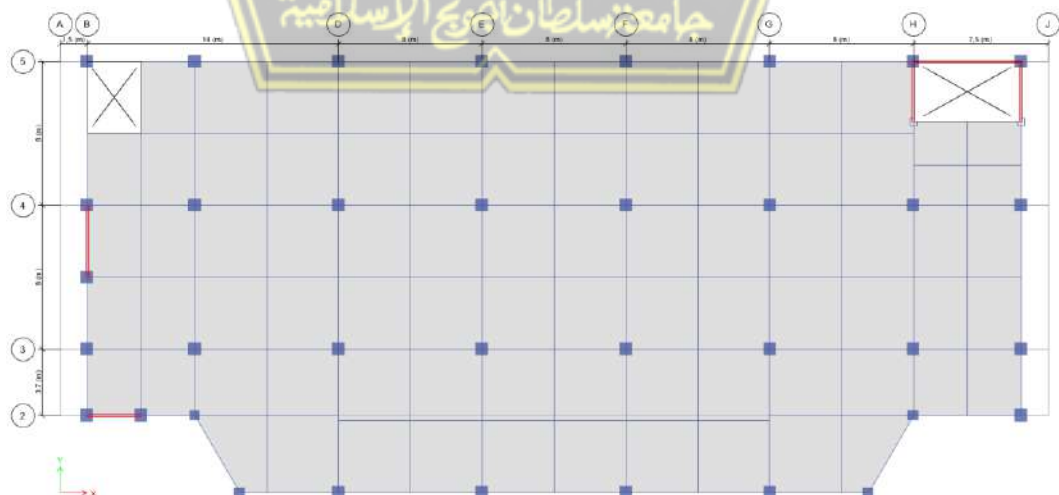
Pada model pertama, dirancang ulang dengan Sistem Ganda (SRPMK dan SDKS) yang dirancang sedemikian rupa agar tidak terjadi ketidakberaturan torsi. Pada model kedua, dirancang ulang dengan Sistem Ganda (SRPMK dan SDKS) yang mengalami torsi lebih dari 1,2 atau permodelan tersebut terjadi ketidakberaturan 1a. Pada model ketiga dirancang ulang dengan Sistem Ganda (SRPMK dan SDKS) dengan mengurangi beberapa perkuatan struktur agar permodelan mengalami ketidakberaturan torsi mendekati Kategori 1b, atau lebih dari 1,4 namun perlu ada beberapa peraturan agar sistem struktur tersebut memenuhi standar SNI 1726-2019 tentang Ketentuan Bangunan Gedung Tahan Gempa. Konfigurasi rancangan permodelan 1,2 dan 3 yang Penulis lakukan dapat dilihat pada Gambar 4.4 sampai Gambar 4.6.



Gambar 4. 4. Denah rancangan ulang Permodelan 1



Gambar 4. 5. Denah rancangan ulang Permodelan 2



Gambar 4. 6. Denah Perancangan Sistem Struktur 3

Berdasarkan Tabel 13 dan Tabel 14 pada SNI 1726:2019, ketidakberaturan horizontal dan ketidakberaturan vertikal pada struktur harus dicek, dengan hasil pengecekan ketidakberaturan horizontal dan vertikal adalah sebagai berikut:

1. Ketidakberaturan Horizontal

a) Ketidakberaturan Horizontal 1a dan 1b Permodelan 1,2 dan 3

Hasil pengecekan ketidakberaturan torsi 1a dan 1b arah X dan arah Y dapat dilihat pada Tabel 4.19 sampai Tabel 4.21.

Tabel 4. 19. Cek Ketidakberaturan Torsi 1a dan 1b Permodelan 1

Lantai	Arah X		Arah Y	
	$\Delta_{max}/\Delta_{avg}$	Cek	$\Delta_{max}/\Delta_{avg}$	Cek
Storey7	1,168	OK	1,089	OK
Storey6	1,126	OK	1,088	OK
Storey5	1,048	OK	1,086	OK
Storey4	1,047	OK	1,086	OK
Storey3	1,039	OK	1,085	OK
Storey2	1,036	OK	1,089	OK
Storey1	1,045	OK	1,083	OK

Tabel 4. 20. Cek Ketidakberaturan Torsi 1a dan 1b Permodelan 2

Lantai	Arah X		Arah Y	
	$\Delta_{max}/\Delta_{avg}$	Cek	$\Delta_{max}/\Delta_{avg}$	Cek
Storey7	1,312	H.1a	1,109	OK
Storey6	1,303	H.1a	1,11	OK
Storey5	1,305	H.1a	1,107	OK
Storey4	1,295	H.1a	1,103	OK
Storey3	1,295	H.1a	1,099	OK
Storey2	1,292	H.1a	1,1	OK
Storey1	1,237	H.1a	1,119	OK

Tabel 4. 21. Cek Ketidakberaturan Torsi 1a dan 1b Permodelan 3

Lantai	Arah X		Arah Y	
	$\Delta_{max}/\Delta_{avg}$	Cek	$\Delta_{max}/\Delta_{avg}$	Cek
Storey7	1,338	H.1a	1,269	H.1a
Storey6	1,328	H.1a	1,075	OK
Storey5	1,329	H.1a	1,075	OK
Storey4	1,317	H.1a	1,073	OK
Storey3	1,315	H.1a	1,073	OK
Storey2	1,307	H.1a	1,077	OK
Storey1	1,248	H.1a	1,088	OK

a. Permodelan 1

Dari hasil pengecekan ketidakberaturan torsi 1a dan 1b, Struktur pada Permodelan 1 tidak mengalami ketidakberaturan torsi 1a maupun 1b karena dapat dilihat pada tabel 4.22 Delta Max sumbu X maupun Y tidak lebih dari 1,2. Karena permodelan 2 sudah mencapai kategori ketidakberaturan tertarget, maka Penulis melanjutkan analisis permodelan 2

b. Permodelan 2

Dari hasil pengecekan ketidakberaturan torsi 1a dan 1b, Struktur pada Permodelan 2 mengalami ketidakberaturan torsi 1a karena dapat dilihat pada Tabel 4.24 dan Tabel 4.25 Delta Max sumbu X maupun Y lebih dari 1,2. Permodelan 2 sudah mencapai kategori ketidakberaturan tertarget, maka Penulis melanjutkan analisis permodelan 3

c. Permodelan 3

Dari hasil pengecekan ketidakberaturan torsi 1a dan 1b, Struktur pada Permodelan 3 mengalami ketidakberaturan torsi 1a. kategori ini masih belum mencapai target karena apabila permodelan 3 mengalami kategori ketidakberaturan 1b maka perancangan tersebut mengalami beberapa konsekuensi yang menyebabkan permodelan 3 tidak memenuhi syarat struktural gedung tahan gempa sesuai dengan SNI 1726-2019. Hasil dari

pengecekan kategori ketidakberaturan torsi dapat dilihat pada Tabel 4.26 dan Tabel 4.27 Delta Max sumbu X maupun Y lebih dari 1,2.

Pada SNI 1729-2019 pasal 7.8.4.3 dijelaskan untuk ketidakberaturan torsi 1a maupun 1b pada KDS D harus memperhitungkan pembesaran momen torsi tak terduga. Sedangkan Permodelan 1 yang tidak mengalami ketidakberaturan torsi hanya memperhitungkan pembesaran sebesar 5% sesuai dengan pasal 7.8.3.2 SNI 1726-2019. Hasil pengecekan pembesaran momen torsi tak terduga 1a arah X dan arah Y dapat dilihat pada tabel 4.22 sampai Tabel 4.27

1. Permodelan 1

Tabel 4. 22. Cek pembesaran momen torsi X Permodelan 1

Arah X	$\Delta_{max}/\Delta_{avg}$	A_x	%	ecc-(m)
Storey7	1,168	1,292	6,5%	1,551
Storey6	1,126	1,116	5,6%	1,340
Storey5	1,048	0,838	4,2%	1,005
Storey4	1,047	0,834	4,2%	1,001
Storey3	1,039	0,809	4,0%	0,971
Storey2	1,036	0,800	4,0%	0,960
Storey1	1,045	0,828	4,1%	0,994

Tabel 4. 23. Cek pembesaran momen torsi Y Permodelan 1

Arah Y	$\Delta_{max}/\Delta_{avg}$	A_x	%	ecc-(m)
Storey7	1,089	0,824	4,1%	2,141
Storey6	1,088	0,822	4,1%	2,137
Storey5	1,086	0,819	4,1%	2,129
Storey4	1,086	0,819	4,1%	2,129
Storey3	1,085	0,818	4,1%	2,126
Storey2	1,089	0,824	4,1%	2,141
Storey1	1,083	0,815	4,1%	2,118

2. Permodelan 2

Tabel 4. 24. Cek pembesaran momen torsi X Permodelan 2

Arah X	$\Delta_{max}/\Delta_{avg}$	A_x	%	ecc. (m)
Storey7	1,312	2,058	10,3%	2,469
Storey6	1,303	2,002	10,0%	2,402
Storey5	1,305	2,014	10,1%	2,417
Storey4	1,295	1,953	9,8%	2,344
Storey3	1,295	1,953	9,8%	2,344
Storey2	1,292	1,935	9,7%	2,322
Storey1	1,237	1,626	8,1%	1,951

Tabel 4. 25. Cek pembesaran momen torsi Y Permodelan 2

Arah Y	$\Delta_{max}/\Delta_{avg}$	A_x	%	ecc. (m)
Storey7	1,109	1,050	5,3%	2,731
Storey6	1,110	1,054	5,3%	2,741
Storey5	1,107	1,043	5,2%	2,711
Storey4	1,103	1,028	5,1%	2,672
Storey3	1,099	1,013	5,1%	2,634
Storey2	1,100	1,017	5,1%	2,644
Storey1	1,119	1,089	5,4%	2,831

3. Permodelan 3

Tabel 4. 26. Cek pembesaran momen torsi X Permodelan 3

Arah X	$\Delta_{max}/\Delta_{avg}$	A_x	%	ecc. (m)
Storey7	1,338	2,226	11,1%	2,671
Storey6	1,328	2,160	10,8%	2,592
Storey5	1,329	2,166	10,8%	2,600
Storey4	1,317	2,089	10,4%	2,507
Storey3	1,315	2,077	10,4%	2,492
Storey2	1,307	2,026	10,1%	2,432
Storey1	1,248	1,685	8,4%	2,022

Tabel 4. 27. Cek pembesaran momen torsi Y Permodelan 3

Arah Y	$\Delta_{max}/\Delta_{avg}$	A_x	%	ecc. (m)
Storey7	1,269	1,801	9,0%	4,682
Storey6	1,075	0,927	4,6%	2,411
Storey5	1,075	0,927	4,6%	2,411
Storey4	1,073	0,921	4,6%	2,393
Storey3	1,073	0,921	4,6%	2,393
Storey2	1,077	0,934	4,7%	2,429
Storey1	1,088	0,973	4,9%	2,530

b) Ketidakberaturan sudut dalam

Struktur tidak mengalami ketidakberaturan sudut dalam dikarenakan bentuk denah yang beraturan yaitu berbentuk persegi. Ketidakberaturan sudut dalam terjadi apabila kedua dimensi proyeksi denah struktur dari lokasi sudut dalam lebih besar dari 15% dimensi denah struktur.

Hasil pengecekan ketidakberaturan sudut dalam dapat dilihat pada Tabel 4.28 sampai Tabel 4.30.

1. Permodelan 1

Tabel 4. 28. Cek Ketidakberaturan sudut dalam

Lx	56	m
Px	6	m
Ly	24	m
Py	4,3	m
Lx/Px	0,4286	
Ly/Py	0,7167	
Cek	H.2	

2. Permodelan 2

Tabel 4. 29. Cek Ketidakberaturan sudut dalam

Lx	56	m
Px	6	m
Ly	24	m
Py	4,3	m
Lx/Px	0,4286	
Ly/Py	0,7167	
Cek	H.2	

3. Permodelan 3

Tabel 4. 30. Cek Ketidakberaturan sudut dalam

Lx	56	m
Px	6	m
Ly	24	m
Py	4,3	m
Lx/Px	0,4286	
Ly/Py	0,7167	
Cek	H.2	

c) Ketidakberaturan diskontinuitas diafragma

Luas bukaan total adalah 233 m² dan luas bruto 32,225 m² maka persentasenya adalah 20,1% sehingga struktur tidak mengalami ketidakberaturan diskontinuitas diafragma. Ketidakberaturan ini terjadi apabila memiliki lubang bukaan suatu lantai dimana ukurannya lebih besar daripada 50% ukuran lantai utuhnya.

Hasil pengecekan ketidakberaturan diskontinuitas diafragma dapat dilihat pada Tabel 4.31 sampai Table 4.33.

1. Permodelan 1

Tabel 4. 31. Cek Ketidakberaturan diskontinuitas diafragma

Syarat 1		
A_{total}	233	m ²
A_{bukaan}	32,22	m ²
Cek	OK	

2. Permodelan 2

Tabel 4. 32. Cek Ketidakberaturan diskontinuitas diafragma

Syarat 1		
A_{total}	233	m ²
A_{bukaan}	32,22	m ²
Cek	OK	

3. Permodelan 3

Tabel 4. 33. Cek Ketidakberaturan diskontinuitas diafragma

Syarat 1		
A_{total}	233	m ²
A_{bukaan}	32,22	m ²
Cek	OK	

- d) Ketidakberaturan akibat pergeseran tegak lurus terhadap bidang
Struktur tidak mengalami ketidakberaturan akibat pergeseran tegak lurus terhadap bidang dikarenakan dinding geser didesain menerus dari lantai 1 sampai lantai 7.
- e) Ketidakberaturan sistem non paralel
Struktur tidak mengalami ketidakberaturan sistem non paralel dikarenakan dinding geser didesain tegak lurus satu sama lain terhadap sumbu x maupun terhadap sumbu y.

2. Ketidakberaturan Vertikal

a) Ketidakberaturan kekakuan tingkat lunak 1a dan 1b

Ketidakberaturan kekakuan tingkat lunak 1a terjadi jika tingkat kekakuan lateral kurang dari 70% kekakuan lateral tingkat di atasnya atau 80% dari kekakuan rata-rata ketiga tingkat di atasnya. Hasil pengecekan ketidakberaturan kekakuan tingkat lunak 1a arah X dan arah Y dapat dilihat pada Tabel 4.34 sampai Tabel 4.36.

1. Permodelan 1

Tabel 4. 34. Cek Ketidakberaturan Kekakuan Tingkat Lunak

Lantai	Arah X		Arah Y	
	Kekakuan	Cek	Kekakuan	Cek
	kN/m		kN/m	
8				
7	501,8306	OK	48917,899	OK
6	2980,7568	OK	205880,409	OK
5	5046,8986	OK	225038,773	OK
4	6642,5824	OK	229813,557	OK
3	7799,8332	OK	267431,604	OK
2	8524,9665	OK	326354,144	OK
1	8830,5907	OK	883283,08	OK

2. Permodelan 2

Tabel 4. 35. Cek Ketidakberaturan Kekakuan Tingkat Lunak

Lantai	Arah X		Arah Y	
	Kekakuan	Cek	Kekakuan	Cek
	kN/m		kN/m	
8				
7	501,8306	OK	48917,899	OK
6	2980,7568	OK	205880,409	OK
5	5046,8986	OK	225038,773	OK

4	6642,5824	OK	229813,557	OK
3	7799,8332	OK	267431,604	OK
2	8524,9665	OK	326354,144	OK
1	8830,5907	OK	883283,08	OK

3. Permodelan 3

Tabel 4. 36. Cek Ketidakberaturan Kekakuan Tingkat Lunak

Lantai	Arah X		Arah Y	
	Kekakuan	Cek	Kekakuan	Cek
	kN/m		kN/m	
8				
7	501,8306	OK	48917,899	OK
6	2980,7568	OK	205880,409	OK
5	5046,8986	OK	225038,773	OK
4	6642,5824	OK	229813,557	OK
3	7799,8332	OK	267431,604	OK
2	8524,9665	OK	326354,144	OK
1	8830,5907	OK	883283,08	OK

Ketidakberaturan akibat kekakuan tingkat lunak 1b terjadi jika tingkat kekakuan lateral kurang dari 60% kekakuan lateral tingkat di atasnya atau 70% dari kekakuan rata-rata ketiga tingkat di atasnya. Hasil pengecekan ketidakberaturan kekakuan tingkat lunak dapat dilihat pada Tabel 4.55

b) Ketidakberaturan Berat (Massa)

Ketidakberaturan ini terjadi jika massa efektif diseberang tingkat lebih dari 150% massa efektif di dekatnya. Hasil pengecekan ketidakberaturan berat (massa) dapat dilihat pada Tabel 4.37 sampai Tabel 4.39.

1. Permodelan 1

Tabel 4. 37. Cek Ketidakberaturan Berat (Massa)

Lantai	Massa	Cek
	kg	
7	178549,53	OK
6	1051992,42	V.2
5	1081210,1	OK
4	1081210,1	OK
3	1098525,66	OK
2	1119189,48	OK
1	1140967,99	V.2

2. Permodelan 2

Tabel 4. 38. Cek Ketidakberaturan Berat (Massa)

Lantai	Massa	Cek
	kg	
7	178549,53	OK
6	1051992,42	V.2
5	1081210,1	OK
4	1081210,1	OK
3	1098525,66	OK
2	1119189,48	OK
1	1140967,99	V.2

3. Permodelan 3

Tabel 4. 39. Cek Ketidakberaturan Berat (Massa)

Lantai	Massa	Cek
	kg	
7	178549,53	OK
6	1051992,42	V.2
5	1081210,1	OK
4	1081210,1	OK
3	1098525,66	OK

2	1119189,48	OK
1	1140967,99	V.2

c) Ketidakberaturan Geometri Vertikal

Struktur tidak mengalami ketidakberaturan geometri vertikal diakibatkan karena dimensi dinding geser yang digunakan memiliki ukuran yang serupa sepanjang tinggi bangunan. Hasil pengecekan ketidakberaturan geometri vertikal dapat dilihat pada Tabel 4.40 sampai Tabel 4.42.

1. Permodelan 1

Tabel 4. 40. Cek Ketidakberaturan Geometri Vertikal

Lantai	L	Cek
	mm	
7	500	
6	600	OK
5	600	OK
4	700	OK
3	700	OK
2	700	OK
1	700	OK

2. Permodelan 2

Tabel 4. 41. Cek Ketidakberaturan Geometri Vertikal

Lantai	L	Cek
	mm	
7	500	
6	600	OK
5	600	OK
4	700	OK
3	700	OK
2	700	OK
1	700	OK

3. Permodelan 3

Tabel 4. 42. Cek Ketidakberaturan Geometri Vertikal

Lantai	L	Cek
	mm	
7	500	
6	600	OK
5	600	OK
4	700	OK
3	700	OK
2	700	OK
1	700	OK

- d) Ketidakberaturan akibat diskontinuitas terhadap bidang elemen vertikal pada pemikul gaya lateral

Struktur tidak mengalami ketidakberaturan diakibatkan oleh diskontinuitas bidang pada elemen vertikal pemikul gaya lateral dikarenakan dinding geser didesain menerus dari lantai 1 sampai lantai 7

- e) Ketidakberaturan tingkat lemah akibat diskontinuitas pada kekuatan lateral tingkat

Hasil pengecekan ketidakberaturan tingkat lemah akibat diskontinuitas pada kekuatan lateral tingkat ditunjukkan pada Tabel 4.43 sampai Tabel 4.45

1. Permodelan 1

Tabel 4. 43. Pengecekan Diskontinuitas dalam Ketidakberaturan Kuat Lateral

Lantai	Arah X		Arah Y	
	Kekuatan	Cek	Kekuatan	Cek
	kN		kN	
7	668,9684		714,0882	
6	3143,7721	OK	3168,5625	OK
5	5053,9372	OK	5062,7974	OK
4	6528,8797	OK	6521,9319	OK

3	7677,12	OK	7668,4523	OK
2	8500,8352	OK	8494,9307	OK
1	8830,5809	OK	8830,5835	OK

2. Permodelan 2

Tabel 4. 44. Pengecekan Diskontinuitas dalam Ketidakberaturan Kuat Lateral

Lantai	Arah X		Arah Y	
	Kekuatan	Cek	Kekuatan	Cek
	kN		kN	
7	668,9684		714,0882	
6	3143,7721	OK	3168,5625	OK
5	5053,9372	OK	5062,7974	OK
4	6528,8797	OK	6521,9319	OK
3	7677,12	OK	7668,4523	OK
2	8500,8352	OK	8494,9307	OK
1	8830,5809	OK	8830,5835	OK

3. Permodelan 3

Tabel 4. 45. Pengecekan Diskontinuitas dalam Ketidakberaturan Kuat Lateral

Lantai	Arah X		Arah Y	
	Kekuatan	Cek	Kekuatan	Cek
	kN		kN	
7	668,9684		714,0882	
6	3143,7721	OK	3168,5625	OK
5	5053,9372	OK	5062,7974	OK
4	6528,8797	OK	6521,9319	OK
3	7677,12	OK	7668,4523	OK
2	8500,8352	OK	8494,9307	OK
1	8830,5809	OK	8830,5835	OK

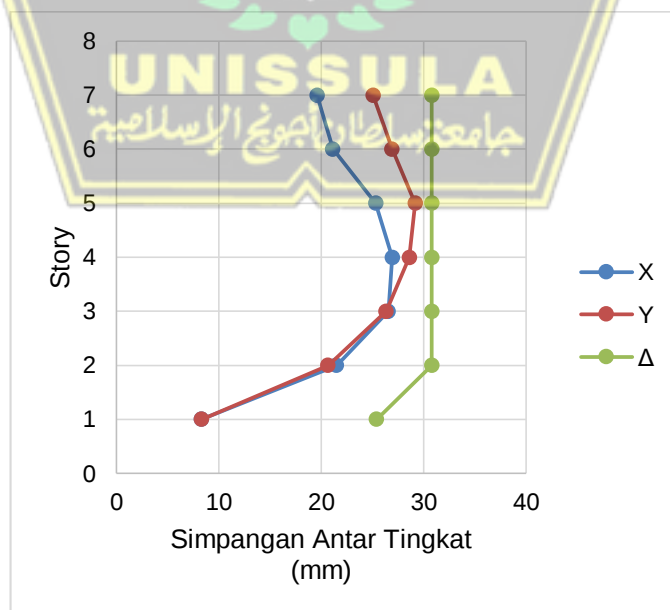
4.3.2. Cek Simpangan Antar Lantai Pemodelan

Simpangan antar lantai adalah perpindahan gaya horizontal di bagian atas tingkat yang relatif kaku terhadap bawahnya. Berdasarkan analisis program ETABS V20.0.0, didapat hasil simpangan arah X dan Y yang ditampilkan pada Tabel 4.46 sampai Tabel 4.48 dan Grafik Simpangan Antar Lantai pada Gambar 4.7 sampai Gambar 4.9.

1. Permodelan 1

Tabel 4. 46. Pengecekan Simpangan Antar Lantai Sumbu X dan Y

Storey	Displacement		Elastic Drift		h	Inelastic Drift		Drift Limit	Cek
	δe_X	δe_Y	δe_X	δe_Y		Δ_X	Δ_Y		
	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)		(mm)	(mm)		
7	17,796	39,182	2,953	6,391	4000	10,828	23,434	30,769	OK
6	14,843	32,791	3,026	6,693	4000	11,095	24,541	30,769	OK
5	11,817	26,098	3,131	6,999	4000	11,480	25,663	30,769	OK
4	8,686	19,099	3,021	6,751	4000	11,077	24,754	30,769	OK
3	5,665	12,348	2,703	6,039	4000	9,911	22,143	30,769	OK
2	2,962	6,309	2,072	4,526	4000	7,597	16,595	30,769	OK
1	0,89	1,783	0,890	1,783	3300	3,263	6,538	25,385	OK

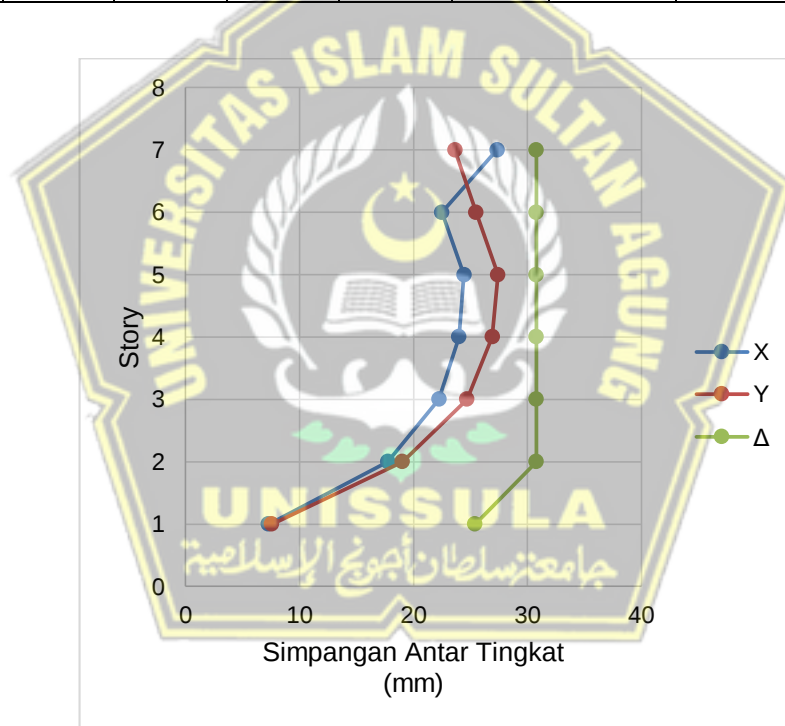


Gambar 4. 7. Grafik Simpangan Antar Lantai.

2. Permodelan 2

Tabel 4. 47. Pengecekan Simpangan Antar Lantai Sumbu X dan Y

Storey	Displacement		Elastic Drift		h	Inelastic Drift		Drift	Cek
	δe_x	δe_y	δe_x	δe_y		Δ_x	Δ_y	Limit	
	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)		(mm)	(mm)	(mm)	
7	39,672	42,192	7,453	6,445	4000	27,328	23,632	30,769	OK
6	32,219	35,747	6,131	6,950	4000	22,480	25,483	30,769	OK
5	26,088	28,797	6,665	7,476	4000	24,438	27,412	30,769	OK
4	19,423	21,321	6,543	7,342	4000	23,991	26,921	30,769	OK
3	12,880	13,979	6,064	6,734	4000	22,235	24,691	30,769	OK
2	6,816	7,245	4,836	5,187	4000	17,732	19,019	30,769	OK
1	1,980	2,058	1,980	2,058	3300	7,260	7,546	25,385	OK

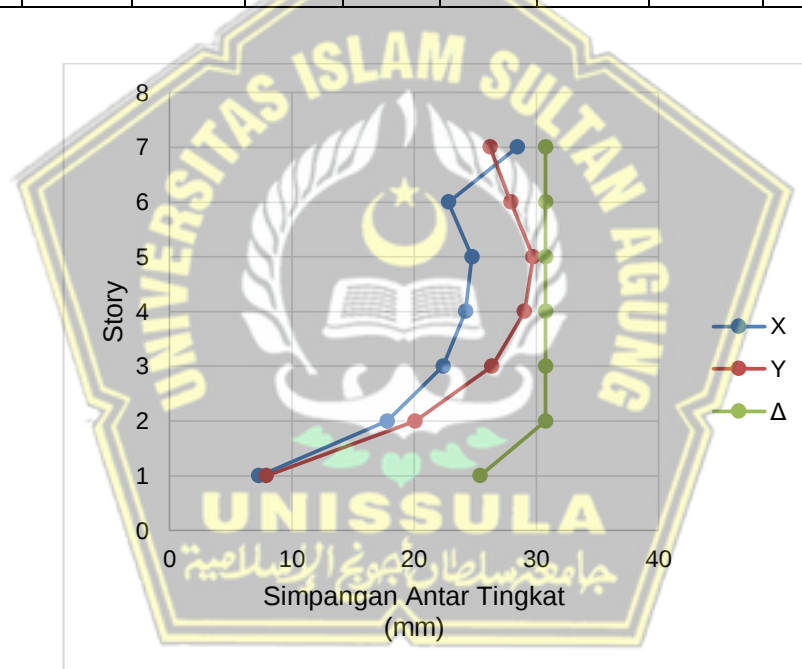


Gambar 4. 8. Grafik Simpangan Antar Lantai.

3. Permodelan 3

Tabel 4. 48. Pengecekan Simpangan Antar Lantai Sumbu X dan Y

Storey	Displacement		Elastic Drift		<i>h</i>	Inelastic Drift		Drift Limit	Cek
	δe_X	δe_Y	δe_X	δe_Y		Δ_X	Δ_Y		
	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)		(mm)	(mm)	(mm)	
7	40,282	45,614	7,756	7,153	4000	28,439	26,228	30,769	OK
6	32,526	38,461	6,223	7,614	4000	22,818	27,918	30,769	OK
5	26,303	30,847	6,747	8,107	4000	24,739	29,726	30,769	OK
4	19,556	22,740	6,604	7,920	4000	24,215	29,040	30,769	OK
3	12,952	14,820	6,106	7,194	4000	22,389	26,378	30,769	OK
2	6,846	7,626	4,853	5,477	4000	17,794	20,082	30,769	OK
1	1,993	2,149	1,993	2,149	3300	7,308	7,880	25,385	OK



Gambar 4. 9. Grafik Simpangan Antar Lantai.

Pada pengecekan Simpangan Antar Lantai struktur Permodelan 1 dinyatakan memenuhi syarat sistem ketentuan tahan gempa karena Delta X dan Delta Y tidak melebihi batas *Drift Limit*.

4.3.3. Cek Sistem Ganda Pemodelan

Berdasarkan SNI 1726:2019 Pasal 7.2.5.1, dalam proses mendesain rancangan Sistem Ganda, rangka portal pemikul momen harus dapat menahan setidaknya minimal 25% akibat gaya gempa desain sehingga tahanan gaya gempa total harus diterapkan oleh kombinasi rangka pemikul momen dan dinding geser dengan distribusi keseluruhan terhadap kekakuan. Pengecekan Sistem Ganda Permodelan 1 dapat dilihat pada tabel 4.49 sampai Tabel 4.51

1. Permodelan 1

Tabel 4. 49. Pengecekan Sistem Ganda

Arah	Lokasi	Gaya yang Dipikul (kN)	Presentase Frame (%)	Keterangan
X	Frame	1890,5928	30%	OK
	Keseluruhan	6384,8772		
Y	Frame	2016,1118	31%	OK
	Keseuruhan	6435,3768		

2. Permodelan 2

Tabel 4. 50. Pengecekan Sistem Ganda

Arah	Lokasi	Gaya yang Dipikul (kN)	Presentase Frame (%)	Keterangan
X	Frame	1993,2978	27%	OK
	Keseluruhan	7354,3617		
Y	Frame	2214,8185	28%	OK
	Keseuruhan	7850,9295		

3. Permodelan 3

Tabel 4. 51. Pengecekan Sistem Ganda

Arah	Lokasi	Gaya yang Dipikul (kN)	Presentase Frame (%)	Keterangan
X	Frame	1896,0463	26%	OK
	Keseluruhan	7279,7553		
Y	Frame	1955,1886	25%	OK
	Keseuruhan	7714,9532		

Pada tabel diatas, disimpulkan bahwa gaya yang dipikul oleh *frame* sumbu X maupun Sumbu Y sudah menahan gaya gempa sebesar lebih dari 25%. Maka Permodelan 1 sudah memenuhi salah satu syarat sistem ketentuan tahan gempa SNI 1726-2019

4.3.4. Rekapitulasi Hasil Pengecekan Permodelan

Rekapitulasi hasil pengecekan meliputi Ketidakberaturan Horizontal dan Vertikal, Simpangan Antar Lantai dan Sistem Ganda. Penulis akan menggunakan salah satu dari ketiga permodelan dengan torsi terbesar untuk perhitungan selanjutnya dengan syarat ketentuan tahan gempa pada SNI 1726-2019 tetap terpenuhi. Dapat dicek pada tabel 4.52 sampai Tabel 4.54.

Tabel 4. 52. Tabel Rekapitulasi Torsi

Model	Torsi Bawaan		Cek Kategori		Cek Pembesaran	
	Spec X	Spec Y	Spec X	Spec Y	Spec X	Spec Y
	$\Delta_{max}/\Delta_{avg}$	$\Delta_{max}/\Delta_{avg}$				
1	1,112	1,095	-	-	5%	5%
2	1,312	1,119	1a	1a	10.3%	5%
3	1,338	1,269	1a	1a	11.1%	9%

Tabel 4. 53. Tabel Rekapitulasi Simpangan Antar Lantai

Model	Simpangan Antar Lantai	
	X	Y
1	AMAN	AMAN
2	AMAN	AMAN
3	AMAN	AMAN

Tabel 4. 54. Tabel Rekapitulasi Sistem Ganda

Permodelan	Sistem Ganda		CEK
	X	Y	
1	30%	31%	YA
2	27%	28%	YA
3	26%	25%	YA

Setelah mengetahui hasil dari pengecekan, Penulis akhirnya menggunakan Permodelan 3 untuk perhitungan selanjutnya karena Permodelan 3 memiliki torsi bawaan paling besar dari ke tiga permodelan yang dibuat. Selain itu Permodelan 3 sudah memenuhi salah satu dari syarat bangunan Gedung tahan gempa SNI 1726-2019.

4.3.5. Eksentrisitas Gedung

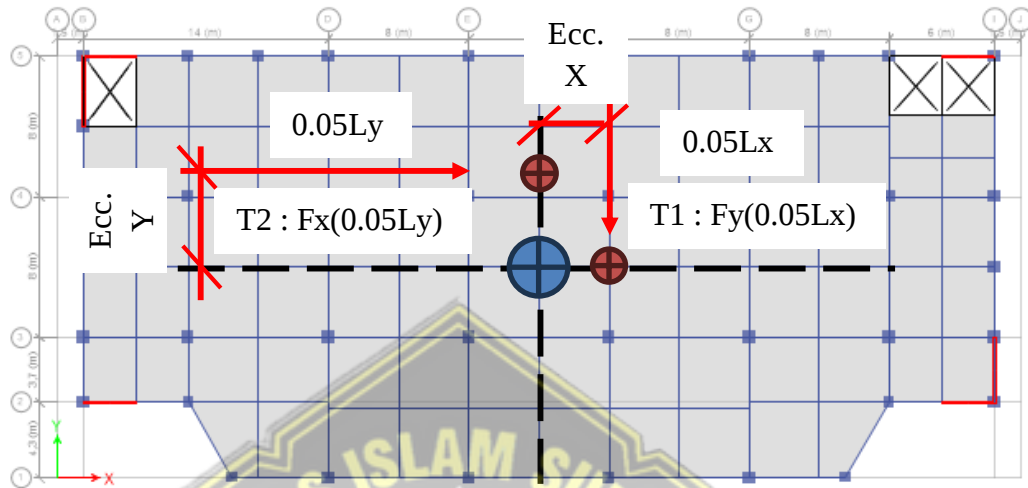
Berikut adalah rekapitulasi dari perhitungan ketidakberaturan torsi yang Penulis analisis. Rekapitulasi ini berisi tentang konsekuensi pembesaran torsi tak terduga yang bertujuan untuk mengetahui besaran konsekuensi torsi yang diperlukan serta mengetahui letak eksentrisitas akibat konsekuensi pembesaran torsi tak terduga.

Mengacu pada SNI 1726-2019 pasal 7.8.4.3 dijelaskan untuk struktur dengan KDS C, D, E dan F dimana struktur tersebut mengalami Kategori ketidakberaturan torsi 1a maupun 1b maka perlu memperhitungkan momen torsi tak terduga (*accidental torsion*).

Jika diafragma tidak flexible (*Rigid*) harus menyertakan momen torsi bawaan yang dihasilkan dari lokasi massa struktur ditambah momen torsi tak terduga akibat

perpindahan pusat massa dari lokasi aktual yang diasumsikan pada masing masing arah dengan jarak sebesar 5% dari salah satu sumbu total luasan struktur gedung.

1. Permodelan 1

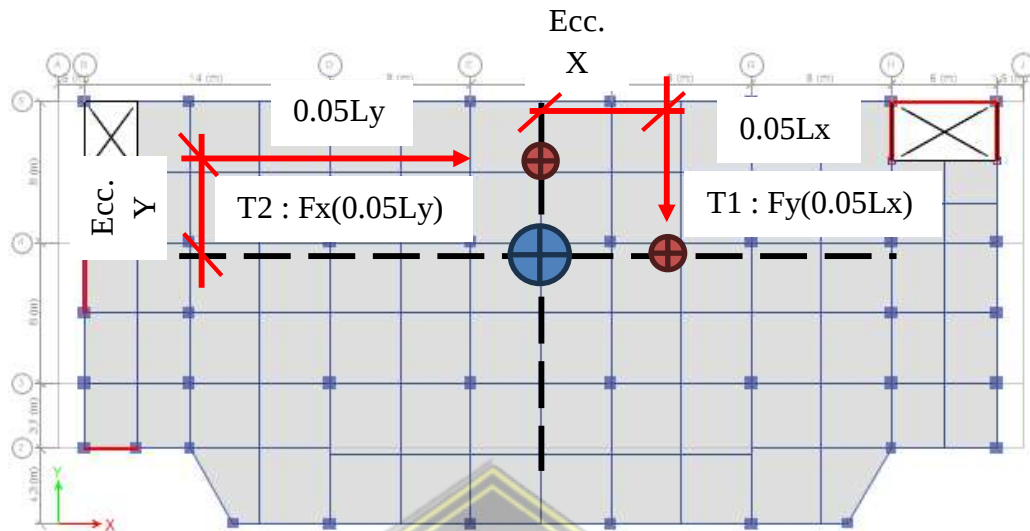


Gambar 4. 10. Denah letak torsi tak terduga Permodelan 1

Tabel 4. 55. Tabel Eksentrisitas Torsi Tak terduga

Arah X	T1	ecc. (m)	Arah Y	T2	ecc. (m)
Storey7	6,5%	1,551	Storey7	4,1%	2,141
Storey6	5,6%	1,340	Storey6	4,1%	2,137
Storey5	4,2%	1,005	Storey5	4,1%	2,129
Storey4	4,2%	1,001	Storey4	4,1%	2,129
Storey3	4,0%	0,971	Storey3	4,1%	2,126
Storey2	4,0%	0,960	Storey2	4,1%	2,141
Storey1	4,1%	0,994	Storey1	4,1%	2,118

2. Permodelan 2

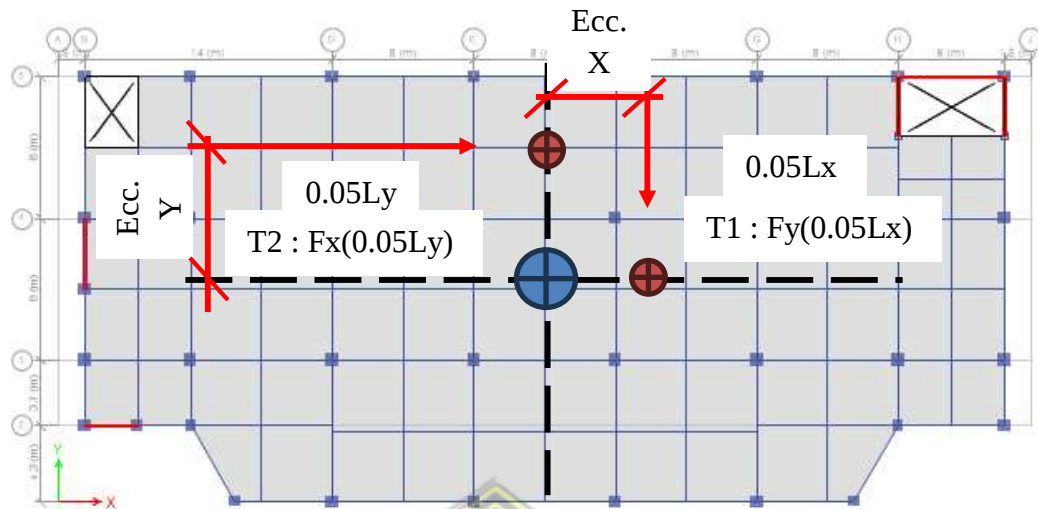


Gambar 4. 11. Denah letak torsi tak terduga Permodelan 2

Tabel 4. 56. Tabel Eksentrisitas Torsi Tak terduga

Arah X	T1	ecc. (m)	Arah Y	T2	ecc. (m)
Storey7	10,3%	2,469	Storey7	5,3%	2,731
Storey6	10,0%	2,402	Storey6	5,3%	2,741
Storey5	10,1%	2,417	Storey5	5,2%	2,711
Storey4	9,8%	2,344	Storey4	5,1%	2,672
Storey3	9,8%	2,344	Storey3	5,1%	2,634
Storey2	9,7%	2,322	Storey2	5,1%	2,644
Storey1	8,1%	1,951	Storey1	5,4%	2,831

3. Permodelan 3



Gambar 4. 12. Denah letak torsi tak terduga permodelan 3

Tabel 4. 57. Tabel Eksentrisitas Torsi Tak terduga

Arah X	T1	ecc. (m)	Arah Y	T2	ecc. (m)
Storey7	11,1%	2,671	Storey7	9,0%	4,682
Storey6	10,8%	2,592	Storey6	4,6%	2,411
Storey5	10,8%	2,600	Storey5	4,6%	2,411
Storey4	10,4%	2,507	Storey4	4,6%	2,393
Storey3	10,4%	2,492	Storey3	4,6%	2,393
Storey2	10,1%	2,432	Storey2	4,7%	2,429
Storey1	8,4%	2,022	Storey1	4,9%	2,530

Setelah mendapatkan hasil dari Eksentrisitas torsi tak terduga, maka Penulis memilih permodelan 3 karena permodelan tersebut memiliki nilai torsi cukup tinggi akan tetapi permodelan 3 tetap memenuhi ketentuan bangunan gedung tahan gempa SNI 1726-2019.

Selanjutnya Penulis melakukan rangkaian perhitungan dengan permodelan 3, apakah permodelan tersebut memenuhi syarat beton struktural untuk bangunan gedung sesuai SNI 2847-2019?

4.4 Pembebanan Struktur

4.4.1. Pembebanan Gravitasi

Pembebanan gravitasi yang digunakan berdasarkan SNI 1727:2020, yaitu Beban Desain Minimum dan Kriteria Terkait untuk Bangunan Gedung dan Struktur Lain. Beban gravitasi dalam Perancangan bangunan tinggi 7 lantai ini meliputi: beban mati berat sendiri (*dead load*), beban mati tambahan (*super imposed dead load*) dan beban hidup (*live load*).

a. Beban Mati Berat Sendiri (*DL*)

Beban mati (*dead load*) adalah berat seluruh komponen elemen struktural bangunan yang terdiri atas pelat, balok, kolom dan dinding geser. Beban mati akan dihitung secara otomatis oleh program ETABS dengan menggunakan berat jenis material beton 24 kN/m^3 dan berat jenis tulangan $78,50 \text{ kN/m}^3$.

b. Beban Mati Tambahan (*SIDL*)

Beban mati tambahan atau *super imposed dead load* adalah berat komponen nonstruktural (arsitektural dan MEP) yang terdapat pada struktur bangunan. Beban *SIDL* yang digunakan dalam desain ini dapat dilihat pada Tabel 4.58 dan Tabel 4.59.

Tabel 4. 58. Beban Mati Tambahan pada Lantai

No	Jenis Beban Mati	Berat Jenis (kN/m^3)	Beban Merata (kN/m^2)
1	Pasir setebal 1 cm	16	0,16
2	Spesi setebal 3 cm	22	0,66
3	Keramik setebal 1 cm	22	0,22
4	Plafond & Penggantung		0,2
5	Dinding Rebah		1,8
6	ME (Mekanikal & Elektrikal)		0,25
TOTAL			3,29

Tabel 4. 59. Beban Mati Tambahan pada Atap

No	Jenis Beban Mati	Beban Merata (kN/m ²)
1	Plafond & Penggantung	0,2
2	ME (Mekanikal & Elektrikal)	0,25
TOTAL		0,45

c. Beban Hidup (LL)

Beban hidup (*live load*) adalah beban yang terjadi akibat penghunian atau penggunaan gedung yang berasal dari barang atau orang yang dapat berpindah tempat sehingga mengakibatkan perubahan dalam pembebanan lantai dan atap. Beban hidup (LL) yang digunakan dalam desain ini, yaitu beban hidup untuk ruangan kelas perkuliahan sebesar 1,92 kN/m² dan beban hidup untuk atap (L_r) sebesar 0,96 kN/m².

4.4.2. Pembebanan Gempa

Pembebanan gempa pada perancangan bangunan ini menggunakan analisis respons spektra (*Response Spectrum Analysis*). Analisis ini digunakan untuk mendesain gedung sehingga kebutuhan tulangan dari elemen struktur memenuhi prinsip desain kapasitas.

a) Analisis Beban Gempa

Analisis beban gempa berlandaskan dalam standar SNI 1726:2019 tentang tata cara perancangan ketahanan gempa untuk struktur bangunan gedung dan non gedung.

1. Kategori Risiko dan Faktor Keutamaan Gempa

Gedung ini dirancang untuk gedung yang bermanfaat guna sarana perkuliahan. Sesuai dengan SNI 1726:2019 Tabel 4, gedung tersebut dikategorikan pada Kategori risiko IV dengan nilai faktor keutamaan gempa (I_e) yaitu 1,50.

2. Klasifikasi Situs

Mengacu pada standar SNI 1726:2019. Klasifikasi situs dapat ditentukan berdasarkan 3 parameter yaitu $\tilde{V}_s$ = kecepatan rambat gelombang geser rata-rata pada regangan geser yang kecil, di dalam lapisan 30 m teratas. N = tahanan penetrasi standar dan S_u = kuat geser rata-rata di dalam lapisan 30 m paling atas. Dalam menentukan klasifikasi situs digunakan nilai penetrasi standar (N -SPT) yang merupakan hasil pengujian tanah lokasi gedung. Data N -SPT tanah yang diperoleh dari lokasi gedung ini hanya diukur sampai kedalaman 20 m. Maka dari itu, Penulis melakukan perhitungan hanya sampai kedalaman 20 m saja.

Dengan analisis perhitungan rata-rata nilai N -SPT sampai dengan kedalaman 20 m dapat dihitung sesuai Tabel 4.60.

Tabel 4. 60. Nilai N -SPT

Kedalaman	Tebal (di)	N-SPT	di/Ni
2,8	2,8	21	0,1333333
5,1	2,3	24	0,0958333
7,6	2,5	28	0,0892857
10,2	2,6	2	1,3
12,8	2,6	3	0,8666667
15,2	2,4	7	0,3428571
17,6	2,4	7	0,3428571
20,2	2,6	9	0,2888889
22,6	2,4	10	0,24
25,2	2,6	12	0,2166667
27,6	2,4	14	0,1714286
30,2	2,6	18	0,1444444
32,6	2,4	19	0,1263158
35,2	2,6	23	0,1130435
37,6	2,4	24	0,1
40,2	2,6	26	0,1
42,6	2,4	27	0,0888889

45,2	2,6	28	0,0928571
47,6	2,4	31	0,0774194
50	2,4	35	0,0685714
Total	50		4,999358

Berdasarkan Tabel 4.29 di atas maka dapat dihitung tahanan penetrasi standar lapangan rata-rata (N) yaitu:

$$N = \frac{\sum_{i=1}^n d_i}{\sum_{i=1}^n \frac{d_i}{N_i}} = \frac{50}{4,999358} = 10,0021$$

Dari hasil perhitungan yang telah dilakukan, didapatkan nilai tahanan penetrasi standar lapangan rata-rata (N) sebesar 10,0021. Berdasarkan SNI 1726:2019 Tabel 5, nilai $15 < N < 50$ termasuk ke dalam Kategori **Tanah Lunak (SE)**.

3. Parameter Respons Spektra Percepatan Gempa Terpetakan

Nilai parameter respons spektra percepatan gempa didapat dari Program Desain Spektra Indonesia tahun 2021 (rsa.ciptakarya.pu.go.id/2021) yang disediakan oleh Direktorat Jenderal Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat Indonesia dengan cara menentukan titik koordinat atau menginput nama kota lokasi perancangan bangunan sehingga secara otomatis diperoleh hasil nilai parameter respon spektra percepatan gempa terpetakan. Nilai parameter respon spektra percepatan gempa terpetakan di daerah Terboyo Kulon Semarang dapat dilihat pada Tabel 4.61.

Tabel 4. 61. Data Parameter Respons Spektra Terpetakan

Variabel	Nilai
F_{PGA}	0,4142
S_s (g)	0,7372
S_1 (g)	0,3322
TL (detik)	20

4. Parameter Respons Spektra Percepatan Gempa Tertarget

Nilai parameter respons spektra percepatan gempa tertarget pada periode pendek (S_{MS}) dan periode 1 detik (S_{M1}) disesuaikan dengan pengaruh klasifikasi situs yang

diperoleh dari Program Desain Spektra Indonesia di *website* resmi Direktorat Jenderal Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat Indonesia dengan cara menentukan jenis tanah maka didapatkan nilai parameter respons spektra gempa tertarget berdasarkan Persamaan 2.1 dan 2.2 sebagai berikut:

$$F_a = 1,3205$$

$$F_v = 2,6711$$

$$S_{MS} = F_a \times S_s = 1,3205 \times 0,7372 = 0,973452$$

$$S_{M1} = F_v \times S_1 = 2,6711 \times 0,3322 = 0,887401$$

5. Parameter Respons Spektra Percepatan Gempa Desain

Nilai parameter respon spektra percepatan gempa desain untuk periode pendek (S_{DS}) dan periode 1 detik (S_{D1}) didapatkan berdasarkan Persamaan 2.3 dan 2.4.

$$S_{DS} = \frac{2}{3} \times S_{MS} = \frac{2}{3} \times 0,973452 = 0,6490$$

$$S_{D1} = \frac{2}{3} \times S_{M1} = \frac{2}{3} \times 0,887401 = 0,5916$$

6. Kategori Desain Seismik

Berdasarkan SNI 1726:2019, tiap struktur bangunan diharuskan memiliki suatu Kategori Desain Seismik. Gedung yang dirancang tergolong pada Kategori Risiko IV dan mempunyai nilai $S_{DS} \geq 0,50$ dan nilai $S_{D1} \geq 0,20$ sehingga gedung perancangan termasuk Kategori Desain Seismik tinggi yaitu D.

7. Faktor R , Ω_0 , C_d Sistem Struktur

Nilai faktor R , Ω_0 , C_d untuk Sistem Rangka Pemikul Momen Khusus (SRPMK) menggunakan standar SNI 1726:2019 Tabel 12 dihasilkan koefisien modifikasi respon (R) = 8, faktor kuat lebih sistem (Ω_0) = 3 dan faktor pembesaran defleksi (C_d) = 5,5.

Nilai faktor R , Ω_0 , C_d untuk Sistem Ganda menggunakan standar SNI 1726:2019 Tabel 12 dihasilkan koefisien modifikasi respon (R) = 7, faktor kuat lebih sistem (Ω_0) = 2,5 dan faktor pembesaran defleksi (C_d) = 5,5.

8. Rekap Analisis Beban Gempa

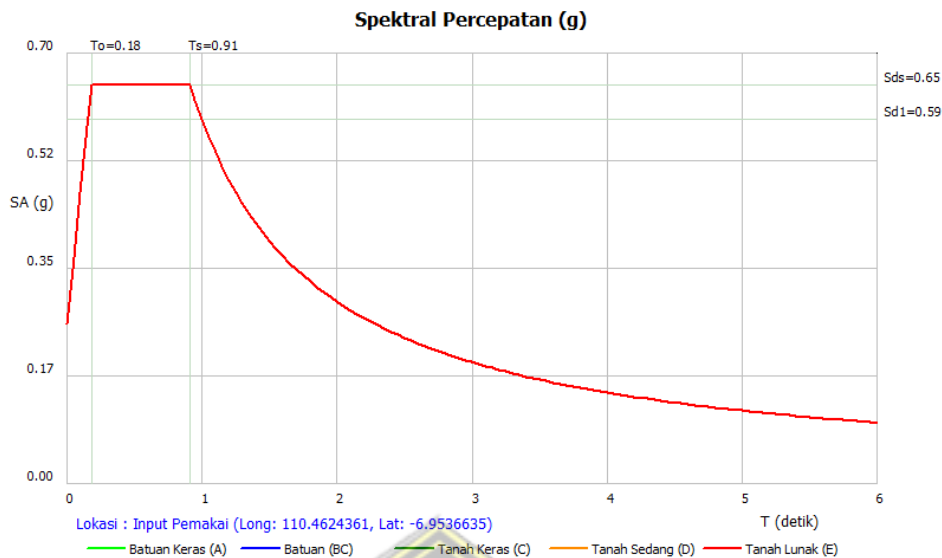
Berdasarkan SNI 1726:2019, pembebanan gempa untuk bangunan Sistem Rangka Pemikul Momen Khusus (SRPMK) dan Sistem Ganda yang terletak di

Terboyo Kulon, Semarang memiliki parameter seperti pada Tabel 4.62.

Tabel 4. 62. Parameter Respons Spektra

Parameter Respons Spektra		
Kategori Risiko		IV
Faktor Keutamaan	I_e	1,5
Klasifikasi Situs		SE (Tanah Lunak)
Percepatan gempa MCE_R terpetakan untuk periode pendek	S_s	0,7372
Percepatan gempa MCE_R terpetakan untuk periode 1 detik	S_1	0,3322
Faktor amplifikasi periode pendek	F_a	1,3205
Faktor amplifikasi periode 1 detik	F_v	2,6711
Percepatan pada periode pendek	S_{MS}	1,0546
Percepatan pada periode 1 detik	S_{M1}	0,7469
Percepatan desain pada periode pendek	S_{DS}	0,6490
Percepatan desain pada periode 1 detik	S_{D1}	0,5916
Parameter periode	T_0	0,1823
	T_s	0,9116
Parameter Sistem Rangka Pemikul Momen Khusus (SRPMK)		
Faktor koefisien modifikasi	R	8
Faktor kuat lebih sistem	Ω_0	3
Faktor pembesaran defleksi	C_d	5,5
Parameter Sistem Ganda		
Faktor koefisien modifikasi	R	7
Faktor kuat lebih sistem	Ω_0	2,5
Faktor pembesaran defleksi	C_d	5,5

Dari parameter respons spektra di atas, spektrum respons desain dapat dilihat pada Gambar 4.13.



Gambar 4. 13. Spektrum Respons Desain Lokasi Perancangan

4.4.3. Kombinasi Pembebanan Struktur

Kombinasi beban untuk metode ultimit struktur, komponen struktur dan elemen fondasi harus dirancang sedemikian rupa hingga kuat rencananya sama atau melebihi pengaruh beban terfaktor.

Berdasarkan SNI 2847:2019 Pasal 5.3.1, kombinasi pembebanan terfaktor, yaitu sebagai berikut:

1. $1,4 D$
2. $1,2 D + 1,6 L + 0,5 (L_r \text{ atau } R)$
3. $1,2 D + 1,6 (L_r \text{ atau } R) + (1,0 L \text{ atau } 0,5 W)$
4. $1,2 D + 1,0 W + 1,0 L + 0,5 (L_r \text{ atau } R)$
5. $1,2 D + 1,0 E + 1,0 L$
6. $0,9 D + 1,0 W$
7. $0,9 D + 1,0 E$

Untuk nomor 5 dan 7 dengan beban gempa diatur oleh SNI 1726:2019 Pasal 7.4, faktor dan kombinasi beban untuk beban mati nominal, beban hidup nominal dan beban gempa nominal, yaitu sebagai berikut:

1. $(1,2 + 0,2 S_{Ds}) D + 1 L \pm 0,3 \rho E_x \pm 1 \rho E_y$
2. $(1,2 + 0,2 S_{Ds}) D + 1 L \pm 1 \rho E_x \pm 0,3 \rho E_y$
3. $(0,9 - 0,2 S_{Ds}) D \pm 0,3 \rho E_x \pm 1 \rho E_y$

$$4. (0,9 - 0,2 S_{DS}) D \pm 1 \rho E_x \pm 0,3 \rho E_y$$

$$S_{DS} (g) = 0,7372 \text{ (Terboyo Kulon, Semarang; Tanah Lunak)}$$

$$\rho = 1,3 \text{ (SNI 1726:2019 Pasal 7.3.4.2)}$$

Berikut kombinasi pembebanan yang digunakan dapat dilihat pada Tabel 4.63.

Tabel 4. 63. Kombinasi Pembebanan

Kombinasi	DL	SIDL	LL	L _r	E _x	E _y
Comb 1	1,40	1,40				
Comb 2	1,20	1,20	1,60	0,50		
Comb 3	1,20	1,20	1,00	1,60		
Comb 4	1,34	1,34	1,00		1,30	0,39
Comb 5	1,34	1,34	1,00		1,30	-0,39
Comb 6	1,34	1,34	1,00		-1,30	0,39
Comb 7	1,34	1,34	1,00		-1,30	-0,39
Comb 8	1,34	1,34	1,00		0,39	1,30
Comb 9	1,34	1,34	1,00		-0,39	1,30
Comb 10	1,34	1,34	1,00		0,39	-1,30
Comb 11	1,34	1,34	1,00		-0,39	-1,30
Comb 12	0,76	0,76			1,30	0,39
Comb 13	0,76	0,76			1,30	-0,39
Comb 14	0,76	0,76			-1,30	0,39
Comb 15	0,76	0,76			-1,30	-0,39
Comb 16	0,76	0,76			0,39	1,30
Comb 17	0,76	0,76			-0,39	1,30
Comb 18	0,76	0,76			0,39	-1,30
Comb 19	0,76	0,76			-0,39	-1,30

4.5 Pengecekan Perilaku Struktur Bangunan

4.5.1. Rasio Partisipasi Massa

Berdasarkan hasil ETABS, ringkasan dan partisipasi modal massa yang diperoleh bisa dilihat pada Tabel 4.64.

Tabel 4. 64. Rekapitulasi Rasio Partisipasi Modal Massa

<i>Modal Direction Factors</i>						
<i>Case</i>	<i>Mode</i>	<i>Period</i>	<i>UX</i>	<i>UY</i>	<i>UZ</i>	<i>RZ</i>
		<i>sec</i>				
<i>Modal</i>	1	0,78	0,013	0,98	0	0,007
<i>Modal</i>	2	0,735	0,77	0,019	0	0,211
<i>Modal</i>	3	0,503	0,225	0	0	0,775
<i>Modal</i>	4	0,252	0,931	0	0	0,069
<i>Modal</i>	5	0,205	0,121	0,321	0	0,558
<i>Modal</i>	6	0,204	0,042	0,881	0	0,077
<i>Modal</i>	7	0,198	0,775	0,091	0	0,134
<i>Modal</i>	8	0,14	0,015	0	0	0,985
<i>Modal</i>	9	0,132	0,153	0,002	0	0,845
<i>Modal</i>	10	0,113	0,08	0,001	0	0,92
<i>Modal</i>	11	0,111	0,486	0,004	0	0,511
<i>Modal</i>	12	0,111	0,719	0,004	0	0,277
<i>Modal</i>	13	0,105	0,84	0,083	0	0,078
<i>Modal</i>	14	0,104	0,179	0,761	0	0,06
<i>Modal</i>	15	0,098	0,494	0,403	0	0,103
<i>Modal</i>	16	0,096	0,321	0,655	0	0,024
<i>Modal</i>	17	0,079	0,001	0	0	0,999
<i>Modal</i>	18	0,071	0,81	0,002	0	0,188
<i>Modal</i>	19	0,067	0,61	0,024	0	0,366
<i>Modal</i>	20	0,066	0,079	0,905	0	0,015
<i>Modal</i>	21	0,063	0,42	0,084	0	0,496
<i>Modal</i>	22	0,062	0,088	0,858	0	0,053
<i>Modal</i>	23	0,053	0,891	0,008	0	0,101
<i>Modal</i>	24	0,049	0,815	0,096	0	0,088
<i>Modal</i>	25	0,048	0,075	0,891	0	0,034
<i>Modal</i>	26	0,047	0,052	0,007	0	0,941
<i>Modal</i>	27	0,045	0,002	0	0	0,998

Modal	28	0,044	0,061	0,03	0	0,909
Modal	29	0,044	0,938	0	0	0,061
Modal	30	0,042	0,054	0,012	0	0,934

4.5.2. Perhitungan Faktor Skala Gempa

4.5.2.1. Perhitungan Koefisien Respons Seismik (C_s)

Nilai C_s dihitung berdasarkan Pasal 7.8.1.1 SNI 1726:2019, yakni terdapat nilai C_s arah X dan arah Y yang harus dibandingkan dengan nilai C_s maksimum dan nilai C_s minimum. Rumus C_s , $C_{s \min}$ dan $C_{s \max}$ arah X dan arah Y menggunakan Persamaan 4.6 sampai Persamaan 4.8 berikut:

$$C_s = \frac{S_{D1}}{T \left(\frac{R}{I_e} \right)} \dots\dots\dots (4.6)$$

$$C_{s \min} = 0,044 S_{DS} I_e \geq 0,01 \dots\dots\dots (4.7)$$

$$C_{s \max} = \frac{S_{DS}}{\left(\frac{R}{I_e} \right)} \dots\dots\dots (4.8)$$

Nilai Periode (T) yang digunakan dalam perhitungan C_s adalah nilai periode di ETABS yang dibandingkan dengan nilai periode minimum dan nilai periode maksimum yang diatur pada Pasal 7.8.2 SNI 1726:2019.

- Periode Minimum

$$T_{\min} = C_t \times h_n^x = 0,0488 \times (23.3)^{0,75} = 0,51775 \text{ detik}$$

- Periode Maksimum

$$T_{\max} = C_u \times T_{\min} = 1,4 \times 0,51775 = 0,725 \text{ detik}$$

- Periode arah X dan Y pada ETABS

$$- T_a \text{ dari ETABS arah X } (T_{cx}) = 0,780 \text{ detik}$$

$$- T_a \text{ dari ETABS arah Y } (T_{cy}) = 0,735 \text{ detik}$$

- Periode yang digunakan

Setelah dilakukan perhitungan, maka nilai T yang digunakan untuk arah X maupun Y adalah menggunakan T arah X dan Y pada ETABS sebesar:

$$- T \text{ arah X } (T_x) = 0,725 \text{ detik}$$

$$- T \text{ arah Y } (T_y) = 0,725 \text{ detik}$$

Setelah melakukan perhitungan T , maka nilai C_s perhitungan adalah sebagai berikut:

- $C_s \text{ arah X} = \frac{0,6480}{0,725 \times (\frac{7}{1,5})} = 0,1391$
- $C_s \text{ arah Y} = \frac{0,6480}{0,725 \times (\frac{7}{1,5})} = 0,1391$
- $C_{s \text{ min}} = 0,044 \times 0,6940 \times 1,5 = 0,0428$
- $C_{s \text{ max}} = \frac{0,6940}{(\frac{7}{1,5})} = 0,1750$

Nilai C_s di atas dibandingkan dengan nilai C_s minimum dan C_s maksimum, maka diperoleh nilai C_s untuk arah X dan Y sesuai pada Tabel 4.65.

Tabel 4. 65. Koefisien Respons Seismik

C_s arah X	0,1391	C_s arah Y	0,1391
C_s minimum	0,0428	C_s minimum	0,0428
C_s maksimum	0,1750	C_s maksimum	0,1750
C_s yang dipakai	0,1391	C_s yang dipakai	0,1391

4.5.2.2. Perhitungan Faktor Skala Gaya

Dari hasil ETABS diperoleh nilai gaya geser dasar seismik statik (V) untuk arah X dan Y ditunjukkan pada Tabel 4.66.

Tabel 4. 66. Output Gaya Geser Dasar Statik (V)

Lantai	Elevasi (m)	V_x (kN)	V_y (kN)
7	4	13433,70	13499,83
6	4	20088,08	20190,48
5	4	25604,85	25739,85
4	4	29967,33	30130,56
3	4	33169,74	33356,02
2	4	35217,24	35420,34
1	3,3	36151,33	36363,74

Sedangkan perhitungan gaya geser dinamik yang dihasilkan oleh ETABS ditunjukkan pada Tabel 4.67.

Tabel 4. 67. Output Gaya Geser Dasar Dinamik (V_I)

Lantai	Elevasi (m)	V_{IX} (kN)	V_{IY} (kN)
7	4	10939,69	10994,12
6	4	15586,87	15679,10
5	4	19338,78	19464,38
4	4	22396,29	22546,70
3	4	24817,01	24982,85
2	4	26501,95	26674,45
1	3,3	27252,42	27426,49

Sesuai dengan SNI 1726:2019 Pasal 7.9.2.5.2. Gaya geser dasar, V_X dan V_Y harus dihitung untuk arah X dan arah Y sesuai Pasal 7.8.1.1. Untuk tiap gerak tanah yang dianalisis, faktor skala gaya geser dasar ditentukan sebagai berikut:

$$\eta_x = \frac{V_X}{V_{IX}} \geq 1,0$$

$$\eta_y = \frac{V_Y}{V_{IY}} \geq 1,0$$

Untuk perhitungan faktor skala dari perbandingan gaya geser statik dan dinamik adalah sebagai berikut:

$$\eta_x = \frac{V_X}{V_{IX}} = \frac{7065,988}{4238,7005} = 1,667$$

$$\bullet \eta_y = \frac{V_Y}{V_{IY}} = \frac{7065,988}{5065,9501} = 1,339$$

Maka, diperoleh rekapitulasi hasil pengecekan faktor skala pada Tabel 4.68 sebagai berikut:

Tabel 4. 68. Rekapitulasi Hasil Pengecekan Faktor Skala

W_t (berat total bangunan)	50810	kN
V_X	7065,84	kN
V_Y	7065,84	kN
V_{IX}	4240,763	kN
V_{IY}	5067,7929	kN
Cek arah X	$V_{IX} < V_X$	Gaya harus dikali skala faktor

Cek arah Y	$V_{IY} < V_Y$	Gaya harus dikali skala faktor
Faktor skala arah X	1,667	
Faktor skala arah Y	1,339	

- Faktor pembesaran gempa arah X = $\frac{7065,998}{4240,763} = 1,667$
- Faktor pembesaran gempa arah Y = $\frac{7065,998}{5067,7929} = 1,339$

Selanjutnya gempa dibesarkan dari kedua arahnya maka didapatkan nilai gaya geser dasar dinamik terkoreksi dapat dilihat pada Tabel 4.69.

Tabel 4. 69. Output Gaya Geser Dinamik Terkoreksi

Lantai	Elevasi (m)	V_{Spec-X} (kN)	V_{Spec-Y} (kN)
7	4	813,0043	806,1666
6	4	2790,8369	2817,0294
5	4	4299,6206	4338,1127
4	4	5435,5302	5490,2178
3	4	6298,8303	6344,872
2	4	6858,8007	6879,5117
1	3,3	7065,8253	7065,8316

Gaya geser desain yang akan digunakan diambil dari yang terbesar dari gaya geser statik ekuivalen dan gaya geser dinamik terkoreksi. Gaya geser desain untuk setiap lantai dapat dilihat pada Tabel 4.70.

Tabel 4. 70. Gaya Geser Desain

Lantai	Elevasi (m)	Statik		Dinamik Terkoreksi		Gaya Geser Desain	
		V_x	V_y	V_{Spec-X}	V_{Spec-Y}	V_x	V_y
		(kN)	(kN)	(kN)	(kN)	(kN)	(kN)
7	4	643,28	643,28	813,00	806,17	813,00	806,17
6	4	2532,36	2532,36	2790,8	2817,0	2790,8	2817,03

5	4	4116,05	4116,05	4299,62	4338,1	4299,6	4338,11
4	4	5364,57	5364,57	5435,5	5490,2	5435,5	5490,22
3	4	6277,26	6277,26	6298,83	6344,87	6298,8	6344,87
2	4	6838,59	6838,59	6858,80	6879,5	6858,8	6879,51
1	3,3	7065,99	7065,99	7065,83	7065,8	7065,99	7065,99

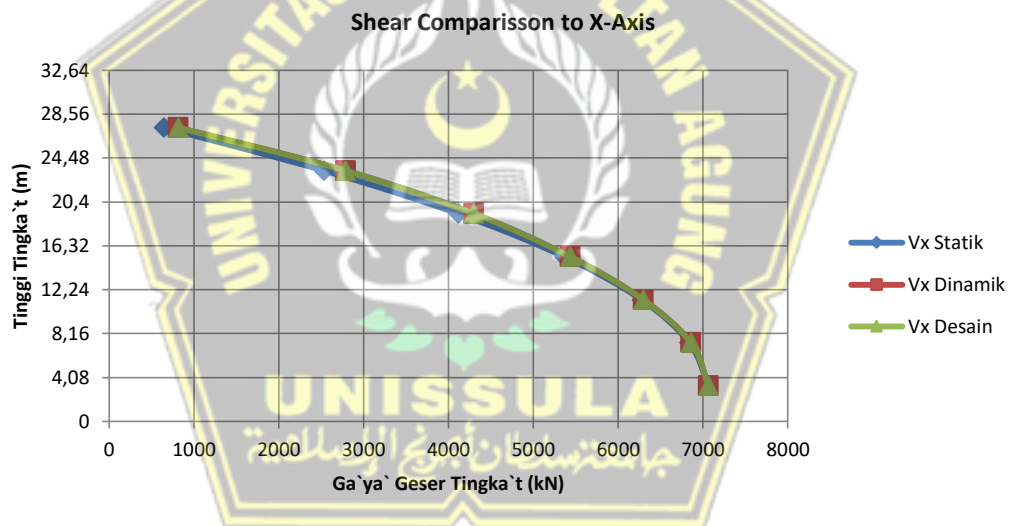
Keterangan :

$V_{\text{Spec-X}}$ = Gaya geser dinamik arah X

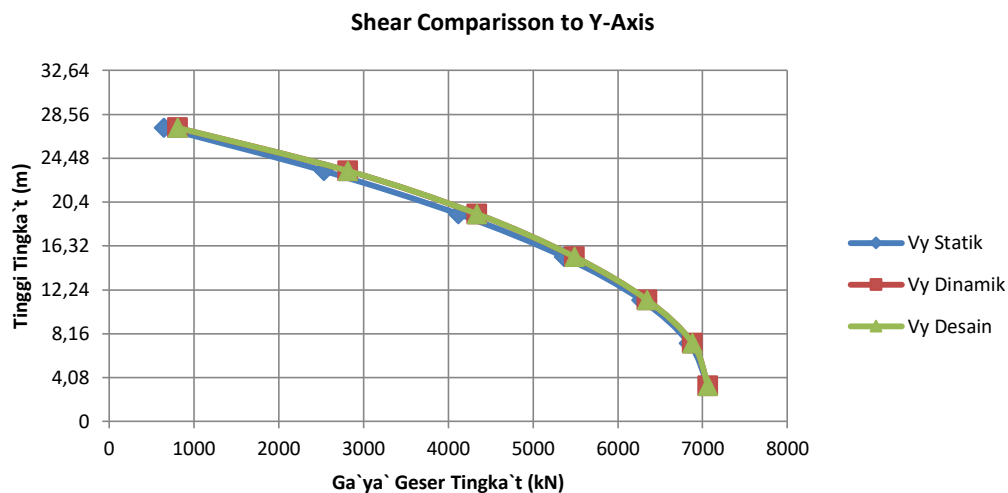
$V_{\text{Spec-Y}}$ = Gaya geser dinamik arah Y

4.5.3. Pengecekan Gaya Geser

Gaya geser pada struktur dapat diperoleh langsung dari ETABS. Berikut diagram geser struktur terhadap ketinggian bangunan arah X dan arah Y ditunjukkan pada Gambar 4.14. dan Gambar 4.15.



Gambar 4. 14. Diagram Gaya Geser Gempa Arah X



Gambar 4. 15. Diagram Gaya Geser Gempa Arah Y

4.5.4. Pengecekan Simpangan Antar Tingkat (*Storey Drift*)

Berdasarkan SNI 1726:2019, faktor-faktor dalam kriteria persyaratan simpangan adalah sebagai berikut:

- Faktor pembesaran defleksi (C_d) untuk Sistem Ganda = 5,5 (Tabel 8 SNI 1726:2019),
- Faktor Keutamaan Gempa (I_e) = 1,5 (Tabel 2 SNI 1726:2019),
- Faktor redundansi untuk gedung dengan KDS D adalah $\rho = 1,3$ (Pasal 7.3.4.2 1726:2019),
- Simpangan antar lantai tingkat desain (Δ) tidak boleh melebihi simpangan antar lantai izin. Berdasarkan SNI 1726:2019 Pasal 7.12.1, simpangan antar lantai izin untuk gedung dengan Kategori risiko IV adalah $= (0,010) \times h$, dimana h adalah tinggi tingkat.

Simpangan antar tingkat merupakan perpindahan horizontal di bagian atas tingkat relatif terhadap bawahnya. Berdasarkan analisis program ETABS, didapat simpangan arah X dan Y yang ditampilkan pada Tabel 4.71.

Tabel 4. 71. Pengecekan *Storey Drift* Arah X

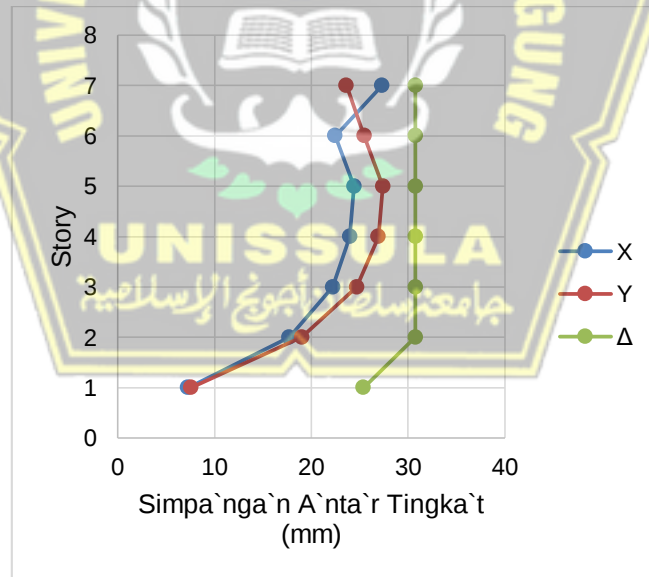
Storey	Displacement		Elastic Drift		h	Inelastic Drift		Drift Limit	Cek
	δe_x	δe_y	δe_x	δe_y		Δ_x	Δ_y		
	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)		(mm)	(mm)		
7	39,672	42,192	7,453	6,445	4000	27,328	23,632	30,769	OK
6	32,219	35,747	6,131	6,950	4000	22,480	25,483	30,769	OK
5	26,088	28,797	6,665	7,476	4000	24,438	27,412	30,769	OK
4	19,423	21,321	6,543	7,342	4000	23,991	26,921	30,769	OK
3	12,880	13,979	6,064	6,734	4000	22,235	24,691	30,769	OK
2	6,816	7,245	4,836	5,187	4000	17,732	19,019	30,769	OK
1	1,980	2,058	1,980	2,058	3300	7,260	7,546	25,385	OK

Keterangan:

Perpindahan yang diperbesar $= (\delta_e \times C_d) / I_e$

Simpangan antar lantai $= (\delta_n - \delta_i)$

Diagram dari hasil analisis simpangan antar tingkat arah X dapat dilihat pada Gambar 4.16.



Gambar 4. 16. Diagram *Storey Drift* Arah X

4.5.5. Pengecekan P-Delta

Pengaruh P-Delta ditentukan berdasarkan nilai dari koefisien stabilitas (θ). Jika nilai θ lebih kecil dari nilai θ maksimum, maka pengaruh P-Delta dapat diabaikan.

Nilai θ maksimum dihitung dengan rumus berikut:

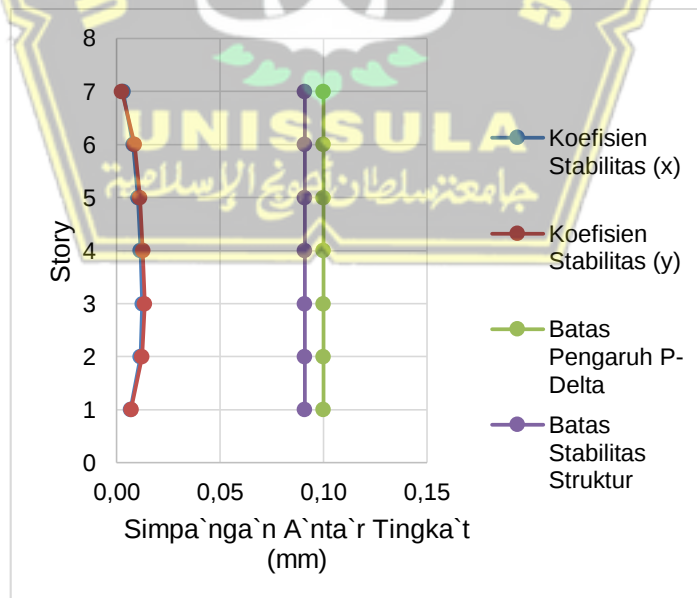
$$\theta_{\max} = \frac{0,5}{C_d \times \beta} = \frac{0,5}{5,5 \times 1} = 0,0909$$

Hasil dari pengecekan P-Delta arah X dapat dilihat pada Tabel 4.72.

Tabel 4. 72. Pengecekan P-Delta Arah X

Storey	Inelastic Drift		Storey Forces			h	Koefisien Stabilitas		Batas Pengaruh P-Delta	Batas Stabilitas Struktur, θ_{max}	Cek
	Δ_X	Δ_Y	P	V _x	V _y		θX	θY			
	(mm)	(mm)	(kN)	(kN)	(kN)	(mm)					
7	27,328	23,632	801,9	493,6	542,9	4000	0,0030	0,0024	0,1	0,0909	OK
6	22,480	25,483	1509	2893	3023	4000	0,0080	0,0087	0,1	0,0909	OK
5	24,438	27,412	3022	4917	5070	4000	0,0102	0,0111	0,1	0,0909	OK
4	23,991	26,921	4532	6446	6582	4000	0,0115	0,0126	0,1	0,0909	OK
3	22,235	24,691	6083	7483	7570	4000	0,0123	0,0135	0,1	0,0909	OK
2	17,732	19,019	7634	8036	8064	4000	0,0115	0,0123	0,1	0,0909	OK
1	7,260	7,546	9185	8192	8192	3300	0,0067	0,0070	0,1	0,0909	OK

Dari pengecekan P-Delta arah X menghasilkan diagram stabilitas P-Delta arah X dapat dilihat di Gambar 4.17.



Gambar 4. 17. Diagram P-Delta

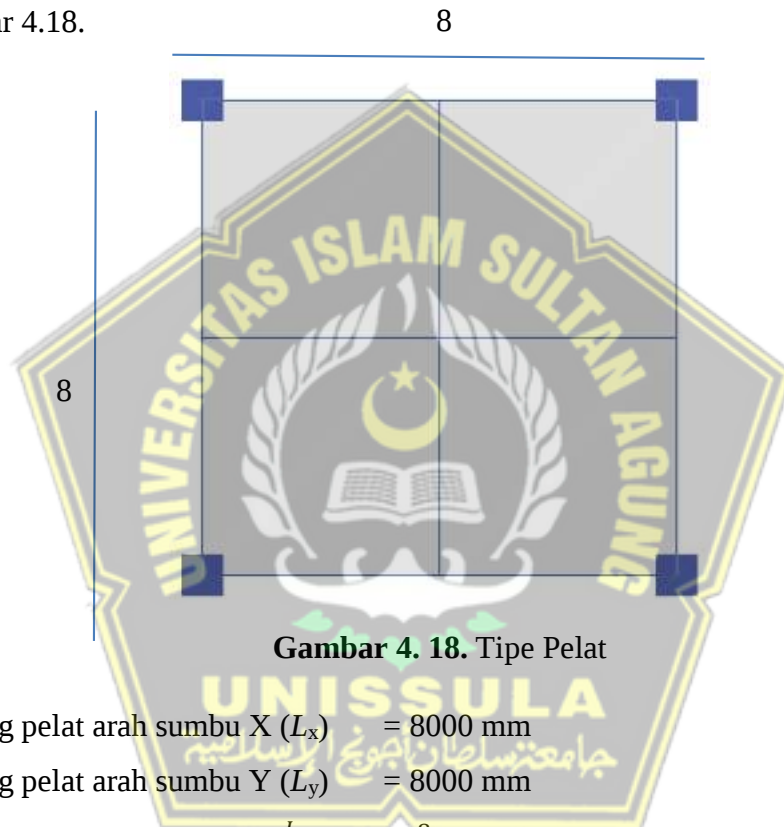
4.6 Perancangan Elemen Struktur Beton Bertulang

4.6.1. Perancangan Pelat

Perilaku pelat dibagi menjadi dua yaitu pelat 1 arah dan pelat 2 arah. Pelat perlu dilakukan pengecekan dengan perbandingan lebar dan panjang pelat (L_x/L_y). Tahapan-tahapan perancangan pelat yang dilakukan, antara lain:

4.6.1.1. *Properti Material dan Penampang*

Tipe pelat yang akan digunakan sebagai contoh perhitungan dapat dilihat pada Gambar 4.18.



Gambar 4. 18. Tipe Pelat

Panjang pelat arah sumbu X (L_x) = 8000 mm

Panjang pelat arah sumbu Y (L_y) = 8000 mm

Perbandingan panjang pelat ($\frac{L_y}{L_x}$) = $\frac{8}{8} = 1$

Jenis pelat = 2 arah, karena $L_y / L_x \leq 2$

Tebal pelat (h) = 125 mm

Diamater tulangan (d_b) = 10 mm

Tebal selimut bersih (c_c) = 20 mm (SNI 2847:2019 Tabel 20.6.1.3.1)

Tebal efektif penampang (d)
= $h - c_c - d_s - d_b/2$
= $125 - 20 - 10 - 10/2$
= 90

Kuat tekan beton (f'_c) = 30 MPa

$$\begin{aligned}\text{Kuat leleh tulangan } (f_y) &= 420 \text{ MPa} \\ \text{Modulus elastisitas beton } (E_c) &= 4700 \times \sqrt{f'_c} \\ &= 4700 \times \sqrt{30} \\ &= 25742 \text{ Mpa}\end{aligned}$$

Faktor distribusi tegangan (β_1)
(SNI 2847:2019 Tabel 22.2.2.4.3)

$$\begin{aligned}\beta_1 &= 0,85 - 0,05 \times \frac{(f'_c - 28)}{7} \\ &= 0,85 - 0,05 \times \frac{(30 - 28)}{7} \\ &= 0,8357\end{aligned}$$

Faktor modifikasi (λ)
(SNI 2847:2019 Tabel 25.4.2.4)

$$\lambda = 1 \text{ (beton normal)}$$

4.6.1.2. Gaya Dalam

Gaya dalam untuk perancangan pelat diambil dari analisis menggunakan ETABS sebagai berikut:

- $M_{\max}$ akibat $M_{11 \max}$ = 10,303 kN-m
- $M_{\min}$ akibat $M_{11 \min}$ = -9,35 kN-m
- $M_{\max}$ akibat $M_{22 \max}$ = 9,646 kN-m
- $M_{\min}$ akibat $M_{22 \min}$ = -11,009 kN-m
- V_u = 16,228 kN

4.6.1.3. Penulangan Lentur Pelat (analisis untuk per m')

a) Momen Positif M_{11}

(Tulangan Lapangan Bawah Arah Sumbu X)

- Spasi tulangan (s)

$$s = 150 \text{ mm}$$

- Spasi maksimum ($s_{\max}$)

(SNI 2847:2019 Pasal 8.7.2.2)

$$s_{\max} = 2 \times h = 2 \times 125 = 250 \text{ mm}$$

- Cek spasi :

$$s < s_{\max} = 150 < 250 \rightarrow \text{OK}$$

- Jumlah tulangan negatif tumpuan (n)

$$n = \frac{b}{s} = \frac{1000}{s} = \frac{1000}{150} = 6,67$$

- Diameter tulangan (d_b)

$$d_b = 10 \text{ mm}$$

- Jarak bersih antar tulangan

$$s - d_b = 150 - 10 = 140 \text{ mm}$$

- Cek jarak bersih

(SNI 2847:2019 Pasal 25.2.1)

$$\text{Syarat} = \text{Jarak bersih} \geq d_b = 140 \geq 25 \rightarrow \text{OK}$$

- Luas tulangan yang dipasang ($A_s \text{ pasang}$)

$$A_s \text{ pasang} = n \times \frac{1}{4} \times \pi \times d_b^2$$

$$= 6,67 \times \frac{1}{4} \times 3,14 \times 10^2$$

$$= 523,599 \text{ mm}^2$$

- Luas tulangan minimum ($A_s \text{ min}$)

(SNI 2847:2019 Pasal 7.6.1.1 dan Pasal 8.6.1.1)

- Untuk $f_y < 420 \text{ MPa}$

$$A_s \text{ min} = 0,2\% \times b \times h$$

$$= 0,2\% \times 1000 \times 125$$

$$= 250 \text{ mm}^2 \text{ (tidak dipakai karena } f_y = 420 \text{ MPa)}$$

- Untuk $f_y \geq 420 \text{ MPa}$

$$A_s \text{ min1} = \left(0,18\% \times \frac{420}{f_y}\right) \times b \times h$$

$$= \left(0,18\% \times \frac{420}{420}\right) \times 1000 \times 125$$

$$= 225 \text{ mm}^2$$

$$A_s \text{ min2} = 0,14\% \times b \times h$$

$$= 0,14\% \times 1000 \times 125$$

$$= 175 \text{ mm}^2$$

$$A_s \text{ min} = 225 \text{ mm}^2 \text{ (dipilih yang terbesar)}$$

- Cek $A_s \text{ min}$:

$$\text{Syarat} = A_s \text{ pasang} \geq A_s \text{ min} = 523,599 \geq 225 \rightarrow \text{OK}$$

- Tinggi blok beton (a)

(SNI 2847:2019 Pasal 22.2.2.4.1)

$$a = A_s \times \frac{f_y}{0,85 \times f'_c \times b} = 523,599 \times \frac{420}{0,85 \times 30 \times 1000} = 8,624 \text{ mm}$$

- Kapasitas lentur (M_n)

(SNI 2847:2019 Pasal 22.2.2.4.1)

$$\begin{aligned} M_n &= A_s \times f_y \times \left(d - \frac{a}{2}\right) \times 10^{-6} \\ &= 523,599 \times 420 \times \left(90 - \frac{8,624}{2}\right) \times 10^{-6} \\ &= 18,844 \text{ kN-m} \end{aligned}$$

- Lokasi garis netral (c)

(SNI 2847:2019 Pasal 22.2.2.4.1)

$$c = \frac{a}{\beta_1} = \frac{8,624}{0,8357} = 10,319 \text{ mm}$$

- Regangan tulangan tarik (ϵ_t)

(SNI 2847:2019 Pasal 22.2.1.2 dan Pasal 22.2.2.1)

$$\epsilon_t = \frac{(d-c)}{c} \times 0,003 = \frac{(90-10,319)}{10,319} \times 0,003 = 0,023$$

- Regangan tulangan tarik lapisan terluar (ϵ_{ty})

$$\epsilon_{ty} = 0,002 \text{ (beton non prategang)}$$

- Batas tulangan regangan tarik

$$\text{Batas} = 0,005$$

- Faktor reduksi (ϕ)

(SNI 2847:2019 Tabel 21.2.2)

- Untuk $\epsilon_t < \epsilon_{ty}$

$$\phi = 0,65$$

- Untuk $\epsilon_{ty} < \epsilon_t < 0,005$

$$\begin{aligned} \phi &= 0,65 + 0,23 \times \frac{(\epsilon_t - \epsilon_{ty})}{(0,005 - \epsilon_{ty})} \\ &= 0,65 + 0,23 \times \frac{(0,023 - 0,002)}{(0,005 - 0,002)} \\ &= 2,26 \end{aligned}$$

- Untuk $\epsilon_t \geq 0,005$

$$\phi = 0,90$$

$$\phi_{\text{dipakai}} = 0,90 \text{ (karena } \epsilon_t \geq 0,005 = 0,023 \geq 0,005)$$

- Kapasitas lentur tereduksi (ϕM_n)

$$\phi M_n = \phi \times M_n$$

$$= 0,90 \times 18,844$$

$$= 16,959 \text{ kN-m}$$

- Momen ultimit (M_u)

$$M_u = |M_{\max} \text{ akibat } M_{11 \max}|$$

$$= |10,303|$$

$$= 10,303 \text{ kN-m}$$

- Cek kapasitas :

$$\text{Syarat} = \phi M_n > M_u$$

$$= 16,959 > 10,303 \rightarrow \text{OK}$$

- Kesimpulan :

Digunakan Tulangan D 10 - 150

b) Momen Negatif M_{11}

(Tulangan Tumpuan Atas Arah Sumbu X)

- Spasi tulangan (s)

$$s = 150 \text{ mm}$$

- Spasi maksimum ($s_{\max}$)

(SNI 2847:2019 Pasal 8.7.2.2)

$$s_{\max} = 2 \times h = 2 \times 125 = 250 \text{ mm}$$

- Cek spasi :

$$s < s_{\max} = 150 < 250 \rightarrow \text{OK}$$

- Jumlah tulangan negatif tumpuan (n)

$$n = \frac{b}{s} = \frac{1000}{s} = \frac{1000}{150} = 6,67$$

- Diameter tulangan (d_b)

$$d_b = 10 \text{ mm}$$

- Jarak bersih antar tulangan

$$s - d_b = 150 - 10 = 140 \text{ mm}$$

- Cek jarak bersih

(SNI 2847:2019 Pasal 25.2.1)

$$\text{Syarat} = \text{Jarak bersih} \geq d_b = 140 \geq 10 \rightarrow \text{OK}$$

- Luas tulangan yang dipasang ($A_s \text{ pasang}$)

$$\begin{aligned}
 A_{s \text{ pasang}} &= n \times \frac{1}{4} \times \pi \times d_b^2 \\
 &= 6,67 \times \frac{1}{4} \times 3,14 \times 10^2 \\
 &= 523,599 \text{ mm}^2
 \end{aligned}$$

- Luas tulangan minimum ($A_{s \text{ min}}$)

(SNI 2847:2019 Pasal 7.6.1.1 dan Pasal 8.6.1.1)

- Untuk $f_y < 420 \text{ MPa}$

$$\begin{aligned}
 A_{s \text{ min}} &= 0,2\% \times b \times h \\
 &= 0,2\% \times 1000 \times 125 \\
 &= 250 \text{ mm}^2 \text{ (tidak dipakai karena } f_y = 420 \text{ MPa)}
 \end{aligned}$$

- Untuk $f_y \geq 420 \text{ MPa}$

$$\begin{aligned}
 A_{s \text{ min1}} &= \left(0,18\% \times \frac{420}{f_y}\right) \times b \times h \\
 &= \left(0,18\% \times \frac{420}{420}\right) \times 1000 \times 125 \\
 &= 225 \text{ mm}^2
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 A_{s \text{ min2}} &= 0,14\% \times b \times h \\
 &= 0,14\% \times 1000 \times 125 \\
 &= 175 \text{ mm}^2
 \end{aligned}$$

$$A_{s \text{ min}} = 225 \text{ mm}^2 \text{ (dipilih yang terbesar)}$$

- Cek $A_{s \text{ min}}$:

$$\text{Syarat} = A_{s \text{ pasang}} \geq A_{s \text{ min}} = 523,599 \geq 225 \rightarrow \text{OK}$$

- Tinggi blok beton (a)

(SNI 2847:2019 Pasal 22.2.2.4.1)

$$a = A_s \times \frac{f_y}{0,85 \times f'_c \times b} = 523,599 \times \frac{420}{0,85 \times 30 \times 1000} = 8,624 \text{ mm}$$

- Kapasitas lentur (M_n)

(SNI 2847:2019 Pasal 22.2.2.4.1)

$$\begin{aligned}
 M_n &= A_s \times f_y \times \left(d - \frac{a}{2}\right) \times 10^{-6} \\
 &= 523,599 \times 420 \times \left(90 - \frac{8,624}{2}\right) \times 10^{-6} \\
 &= 18,844 \text{ kN-m}
 \end{aligned}$$

- Lokasi garis netral (c)

(SNI 2847:2019 Pasal 22.2.2.4.1)

$$c = \frac{a}{\beta_1} = \frac{8,624}{0,8357} = 10,319 \text{ mm}$$

- Regangan tulangan tarik (ε_t)

(SNI 2847:2019 Pasal 22.2.1.2 dan Pasal 22.2.2.1)

$$\varepsilon_t = \frac{(d-c)}{c} \times 0,003 = \frac{(90-10,319)}{10,319} \times 0,003 = 0,023$$

- Regangan tulangan tarik lapisan terluar (ε_{ty})

$$\varepsilon_{ty} = 0,002 \text{ (beton non prategang)}$$

- Batas tulangan regangan tarik

$$\text{Batas} = 0,005$$

- Faktor reduksi (ϕ)

(SNI 2847:2019 Tabel 21.2.2)

- Untuk $\varepsilon_t < \varepsilon_{ty}$

$$\phi = 0,65$$

- Untuk $\varepsilon_{ty} < \varepsilon_t < 0,005$

$$\begin{aligned} \phi &= 0,65 + 0,23 \times \frac{(\varepsilon_t - \varepsilon_{ty})}{(0,005 - \varepsilon_{ty})} \\ &= 0,65 + 0,23 \times \frac{(0,023 - 0,002)}{(0,005 - 0,002)} \\ &= 2,26 \end{aligned}$$

- Untuk $\varepsilon_t \geq 0,005$

$$\phi = 0,90$$

$$\phi \text{ dipakai} = 0,90 \text{ (karena } \varepsilon_t \geq 0,005 = 0,023 \geq 0,005)$$

- Kapasitas lentur tereduksi (ϕM_n)

$$\begin{aligned} \phi M_n &= \phi \times M_n \\ &= 0,90 \times 18,844 \\ &= 16,959 \text{ kN-m} \end{aligned}$$

- Momen ultimit (M_u)

$$\begin{aligned} M_u &= |M_{\min} \text{ akibat } M_{11 \min}| \\ &= |-9,350| \\ &= 9,350 \text{ kN-m} \end{aligned}$$

- Cek kapasitas :

$$\text{Syarat} = \phi M_n > M_u$$

$$= 16,959 > 9,350 \rightarrow \text{OK}$$

- Kesimpulan :

Digunakan Tulangan D 10 - 150

c) Momen Positif M_{22}

(Tulangan Lapangan Bawah Arah Sumbu Y)

- Spasi tulangan (s)

$$s = 150 \text{ mm}$$

- Spasi maksimum ($s_{\max}$)

(SNI 2847:2019 Pasal 8.7.2.2)

$$s_{\max} = 2 \times h = 2 \times 125 = 250 \text{ mm}$$

- Cek spasi :

$$s < s_{\max} = 150 < 250 \rightarrow \text{OK}$$

- Jumlah tulangan negatif tumpuan (n)

$$n = \frac{b}{s} = \frac{1000}{s} = \frac{1000}{150} = 6,67$$

- Diameter tulangan (d_b)

$$d_b = 10 \text{ mm}$$

- Jarak bersih antar tulangan

$$s - d_b = 150 - 10 = 140 \text{ mm}$$

- Cek jarak bersih

(SNI 2847:2019 Pasal 25.2.1)

$$\text{Syarat} = \text{Jarak bersih} \geq d_b$$

$$= 140 \geq 10 \rightarrow \text{OK}$$

- Luas tulangan yang dipasang ($A_s \text{ pasang}$)

$$A_s \text{ pasang} = n \times \frac{1}{4} \times \pi \times d_b^2$$

$$= 6,67 \times \frac{1}{4} \times 3,14 \times 10^2$$

$$= 523,599 \text{ mm}^2$$

- Luas tulangan minimum ($A_{s \min}$)

(SNI 2847:2019 Pasal 7.6.1.1 dan Pasal 8.6.1.1)

- Untuk $f_y < 420$ MPa

$$\begin{aligned} A_{s \min} &= 0,2\% \times b \times h \\ &= 0,2\% \times 1000 \times 125 \\ &= 250 \text{ mm}^2 \text{ (tidak dipakai karena } f_y = 420 \text{ MPa)} \end{aligned}$$

- Untuk $f_y \geq 420$ MPa

$$\begin{aligned} A_{s \min 1} &= \left(0,18\% \times \frac{420}{f_y}\right) \times b \times h \\ &= \left(0,18\% \times \frac{420}{420}\right) \times 1000 \times 125 \\ &= 225 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} A_{s \min 2} &= 0,14\% \times b \times h \\ &= 0,14\% \times 1000 \times 125 \\ &= 175 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

$$A_{s \min} = 225 \text{ mm}^2 \text{ (dipilih yang terbesar)}$$

- Cek $A_{s \min}$:

$$\begin{aligned} \text{Syarat} &= A_{s \text{ pasang}} \geq A_{s \min} \\ &= 523,599 \geq 225 \rightarrow \text{OK} \end{aligned}$$

- Tinggi blok beton (a)

(SNI 2847:2019 Pasal 22.2.2.4.1)

$$\begin{aligned} a &= A_s \times \frac{f_y}{0,85 \times f'_c \times b} \\ &= 523,599 \times \frac{420}{0,85 \times 30 \times 1000} \\ &= 8,624 \text{ mm} \end{aligned}$$

- Kapasitas lentur (M_n)

(SNI 2847:2019 Pasal 22.2.2.4.1)

$$\begin{aligned} M_n &= A_s \times f_y \times \left(d - d_b - \frac{a}{2}\right) \times 10^{-6} \\ &= 523,599 \times 420 \times \left(90 - 10 - \frac{8,624}{2}\right) \times 10^{-6} \\ &= 16,645 \text{ kN-m} \end{aligned}$$

- Lokasi garis netral (c)

(SNI 2847:2019 Pasal 22.2.2.4.1)

$$c = \frac{a}{\beta_1} = \frac{8,624}{0,8357} = 10,319 \text{ mm}$$

- Regangan tulangan tarik (ε_t)
(SNI 2847:2019 Pasal 22.2.1.2 dan Pasal 22.2.2.1)

$$\begin{aligned}\varepsilon_t &= \frac{(d-c)}{c} \times 0,003 \\ &= \frac{(90-10,319)}{9,587} \times 0,003 \\ &= 0,023\end{aligned}$$

- Regangan tulangan tarik lapisan terluar (ε_{ty})

$$\varepsilon_{ty} = 0,002 \text{ (beton non prategang)}$$

- Batas tulangan regangan tarik

$$\text{Batas} = 0,005$$

- Faktor reduksi (ϕ)

(SNI 2847:2019 Tabel 21.2.2)

- Untuk $\varepsilon_t < \varepsilon_{ty}$

$$\phi = 0,65$$

- Untuk $\varepsilon_{ty} < \varepsilon_t < 0,005$

$$\begin{aligned}\phi &= 0,65 + 0,23 \times \frac{(\varepsilon_t - \varepsilon_{ty})}{(0,005 - \varepsilon_{ty})} \\ &= 0,65 + 0,23 \times \frac{(0,023 - 0,002)}{(0,005 - 0,002)} \\ &= 2,26\end{aligned}$$

- Untuk $\varepsilon_t \geq 0,005$

$$\phi = 0,90$$

$$\phi_{\text{dipakai}} = 0,90 \text{ (karena } \varepsilon_t \geq 0,005 = 0,023 \geq 0,005)$$

- Kapasitas lentur tereduksi (ϕM_n)

$$\begin{aligned}\phi M_n &= \phi \times M_n \\ &= 0,90 \times 16,645 \\ &= 14,980 \text{ kN-m}\end{aligned}$$

- Momen ultimit (M_u)

$$\begin{aligned}M_u &= |M_{\text{max}} \text{ akibat } M_{22 \text{ max}}| \\ &= |9,646| \\ &= 9,646 \text{ kN-m}\end{aligned}$$

- Cek kapasitas :

$$\begin{aligned}\text{Syarat} &= \phi M_n > M_u \\ &= 14,980 > 9,646 \rightarrow \text{OK}\end{aligned}$$

- Kesimpulan :

Digunakan Tulangan D 10 - 150

d) Momen Negatif M_{22}

(Tulangan Tumpuan Atas Arah Sumbu Y)

- Spasi tulangan (s)

$$s = 150 \text{ mm}$$

- Spasi maksimum ($s_{\max}$)

(SNI 2847:2019 Pasal 8.7.2.2)

$$s_{\max} = 2 \times h = 2 \times 125 = 250 \text{ mm}$$

- Cek spasi :

$$s < s_{\max} = 150 < 250 \rightarrow \text{OK}$$

- Jumlah tulangan negatif tumpuan (n)

$$n = \frac{b}{s} = \frac{1000}{150} = \frac{1000}{150} = 6,67$$

- Diameter tulangan (d_b)

$$d_b = 10 \text{ mm}$$

- Jarak bersih antar tulangan

$$s - d_b = 150 - 10 = 140 \text{ mm}$$

- Cek jarak bersih

(SNI 2847:2019 Pasal 25.2.1)

$$\text{Syarat} = \text{Jarak bersih} \geq d_b$$

$$= 140 \geq 10 \rightarrow \text{OK}$$

- Luas tulangan yang dipasang ($A_{s \text{ pasang}}$)

$$\begin{aligned}A_{s \text{ pasang}} &= n \times \frac{1}{4} \times \pi \times d_b^2 \\ &= 6,67 \times \frac{1}{4} \times 3,14 \times 10^2 \\ &= 523,599 \text{ mm}^2\end{aligned}$$

- Luas tulangan minimum ($A_{s \text{ min}}$)

(SNI 2847:2019 Pasal 7.6.1.1 dan Pasal 8.6.1.1)

- Untuk $f_y < 420 \text{ MPa}$

$$\begin{aligned}
 A_{s \min} &= 0,2\% \times b \times h \\
 &= 0,2\% \times 1000 \times 125 \\
 &= 250 \text{ mm}^2 \text{ (tidak dipakai karena } f_y = 420 \text{ MPa)}
 \end{aligned}$$

- Untuk $f_y \geq 420 \text{ MPa}$

$$\begin{aligned}
 A_{s \min 1} &= \left(0,18\% \times \frac{420}{f_y}\right) \times b \times h \\
 &= \left(0,18\% \times \frac{420}{420}\right) \times 1000 \times 125 \\
 &= 225 \text{ mm}^2
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 A_{s \min 2} &= 0,14\% \times b \times h \\
 &= 0,14\% \times 1000 \times 125 \\
 &= 175 \text{ mm}^2
 \end{aligned}$$

$$A_{s \min} = 225 \text{ mm}^2 \text{ (dipilih yang terbesar)}$$

▪ Cek $A_{s \min}$:

$$\begin{aligned}
 \text{Syarat} &= A_s \text{ pasang} \geq A_{s \min} \\
 &= 523,599 \geq 225 \rightarrow \text{OK}
 \end{aligned}$$

▪ Tinggi blok beton (a)

(SNI 2847:2019 Pasal 22.2.2.4.1)

$$\begin{aligned}
 a &= A_s \times \frac{f_y}{0,85 \times f'_c \times b} \\
 &= 523,599 \times \frac{420}{0,85 \times 30 \times 1000} \\
 &= 8,624 \text{ mm}
 \end{aligned}$$

▪ Kapasitas lentur (M_n)

(SNI 2847:2019 Pasal 22.2.2.4.1)

$$\begin{aligned}
 M_n &= A_s \times f_y \times \left(d - d_b - \frac{a}{2}\right) \times 10^{-6} \\
 &= 523,599 \times 420 \times \left(90 - 10 - \frac{8,624}{2}\right) \times 10^{-6} \\
 &= 16,645 \text{ kN-m}
 \end{aligned}$$

▪ Lokasi garis netral (c)

(SNI 2847:2019 Pasal 22.2.2.4.1)

$$c = \frac{a}{\beta_1} = \frac{8,624}{0,8357} = 10,319 \text{ mm}$$

▪ Regangan tulangan tarik (ϵ_t)

(SNI 2847:2019 Pasal 22.2.1.2 dan Pasal 22.2.2.1)

$$\begin{aligned}\varepsilon_t &= \frac{(d-c)}{c} \times 0,003 \\ &= \frac{(90-10,319)}{10,319} \times 0,003 \\ &= 0,023\end{aligned}$$

- Regangan tulangan tarik lapisan terluar (ε_{ty})

$$\varepsilon_{ty} = 0,002 \text{ (beton non prategang)}$$

- Batas tulangan regangan tarik

$$\text{Batas} = 0,005$$

- Faktor reduksi (ϕ)

(SNI 2847:2019 Tabel 21.2.2)

- Untuk $\varepsilon_t < \varepsilon_{ty}$

$$\phi = 0,65$$

- Untuk $\varepsilon_{ty} < \varepsilon_t < 0,005$

$$\begin{aligned}\phi &= 0,65 + 0,23 \times \frac{(\varepsilon_t - \varepsilon_{ty})}{(0,005 - \varepsilon_{ty})} \\ &= 0,65 + 0,23 \times \frac{(0,023 - 0,002)}{(0,005 - 0,002)} \\ &= 2,26\end{aligned}$$

- Untuk $\varepsilon_t \geq 0,005$

$$\phi = 0,90$$

$$\phi_{\text{dipakai}} = 0,90 \text{ (karena } \varepsilon_t \geq 0,005 = 0,023 \geq 0,005)$$

- Kapasitas lentur tereduksi (ϕM_n)

$$\begin{aligned}\phi M_n &= \phi \times M_n \\ &= 0,90 \times 16,645 \\ &= 14,980 \text{ kN-m}\end{aligned}$$

- Momen ultimit (M_u)

$$\begin{aligned}M_u &= |M_{\min} \text{ akibat } M_{22 \min}| \\ &= |-11,009| \\ &= 11,009 \text{ kN-m}\end{aligned}$$

- Cek kapasitas :

$$\begin{aligned}\text{Syarat} &= \phi M_n > M_u \\ &= 14,980 > 11,009 \rightarrow \text{OK}\end{aligned}$$

- Kesimpulan :
Digunakan Tulangan D 10 – 150

e) Tulangan Minimum

(untuk Tumpuan Bawah dan Lapangan Atas, Arah X dan Y)

- Spasi tulangan (s)
 $s = 150 \text{ mm}$
- Spasi maksimum ($s_{\max}$)
(SNI 2847:2019 Pasal 8.7.2.2)
 $s_{\max} = 2 \times h = 2 \times 125 = 250 \text{ mm}$
- Cek spasi :
 $s < s_{\max} = 150 < 250 \rightarrow \text{OK}$
- Diameter tulangan (d_b)
 $d_b = 10 \text{ mm}$
- Jarak bersih antar tulangan
 $s - d_b = 150 - 10 = 140 \text{ mm}$
- Cek jarak bersih
(SNI 2847:2019 Pasal 25.2.1)
Syarat = Jarak bersih $\geq d_b$
 $= 140 \geq 10 \rightarrow \text{OK}$
- Luas tulangan yang dipasang ($A_s \text{ pasang}$)
$$A_s \text{ pasang} = n \times \frac{1}{4} \times \pi \times d_b^2$$
$$= 6,67 \times \frac{1}{4} \times 3,14 \times 10^2$$
$$= 523,599 \text{ mm}^2$$
- Luas tulangan minimum ($A_{s \text{ min}}$)
(SNI 2847:2019 Pasal 7.6.1.1 dan Pasal 8.6.1.1)
 - Untuk $f_y < 420 \text{ MPa}$
 $A_{s \text{ min}} = 0,2\% \times b \times h$
 $= 0,2\% \times 1000 \times 125$
 $= 250 \text{ mm}^2$ (tidak dipakai karena $f_y = 420 \text{ MPa}$)
 - Untuk $f_y \geq 420 \text{ MPa}$

$$\begin{aligned}
 A_{s \min 1} &= (0,18\% \times \frac{420}{f_y}) \times b \times h \\
 &= (0,18\% \times \frac{420}{420}) \times 1000 \times 125 \\
 &= 225 \text{ mm}^2
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 A_{s \min 2} &= 0,14\% \times b \times h \\
 &= 0,14\% \times 1000 \times 125 \\
 &= 175 \text{ mm}^2
 \end{aligned}$$

$$A_{s \min} = 225 \text{ mm}^2 \text{ (dipilih yang terbesar)}$$

- Cek $A_{s \min}$:

$$\begin{aligned}
 \text{Syarat} &= A_{s \text{ pasang}} \geq A_{s \min} \\
 &= 523,599 \geq 225 \rightarrow \text{OK}
 \end{aligned}$$

- Kesimpulan :

Digunakan Tulangan D 10 - 150

4.6.1.4. Pengecekan Kapasitas Geser

- Kapasitas geser beton (V_c)

$$\begin{aligned}
 V_c &= 0,17 \times \sqrt{f'_c} \times b \times d \\
 &= 0,17 \times \sqrt{30} \times 1000 \times 90/1000 \\
 &= 83,802 \text{ kN}
 \end{aligned}$$

- Faktor reduksi (ϕ)

(SNI 2847:2019 Tabel 21.2.2)

$$\phi = 0,75$$

- Ambang batas geser pelat

(SNI 2847:2019 Pasal 7.6.3.1)

$$\begin{aligned}
 \text{Batas} &= 0,5 \times \phi \times V_c \\
 &= 0,5 \times 0,75 \times 83,802 \\
 &= 31,426 \text{ kN}
 \end{aligned}$$

- Cek keperluan tulangan geser pelat

$$\begin{aligned}
 \text{Syarat} &= V_u > 0,5 \times \phi \times V_c \\
 &= 16,228 < 31,426 \rightarrow \text{Tidak perlu tulangan geser}
 \end{aligned}$$

4.6.1.5. Pengecekan Lendutan Pelat

a) Kapasitas Retak Lentur

- Momen inersia pelat (I_g)

$$I_g = \frac{1}{12} \times b \times h^3 = \frac{1}{12} \times 1000 \times 125^3 = 162760417 \text{ mm}^4$$

- Tegangan retak (f_r)

$$f_r = 0,62 \times \sqrt{f'_c} = 0,62 \times \sqrt{30} = 3,396 \text{ MPa}$$

- Garis netral (y)

$$y = \frac{h}{2} = \frac{125}{2} = 62,5 \text{ mm}$$

- Kapasitas retak lentur (M_{cr})

$$M_{cr} = f_r \times \frac{I_g}{y} \times 10^{-6} = 3,396 \times \frac{162760417}{62,5} \times 10^{-6} = 8,843 \text{ kNm}$$

- Momen inersia retak (I_{cr})

$$I_{cr} = 0,25 \times I_g = 0,25 \times 162760417 = 40690104 \text{ mm}^4$$

b) Lendutan Arah Sumbu X

- Gaya dalam yang diperoleh dalam ETABS :

- $M_{11 \text{ max}}$ akibat DL = 3,659 kN-m
- $M_{11 \text{ min}}$ akibat DL = -4,708 kN-m
- $M_{11 \text{ max}}$ akibat $SIDL$ = 1,178 kN-m
- $M_{11 \text{ min}}$ akibat $SIDL$ = -0,696 kN-m
- $M_{11 \text{ max}}$ akibat LL = 3,029 kN-m
- $M_{11 \text{ min}}$ akibat LL = -1,79 kN-m

- Data hasil olah gaya dalam :

- $M_a \text{ lapangan (+)}$
= $\sum M_{11 \text{ max}}$
= $3,659 + 1,178 + 3,029$
= 7,866 kN-m
- $M_a \text{ tumpuan (-)}$
= $\sum M_{11 \text{ min}}$
= $-4,708 + (-0,696) + (-1,79)$
= -7,194 kN-m
- $M_{cr} / M_a \text{ lapangan}$
= $8,843 / 7,866$
= 1,124 kN-m

$$\begin{aligned}
 - \quad M_{cr} / M_a \text{ tumpuan} &= 8,843 / 7,194 \\
 &= 1,229 \text{ kN-m} \\
 - \quad I_e \text{ lapangan} &= \left(\frac{M_{cr}}{M_a} \right)^3 \times I_g + \left[1 - \left(\frac{M_{cr}}{M_a} \right)^3 \right] \times I_{cr} \\
 &= (1,1)^3 \times 1,63 \times 10^6 + [1 - (1,1)^3] \times 4,07 \times 10^6 \\
 &= 162760417 \text{ mm}^4 \\
 I_e \text{ lapangan dipakai} &= I_g = 162760417 \text{ mm}^4 \text{ (karena } I_e \text{ lapangan} > I_g) \\
 - \quad I_e \text{ tumpuan} &= \left(\frac{M_{cr}}{M_a} \right)^3 \times I_g + \left[1 - \left(\frac{M_{cr}}{M_a} \right)^3 \right] \times I_{cr} \\
 &= (1,2)^3 \times 1,63 \times 10^6 + [1 - (1,2)^3] \times 4,07 \times 10^6 \\
 &= 162760417 \text{ mm}^4 \\
 I_e \text{ tumpuan dipakai} &= I_g = 162760417 \text{ mm}^4 \text{ (karena } I_e \text{ tumpuan} > I_g) \\
 - \quad I_e \text{ rata-rata} &= 0,5 \times I_e \text{ lapangan} + 0,5 \times I_e \text{ tumpuan} \\
 &= 0,5 \times 162760417 + 0,5 \times 162760417 \\
 &= 162760417 \text{ mm}^4
 \end{aligned}$$

▪ Lendutan seketika akibat DL (δ_{DL})

$$\begin{aligned}
 \delta_{DL} &= \frac{\frac{5}{48} \times L^2 \times (M_{lap} + 0,2 \times M_{tum})}{E_c \times I_e \text{ rata-rata}} \times 10^6 \\
 &= \frac{\frac{5}{48} \times 8000 \times (3,659 + 0,2 \times 4,708)}{25743 \times 162760417} \times 10^6 \\
 &= 7,320 \text{ mm}
 \end{aligned}$$

▪ Lendutan seketika akibat $SIDL$ (δ_{SIDL})

$$\begin{aligned}
 \delta_{SIDL} &= \frac{\frac{5}{48} \times L^2 \times (M_{lap} + 0,2 \times M_{tum})}{E_c \times I_e \text{ rata-rata}} \times 10^6 \\
 &= \frac{\frac{5}{48} \times 8000 \times (1,178 + 0,2 \times 0,696)}{25743 \times 162760417} \times 10^6 \\
 &= 2,096 \text{ mm}
 \end{aligned}$$

▪ Lendutan seketika akibat LL (δ_{LL})

$$\begin{aligned}
 \delta_{LL} &= \frac{\frac{5}{48} \times L^2 \times (M_{lap} + 0,2 \times M_{tum})}{E_c \times I_e \text{ rata-rata}} \times 10^6 \\
 &= \frac{\frac{5}{48} \times 8000 \times (3,029 + 0,2 \times 1,79)}{25743 \times 162760417} \times 10^6 \\
 &= 5,389 \text{ mm}
 \end{aligned}$$

▪ Syarat lendutan seketika akibat LL (δ_{LL})

(SNI 2847:2019 Tabel 24.2.2)

$$\text{Syarat} = \frac{L}{360} = \frac{8000}{360} = 22,222 \text{ mm}$$

- Cek lendutan seketika akibat LL (δ_{LL})

$$\begin{aligned}\text{Cek} &= \delta_{LL} < \frac{L}{360} \\ &= 5,389 < 22,222 \rightarrow \text{OK}\end{aligned}$$

- Rasio tulangan pelat (ρ)

$$\rho = \frac{A_s \text{ pakai}}{b \times d} = \frac{529,599}{1000 \times 90} = 0,00588$$

- Faktor jangka panjang (λ)

$$\lambda = \frac{2}{1 + 50 \times \rho} = \frac{2}{1 + 50 \times 0,00588} = 1,549$$

- Lendutan jangka panjang (δ_{LT})

(SNI 2847:2019 Tabel 24.2.2)

$$\begin{aligned}\delta_{LT} &= \lambda \times (\delta_{DL} + \delta_{SIDL}) + \delta_{LL} \\ &= 1 \times (7,320 + 2,096) + 5,389 \\ &= 19,977 \text{ mm}\end{aligned}$$

- Syarat lendutan jangka panjang (δ_{LT})

(SNI 2847:2019 Tabel 24.2.2)

$$\text{Syarat} = \frac{L}{240} = \frac{8000}{240} = 28,571 \text{ mm}$$

- Cek lendutan jangka panjang (δ_{LT})

$$\begin{aligned}\text{Cek} &= \delta_{LT} < \frac{L}{240} \\ &= 19,977 < 28,571 \rightarrow \text{OK}\end{aligned}$$

c) Lendutan Arah Sumbu Y

- Gaya dalam yang diperoleh dalam ETABS :

- $M_{22 \text{ max}}$ akibat DL = 3,905 kN-m
- $M_{22 \text{ min}}$ akibat DL = -5,11 kN-m
- $M_{22 \text{ max}}$ akibat $SIDL$ = 1,135 kN-m
- $M_{22 \text{ min}}$ akibat $SIDL$ = -0,918 kN-m
- $M_{22 \text{ max}}$ akibat LL = 2,919 kN-m
- $M_{22 \text{ min}}$ akibat LL = -2,36 kN-m

▪ Data hasil olah gaya dalam :

$$\begin{aligned}
 - M_a \text{ lapangan (+)} &= \sum M_{22 \text{ max}} \\
 &= 3,905 + 1,135 + 2,919 \\
 &= 7,959 \text{ kN-m} \\
 - M_a \text{ tumpuan (-)} &= \sum M_{22 \text{ min}} \\
 &= -5,11 + (-0,918) + (-2,36) \\
 &= -8,388 \text{ kN-m} \\
 - M_{cr} / M_a \text{ lapangan} &= 8,843 / 7,959 \\
 &= 1,111 \text{ kN-m} \\
 - M_{cr} / M_a \text{ tumpuan} &= 8,843 / 8,388 \\
 &= 1,054 \text{ kN-m} \\
 - I_e \text{ lapangan} &= \left(\frac{M_{cr}}{M_a} \right)^3 \times I_g + \left[1 - \left(\frac{M_{cr}}{M_a} \right)^3 \right] \times I_{cr} \\
 &= (1,1)^3 \times 1,63 \times 10^8 + [1 - (1,1)^3] \times 4,07 \times 10^7 \\
 &= 117810699 \text{ mm}^4 \\
 I_e \text{ lapangan dipakai} &= 117810699 \text{ mm}^4 \text{ (karena } I_e \text{ lapangan} < I_g) \\
 - I_e \text{ tumpuan} &= \left(\frac{M_{cr}}{M_a} \right)^3 \times I_g + \left[1 - \left(\frac{M_{cr}}{M_a} \right)^3 \right] \times I_{cr} \\
 &= (1)^3 \times 1,63 \times 10^8 + [1 - (1)^3] \times 4,07 \times 10^7 \\
 &= 220592457 \text{ mm}^4 \\
 I_e \text{ tumpuan dipakai} &= I_g = 162760417 \text{ mm}^4 \text{ (karena } I_e \text{ tumpuan} > I_g) \\
 - I_e \text{ rata-rata} &= 0,5 \times I_e \text{ lapangan} + 0,5 \times I_e \text{ tumpuan} \\
 &= 0,5 \times 117810699 + 0,5 \times 162760417 \\
 &= 140285558 \text{ mm}^4
 \end{aligned}$$

▪ Lendutan seketika akibat DL (δ_{DL})

$$\begin{aligned}
 \delta_{DL} &= \frac{\frac{5}{48} \times L^2 \times (M_{lap} + 0,2 \times M_{tum})}{E_c \times I_e \text{ rata-rata}} \times 10^6 \\
 &= \frac{\frac{5}{48} \times 8000 \times (3,905 + 0,2 \times 5,11)}{25743 \times 140285558} \times 10^6 \\
 &= 7,839 \text{ mm}
 \end{aligned}$$

- Lendutan seketika akibat *SIDL* (δ_{SIDL})

$$\begin{aligned}\delta_{SIDL} &= \frac{\frac{5}{48} \times L^2 \times (M_{lap} + 0,2 \times M_{tum})}{E_c \times I_e \text{ rata-rata}} \times 10^6 \\ &= \frac{\frac{5}{48} \times 85000 \times (1,135 + 0,2 \times 0,918)}{25743 \times 140285558} \times 10^6 \\ &= 2,098 \text{ mm}\end{aligned}$$

- Lendutan seketika akibat *LL* (δ_{LL})

$$\begin{aligned}\delta_{LL} &= \frac{\frac{5}{48} \times L^2 \times (M_{lap} + 0,2 \times M_{tum})}{E_c \times I_e \text{ rata-rata}} \times 10^6 \\ &= \frac{\frac{5}{48} \times 8000 \times (2,919 + 0,2 \times 2,36)}{25743 \times 140285558} \times 10^6 \\ &= 5,395 \text{ mm}\end{aligned}$$

- Syarat lendutan seketika akibat *LL* (δ_{LL})

(SNI 2847:2019 Tabel 24.2.2)

$$\text{Syarat} = \frac{L}{360} = \frac{8000}{360} = 22,222 \text{ mm}$$

- Cek lendutan seketika akibat *LL* (δ_{LL})

$$\begin{aligned}\text{Cek} &= \delta_{LL} < \frac{L}{360} \\ &= 4,244 < 22,222 \rightarrow \text{OK}\end{aligned}$$

- Rasio tulangan pelat (ρ)

$$\rho = \frac{A_s \text{ pakai}}{b \times d} = \frac{529,599}{1000 \times 90} = 0,00588$$

- Faktor jangka panjang (λ)

$$\lambda = \frac{2}{1 + 50 \times \rho} = \frac{2}{1 + 50 \times 0,00588} = 1,549$$

- Lendutan jangka panjang (δ_{LT})

(SNI 2847:2019 Tabel 24.2.2)

$$\begin{aligned}\delta_{LT} &= \lambda \times (\delta_{DL} + \delta_{SIDL}) + \delta_{LL} \\ &= 1 \times (7,839 + 2,098) + 5,395 \\ &= 20,792 \text{ mm}\end{aligned}$$

- Syarat lendutan jangka panjang (δ_{LT})

(SNI 2847:2019 Tabel 24.2.2)

$$\text{Syarat} = \frac{L}{240} = \frac{8000}{240} = 33,333 \text{ mm}$$

- Cek lendutan jangka panjang (δ_{LT})

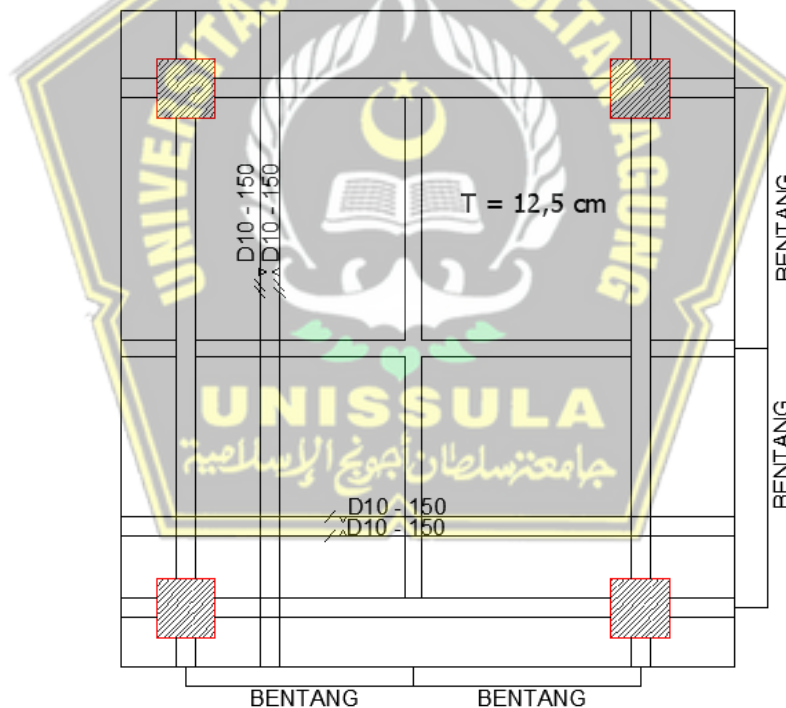
$$\begin{aligned} \text{Cek} &= \delta_{LT} < \frac{L}{240} \\ &= 20,792 < 33,333 \rightarrow \text{OK} \end{aligned}$$

4.6.1.6. Rekapitulasi Hasil Tulangan Pelat

Rekapitulasi hasil tulangan pelat dan gambar penulangan pelat beton pada perancangan ditunjukkan pada Tabel 4.73 dan Gambar 4.19.

Tabel 4. 73. Rekapitulasi Hasil Tulangan Pelat

Pelat	L_x (m)	L_y (m)	Arah	Tumpuan		Lapangan	
				Atas	Bawah	Atas	Bawah
S 125	8	8	X	D10-150	D10-150	D10-150	D10-150
			Y	D10-150	D10-150	D10-150	D10-150



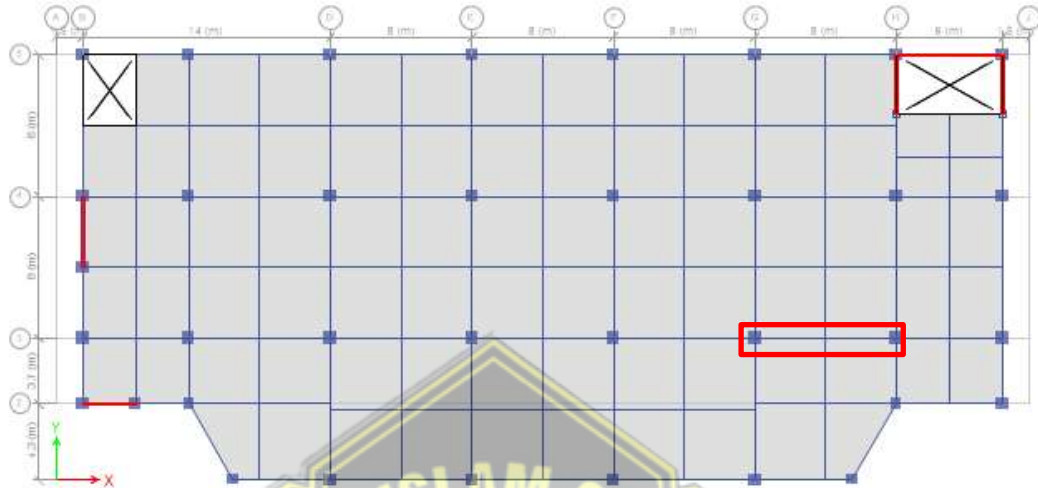
Gambar 4. 19. Penulangan Pelat

4.6.2. Perancangan Balok

Perhitungan tulangan lentur balok, tulangan geser dan perhitungan torsi balok dilakukan secara konvensional sebagai bagian dari analisis kapasitas perancangan balok berdasarkan SRPMK untuk menentukan jumlah beban yang diperlukan.

4.6.2.1. Properti Material dan Penampang

Tipe balok yang akan digunakan sebagai contoh perhitungan adalah balok G1 pada tingkat kelima yang ditunjukkan Gambar 4.20.



Gambar 4. 20. Denah Balok G1 Sampel

Panjang balok (L)	= 8000 mm
Lebar balok (b)	= 400 mm
Tinggi balok (h)	= 800 mm
Panjang tumpuan	= $2 \times h = 2 \times 700 = 1400$ mm
Diameter tulangan longitudinal (d_b)	= 22 mm
Diameter tulangan pinggang (d_{bt})	= 22 mm
Diameter tulangan sengkang (d_s)	= 10 mm
Tebal selimut bersih (c_c)	= 40 mm
Tebal efektif balok (d)	= $h - c_c - d_s - d_b/2$
	= $800 - 40 - 10 - 22/2$
	= 739 mm
Kuat tekan beton (f'_c)	= 30 MPa
Kuat leleh tulangan longitudinal (f_y)	= 420 MPa
Kuat leleh tulangan transversal (f_y)	= 420 Mpa
Faktor distribusi tegangan (β_1)	= $0,85 - 0,05 \times \frac{(f'_c - 28)}{7}$
	= $0,85 - 0,05 \times \frac{(30 - 28)}{7}$
	= 0,8357

Panjang Kolom (c_1)	= 700 mm
Lebar Kolom (c_2)	= 700 mm
Panjang bersih balok (L_n)	= $L - c_1 = 8000 - 700 = 7300$ mm
Faktor modifikasi (λ)	= 1 (beton normal)

4.6.2.2. Perhitungan Tulangan Longitudinal Balok

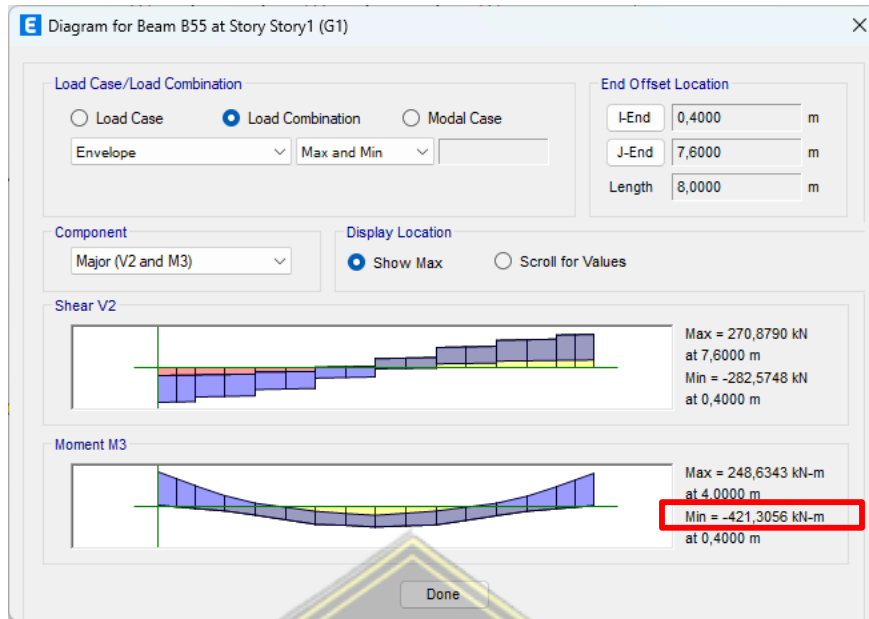
Tahapan-tahapan perhitungan tulangan longitudinal balok yang dilakukan, antara lain:

1. Gaya Dalam

Gaya dalam berupa momen ultimit tumpuan dan lapangan pada balok G1 yang didapat dari ETABS yang digunakan untuk mendesain tulangan longitudinal balok sebagai berikut:

- M_u tumpuan (-) = -421,305 kN-m
- M_u tumpuan (+) = 111,947 kN-m
- M_u lapangan (-) = -40,313 kN-m
- M_u lapangan (+) = 248,634 kN-m
- P_u = 0 kN

Tampilan momen ultimit tumpuan dan lapangan pada balok G1 yang didapat dari ETABS dapat dilihat pada Gambar 4.21.



Gambar 4. 21. Momen Ultimit Tumpuan Balok G1

2. Syarat Gaya dan Geometri

a) Syarat Gaya Aksial

(SNI 2847:2019 pada Penjelasan R18.6.1 dan Pasal 18.6.4.7)

$$\begin{aligned} \text{Syarat} &= P_u \leq 0,1 A_g \times f'_c \\ &= 0 \leq 0,1 \times 400 \times 800 \times 30 \\ &= 0 \leq 960000 \rightarrow \text{OK} \end{aligned}$$

b) Syarat Tinggi Efektif

(SNI 2847:2019 pada Pasal 18.6.2.1)

$$\begin{aligned} \text{Syarat} &= L_n \geq 4 d \\ &= 7300 \geq 4 \times 739 \\ &= 7300 \geq 2956 \rightarrow \text{OK} \end{aligned}$$

c) Syarat Lebar 1

(SNI 2847:2019 pada Pasal 18.6.2.1)

$$\begin{aligned} \text{Syarat} &= b \geq \text{minimal } (0,3 h \text{ atau } 250 \text{ mm}) \rightarrow \text{ambil nilai terkecil} \\ &= 400 \geq \text{minimal } (0,3 \times 800 \text{ atau } 250 \text{ mm}) \\ &= 400 \geq \text{minimal } (240 \text{ atau } 250 \text{ mm}) \\ &= 400 \geq 240 \rightarrow \text{OK} \end{aligned}$$

d) Syarat Lebar 2

(SNI 2847:2019 pada Pasal 18.6.2.1)

$$\begin{aligned}\text{Syarat} &= b \leq c_2 + 2 \times \text{minimal} (c_2 \text{ atau } 0,75 c_1) \rightarrow \text{ambil terkecil} \\ &= 400 \leq 700 + 2 \times \text{minimal} (700 \text{ atau } 0,75 \times 700) \\ &= 400 \leq 700 + 2 \times \text{minimal} (700 \text{ atau } 525) \\ &= 400 \leq 700 + 2 \times 525 \\ &= 400 \leq 1750 \rightarrow \text{OK}\end{aligned}$$

3. Tulangan Tumpuan Atas

- Jumlah tulangan tumpuan atas (n)

$$n = 6$$

- Diamater tulangan longitudinal (d_b)

$$d_b = 22 \text{ mm}$$

- Jarak bersih antar tulangan

$$\begin{aligned}\text{Jarak bersih} &= \frac{b - 2 c_c - 2 d_s - n \times d_b}{n - 1} \\ &= \frac{400 - 2 \times 40 - 2 \times 10 - 6 \times 22}{6 - 1} \\ &= 33,600 \text{ mm}\end{aligned}$$

- Cek jarak bersih

(SNI 2847:2019 pada Pasal 25.2.1)

$$\begin{aligned}\text{Syarat} &= \text{Jarak Bersih} \geq \text{maksimal} (d_b \text{ dan } 25 \text{ mm}) \\ &= 33,600 \geq \text{maksimal} (22 \text{ dan } 25) \rightarrow \text{ambil nilai terbesar} \\ &= 33,600 \geq 25 \rightarrow \text{OK}\end{aligned}$$

- Luas tulangan yang dipasang (A_s pasang)

$$\begin{aligned}A_s \text{ pasang} &= n \times \frac{1}{4} \times \pi \times d_b^2 \\ &= 6 \times \frac{1}{4} \times 3,14 \times 22^2 \\ &= 2280,796 \text{ mm}^2\end{aligned}$$

- Luas tulangan minimum ($A_{s \min}$)
(SNI 2847:2019 pada Pasal 9.6.1.2)

$$\begin{aligned} A_{s \min 1} &= \frac{0,25 \times \sqrt{f_c}}{f_y} \times b \times d \\ &= \frac{0,25 \times \sqrt{30}}{420} \times 400 \times 739 \\ &= 963,731 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} A_{s \min 2} &= \frac{1,4}{f_y} \times b \times d \\ &= \frac{1,4}{420} \times 400 \times 793 \\ &= 985,333 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} A_{s \min} &= \text{maksimum } (A_{s \min 1} \text{ atau } A_{s \min 2}) \\ &= 985,333 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

- Cek $A_{s \min}$:

$$\begin{aligned} \text{Syarat} &= A_{s \text{ pasang}} \geq A_{s \min} \\ &= 2280,796 \geq 985,333 \rightarrow \text{OK} \end{aligned}$$

- Rasio tulangan (ρ)

$$\rho = \frac{A_{s \text{ pasang}}}{b \times d} = \frac{2280,796}{400 \times 739} = 0,77\%$$

- Rasio tulangan maksimum ($\rho_{\max}$)

$$\begin{aligned} \rho_{\max 1} &= 0,75 \times \beta_1 \times 0,85 \times \frac{f_c}{f_y} \times \frac{600}{600 + f_y} \\ &= 0,75 \times 0,8129 \times 0,85 \times \frac{30}{420} \times \frac{600}{600 + 420} \\ &= 0,022385 \end{aligned}$$

$$\rho_{\max 2} = 0,25 \text{ (SNI 2847:2019 pada Pasal 18.6.3.1)}$$

$$\begin{aligned} \rho_{\max} &= \text{maksimum } (\rho_{\max 1} \text{ atau } \rho_{\max 2}) \\ &= 0,25 \end{aligned}$$

- Cek $A_{s \max}$:

$$\begin{aligned} \text{Syarat} &= \rho \leq \rho_{\max} \\ &= 0,77 \leq 0,25 \rightarrow \text{OK} \end{aligned}$$

- Tinggi blok beton (a)

(SNI 2847:2019 pada Pasal 22.2.2.4.1)

$$\begin{aligned} a &= A_s \times \frac{f_y}{0,85 \times f'_c \times b} \\ &= 2280,796 \times \frac{420}{0,85 \times 30 \times 400} \\ &= 93,915 \text{ mm} \end{aligned}$$

- Kapasitas lentur (M_n)

(SNI 2847:2019 pada Pasal 22.2.2.4.1)

$$\begin{aligned} M_n &= A_s \times f_y \times \left(d - \frac{a}{2}\right) \times 10^{-6} \\ &= 2280,796 \times 420 \times \left(739 - \frac{93,915}{2}\right) \times 10^{-6} \\ &= 662,931 \text{ kN-m} \end{aligned}$$

- Lokasi garis netral (c)

(SNI 2847:2019 pada Pasal 22.2.2.4.1)

$$c = \frac{a}{\beta_1} = \frac{93,915}{0,8357} = 112,377 \text{ mm}$$

- Regangan tulangan tarik (ε_t)

(SNI 2847:2019 pada Pasal 22.2.1.2 dan 22.2.2.1)

$$\begin{aligned} \varepsilon_t &= \frac{(d-c)}{c} \times 0,003 \\ &= \frac{(739-112,377)}{112,377} \times 0,003 \\ &= 0,017 \end{aligned}$$

- Faktor reduksi (ϕ)

(SNI 2847:2019 pada Pasal 22.2.1.2 dan 22.2.2.1)

$$\phi = 0,90 \text{ (karena } \varepsilon_t \geq 0,005 = 0,013 \geq 0,005)$$

- Kapasitas lentur tereduksi (ϕM_n)

$$\begin{aligned} \phi M_n &= \phi \times M_n \\ &= 0,90 \times 662,931 \\ &= 596,638 \text{ kN-m} \end{aligned}$$

- Momen ultimit (M_u)

$$\begin{aligned} M_u &= |M_{u \text{ tumpuan } (-)}| \\ &= |-421,306| \\ &= 421,306 \text{ kN-m} \end{aligned}$$

- Cek kapasitas :

$$\begin{aligned}\text{Syarat} &= \phi M_n > M_u \\ &= 596,638 > 421,306 \rightarrow \text{OK}\end{aligned}$$

- Luas tulangan yang diperlukan (A_s perlu)

$$\begin{aligned}A_s \text{ perlu} &= \frac{M_u}{f_y \times (d - \frac{a}{2})} \times 10^6 \\ &= \frac{421,306}{420 \times (739 - \frac{93,915}{2})} \times 10^6 \\ &= 1449,490 \text{ mm}^2\end{aligned}$$

4. Tulangan Tumpuan Bawah

- Jumlah tulangan tumpuan bawah (n)

$$n = 4$$

- Diameter tulangan longitudinal (d_b)

$$d_b = 22 \text{ mm}$$

- Jarak bersih antar tulangan

$$\begin{aligned}\text{Jarak bersih} &= \frac{b - 2 c_c - 2 d_s - n \times d_b}{n - 1} \\ &= \frac{400 - 2 \times 40 - 2 \times 10 - 4 \times 22}{4 - 1} \\ &= 70,667 \text{ mm}\end{aligned}$$

- Cek jarak bersih

(SNI 2847:2019 pada Pasal 25.2.1)

$$\begin{aligned}\text{Syarat} &= \text{Jarak bersih} \geq \text{maksimal } (d_b \text{ dan } 25 \text{ mm}) \\ &= 70,6 \geq \text{maksimal } (22 \text{ dan } 25) \rightarrow \text{ambil nilai terbesar} \\ &= 70,6 \geq 25 \rightarrow \text{OK}\end{aligned}$$

- Luas tulangan yang dipasang (A_s pasang)

$$\begin{aligned}A_s \text{ pasang} &= n \times \frac{1}{4} \times \pi \times d_b^2 \\ &= 4 \times \frac{1}{4} \times 3,14 \times 22^2 \\ &= 1520,531 \text{ mm}^2\end{aligned}$$

- Luas tulangan minimum (A_s min)

(SNI 2847:2019 pada Pasal 9.6.1.2 dan 18.6.3.2)

$$A_{s \text{ min } 1} = \frac{0,25 \times \sqrt{f_c}}{f_y} \times b \times d$$

$$= \frac{0,25 \times \sqrt{30}}{420} \times 400 \times 739$$

$$= 963,731 \text{ mm}^2$$

$$A_{s \text{ min } 2} = \frac{1,4}{f_y} \times b \times d$$

$$= \frac{1,4}{420} \times 400 \times 739$$

$$= 985,333 \text{ mm}^2$$

$$A_{s \text{ min } 3} = 0,5 \times A_{s \text{ tumpuan (-)}}$$

$$= 0,5 \times 2280,796$$

$$= 1140,398 \text{ mm}^2$$

$$A_{s \text{ min}} = \text{maksimum } (A_{s \text{ min } 1} ; A_{s \text{ min } 2} ; \text{ atau } A_{s \text{ min } 3})$$

$$= 1140,398 \text{ mm}^2$$

- Cek $A_{s \text{ min}}$:

$$\text{Syarat} = A_{s \text{ pasang}} \geq A_{s \text{ min}}$$

$$= 1520,531 \geq 1140,398 \rightarrow \text{OK}$$

- Rasio tulangan (ρ)

$$\rho = \frac{A_{s \text{ pasang}}}{b \times d} = \frac{1520,531}{400 \times 739} = 0,005$$

- Rasio tulangan maksimum (ρ_{max})

$$\rho_{\text{max } 1} = 0,75 \times \beta_1 \times 0,85 \times \frac{f_c}{f_y} \times \frac{600}{600 + f_y}$$

$$= 0,75 \times 0,8357 \times 0,85 \times \frac{30}{420} \times \frac{600}{600 + 420}$$

$$= 0,024$$

$$\rho_{\text{max } 2} = 0,025 \text{ (SNI 2847:2019 pada Pasal 18.6.3.1)}$$

$$\rho_{\text{max}} = \text{maksimum } (\rho_{\text{max } 1} \text{ atau } \rho_{\text{max } 2})$$

$$= 0,025$$

- Cek $A_{s \text{ max}}$:

$$\text{Syarat} = \rho \leq \rho_{\text{max}}$$

$$= 0,005 \leq 0,025 \rightarrow \text{OK}$$

- Tinggi blok beton (a)

(SNI 2847:2019 pada Pasal 22.2.2.4.1)

$$\begin{aligned} a &= A_s \times \frac{f_y}{0,85 \times f'_c \times b} \\ &= 1140,398 \times \frac{420}{0,85 \times 30 \times 350} \\ &= 62,610 \text{ mm} \end{aligned}$$

- Kapasitas lentur (M_n)

(SNI 2847:2019 pada Pasal 22.2.2.4.1)

$$\begin{aligned} M_n &= A_s \times f_y \times \left(d - \frac{a}{2}\right) \times 10^{-6} \\ &= 1520,531 \times 420 \times \left(649 - \frac{62,610}{2}\right) \times 10^{-6} \\ &= 451,950 \text{ kN-m} \end{aligned}$$

- Lokasi garis netral (c)

(SNI 2847:2019 pada Pasal 22.2.2.4.1)

$$c = \frac{a}{\beta_1} = \frac{62,610}{0,8357} = 74,918 \text{ mm}$$

- Regangan tulangan tarik (ε_t)

(SNI 2847:2019 pada Pasal 22.2.1.2 dan 22.2.2.1)

$$\begin{aligned} \varepsilon_t &= \frac{(d-c)}{c} \times 0,003 \\ &= \frac{(739-74,918)}{74,918} \times 0,003 \\ &= 0,027 \end{aligned}$$

- Faktor reduksi (ϕ)

(SNI 2847:2019 pada Pasal 22.2.1.2 dan 22.2.2.1)

$$\phi = 0,90 \text{ (karena } \varepsilon_t \geq 0,005 = 0,027 \geq 0,005)$$

- Kapasitas lentur tereduksi (ϕM_n)

$$\begin{aligned} \phi M_n &= \phi \times M_n \\ &= 0,90 \times 451,950 \\ &= 406,755 \text{ kN-m} \end{aligned}$$

- Momen ultimit (M_u)

$$\begin{aligned} M_u &= |M_{u \text{ tumpuan (+)}}| \\ &= |111,947| \\ &= 111,947 \text{ kN-m} \end{aligned}$$

- Cek kapasitas :

$$\begin{aligned}\text{Syarat} &= \phi M_n > M_u \\ &= 406,755 > 111,947 \rightarrow \text{OK}\end{aligned}$$

- Luas tulangan yang diperlukan (A_s perlu)

$$\begin{aligned}A_s \text{ perlu} &= \frac{M_u}{f_y \times (d - \frac{a}{2})} \times 10^6 \\ &= \frac{111,947}{420 \times (739 - \frac{62,610}{2})} \times 10^6 \\ &= 376,632 \text{ mm}^2\end{aligned}$$

5. Tulangan Lapangan Atas

- Jumlah tulangan lapangan atas (n)

$$n = 4$$

- Diameter tulangan longitudinal (d_b)

$$d_b = 22 \text{ mm}$$

- Jarak bersih antar tulangan

$$\begin{aligned}\text{Jarak bersih} &= \frac{b - 2 c_c - 2 d_s - n \times d_b}{n - 1} \\ &= \frac{400 - 2 \times 40 - 2 \times 10 - 4 \times 22}{4 - 1} \\ &= 70,667 \text{ mm}\end{aligned}$$

- Cek jarak bersih

(SNI 2847:2019 pada Pasal 25.2.1)

$$\begin{aligned}\text{Syarat} &= \text{Jarak Bersih} \geq \text{maksimal } (d_b \text{ dan } 25 \text{ mm}) \\ &= 70,6 \geq \text{maksimal } (22 \text{ dan } 25) \rightarrow \text{ambil nilai terbesar} \\ &= 70,6 \geq 25 \rightarrow \text{OK}\end{aligned}$$

- Luas tulangan yang dipasang (A_s pasang)

$$\begin{aligned}A_s \text{ pasang} &= n \times \frac{1}{4} \times \pi \times d_b^2 \\ &= 4 \times \frac{1}{4} \times 3,14 \times 22^2 \\ &= 1520,531 \text{ mm}^2\end{aligned}$$

- Luas tulangan minimum (A_s min)

(SNI 2847:2019 pada Pasal 9.6.1.2 dan 18.6.3.2)

$$A_s \text{ min 1} = \frac{0,25 \times \sqrt{f_c}}{f_y} \times b \times d$$

$$= \frac{0,25 \times \sqrt{30}}{420} \times 400 \times 739$$

$$= 963,731 \text{ mm}^2$$

$$A_{s \text{ min } 2} = \frac{1,4}{f_y} \times b \times d$$

$$= \frac{1,4}{420} \times 400 \times 739$$

$$= 985,333 \text{ mm}^2$$

$$A_{s \text{ min } 3} = 0,25 \times A_{s \text{ tumpuan (-)}}$$

$$= 0,25 \times 2280,796$$

$$= 570,199 \text{ mm}^2$$

$$A_{s \text{ min}} = \text{maksimum } (A_{s \text{ min } 1} ; A_{s \text{ min } 2} ; \text{ atau } A_{s \text{ min } 3})$$

$$= 985,333 \text{ mm}^2$$

- Cek $A_{s \text{ min}}$:

$$\text{Syarat} = A_{s \text{ pasang}} \geq A_{s \text{ min}}$$

$$= 1520,531 \geq 985,333 \rightarrow \text{OK}$$

- Rasio tulangan (ρ)

$$\rho = \frac{A_{s \text{ pasang}}}{b \times d} = \frac{1520,531}{400 \times 739} = 0,0051$$

- Rasio tulangan maksimum (ρ_{max})

$$\rho_{\text{max } 1} = 0,75 \times \beta_1 \times 0,85 \times \frac{f_c}{f_y} \times \frac{600}{600 + f_y}$$

$$= 0,75 \times 0,8357 \times 0,85 \times \frac{30}{420} \times \frac{600}{600 + 420}$$

$$= 0,024$$

$$\rho_{\text{max } 2} = 0,025 \text{ (SNI 2847:2019 pada Pasal 18.6.3.1)}$$

$$\rho_{\text{max}} = \text{maksimum } (\rho_{\text{max } 1} \text{ atau } \rho_{\text{max } 2})$$

$$= 0,025$$

- Cek $A_{s \text{ max}}$:

$$\text{Syarat} = \rho \leq \rho_{\text{max}}$$

$$= 0,005 \leq 0,025 \rightarrow \text{OK}$$

- Tinggi blok beton (a)

$$\text{(SNI 2847:2019 pada Pasal 22.2.2.4.1)}$$

$$a = A_s \times \frac{f_y}{0,85 \times f'_c \times b}$$

$$= 1520,531 \times \frac{420}{0,85 \times 30 \times 400}$$

$$= 62,610 \text{ mm}$$

- Kapasitas lentur (M_n)

(SNI 2847:2019 pada Pasal 22.2.2.4.1)

$$M_n = A_s \times f_y \times \left(d - \frac{a}{2}\right) \times 10^{-6}$$

$$= 1520,531 \times 420 \times \left(739 - \frac{62,610}{2}\right) \times 10^{-6}$$

$$= 451,950 \text{ kN-m}$$

- Lokasi garis netral (c)

(SNI 2847:2019 pada Pasal 22.2.2.4.1)

$$c = \frac{a}{\beta_1} = \frac{62,610}{0,8357} = 74,918 \text{ mm}$$

- Regangan tulangan tarik (ε_t)

(SNI 2847:2019 pada Pasal 22.2.1.2 dan 22.2.2.1)

$$\varepsilon_t = \frac{(d-c)}{c} \times 0,003$$

$$= \frac{(739-74,918)}{74,918} \times 0,003$$

$$= 0,027$$

- Faktor reduksi (ϕ)

(SNI 2847:2019 pada Pasal 22.2.1.2 dan 22.2.2.1)

$$\phi = 0,90 \text{ (karena } \varepsilon_t \geq 0,005 = 0,027 \geq 0,005)$$

- Kapasitas lentur tereduksi (ϕM_n)

$$\phi M_n = \phi \times M_n$$

$$= 0,90 \times 451,950$$

$$= 406,755 \text{ kN-m}$$

- Momen ultimit (M_u)

$$M_u = |M_{u \text{ lapangan}} (-)|$$

$$= |-40,3135|$$

$$= 40,3135 \text{ kN-m}$$

- Cek kapasitas :

$$\text{Syarat} = \phi M_n > M_u$$

$$= 406,755 > 40,314 \rightarrow \text{OK}$$

- Luas tulangan yang diperlukan (A_s perlu)

$$\begin{aligned}
 A_{s \text{ perlu}} &= \frac{M_u}{f_y \times (d - \frac{a}{2})} \times 10^6 \\
 &= \frac{40,3135}{420 \times (739 - \frac{62,610}{2})} \times 10^6 \\
 &= 135,630 \text{ mm}^2
 \end{aligned}$$

6. Tulangan Lapangan Bawah

- Jumlah tulangan lapangan bawah (n)

$$n = 6$$

- Diameter tulangan longitudinal (d_b)

$$d_b = 22 \text{ mm}$$

- Jarak bersih antar tulangan

$$\begin{aligned}
 \text{Jarak bersih} &= \frac{b - 2 c_c - 2 d_s - n \times d_b}{n - 1} \\
 &= \frac{400 - 2 \times 40 - 2 \times 10 - 6 \times 22}{6 - 1} \\
 &= 33,600 \text{ mm}
 \end{aligned}$$

- Cek jarak bersih

(SNI 2847:2019 pada Pasal 25.2.1)

$$\begin{aligned}
 \text{Syarat} &= \text{Jarak bersih} \geq \text{maksimal } (d_b \text{ dan } 25 \text{ mm}) \\
 &= 33,600 \geq \text{maksimal } (22 \text{ dan } 25) \rightarrow \text{ambil nilai terbesar} \\
 &= 33,600 \geq 25 \rightarrow \text{OK}
 \end{aligned}$$

- Luas tulangan yang dipasang (A_s pasang)

$$\begin{aligned}
 A_{s \text{ pasang}} &= n \times \frac{1}{4} \times \pi \times d_b^2 \\
 &= 6 \times \frac{1}{4} \times 3,14 \times 22^2 \\
 &= 2280,796 \text{ mm}^2
 \end{aligned}$$

- Luas tulangan minimum (A_s min)

(SNI 2847:2019 pada Pasal 9.6.1.2 dan 18.6.3.2)

$$\begin{aligned}
 A_{s \text{ min } 1} &= \frac{0,25 \times \sqrt{f_c}}{f_y} \times b \times d \\
 &= \frac{0,25 \times \sqrt{30}}{420} \times 400 \times 739 \\
 &= 963,731 \text{ mm}^2
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 A_{s \text{ min } 2} &= \frac{1,4}{f_y} \times b \times d \\
 &= \frac{1,4}{420} \times 400 \times 739 \\
 &= 985,333 \text{ mm}^2
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 A_{s \text{ min } 3} &= 0,25 \times A_s \text{ tumpuan (-)} \\
 &= 0,25 \times 2280,796 \\
 &= 570,199 \text{ mm}^2
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 A_{s \text{ min}} &= \text{maksimum } (A_{s \text{ min } 1} ; A_{s \text{ min } 2} ; \text{ atau } A_{s \text{ min } 3}) \\
 &= 985,333 \text{ mm}^2
 \end{aligned}$$

- Cek $A_{s \text{ min}}$:

$$\begin{aligned}
 \text{Syarat} &= A_s \text{ pasang} \geq A_{s \text{ min}} \\
 &= 2280,796 \geq 985,333 \rightarrow \text{OK}
 \end{aligned}$$

- Rasio tulangan (ρ)

$$\rho = \frac{A_s \text{ pasang}}{b \times d} = \frac{2280,796}{400 \times 739} = 0,007$$

- Rasio tulangan maksimum (ρ_{max})

$$\begin{aligned}
 \rho_{\text{max } 1} &= 0,75 \times \beta_1 \times 0,85 \times \frac{f_c}{f_y} \times \frac{600}{600 + f_y} \\
 &= 0,75 \times 0,8357 \times 0,85 \times \frac{30}{420} \times \frac{600}{600 + 420} \\
 &= 0,024
 \end{aligned}$$

$$\rho_{\text{max } 2} = 0,025 \text{ (SNI 2847:2019 pada Pasal 18.6.3.1)}$$

$$\begin{aligned}
 \rho_{\text{max}} &= \text{maksimum } (\rho_{\text{max } 1} \text{ atau } \rho_{\text{max } 2}) \\
 &= 0,025
 \end{aligned}$$

- Cek $A_{s \text{ max}}$:

$$\begin{aligned}
 \text{Syarat} &= \rho \leq \rho_{\text{max}} \\
 &= 0,007 \leq 0,025 \rightarrow \text{OK}
 \end{aligned}$$

- Tinggi blok beton (a)

(SNI 2847:2019 pada Pasal 22.2.2.4.1)

$$\begin{aligned}
 a &= A_s \times \frac{f_y}{0,85 \times f'_c \times b} \\
 &= 2280,796 \times \frac{420}{0,85 \times 30 \times 400} \\
 &= 93,915 \text{ mm}
 \end{aligned}$$

- Kapasitas lentur (M_n)

(SNI 2847:2019 pada Pasal 22.2.2.4.1)

$$\begin{aligned} M_n &= A_s \times f_y \times \left(d - \frac{a}{2}\right) \times 10^{-6} \\ &= 2280,796 \times 420 \times \left(739 - \frac{93,915}{2}\right) \times 10^{-6} \\ &= 662,931 \text{ kN-m} \end{aligned}$$

- Lokasi garis netral (c)

(SNI 2847:2019 pada Pasal 22.2.2.4.1)

$$c = \frac{a}{\beta_1} = \frac{93,915}{0,8357} = 112,377 \text{ mm}$$

- Regangan tulangan tarik (ϵ_t)

(SNI 2847:2019 pada Pasal 22.2.1.2 dan 22.2.2.1)

$$\begin{aligned} \epsilon_t &= \frac{(d-c)}{c} \times 0,003 \\ &= \frac{(739-112,377)}{112,377} \times 0,003 \\ &= 0,017 \end{aligned}$$

- Faktor reduksi (ϕ)

(SNI 2847:2019 pada Pasal 22.2.1.2 dan 22.2.2.1)

$$\phi = 0,90 \text{ (karena } \epsilon_t \geq 0,005 = 0,017 \geq 0,005)$$

- Kapasitas lentur tereduksi (ϕM_n)

$$\begin{aligned} \phi M_n &= \phi \times M_n \\ &= 0,90 \times 662,931 \\ &= 596,638 \text{ kN-m} \end{aligned}$$

- Momen ultimit (M_u)

$$\begin{aligned} M_u &= |M_{u \text{ lapangan}} (+)| \\ &= |248,634| \\ &= 248,634 \text{ kN-m} \end{aligned}$$

- Cek kapasitas :

$$\begin{aligned} \text{Syarat} &= \phi M_n > M_u \\ &= 596,638 > 248,634 \rightarrow \text{OK} \end{aligned}$$

- Luas tulangan yang diperlukan (A_s perlu)

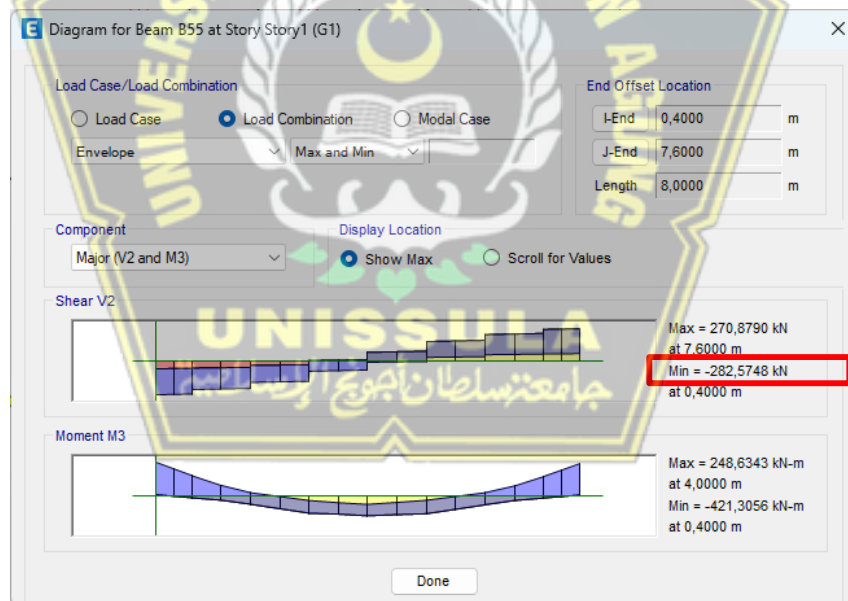
$$\begin{aligned}
 A_s \text{ perlu} &= \frac{M_u}{f_y \times (d - \frac{a}{2})} \times 10^6 \\
 &= \frac{248,634}{420 \times (739 - \frac{93,915}{2})} \times 10^6 \\
 &= 855,419 \text{ mm}^2
 \end{aligned}$$

4.6.2.3. Perhitungan Tulangan Transversal Balok

Tulangan transversal pada balok merupakan tulangan yang berguna untuk menahan gaya geser ultimit yang diterima balok. Tahapan-tahapan perhitungan tulangan transversal balok yang dilakukan, antara lain:

1. Gaya Dalam

Gaya dalam berupa gaya geser ultimit tumpuan dan lapangan pada balok G1. Tampilan gaya geser ultimit tumpuan dan lapangan pada balok G1 yang didapat dari ETABS dapat dilihat pada Gambar 4.22.



Gambar 4. 22. Gaya Geser Ultimit Tumpuan Balok G1

Gaya dalam berupa gaya geser ultimit tumpuan dan lapangan pada balok G1 yang didapat dari ETABS yang digunakan untuk mendesain tulangan transversal balok sebagai berikut:

- V_u tumpuan = 282,5748 kN
- V_u lapangan = 229,1807 kN

2. Tulangan Transversal Tumpuan

a) Gaya Desain

(SNI 2847:2019 pada Penjelasan Pasal R18.6.5)

Gaya geser terfaktor akibat beban gravitasi dengan kombinasi $1,2 D + L$ yang didapat dari ETABS didapatkan hasil sebagai berikut:

$$V_g \text{ tumpuan} = 218,4229 \text{ kN}$$

Dari hasil perhitungan tulangan longitudinal balok di atas, didapatkan luas tulangan pada daerah tumpuan sebagai berikut:

$$A_s^+ \text{ tumpuan} = 1520,531 \text{ mm}^2$$

$$A_s^- \text{ tumpuan} = 2280,531 \text{ mm}^2$$

- *Probable Moment Capacities* (M_{pr})

$$a_{pr}^+ = 1,25 a \text{ (tumpuan positif desain lentur)}$$

$$= 1,25 \times 1520,531$$

$$= 78,263 \text{ mm}^2$$

$$a_{pr}^- = 1,25 a \text{ (tumpuan negatif desain lentur)}$$

$$= 1,25 \times 2280,796$$

$$= 117,394 \text{ mm}^2$$

$$M_{pr}^+ = A_s^+ \times 1,25 f_y \times (d - \frac{a_{pr}^+}{2})$$

$$= 1520,531 \times 1,25 \times 420 \times (739 - \frac{78,263}{2})$$

$$= 558690265 \text{ Nmm}$$

$$M_{pr}^- = A_s^- \times 1,25 f_y \times (d - \frac{a_{pr}^-}{2})$$

$$= 2280,796 \times 1,25 \times 420 \times (739 - \frac{117,394}{2})$$

$$= 814607129 \text{ Nmm}$$

- Gaya Geser Akibat Goyangan (V_{sway})

(SNI 2847:2019 pada Pasal 18.6.5.1)

Gaya geser akibat goyangan dihitung dengan rumus berikut:

$$V_{sway} \text{ atau } V_{pr} = \frac{M_{pr}^+ + M_{pr}^-}{L_n}$$

$$= \frac{558690265 + 814607129}{7300}$$

$$= 188123 \text{ N}$$

- Gaya Geser Desain Akibat Goyangan (V_e)

(SNI 2847:2019 pada Pasal 18.6.5.1)

Gaya geser desain akibat goyangan dihitung dengan rumus berikut:

$$\begin{aligned} V_e &= V_g + V_{pr} \\ &= 218,4229 \times 10^3 + 188123 \\ &= 406546 \text{ N} \end{aligned}$$

b) Tahanan Geser Beton

- Gaya Geser Akibat Goyangan (V_{sway})

$$V_{sway} \text{ atau } V_{pr} = 188123 \text{ N}$$

- $\frac{1}{2}$ Gaya Geser Desain Akibat Goyangan ($\frac{1}{2} V_e$)

$$\frac{1}{2} V_e = \frac{1}{2} \times 406546 = 203273 \text{ N}$$

- Gaya Aksial Terfaktor (P_u)

$$P_u = 0 \text{ N}$$

- Menghitung $A_g f_c' / 20$:

$$\begin{aligned} \frac{A_g f_c'}{20} &= \frac{400 \times 800 \times 30}{20} \\ &= 480000 \text{ N} \end{aligned}$$

- Kuat Geser Nominal Beton (V_c)

(SNI 2847:2019 pada Pasal 18.6.5.2)

$$\text{Syarat} = V_c = 0, \text{ jika } V_{pr} \geq \frac{1}{2} V_e \text{ dan } P_u < \frac{A_g f_c'}{20}$$

$$V_{pr} \geq \frac{1}{2} V_e = 188123 \geq 203273 \rightarrow \text{OK}$$

$$P_u < \frac{A_g f_c'}{20} = 0 < 480000 \rightarrow \text{OK}$$

$$V_c = 0$$

c) Penulangan Geser

- Jumlah kaki (n)

$$n = 3$$

- Luas tulangan geser (A_v)

$$\begin{aligned} A_v &= n \times \frac{1}{4} \times \pi \times d_s^2 \\ &= 3 \times \frac{1}{4} \times 3,14 \times 10^2 \\ &= 235,619 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

- Spasi tulangan (s)

$$s = 100 \text{ mm}$$

- Spasi maksimum ($s_{\max}$)

(SNI 2847:2019 pada Pasal 18.6.4.4)

$$s_{\max 1} = \frac{1}{4} \times d = \frac{1}{4} \times 739 = 184,75 \text{ mm}$$

$$s_{\max 2} = 6 \times d_b = 6 \times 22 = 132 \text{ mm}$$

$$s_{\max 3} = 150 \text{ mm}$$

$$\begin{aligned} s_{\max} &= \text{minimal } (s_{\max 1} ; s_{\max 2} ; \text{atau } s_{\max 3}) \\ &= 132 \text{ mm} \end{aligned}$$

- Cek spasi :

$$s < s_{\max} = 100 < 132 \rightarrow \text{OK}$$

- Kuat geser nominal akibat penulangan geser (V_s)

(SNI 2847:2019 pada Pasal 22.5.10.5.3)

$$\begin{aligned} V_s &= \frac{A_v \times f_y \times d}{s} \\ &= \frac{235,619 \times 420 \times 739}{100} \\ &= 731316 \text{ N} \end{aligned}$$

- Batas kuat geser nominal akibat penulangan geser (V_s) :

(SNI 2847:2019 pada Pasal 22.5.1.2)

$$\begin{aligned} \text{Batas } V_s &= 0,66 \times \sqrt{f_c} \times b \times d \\ &= 0,66 \times \sqrt{30} \times 400 \times 739 \\ &= 1068585 \text{ N} \end{aligned}$$

- Faktor reduksi kuat geser (ϕ)

(SNI 2847:2019 pada Pasal 12.5.3.2 dan 21.2.4)

$$\phi = 0,75$$

- Kuat geser nominal (V_n)

$$\begin{aligned} V_n &= V_c + V_s \\ &= 0 + 1068585 \\ &= 1068585 \text{ N} \end{aligned}$$

- Kapasitas geser tereduksi (ϕV_n)

$$\begin{aligned} \phi V_n &= \phi \times V_n \\ &= 0,75 \times 1068585 \\ &= 801439 \text{ N} \end{aligned}$$

- Gaya geser ultimit (V_u)

$$\begin{aligned} V_u &= V_{u \text{ tumpuan}} \times 10^3 \\ &= 282,5748 \times 10^3 \\ &= 2825748 \text{ N} \end{aligned}$$

- Cek kapasitas :

$$\begin{aligned} \text{Syarat} \quad &= \frac{\phi V_n}{V_u} \geq 1 \\ &= \frac{801439}{2825748} \geq 1 \\ &= 2,672 \geq 1 \rightarrow \text{OK} \end{aligned}$$

3. Tulangan Transversal Lapangan

a) Gaya Dalam

$$V_{u \text{ lapangan}} = 229,1807 \text{ kN}$$

b) Penulangan Geser

- Jumlah kaki (n)

$$n = 2$$

- Luas tulangan geser (A_v)

$$\begin{aligned} A_v &= n \times \frac{1}{4} \times \pi \times d_s^2 \\ &= 2 \times \frac{1}{4} \times 3,14 \times 10^2 \\ &= 157,080 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

- Spasi tulangan (s)

$$s = 150 \text{ mm}$$

- Spasi maksimum ($s_{\max}$)

(SNI 2847:2019 pada Pasal 18.6.4.6)

$$s_{\max} = \frac{1}{2} \times d = \frac{1}{2} \times 739 = 369,50 \text{ mm}$$

- Cek spasi :

$$s < s_{\max} = 150 < 369,50 \rightarrow \text{OK}$$

- Kuat geser nominal akibat penulangan geser (V_s)

(SNI 2847:2019 pada Pasal 22.5.10.5.3)

$$\begin{aligned} V_s &= \frac{A_v \times f_y \times d}{s} \\ &= \frac{157,080 \times 420 \times 739}{150} \\ &= 325029 \text{ N} \end{aligned}$$

- Batas kuat geser nominal akibat penulangan geser (V_s) :

(SNI 2847:2019 pada Pasal 22.5.1.2)

$$\begin{aligned} \text{Batas } V_s &= 0,66 \times \sqrt{f_c} \times b \times d \\ &= 0,66 \times \sqrt{30} \times 400 \times 739 \\ &= 1068585 \text{ N} \end{aligned}$$

- Kuat geser nominal beton (V_c)

(SNI 2847:2019 pada Pasal 22.5.5.1)

$$\begin{aligned} V_c &= 0,17 \times \sqrt{f_c} \times b \times d \\ &= 0,17 \times \sqrt{30} \times 400 \times 739 \\ &= 275242 \text{ N} \end{aligned}$$

- Faktor reduksi kuat geser (ϕ)

(SNI 2847:2019 pada Pasal 12.5.3.2 dan 21.2.4)

$$\phi = 0,75$$

- Kuat geser nominal (V_n)

$$\begin{aligned} V_n &= V_c + V_s \\ &= 275242 + 325029 \\ &= 600271 \text{ N} \end{aligned}$$

- Kapasitas geser tereduksi (ϕV_n)

$$\begin{aligned}\phi V_n &= \phi \times V_n \\ &= 0,75 \times 600271 \\ &= 450203 \text{ N}\end{aligned}$$

- Gaya geser ultimit (V_u)

$$\begin{aligned}V_u &= V_{u \text{ lapangan}} \times 10^3 \\ &= 229,1807 \times 10^3 \\ &= 22918 \text{ N}\end{aligned}$$

- Cek kapasitas :

$$\begin{aligned}\text{Syarat} &= \frac{\phi V_n}{V_u} \geq 1 \\ &= \frac{45020}{22918} \geq 1 \\ &= 1,964 \geq 1 \rightarrow \text{OK}\end{aligned}$$

4.6.2.4. Perhitungan Tulangan Torsi Balok

Tulangan torsi pada balok merupakan tulangan yang berguna untuk menahan gaya torsi yang diterima balok. Tahapan-tahapan perhitungan tulangan transversal balok yang dilakukan, antara lain:

1. Parameter Umum untuk Perhitungan Torsi

- Luas dibatasi keliling luar penampang beton (A_{cp})

$$A_{cp} = b \times h = 400 \times 800 = 320000 \text{ mm}^2$$

- Keliling luar penampang beton (p_{cp})

$$\begin{aligned}p_{cp} &= 2 \times (b + h) \\ &= 2 \times (400 + 800) \\ &= 2400 \text{ mm}\end{aligned}$$

- x_0
- $$\begin{aligned}&= b - 2c_c - d_s \\ &= 400 - 2 \times 40 - 10 \\ &= 310 \text{ mm}\end{aligned}$$

- y_0
- $$\begin{aligned}&= h - 2c_c - d_s \\ &= 800 - 2 \times 40 - 10 \\ &= 710 \text{ mm}\end{aligned}$$

- Luas lingkup garis pusat tulangan torsi (A_{oh})
(SNI 2847:2019 pada Penjelasan Pasal R22.7.6.1.1)

$$\begin{aligned} A_{oh} &= x_0 \times y_0 \\ &= 310 \times 710 \\ &= 220100 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

- Luas bruto lingkup lintasan alir geser (A_o)
(SNI 2847:2019 pada Pasal 22.7.6.1.1)

$$\begin{aligned} A_o &= 0,85 \times A_{oh} \\ &= 0,85 \times 220100 \\ &= 187085 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

- Keliling garis pusat tulangan torsi (p_h)
(SNI 2847:2019 pada Pasal 22.7.6.1)

$$\begin{aligned} p_h &= 2 \times (x_0 + y_0) \\ &= 2 \times (310 + 710) \\ &= 2040 \text{ mm} \end{aligned}$$

- Kuat leleh tulangan (f_y)

$$f_y = 420 \text{ MPa}$$

- Kuat leleh tulangan torsi (f_{yt})

$$f_{yt} = f_y = 420 \text{ MPa}$$

- Menghitung f_y / f_{yt} :

$$\frac{f_y}{f_{yt}} = \frac{420}{420} = 1$$

- Sudut antara sumbu *strut* dan kord (θ)

(SNI 2847:2019 pada Tabel 22.7.6.1.2)

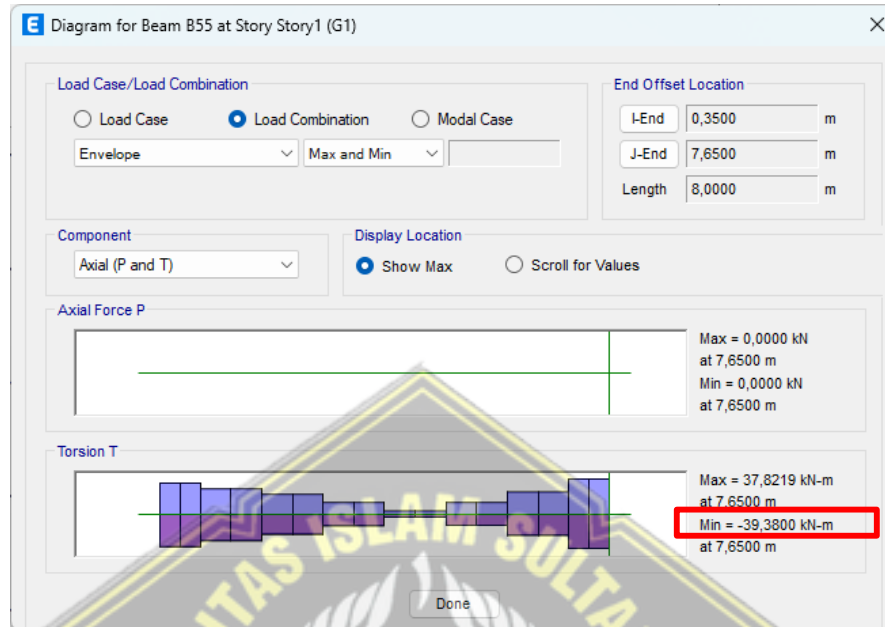
$$\theta = 45^\circ \text{ (non prategang)}$$

2. Gaya Dalam

Gaya dalam berupa gaya *absolute* torsi pada balok G1 yang didapat dari ETABS yang digunakan untuk mendesain tulangan torsi balok sebagai berikut:

$$\begin{aligned} T_u &= 39,3800 \text{ kN-m} \\ &= 39,3800 \times 10^6 \\ &= 39380000 \text{ N-mm} \end{aligned}$$

Tampilan gaya torsi pada balok G1 yang didapat dari ETABS dapat dilihat pada Gambar 4.23.



Gambar 4. 23. Gaya Torsi Balok G1

3. Pengecekan Kebutuhan Tulangan Torsi

- Momen retak torsi (T_{cr})

$$\begin{aligned}
 T_{cr} &= 0,33 \times \sqrt{f_c} \times \frac{A_{cp}^2}{p_{cp}} \\
 &= 0,33 \times \sqrt{30} \times \frac{320000^2}{2400} \\
 &= 77119336 \text{ N-mm}
 \end{aligned}$$

- Faktor reduksi kuat torsi (ϕ)
(SNI 2847:2019 pada Tabel 21.2.1)

$$\phi = 0,75$$

- Kapasitas torsi tereduksi (ϕT_{cr})

$$\begin{aligned}
 \phi T_{cr} &= \phi \times T_{cr} \\
 &= 0,75 \times 77119336 \\
 &= 57839502 \text{ N-mm}
 \end{aligned}$$

- Cek perlu tulangan torsi :

(SNI 2847:2019 pada Tabel 22.7.4.1)

$$\begin{aligned}\text{Syarat} &= T_u > \frac{1}{4} \phi T_{cr} \\ &= 39380000 > \frac{1}{4} \times 57839502 \\ &= 339380000 > 14459876 \rightarrow \text{Perlu}\end{aligned}$$

4. Pengecekan Kecukupan Dimensi Penampang

- Momen torsi ultimit yang dipakai (T_u pakai)

(SNI 2847:2019 pada Pasal 22.7.3.2 dan 22.7.5)

$$\begin{aligned}T_{u \text{ pakai}} &= \text{minimal } (\phi T_{cr} \text{ atau } T_u) \\ &= \text{minimal } (57839502 \text{ atau } 339380000) \\ &= 339380000 \text{ N-mm}\end{aligned}$$

- Gaya geser ultimit (V_u)

$$\begin{aligned}V_u &= V_{u \text{ tumpuan}} \times 10^3 \\ &= 282575 \times 10^3 \\ &= 282575 \text{ N}\end{aligned}$$

- Kuat geser nominal beton (V_c)

(SNI 2847:2019 pada Pasal 22.5.5.1)

$$\begin{aligned}V_c &= 0,17 \times \sqrt{f_c} \times b \times d \\ &= 0,17 \times \sqrt{30} \times 400 \times 739 \\ &= 275242 \text{ N}\end{aligned}$$

- Tegangan ultimit geser + torsi

(SNI 2847:2019 pada Tabel 22.7.7.1)

$$\begin{aligned}\text{Tegangan ultimit geser + torsi} &= \sqrt{\left(\frac{V_u}{b \times d}\right)^2 + \left(\frac{T_u \times p_h}{1,7 \times A_{oh}^2}\right)^2} \\ &= \sqrt{\left(\frac{275242}{400 \times 739}\right)^2 + \left(\frac{339380000 \times 2040}{1,7 \times 220100^2}\right)^2} \\ &= 1,366 \text{ Mpa}\end{aligned}$$

- Kapasitas tegangan beton

(SNI 2847:2019 pada Tabel 22.7.7.1)

$$\text{Kapasitas tegangan beton} = \phi \times \left(\frac{V_c}{b \times d} + 0,66 \times \sqrt{f_c}\right)$$

$$= \phi \times \left(\frac{275242}{400 \times 739} + 0,66 \times \sqrt{30} \right)$$

$$= 3,410 \text{ MPa}$$

- Cek dimensi penampang :

$$\sqrt{\left(\frac{V_u}{b \times d} \right)^2 + \left(\frac{T_u \times p_h}{1,7 \times A_{oh}^2} \right)^2} \leq \phi \times \left(\frac{V_c}{b \times d} + 0,66 \times \sqrt{f_c} \right)$$

$$1,366 \leq 3,410 \rightarrow \text{OK}$$

5. Penulangan Transversal Torsi

- Jumlah kaki (n)

$$n_{\text{tumpuan}} = 3$$

$$n_{\text{lapangan}} = 2$$

- Spasi tulangan (s)

$$s_{\text{tumpuan}} = 100 \text{ mm}$$

$$s_{\text{lapangan}} = 150 \text{ mm}$$

- Spasi maksimum (s_{max})

(SNI 2847:2019 pada Pasal 9.7.6.3.3)

$$s_{\text{max } 1} = \frac{1}{8} \times p_h = \frac{1}{8} \times 1820 = 228 \text{ mm}$$

$$s_{\text{max } 2} = 300 \text{ mm}$$

$$s_{\text{max}} = \text{minimal } (s_{\text{max } 1} \text{ atau } s_{\text{max } 2})$$

$$= 228 \text{ mm}$$

- Cek spasi :

$$s_{\text{tumpuan}} < s_{\text{max}} = 100 < 228 \rightarrow \text{OK}$$

$$s_{\text{lapangan}} < s_{\text{max}} = 150 < 228 \rightarrow \text{OK}$$

- Luas tulangan geser + torsi (A_{v+t})

$$A_{v+t \text{ tumpuan}} = n_{\text{tumpuan}} \times \frac{1}{4} \times \pi \times d_s^2$$

$$= 3 \times \frac{1}{4} \times 3,14 \times 10^2$$

$$= 235,619 \text{ mm}^2$$

$$A_{v+t \text{ lapangan}} = n_{\text{lapangan}} \times \frac{1}{4} \times \pi \times d_s^2$$

$$= 2 \times \frac{1}{4} \times 3,14 \times 10^2$$

$$= 157,079 \text{ mm}^2$$

- Luas tulangan geser + torsi (A_{v+t}) / spasi pasang (s_{pasang})

$$\begin{aligned} A_{v+t} / s \text{ tumpuan pasang} &= \frac{A_{v+t} \text{ tumpuan}}{s_{tumpuan pasang}} \\ &= \frac{235,619}{100} \\ &= 2,356 \text{ mm}^2/\text{mm} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} A_{v+t} / s \text{ lapangan pasang} &= \\ &= \frac{157,079}{150} \\ &= 1,047 \text{ mm}^2/\text{mm} \end{aligned}$$

- Luas satu kaki sengkang penahan torsi (A_t) / spasi (s)
(SNI 2847:2019 pada Pasal 22.7.6.1)

$$\begin{aligned} A_t / s &= \frac{T_u}{2 \times \phi \times A_o \times f_{yt}} \\ &= \frac{39380000}{2 \times 0,75 \times 187058 \times 420} \\ &= 0,334 \text{ mm}^2/\text{mm} \end{aligned}$$

- Luas tulangan geser (A_v) / spasi perlu (s_{perlu})

$$\begin{aligned} A_v / s \text{ tumpuan perlu} &= \left(\frac{V_u \text{ tumpuan}}{\phi} - V_c \text{ tumpuan} \right) / (f_y \times d) \\ &= \left(\frac{282,5748}{0,75} - 275242 \right) / (420 \times 739) \\ &= 0,327 \text{ mm}^2/\text{mm} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} A_v / s \text{ lapangan perlu} &= \left(\frac{V_u \text{ lapangan}}{\phi} - V_c \text{ lapangan} \right) / (f_y \times d) \\ &= \left(\frac{229,1807}{0,75} - 275242 \right) / (420 \times 739) \\ &= 0,098 \text{ mm}^2/\text{mm} \end{aligned}$$

- Luas tulangan geser + torsi (A_{v+t}) / spasi perlu (s_{perlu})
(SNI 2847:2019 pada Penjelasan Pasal R9.5.4.3)

$$\begin{aligned} A_{v+t} / s \text{ tumpuan perlu} &= 2 \times (A_t / s) + (A_v / s \text{ tumpuan perlu}) \\ &= 2 \times 0,334 + 0,327 \\ &= 0,995 \text{ mm}^2/\text{mm} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} A_{v+t} / s \text{ lapangan perlu} &= 2 \times (A_t / s) + (A_v / s \text{ lapangan perlu}) \\ &= 2 \times 0,344 + 0,098 \\ &= 0,766 \text{ mm}^2/\text{mm} \end{aligned}$$

- Luas tulangan geser + torsi (A_{v+t}) / spasi minimum (s_{min})
(SNI 2847:2019 pada Pasal 9.6.4.2)

$$\begin{aligned} A_{v+t} / s_{min 1} &= 0,062 \times \sqrt{f_c} \times \frac{b}{f_y} \\ &= 0,062 \times \sqrt{30} \times \frac{400}{420} \\ &= 0,323 \text{ mm}^2/\text{mm} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} A_{v+t} / s_{min 2} &= 0,35 \times \frac{b}{f_y} \\ &= 0,35 \times \frac{400}{420} \\ &= 0,333 \text{ mm}^2/\text{mm} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} A_{v+t} / s_{min} &= \text{maksimum } (A_{v+t} / s_{min 1} \text{ atau } A_{v+t} / s_{min 2}) \\ &= 0,333 \text{ mm}^2/\text{mm} \end{aligned}$$

- Cek geser + torsi :

$$\begin{aligned} A_{v+t} / s_{\text{tumpuan pasang}} &\geq \text{maksimum } (A_{v+t} / s_{\text{perlu}} \text{ atau } A_{v+t} / s_{min}) \\ 2,356 &\geq \text{maksimum } (0,995 \text{ atau } 0,333) \\ 2,356 &\geq 0,995 \rightarrow \text{OK} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} A_{v+t} / s_{\text{lapangan pasang}} &\geq \text{maksimum } (A_{v+t} / s_{\text{perlu}} \text{ atau } A_{v+t} / s_{min}) \\ 1,047 &\geq \text{maksimum } (0,766 \text{ atau } 0,333) \\ 1,047 &\geq 0,766 \rightarrow \text{OK} \end{aligned}$$

6. Penulangan Longitudinal Torsi

- Diameter tulangan pinggang (d_b)

$$d_b = 10 \text{ mm}$$

- Diameter tulangan pinggang minimum ($d_{b \min}$)

(SNI 2847:2019 pada Pasal 9.7.5.2)

$$\begin{aligned} d_{b \min} &= 0,042 s \\ &= 0,042 \times \text{maksimum } (s_{\text{tumpuan}} \text{ atau } s_{\text{lapangan}}) \\ &= 0,042 \times 150 \\ &= 6,3 \text{ mm} \end{aligned}$$

- Cek d_b :

$$\begin{aligned} \text{Syarat} &= d_b \geq d_{b \min} \\ &= 10 \geq 6,3 \rightarrow \text{OK} \end{aligned}$$

- Luas tulangan yang diperlukan (A_s perlu)

$$A_s \text{ perlu tumpuan atas} = 1449,490 \text{ mm}^2$$

$$A_s \text{ perlu tumpuan bawah} = 376,632 \text{ mm}^2$$

$$A_s \text{ perlu lapangan atas} = 135,630 \text{ mm}^2$$

$$A_s \text{ perlu lapangan bawah} = 855,419 \text{ mm}^2$$

- Luas tulangan longitudinal torsi (A_l)

(SNI 2847:2019 pada Pasal 22.7.6.1)

$$\begin{aligned} A_l &= (A_t / s) \times p_h \\ &= 0,334 \times 2040 \\ &= 681,595 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

- Luas tulangan longitudinal torsi minimum ($A_{l \text{ min}}$)

(SNI 2847:2019 pada Pasal 9.6.4.3)

$$\begin{aligned} A_{l \text{ min}} &= 0,42 \times \sqrt{f_c} \times \frac{A_{cp}}{f_y} - \left(\frac{A_t}{s}\right) \times p_h \\ &= 0,42 \times \sqrt{30} \times \frac{320000}{420} - 0,334 \times 1820 \\ &= 1071,117 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

- Luas tulangan longitudinal (A_s)

$$\begin{aligned} A_s &= \text{maksimum } (A_l \text{ atau } A_{l \text{ min}}) \\ &= \text{maksimum } (681,595 \text{ atau } 1071,117) \\ &= 1071,117 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

- Luas tulangan longitudinal torsi perlu ($A_{l \text{ perlu}}$)

$$\begin{aligned} A_{l \text{ perlu tumpuan}} &= A_s \text{ perlu tumpuan atas} + A_s \text{ perlu tumpuan bawah} \\ &= 1449,490 + 376,632 \\ &= 1826,122 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} A_{l \text{ perlu lapangan}} &= A_s \text{ perlu lapangan atas} + A_s \text{ perlu lapangan bawah} \\ &= 135,630 + 855,419 \\ &= 991,049 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

- Luas tul. longitudinal (A_s) + luas tul. longitudinal torsi perlu ($A_{l \text{ perlu}}$)

$$\begin{aligned} A_s + A_{l \text{ perlu tumpuan}} &= 1071,117 + 1826,122 \\ &= 2897,239 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} A_s + A_{l \text{ perlu lapangan}} &= 1071,117 + 991,049 \\ &= 2241,759 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

- Jumlah tulangan negatif (n)

$$\begin{aligned}
 n_{\text{tumpuan atas}} &= 6 \\
 n_{\text{tumpuan tengah}} &= 4(\text{angka kelipatan } 2) \\
 n_{\text{tumpuan bawah}} &= 4 \\
 n_{\text{tumpuan vertikal}} &= 4 + n_{\text{tumpuan tengah}} / 2 \\
 &= 4 + 4 / 2 \\
 &= 4 \\
 n_{\text{lapangan atas}} &= 4 \\
 n_{\text{lapangan tengah}} &= 4(\text{angka kelipatan } 2) \\
 n_{\text{lapangan bawah}} &= 6 \\
 n_{\text{lapangan vertikal}} &= 2 + n_{\text{lapangan tengah}} / 2 \\
 &= 2 + 4 / 2 \\
 &= 4
 \end{aligned}$$

- Minimal n (n_{atas} atau n_{bawah})

$$\begin{aligned}
 \text{Minimal } n_{\text{tumpuan}} &= \text{minimal } (n_{\text{tumpuan atas}} \text{ atau } n_{\text{tumpuan bawah}}) \\
 &= \text{minimal } (6 \text{ atau } 4) \\
 &= 4 \\
 \text{Minimal } n_{\text{lapangan}} &= \text{minimal } (n_{\text{lapangan atas}} \text{ atau } n_{\text{lapangan bawah}}) \\
 &= \text{minimal } (4 \text{ atau } 6) \\
 &= 4
 \end{aligned}$$

- Spasi tumpuan (S_{tumpuan})

$$\begin{aligned}
 S_{\text{horizontal tumpuan}} &= \frac{400 - 2 \times 40 - 2 \times 10 - 22}{4 - 1} \\
 &= 93 \text{ mm}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 S_{\text{vertikal tumpuan}} &= \frac{h - 2c_c - 2d_s - d_b}{n_{\text{vertikal}} - 1} \\
 &= \frac{800 - 2 \times 40 - 2 \times 10 - 22}{4 - 1} \\
 &= 226
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 S_{\text{tumpuan}} &= \text{maksimum } (S_{\text{horizontal}} \text{ atau } S_{\text{vertikal}}) \\
 &= \text{maksimum } (93 \text{ atau } 226) \\
 &= 226
 \end{aligned}$$

- Spasi lapangan (s_{lapangan})

$$\begin{aligned}
 S_{\text{horizontal lapangan}} &= \frac{400 - 2 \times 40 - 2 \times 10 - 22}{4 - 1} \\
 &= 93 \text{ mm} \\
 S_{\text{vertikal lapangan}} &= \frac{h - 2c_c - 2d_s - d_b}{n_{\text{vertikal}} - 1} \\
 &= \frac{800 - 2 \times 40 - 2 \times 10 - 22}{4 - 1} \\
 &= 226 \\
 S_{\text{lapangan}} &= \text{maksimum } (s_{\text{horizontal}} \text{ atau } s_{\text{vertikal}}) \\
 &= \text{maksimum } (124 \text{ atau } 299) \\
 &= 226
 \end{aligned}$$

- Cek spasi tulangan longitudinal :

$$\begin{aligned}
 S_{\text{tumpuan}} &\leq 300 &= 266 \leq 300 \rightarrow \text{OK} \\
 S_{\text{lapangan}} &\leq 300 &= 266 \leq 300 \rightarrow \text{OK}
 \end{aligned}$$

- Luas tulangan longitudinal (A_s)

$$\begin{aligned}
 A_{s \text{ tumpuan}} &= (n_{\text{atas}} + n_{\text{bawah}}) \times \frac{\pi}{4} \times d_b^2 \\
 &= (6 + 4) \times \frac{3,14}{4} \times 22^2 \\
 &= 3801,327111 \text{ mm}^2 \\
 A_{s \text{ lapangan}} &= (n_{\text{atas}} + n_{\text{bawah}}) \times \frac{\pi}{4} \times d_b^2 \\
 &= (4 + 6) \times \frac{3,14}{4} \times 22^2 \\
 &= 3801,327111 \text{ mm}^2
 \end{aligned}$$

- Luas tulangan longitudinal torsi pasang ($A_l \text{ pasang}$)

$$\begin{aligned}
 A_{l \text{ pasang tumpuan}} &= (n_{\text{tengah}}) \times \frac{\pi}{4} \times d_{bt}^2 \\
 &= 2 \times \frac{3,14}{4} \times 10^2 \\
 &= 314,159 \text{ mm}^2 \\
 A_{l \text{ pasang lapangan}} &= (n_{\text{tengah}}) \times \frac{\pi}{4} \times d_{bt}^2 \\
 &= 2 \times \frac{3,14}{4} \times 10^2 \\
 &= 314,159 \text{ mm}^2
 \end{aligned}$$

- Luas tul. longitudinal (A_s) + luas tul. longitudinal torsi pasang ($A_{l \text{ pasang}}$)

$$\begin{aligned} A_s \text{ tumpuan} + A_{l \text{ pasang tumpuan}} &= 3801,327 + 314,159 \\ &= 4115,486 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

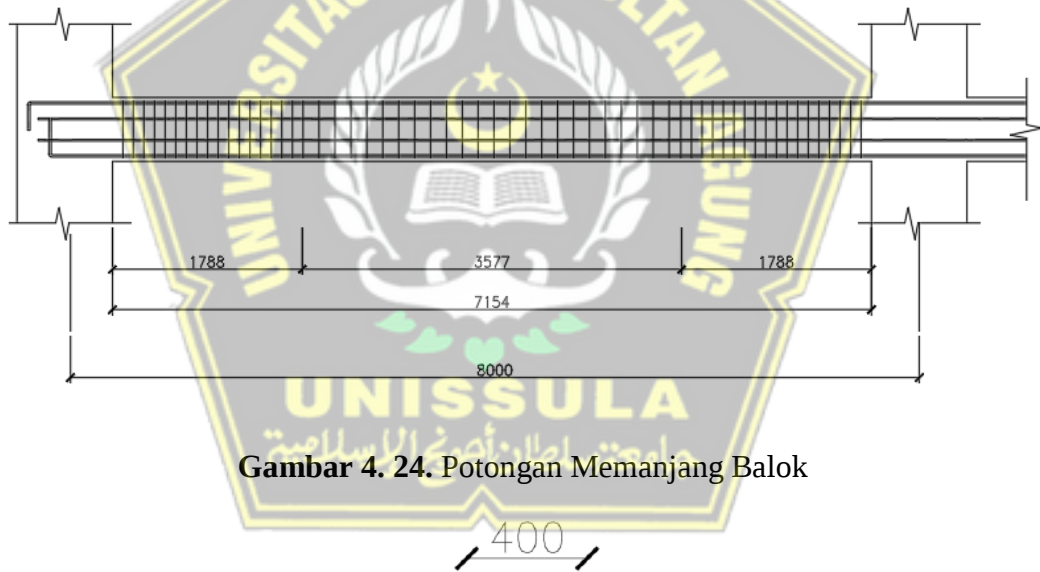
$$\begin{aligned} A_s \text{ lapangan} + A_{l \text{ pasang lapangan}} &= 3801,327 + 314,159 \\ &= 4115,486 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

Cek lentur + torsi :

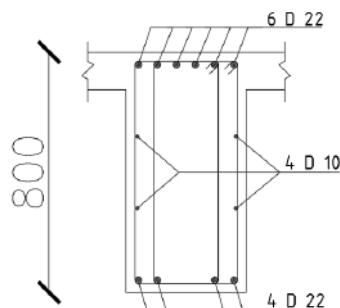
$$\begin{aligned} A_s \text{ tumpuan} + A_{l \text{ pasang tumpuan}} &\geq A_s + A_{l \text{ perlu tumpuan}} \\ 2897,239 &\geq 4115,486 \rightarrow \text{OK} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} A_s \text{ lapangan} + A_{l \text{ pasang lapangan}} &\geq A_s + A_{l \text{ perlu lapangan}} \\ 2062,166 &\geq 4115,486 \rightarrow \text{OK} \end{aligned}$$

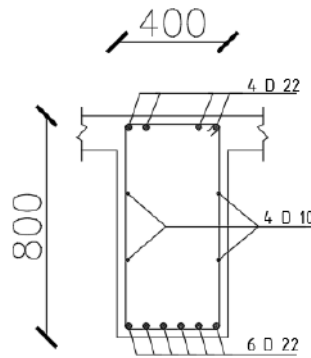
Gambar tulangan balok G1 yang didapat berdasarkan perhitungan di atas dapat dilihat pada Gambar 4.24 sampai Gambar 4.26.



Gambar 4. 24. Potongan Memanjang Balok



Gambar 4. 25. Tulangan Tumpuan Balok G1



Gambar 4. 26. Tulangan Lapangan Balok G1

4.6.2.5. Rekapitulasi Hasil Tulangan Balok

Dari hasil perhitungan terdapat rekapitulasi tulangan balok yang dapat dilihat pada Tabel 4.63 di bawah ini.

Tabel 4. 74. Rekapitulasi Tulangan Balok

Balok Kode	Dimensi (cm)	Lokasi	Tulangan Longitudinal		Tulangan Transversal		Tul. Torsi
			Tumpuan	Lapangan	Tumpuan	Lapangan	
G1	40 × 80	Atas	6 D22	4 D22	D10-100	D10-150	2 D10
		Bawah	4 D22	6 D22			
G2	40 × 70	Atas	6 D22	3 D22	D10-100	D10-100	2 D10
		Bawah	3 D22	4 D22			
G3	30 × 70	Atas	6 D19	3 D19	D10-100	D10-150	2 D10
		Bawah	3 D19	4 D19			
G4	30 × 50	Atas	6 D19	2 D19	D10-100	D10-150	2 D12
		Bawah	2 D19	3 D19			
G5	300 × 40	Atas	6 D19	2 D19	D10-100	D10-150	2 D10
		Bawah	3 D19	2 D19			
B1	25 × 60	Atas	6 D19	2 D19	D10-100	D10-100	2 D10
		Bawah	3 D19	2 D19			
B2	25 × 50	Atas	5 D16	2 D16	D10-100	D10-100	2 D10
		Bawah	3 D16	4 D16			

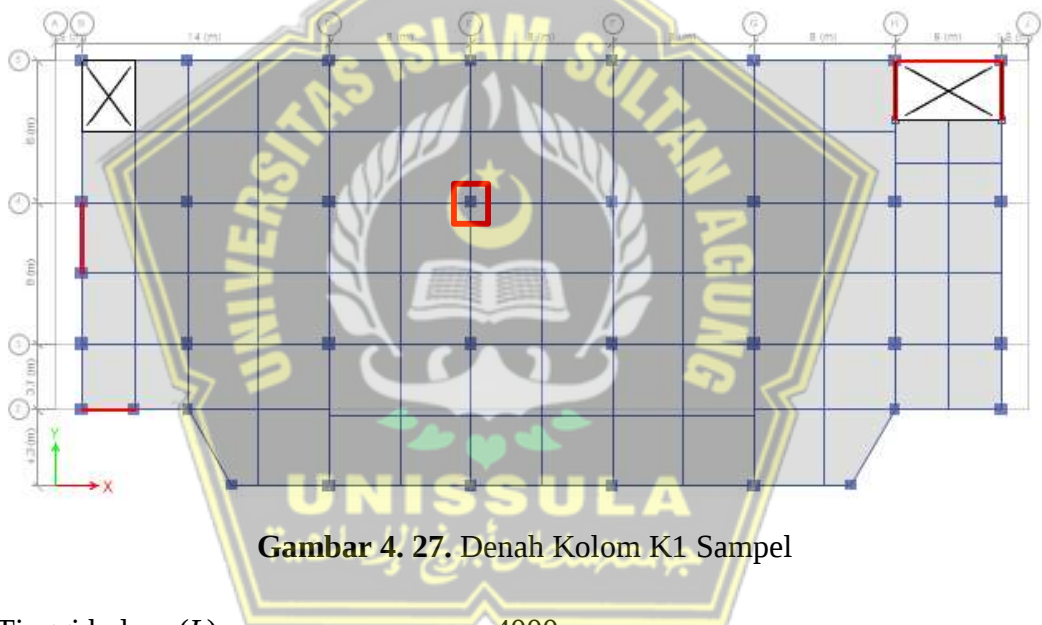
B3	20 × 40	Atas	4 D16	2 D16	D8-100	D8-150	-
		Bawah	2 D16	3 D16			

4.6.3. Perancangan Kolom

Desain dimensi penampang kolom harus mampu menahan gaya momen dan gaya geser sehingga diperlukan analisis kapasitas desain kolom. Diagram interaksi Pn-M kolom juga disertakan dalam analisis kapasitas desain kolom untuk mengetahui kapasitas kolom terhadap gaya aksial yang menumpunya.

4.6.3.1. Properti Material dan Penampang

Tipe kolom yang akan digunakan sebagai contoh perhitungan adalah kolom K1 pada tingkat pertama yang ditunjukkan Gambar 4.27.



Gambar 4. 27. Denah Kolom K1 Sampel

Tinggi kolom (L)	= 4000 mm
Dimensi ($b \times h$)	= 700 x 700 mm
Luas penampang (A_g)	= 490000 mm ²
Tebal selimut bersih (c_c)	= 40 mm
Diameter tulangan longitudinal (d_b)	= 22 mm
Diameter tulangan sengkang (d_s)	= 10 mm
Tinggi efektif kolom (d)	= $b - c_c - d_s - d_b/2$
	= 700 - 40 - 10 - 22/2
	= 639 mm

Kuat tekan beton (f'_c)	= 30 MPa
Kuat leleh baja tulangan (f_y)	= 420 MPa
Faktor reduksi kekuatan (ϕ)	= 0,65 (SNI 2847:2019 Tabel 21.2.1)
Momen kapasitas balok (M_{nb+})	= 567,138 kNm
Momen kapasitas balok (M_{nb-})	= 294,814 kNm

4.6.3.2. Perhitungan Tulangan Longitudinal Kolom

Tahapan-tahapan perhitungan tulangan longitudinal kolom yang dilakukan, antara lain:

1. Gaya Dalam

Gaya dalam berupa gaya tekan aksial yang diterima kolom dan gaya geser pada kolom K1 dan kolom atasnya yang didapat dari ETABS yang digunakan untuk mendesain tulangan longitudinal kolom sebagai berikut:

- P_u kolom desain = 6073,536 kN
- V_u kolom desain = 99,765 kN

2. Cek Dimensi

Batasan dimensi untuk struktur kolom sesuai SNI 2847:2019 Pasal 18.7.2.1 harus memenuhi :

- a) Dimensi terkecil penampang tidak kurang dari 300 mm

$$\text{Syarat} \quad = b \geq 300 = 700 \geq 300 \rightarrow \text{OK}$$

- b) Rasio dimensi penampang tidak kurang dari 0,4

$$\text{Syarat} \quad = \frac{b}{h} \geq 0,4 = \frac{700}{700} \geq 0,4 = 1 \geq 0,4 \rightarrow \text{OK}$$

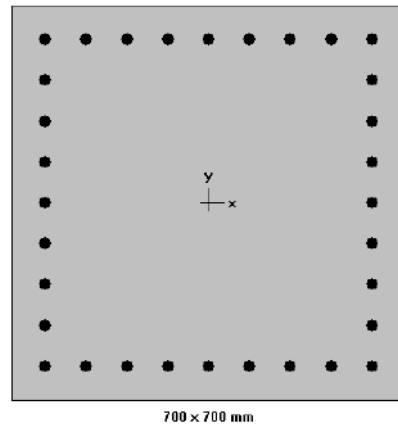
3. Cek syarat komponen struktur tahan gempa

Gaya tekan aksial P_u akibat kombinasi beban yang kurang dari $0,3 A_g f_c$

$$\begin{aligned} \text{Syarat} \quad &= P_u \leq 0,3 A_g \times f_c \\ &= 6073,536 \leq 0,3 \times 490000 \times 30 \times 10^{-3} \\ &= 6073,536 \leq 4410,000 \rightarrow \text{OK} \end{aligned}$$

4. Menentukan tulangan longitudinal penahan lentur

Luas tulangan longitudinal tidak diizinkan kurang dari $0,01A_g$ dan tidak lebih dari $0,06A_g$ sesuai SNI 2847:2019 Pasal 18.7.4. Hasil konfigurasi tulangan lentur kolom K1 didapatkan dengan cara menggunakan program *SPColumn* ditunjukkan pada Gambar 4.28.



Gambar 4. 28. Tulangan Longitudinal Kolom K1

Diagram interaksi P_n - M_{pr} SPColumn kolom K1 dan hasil analisis interaksi P_n - M_{pr} kolom K1 dapat dilihat pada Gambar 4.29 dan Tabel 4.75.



Gambar 4. 29. Diagram Interaksi P_n - M_{pr} SPColumn Kolom K1

Tabel 4. 75. Hasil Analisis Interaksi P_n - M_{pr} Kolom K1

No	P_u (kN)	M_{ux} (kNm)	ϕM_{nx} (kNm)	$\phi M_n/M_u$	NA depth (mm)	dt depth (mm)	ϵ_t	ϕ
1	6073	99	1186,22	11,982	502	639	0,00082	0,65

$$\begin{aligned}
 0,01 A_g &= 0,01 \times 490000 \\
 &= 4900 \text{ mm}^2
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
0,06 A_g &= 0,06 \times 490000 \\
&= 29400 \text{ mm}^2 \\
A_{st} &= n \times 1/4 \times \pi \times D^2 \\
&= 36 \times 1/4 \times 3,14 \times 22^2 \\
&= 13684,8 \text{ mm}^2 \\
\text{Syarat} &= 0,01 A_g < A_{st} < 0,06 A_g \\
&= 4900 < 13684 < 29400 \rightarrow \text{OK}
\end{aligned}$$

4.6.3.3. Perhitungan Tulangan Transversal Kolom

Tahapan-tahapan perhitungan tulangan transversal kolom yang dilakukan, antara lain:

1. Analisis Tulangan Geser sebagai *Confinement*

Pada analisis tulangan geser sebagai kolom ini melalui beberapa tahap, yaitu:

- a) Menentukan daerah pemasangan tulangan sengkang persegi (*hoop*), tulangan *hoop* diperlukan sepanjang ℓ_o dari ujung-ujung kolom. Sesuai SNI 2847:2019 Pasal 18.4.3.3 dengan ℓ_o merupakan nilai terbesar dari:

- 1/6 tinggi bersih kolom = $4000 / 6 = 670 \text{ mm}$
- Dimensi maksimum kolom = 700 mm
- 450 mm

Jadi, jarak ℓ_o digunakan 700 mm

- b) Penentuan $s_{\max}$ merupakan nilai terbesar dari:

- 1/4 dimensi komponen struktur minimum = $700 / 4 = 175 \text{ mm}$
- $6D = 6 \times 22 = 132 \text{ mm}$
- s_o , tidak melebihi 150 mm dan tidak kurang dari 100 mm

$$s_o = 100 + \frac{400 - 0,33 (700 - 2 \times 40 - 2(10) - 2)}{3} = 167,5 \text{ mm}$$

Ambil jarak tulangan transversal 100 mm

- c) Penentuan luas tulangan *confinement*

Berdasarkan SNI 2847:2019 Tabel 18.7.5.4. Untuk daerah sepanjang ℓ_o dari ujung-ujung kolom total luas penampang *hoop* tidak boleh kurang dari salah satu yang terbesar di antara :

- Tinggi penampang inti beton yang tertekan (b_{cl})

$$b_{cl} = h - (2 \times c_c) = 700 - (2 \times 40) = 620 \text{ mm}$$

- Lebar penampang inti beton yang tertekan (b_{c2})

$$b_{c2} = b - (2 \times c_c) = 700 - (2 \times 40) = 620 \text{ mm}$$

- Luas penampang inti beton (A_{ch})

$$A_{ch} = b_{c1} \times b_{c2} = 620 \times 620 = 384400 \text{ mm}^2$$

- Faktor kekuatan beton (k_f)

$$k_f = \frac{f'_c}{175} + 0,6 = \frac{30}{175} + 0,6 = 0,77143 \rightarrow \text{minimal } 1$$

- Faktor efektivitas pengekanan (k_n)

$$k_n = \frac{n_i}{n_i - 2} = \frac{36}{36 - 2} = 1,05$$

- Luas penampang total tulangan transversal (A_{sh})

$$\begin{aligned} A_{sh1} &= 0,3 \times \left(\frac{A_g}{A_{ch}} - 1 \right) \times \frac{f'_c}{f_{yt}} \\ &= 0,3 \times \left(\frac{490000}{384400} - 1 \right) \times \frac{30}{420} \\ &= 3,650 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} A_{sh2} &= 0,09 \times \frac{f'_c}{f_{yt}} \\ &= 0,09 \times \frac{30}{420} \\ &= 3,986 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} A_{sh3} &= 0,2 \times k_f \times k_n \times \frac{P_u}{f_{yt} \times A_{ch}} \\ &= 0,2 \times 1 \times 1,05 \times \frac{6073 \times 10^3}{420 \times 384400} \\ &= 0,00752 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{A_{sh}}{s} &= b_c \times A_{sh \text{ max}} \\ &= 620 \times 0,00752 \\ &= 4,662 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} A_{sh} &= s \times \frac{A_{sh}}{s} \\ &= 100 \times 4,622 \\ &= 462,20 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

Maka dapat digunakan Sengkang (*hoop*) 6 D10-100

$$A_{s \text{ pasang}} = 6 \text{ kaki} \times 1/4 \times 3,14 \times 13^2 = 471,99 \text{ mm}^2$$

$$\begin{aligned} \text{Syarat} &= A_{s \text{ pasang}} > A_{sh} \\ &= 471,99 > 462,20 \text{ mm}^2 \rightarrow \text{OK} \end{aligned}$$

d) Berdasarkan SNI 2847:2019 Pasal 18.7.5.5. Untuk daerah di luar ℓ_0 diberi sengkang dengan spasi tidak melebihi nilai terkecil dari:

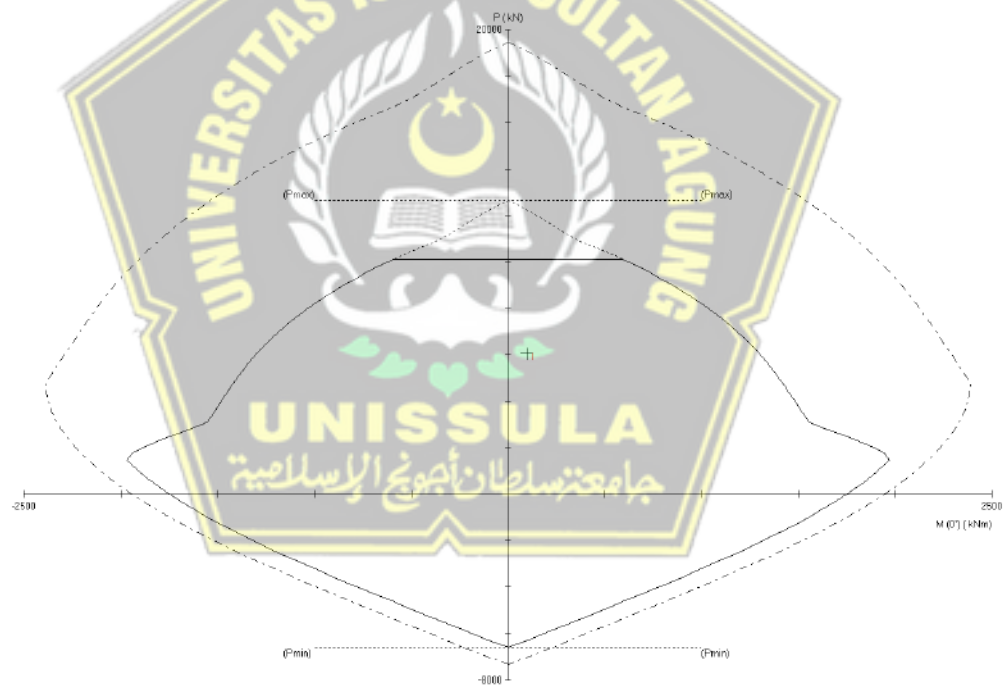
a. $6D = 6 \times 22 = 132 \text{ mm}$

b. 150 mm

Maka $s_{\max} = 150 \text{ mm}$ dan dapat digunakan spasi (s) = 150 mm sepanjang sisa kolom bersih.

2. Analisis Gaya Geser Desain Tulangan Sengkang Kolom

Gaya geser V_e harus diambil dari gaya geser yang berhubungan dengan sendi plastis pada kedua ujung kolom sesuai SNI 2847:2019 Pasal 18.7.6.1.1. Nilai M_{pr} pada kolom ditentukan dengan anggapan kekuatan tarik memanjang minimal $1,25f_y$ dan $\phi = 1$. Untuk diagram interaksi P_n - M SPColumn dengan $1,25f_y$ dan hasil analisis interaksi P_n - M SPColumn dengan $1,25f_y$ dapat dilihat pada Gambar 4.30 dan Tabel 4.76.



Gambar 4. 30. Diagram Interaksi P_n - M SPColumn Kolom K1 dengan $1,25 f_y$

Tabel 4. 76. Hasil Analisis Interaksi P_n - M Kolom K1 dengan $1,25 f_y$

No	P_u (kN)	M_{ux} (kNm)	ϕM_{nx} (kNm)	$\phi M_n/M_u$	NA depth (mm)	dt depth (mm)	ϵ_t	ϕ
1	6073	99	1298	13,111	485	639	0,00095	0,650

- Probable Moment of Column (M_{prc})

$$M_{prc} = 4140,98 \text{ kNm}$$

- Tinggi bersih kolom (L_n)

$$\begin{aligned} L_n &= \text{Tinggi Kolom} - \text{Tinggi Balok} \\ &= 4000 - 700 \\ &= 3300 \text{ mm} \\ &= 3,3 \text{ m} \end{aligned}$$

- Probable Moment of Beam (M_{prb})

$$M_{prb \text{ atas}} = 128881810 \text{ Nmm} = 128,88 \text{ kNm}$$

$$M_{prb \text{ bawah}} = 247294877 \text{ Nmm} = 247,29 \text{ kNm}$$

$$\begin{aligned} \sum M_{prb} &= 128,88 + 247,29 \\ &= 376,18 \text{ kNm} \end{aligned}$$

- Faktor distribusi kolom (D_f)

$$D_f = 0,5 \text{ (atas dan bawah dianggap sama)}$$

- Faktor reduksi geser (ϕ)

$$\phi = 0,75$$

- Gaya geser desain (V_e)

$$\begin{aligned} V_{e1} &= \frac{M_{pr \text{ atas}} + M_{pr \text{ bawah}}}{L_n} \\ &= \frac{4140,98 + 4140,98}{3,58} \\ &= 2313,40 \text{ kN} \end{aligned}$$

V_e tidak perlu melebihi dari:

$$\begin{aligned} V_{e2} &= \frac{\sum M_{prb} \times D_{f \text{ atas}} + \sum M_{prb} \times D_{f \text{ bawah}}}{L_n} \\ &= \frac{376,18 \times 0,5 + 376,18 \times 0,5}{3,58} \\ &= 105,08 \text{ kN} \end{aligned}$$

V_e tidak boleh kurang dari gaya geser terfaktor hasil analisis:

$$V_{e3} = 99,77 \text{ kN}$$

- Dari nilai V_e yang telah dihitung, maka diambil $V_u = 105,08 \text{ kN}$. Asumsi kuat geser yang disumbang oleh beton, $V_c = 0$. Maka:

$$V_s = \frac{V_u}{\phi} = \frac{105,08}{0,75} = 140,10 \text{ kN}$$

$$\frac{A_v}{s} = \frac{V_s}{f_y \times d} = \frac{140,10}{420 \times 836} = 0,399 \text{ mm}^2/\text{mm}$$

- Untuk $s = 100$ mm, maka:

$$A_v = \frac{A_v}{s} \times 100 = 0,399 \times 100 = 39,90 \text{ mm}^2/\text{mm}$$

- Cek $A_{sh} > A_v$

$$\begin{aligned} \text{Syarat} &= A_{sh} > A_v \\ &= 795,99 > 39,90 \rightarrow \text{OK} \end{aligned}$$

Digunakan 6 D13-100 untuk sengkang tertutup dan ikat silang dengan $A_{sh} = 795,99 \text{ mm}^2$.

3. Menghitung nilai V_c daerah di luar ℓ_0

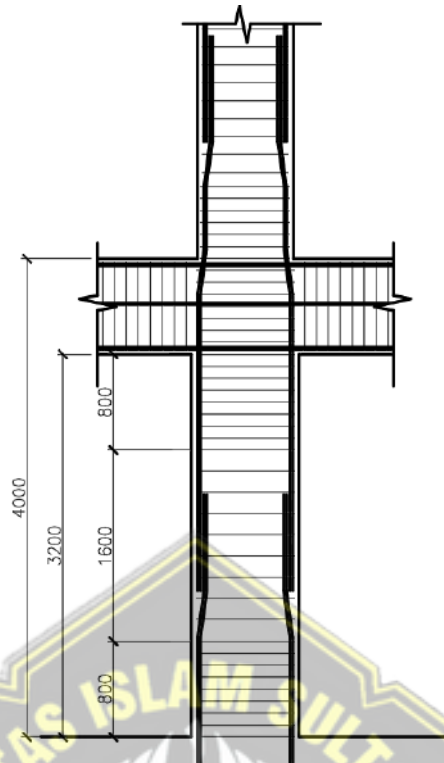
(SNI 2847:2019 Pasal 22.5.6.1)

$$\begin{aligned} V_c &= 0,17 \times \left(1 + \frac{P_u}{14A_g}\right) \times \lambda \times \sqrt{f'_c} \times b_w \times d \\ &= 0,17 \times \left(1 + \frac{5998,853 \times 10^3}{14 \times 490000}\right) \times 1 \times \sqrt{30} \times 700 \times 670 \\ &= 1236,901 \text{ kN} \end{aligned}$$

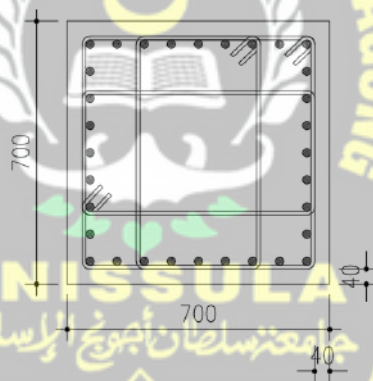
Karena $V_c > V_u$ ($V_u = 105,08 \text{ kN}$) maka daerah di luar ℓ_0 dipasang tulangan sengkang dengan jarak:

$$s = \frac{d}{2} = \frac{670}{2} = 335 \text{ mm}$$

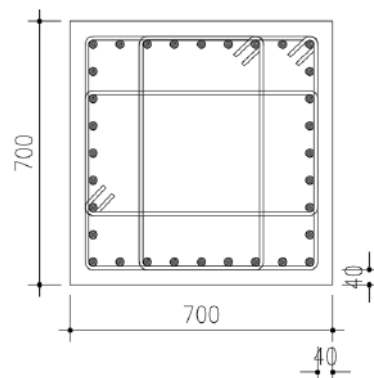
Berdasarkan SNI 2847:2019 Pasal 18.7.5.5, jarak tulangan transversal diluar ℓ_0 tidak boleh lebih dari 150 mm atau $6d_b$ (132 mm). Maka dipasang jarak maksimal 150 mm. Berikut adalah gambar dari hasil perhitungan ditunjukkan pada Gambar 4.31 sampai Gambar 4.33



Gambar 4. 31. Potongan Memanjang Kolom K1



Gambar 4. 32. Tulangan Ujung Kolom K1



Gambar 4. 33. Tulangan Tengan Kolom K1

4.6.3.4. Rekapitulasi Hasil Tulangan Kolom

Dari hasil perhitungan tulangan pada semua tipe kolom yang telah dilakukan, berikut adalah rekapitulasi hasil tulangan kolom ditunjukkan pada Tabel 4.77.

Tabel 4. 77. Rekapitulasi Tulangan Kolom

No	Tipe Kolom	Dimensi Kolom	Tulangan Pokok	Tulangan Geser	
				Tumpuan	Lapangan
1	K1	700 × 700	32 D22	D10-100	D10-150
2	K2	600 × 600	24 D22	D10-100	D10-150
3	K3	500 × 500	20 D19	D10-100	D10-150

4.6.4. Perancangan Strong Column-Weak Beam

Kekuatan lentur kolom harus memenuhi Persamaan 4.13 sesuai SNI 2847:2019

Pasal 18.7.3.2 sebagai berikut:

$$\Sigma M_{nc} \geq 1,2 \Sigma M_{nb} \dots\dots\dots (4.13)$$

1. Menentukan nilai ΣM_{nb}

$$\begin{aligned} \Sigma M_{nb} &= M_{nb}^{+} + M_{nb}^{-} \\ &= 598,019 + 598,019 \\ &= 1196 \text{ kNm} \end{aligned}$$

2. Menentukan nilai ΣM_{nc}

Nilai M_{nc} didapatkan dari diagram interaksi P_n - M SPColumn dengan mencari gaya aksial yang dihasilkan dari kombinasi beban pada kolom atas dan kolom bawah. Nilai M_{nc} atas dan M_{nc} bawah sebagai berikut:

$$\begin{aligned} \Sigma M_{nc} &= M_{nc \text{ atas}} + M_{nc \text{ bawah}} \\ &= 567,138 + 294,814 \\ &= 861,952 \text{ kNm} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Syarat} &= \Sigma M_{nc} \geq 1,2 \Sigma M_{nb} \\ &= \frac{\Sigma M_{nc}}{\Sigma M_{nb}} \geq 1,2 \\ &= \frac{1196}{861,952} \geq 1,2 \\ &= 1,39 \geq 1,2 \rightarrow \text{OK} \end{aligned}$$

4.6.5. Perancangan Hubungan Balok-Kolom (*Joint*)

Hubungan balok-kolom (*joint*) merupakan daerah pertemuan antara kolom dan balok yang harus didetailkan dengan baik. Analisis perhitungan hubungan balok G3 dengan kolom K1 lantai 1 dengan langkah-langkah sebagai berikut:

4.6.5.1. Syarat Panjang *Joint*

Berdasarkan SNI 2847:2019 Pasal 18.8.2.3, dimensi kolom yang paralel dengan tulangan balok tersebut tidak boleh kurang dari 20 kali diameter tulangan longitudinal terbesar balok untuk beton normal.

- Lebar kolom (b)
 $b = h = 700 \text{ mm}$
- Diameter tulangan longitudinal terbesar balok (d_b)
 $d_b = 22 \text{ mm}$
 $20d_b = 20 \times 22 = 440 \text{ mm}$
- Cek $b > 20d_b$
Syarat $= b > 20d_b = 700 > 440 \rightarrow \text{OK}$

4.6.5.2. Tulangan Geser untuk *Confinement*

Berdasarkan SNI 2847:2019 Pasal 18.8.3.1, jumlah tulangan *confinement* dapat menggunakan seperti pada detail tulangan geser kolom pada ℓ_0 . Dari hasil analisis tulangan geser kolom di atas digunakan tulangan geser 6 D13-100.

4.6.5.3. Gaya Geser pada *Joint*

Momen balok yang timbul:

- Probable Moment of Beam Positive (M_{prb}^+)
 $M_{prb}^+ = 128,88 \text{ kNm}$
- Probable Moment of Beam Negative (M_{prb}^-)
 $M_{prb}^- = 247,29 \text{ kNm}$
- Faktor distribusi kolom (D_f)
 $D_f = 0,5 \rightarrow \text{OK}$

- Momen terfaktor diperbesar (M_c)

$$\begin{aligned} M_c &= 0,5 \times (M_{prb}^+ + M_{prb}^-) \\ &= 0,5 \times (128,88 + 247,29) \\ &= 188,09 \text{ kNm} \end{aligned}$$

4.6.5.4. Gaya Geser pada Kolom

- Tinggi efektif kolom (L_n)

$$\begin{aligned} L_n &= \text{Tinggi Kolom} - \text{Tinggi Balok} \\ &= 4000 - 700 \\ &= 3300 \text{ mm} \\ &= 3,3 \text{ m} \end{aligned}$$

- Gaya geser kolom (V_h)

$$\begin{aligned} V_h &= \frac{M_c}{L_n} \\ &= \frac{188,09}{3,58} \\ &= 52,54 \text{ kN} \end{aligned}$$

4.6.5.5. Gaya Geser pada Tulangan Longitudinal Balok

- Luas tulangan atas 4 D19, $A_s = 1134,11 \text{ mm}^2$

$$\begin{aligned} T_1 &= 1,25 \times A_s \times f_y \\ &= 1,25 \times 1134,11 \times 420 \\ &= 595,41 \text{ N} \end{aligned}$$

- Gaya tekan yang bekerja pada beton di sisi kiri hubungan balok kolom, sebesar:

$$C_1 = T_1 = 595,41 \text{ kN}$$

- Luas tulangan bawah 2 D19, $A_s = 567,06 \text{ mm}^2$

$$\begin{aligned} T_2 &= 1,25 \times A_s \times F_y \\ &= 1,25 \times 567,06 \times 420 \\ &= 297,71 \text{ kN} \end{aligned}$$

- Gaya tekan yang bekerja pada beton di sisi kanan hubungan balok kolom, sebesar :

$$C_2 = T_2 = 297,71 \text{ kN}$$

4.6.5.6. Kuat Geser pada Joint

- Kuat geser pada *joint* (V_j) sebesar:

$$\begin{aligned}V_j &= T_1 + T_2 - V_h \\&= 595,41 + 297,71 - 52,54 \\&= 840,58 \text{ kN}\end{aligned}$$

4.6.5.7. Kuat Geser yang dikekang Keempat Sisi

- Kuat geser nominal (V_n)

$$\begin{aligned}V_n &= 1,7 \times \lambda \times \sqrt{f_c'} \times A_g \\&= 1,7 \times 1 \times \sqrt{30} \times 490000 \times 10^{-3} \\&= 7934,20 \text{ kN}\end{aligned}$$

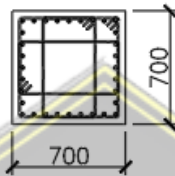
- Kapasitas geser tereduksi (ϕV_n)

$$\phi V_n = \phi \times V_n = 0,85 \times 7934,20 = 6744,07 \text{ N}$$

- Cek $\phi V_n > V_j$

$$\begin{aligned}\text{Syarat} &= \phi V_n > V_j \\&= 6744,07 > 840,58 \rightarrow \text{OK}\end{aligned}$$

Dari analisis perhitungan yang telah dilakukan, kuat geser yang dikekang keempat sisinya lebih besar daripada gaya geser *joint* yang ditimbulkan. Dengan nilai $6744,07 \text{ kN} > 840,58 \text{ kN}$ maka memenuhi persyaratan. Gambar tulangan hubungan balok-kolom dari hasil perhitungan dapat dilihat pada Gambar 4.34.



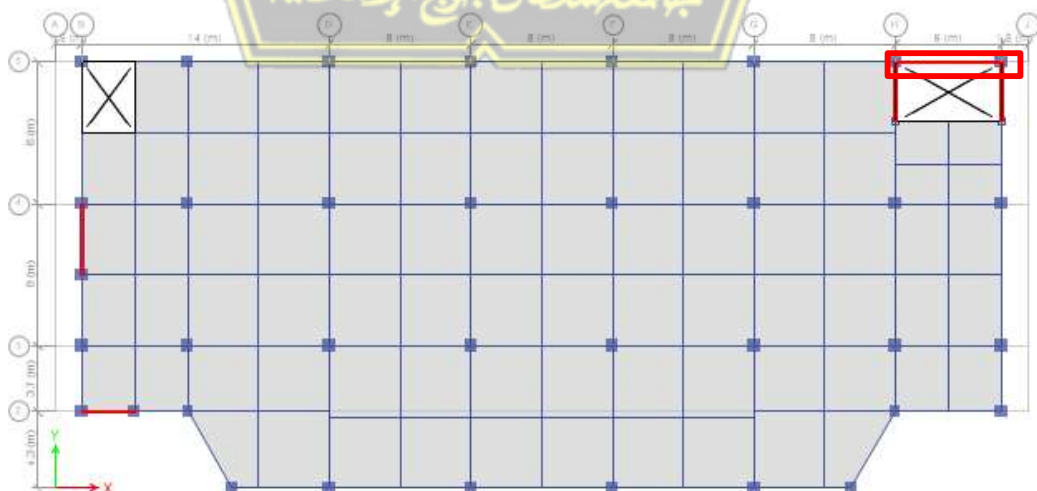
Gambar 4. 34. Hubungan Balok Kolom (*Joint*)

4.6.6. Perancangan Dinding Geser

Perancangan dinding geser memerlukan analisis kapasitas desain dinding geser untuk mengetahui dimensi penampang dinding geser yang didesain agar mampu menahan gaya momen serta gaya geser.

4.6.6.1. *Properti Material dan Penampang*

Dinding geser yang akan digunakan sebagai contoh perhitungan adalah dinding geser yang ditunjukkan Gambar 4.35.



Gambar 4. 35. Denah Dinding Geser Sampel

Tebal dinding geser (t_w)	= 150 mm
Panjang dinding geser (L)	= 4000 mm
Panjang kolom (h_k)	= 700 mm
Lebar kolom (b_k)	= 700 mm
Tinggi dinding geser total (h_w)	= 27300 mm
Diameter tul. longitudinal badan (d_l)	= 16 mm
Diameter tul. transversal badan (d_t)	= 16 mm
Diameter tulangan kolom (d_b)	= 22 mm
Kuat tekan beton (f'_c)	= 30 MPa
Kuat leleh baja tulangan (f_y)	= 420 MPa

4.6.6.2. Gaya Dalam

Gaya dalam untuk perancangan dinding geser diambil dari analisis menggunakan ETABS ditunjukkan pada Tabel 4.78 dan Tabel 4.79.

Tabel 4. 78. Gaya Aksial-Lentur pada Dinding Geser

Aksial - Lentur			
Kondisi	P (kN)	M2 (kN-m)	M3 (kN-m)
P max	64,942	0,026	1304,258
P min	-5004,733	-742,351	-43563,735
M2 Max	-3210,784	851,708	47332,635
M2 Min	-3088,328	-769,839	-44519,522
M3 Max	-3364,388	319,842	59944,267
M3 Min	-2934,725	-237,973	-57131,154

Tabel 4. 79. Gaya Geser pada Dinding Geser

Geser	
V2 (kN)	4792,532
V3 (kN)	237,675

4.6.6.3. Pengecekan Geometri

- Panjang total (L_w)

$$L_w = L + h_k = 4000 + 700 = 4700 \text{ kN}$$

- Panjang bersih (L_n)

$$L_n = L - h_k = 4000 - 700 = 3300 \text{ N}$$

- Luas penampang melintang (A_{cv})

$$A_{cv} = t_w \times L_w = 200 \times 4700 = 940000 \text{ mm}^2$$

- Luas total dinding geser (A_w)

$$\begin{aligned} A_w &= t_w \times L_n + 2 \times (b_k \times h_k) \\ &= 150 \times 3300 + 2 \times (700 \times 700) \\ &= 1640000 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

4.6.6.4. Kebutuhan Tulangan Minimum

- Faktor reduksi kekuatan geser

$$\phi = 0,75$$

- Gaya geser ($\frac{V_u}{\phi}$)

$$\frac{V_u}{\phi} = \frac{4792,532 \times 10^3}{0,75} = 6390042 \text{ N}$$

- Rasio tulangan minimum (ρ_{min})

(SNI 2847:2019 Pasal 18.10.2.1)

Rasio tulangan minimal yaitu 0,0025, kecuali jika $V_u < 0,083 \times A_{cv} \times \sqrt{f_c}$ maka rasio tulangan diizinkan sesuai SNI 2847:2019 Tabel 11.6.1.

$$\begin{aligned} \text{Syarat} &= V_u < 0,083 \times A_{cv} \times \sqrt{f_c} \\ &= 4792,532 < 0,083 \times 940000 \times \sqrt{30} \\ &= 4792,532 > 427333 \text{ N} \rightarrow \text{Pakai rasio minimal } 0,0025 \end{aligned}$$

Karena $V_u > 0,083 \times A_{cv} \times \sqrt{f_c}$, maka :

Rasio tulangan longitudinal minimum (ρ_{lmin}) = 0,0025

Rasio tulangan transversal minimum (ρ_{tmin}) = 0,0025

- Jumlah lapis tulangan pakai (n_{lapis})

(SNI 2847:2019 Pasal 18.10.2.2)

Minimal 2 lapis tulangan dibutuhkan jika $V_u > 0,17 \times A_{cv} \times \sqrt{f_c}$ atau $\frac{h_w}{l_w} \geq 2$.

Cek batasan 1:

$$\begin{aligned} \text{Syarat} &= V_u > 0,17 \times A_{cv} \times \sqrt{f_c} \\ &= 4792,532 > 0,17 \times 2670000 \times \sqrt{40} \end{aligned}$$

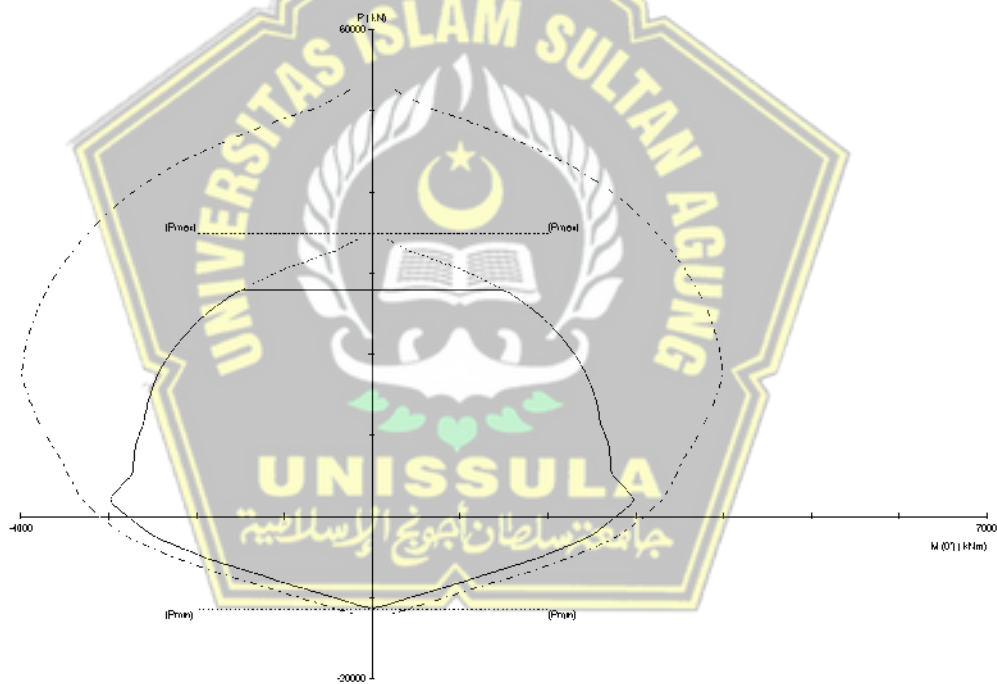
$$= 4792,532 > 875261 \text{ N} \rightarrow \text{Perlu tulangan 2 lapis}$$

Cek batasan 2:

$$\begin{aligned} \text{Syarat} &= \frac{h_w}{l_w} \geq 2 \\ &= \frac{27300}{4700} \geq 2 \\ &= 5,808 > 2 \rightarrow \text{Perlu tulangan 2 lapis} \end{aligned}$$

4.6.6.5. Pengecekan terhadap Gaya Dalam Aksial-Lentur (SPColumn)

Konfigurasi tulangan longitudinal pada dinding geser didapatkan dari hasil *trial and error* menggunakan program SPColumn yaitu D16-100 dan konfigurasi tulangan pada kolom yaitu 36 D22. Untuk diagram interaksi SPColumn dinding geser dan hasil analisis interaksi P_n - M_{pr} dinding geser dapat dilihat pada Gambar 4.36 dan Tabel 4.80.



Gambar 4. 36. Diagram Interaksi SPColumn Dinding Geser

Tabel 4. 80. Hasil Analisis Interaksi SPColumn Dinding Geser

No	P_u	M_{ux}	M_{uy}	ϕM_{nx}	ϕM_{ny}	$\phi M_n/M_u$	NA Dept h	d_t Dept h	ϵ_t	ϕ
	kN	kNm	kNm	kNm	kNm		mm	mm		
1	64	0	1304	0	24117,6	18,495	531	4650	0,02326	0,9
2	5004	742	4356	2062,53	12108,4	2,78	455	1057	0,00388	0,803
3	3210	851	4733	2175,25	12098,1	2,556	419	1066	0,0046	0,865
4	3088	769	4451	2158,15	12491,5	2,806	422	1080	0,00465	0,87
5	3364	319	5994	1340,82	25194,1	4,203	625	1769	0,0054	0,9
6	2934	237	5713	1130,45	27250,1	4,77	697	2282	0,0068	0,9

1. Bagian Badan

- Spasi tulangan longitudinal (s)

$$s = 100 \text{ mm}$$

- Cek spasi tulangan maksimum

(SNI 2847:2019 Pasal 18.10.2)

Spasi tulangan untuk dinding struktural maksimum 450 mm

$$\text{Syarat} = s \leq 450 = 100 \leq 450 \rightarrow \text{OK}$$

- Rasio tulangan longitudinal (ρ_l)

(SNI 2847:2019 Pasal R18.10.6.5)

$$\begin{aligned} \rho_l &= n_{\text{lapis}} \times \frac{\frac{\pi}{4} \times d_l^2}{t_w \times s} \\ &= 2 \times \frac{\frac{\pi}{4} \times 30^2}{200 \times 100} \\ &= 2,011 \% \end{aligned}$$

- Cek rasio tulangan minimum

$$\text{Syarat} = \rho_l \geq \rho_{l \text{ min}} = 2,011 \% \geq 0,25 \% \rightarrow \text{OK}$$

2. Bagian Kolom

Jumlah tulangan per kolom (n) = 36 mm

- Rasio tulangan longitudinal (ρ_l)

$$\begin{aligned}\rho_l &= n \times \frac{\frac{\pi}{4} \times d_b^2}{b_k \times h_k} \\ &= 36 \times \frac{\frac{\pi}{4} \times 22^2}{700 \times 700} \\ &= 2,793 \%\end{aligned}$$

- Cek rasio tulangan kolom

$$\begin{aligned}\text{Syarat} &= 1 \% \leq \rho \leq 6 \% \\ &= 1 \% \leq 2,793 \% \leq 6 \% \rightarrow \text{OK}\end{aligned}$$

4.6.6.6. Pengecekan Kapasitas Geser

- Rasio tinggi dinding dengan panjang total (h_w/L_w)

$$h_w/L_w = 27300 / 4700 = 5,8085$$

- Koefisien kekuatan beton terhadap geser dinding nominal (α_c)
(SNI 2847:2019 Pasal 18.10.4.1)

$$\alpha_c = 0,17 \text{ (untuk } h_w/L_w > 2 \text{)}$$

- Spasi tulangan transversal (s)

$$s = 100 \text{ mm}$$

- Cek spasi tulangan maksimum

(SNI 2847:2019 Pasal 18.10.2)

Spasi tulangan untuk dinding struktural maksimum 450 mm

$$\text{Syarat} = s \leq 450 = 100 \leq 450 \rightarrow \text{OK}$$

- Kuat geser dinding (V_n)

$$\begin{aligned}V_n &= A_{cv} \times (\alpha_c \times \sqrt{f_c} + \rho_t \times f_y) \\ &= 940000 \times (0,17 \times \sqrt{30} + 2,011 \% \times 420) \\ &= 8813186 \text{ N}\end{aligned}$$

$$\phi V_n = 0,75 \times 8813186 \times 10^{-3} = 6390042 \text{ kN}$$

- Cek kapasitas geser

$$\text{Syarat} = V_n \geq \frac{V_u}{\phi} = 8813186 \geq 6390042 \rightarrow \text{OK}$$

4.6.6.7. Pengecekan Kebutuhan Elemen Batas Khusus

Ada 2 metode yang dapat digunakan dalam melakukan pengecekan kebutuhan elemen batas khusus, antara lain:

1. Displacement-Based Method

- Panjang zona tekan (c)

(SNI 2847:2019 Pasal 18.10.6.4)

$$c = 1690 \text{ mm (ambil nilai NA depth maksimum)}$$

- Perpindahan desain (δ_u)

$$\delta_u = 0 \text{ (boleh dikosongkan)}$$

- Rasio perpindahan desain terhadap tinggi dinding (δ_u/h_w)

(SNI 2847:2019 Pasal 18.10.6.2)

$$\delta_u/h_w = 0,005 \text{ (batas maksimum)}$$

- Cek elemen batas khusus

(SNI 2847:2019 Pasal 18.10.6.2)

$$\begin{aligned} \text{Syarat} &= c \geq \frac{L_w}{600 \times (1,5 \times \frac{\delta_u}{h_w})} \\ &= 1690 \geq \frac{4700}{600 \times (1,5 \times 0,005)} \\ &= 1690 < 1044,44 \rightarrow \text{perlu elemen batas khusus} \end{aligned}$$

- Batas perpanjangan elemen batas khusus

(SNI 2847:2019 Pasal 18.10.6.4)

$$c - 0,1 L_w = 1690 - 0,1 \times 4700 = 1220 \text{ mm}$$

$$c/2 = \frac{1690}{2} = 845 \text{ mm}$$

$$h_c + 300 = 700 + 300 = 1000 \text{ mm}$$

- Panjang elemen batas khusus (L_{BE})

$$L_{BE} = \text{maksimum } (c - 0,1 L_w ; c/2 ; \text{ atau } h_c + 300) = 1200 \text{ mm}$$

$$\begin{aligned} L_{BE} &= \text{maksimum } (1220; 845; 1000) = 1200 \\ &= 1220 \text{ mm} \end{aligned}$$

- Tinggi elemen batas khusus (h_{BE})

$$\begin{aligned} h_{BE} &= \text{maksimum } (L_w ; \frac{M_u}{4 V_u}) \\ &= \text{maksimum } (4700 ; 3126,963) \\ &= 4700 \text{ mm} \end{aligned}$$

2. Strength-Based Method

- Luas penampang total (A_g)

$$A_g = A_w = 1640000 \text{ mm}^2$$

- Inersia penampang (I_g)

$$\begin{aligned} I_g &= \frac{1}{12} \times t_w \times L_n^3 + 2 \left(\frac{1}{12} \times b_k \times h_k^3 + \left(\frac{L}{2} \right)^2 \times b_k \times h_k \right) \\ &= \frac{1}{12} \times 200 \times 3300^3 + 2 \left(\frac{1}{12} \times 700 \times 700^3 + \left(\frac{4000}{2} \right)^2 \times 700 \times 700 \right) \\ &= 4,559 \times 10^{13} \text{ mm}^4 \end{aligned}$$

- Tegangan kondisi (σ)

- Tegangan kondisi 1 (σ_1)

$$\begin{aligned} \sigma_1 &= \frac{P_u}{A_g} + \frac{m_u}{I_g} \times \frac{L}{2} \\ &= \frac{64,942 \times 10^3}{1640000} + \frac{1304 \times 10^6}{4,559 \times 10^{13}} \times \frac{4000}{2} \\ &= 0,612 \text{ MPa} \end{aligned}$$

- Tegangan kondisi 2 (σ_2)

$$\begin{aligned} \sigma_2 &= \frac{P_u}{A_g} + \frac{m_u}{I_g} \times \frac{L}{2} \\ &= \frac{5004,733 \times 10^3}{1640000} + \frac{43563,735 \times 10^6}{4,559 \times 10^{13}} \times \frac{4000}{2} \\ &= 22,163 \text{ MPa} \end{aligned}$$

- Tegangan kondisi 3 (σ_3)

$$\begin{aligned} \sigma_3 &= \frac{P_u}{A_g} + \frac{m_u}{I_g} \times \frac{L}{2} \\ &= \frac{3210,784 \times 10^3}{1640000} + \frac{47332,634 \times 10^6}{4,559 \times 10^{13}} \times \frac{4000}{2} \\ &= 22,722 \text{ Mpa} \end{aligned}$$

- Tegangan kondisi 4 (σ_4)

$$\begin{aligned} \sigma_4 &= \frac{P_u}{A_g} + \frac{m_u}{I_g} \times \frac{L}{2} \\ &= \frac{3088,328 \times 10^3}{1640000} + \frac{44519,522 \times 10^6}{4,559 \times 10^{13}} \times \frac{4000}{2} \\ &= 21,414 \text{ MPa} \end{aligned}$$

- Tegangan kondisi 5 (σ_5)

$$\begin{aligned}\sigma_5 &= \frac{P_u}{A_g} + \frac{m_u}{I_g} \times \frac{L}{2} \\ &= \frac{3364,388 \times 10^3}{1640000} + \frac{59944,267 \times 10^6}{4,559 \times 10^{13}} \times \frac{4000}{2} \\ &= 28,349 \text{ MPa}\end{aligned}$$

- Tegangan kondisi 6 (σ_6)

$$\begin{aligned}\sigma_6 &= \frac{P_u}{A_g} + \frac{m_u}{I_g} \times \frac{L}{2} \\ &= \frac{2934,725 \times 10^3}{1640000} + \frac{57131,154 \times 10^6}{4,559 \times 10^{13}} \times \frac{4000}{2} \\ &= 26,853 \text{ MPa}\end{aligned}$$

- Tegangan maksimum ($\sigma_{\max}$)

$$\begin{aligned}\sigma_{\max} &= \text{maksimum } (\sigma_1 ; \sigma_2 ; \sigma_3 ; \sigma_4 ; \sigma_5 ; \text{ atau } \sigma_6) \\ &= 28,349 \text{ MPa}\end{aligned}$$

- Batas tegangan

(SNI 2847:2019 Pasal 18.10.6.3)

$$\text{Batas} = 0,2 f'_c = 0,2 \times 30 = 6 \text{ MPa}$$

- Cek perlu elemen batas khusus

(SNI 2847:2019 Pasal 18.10.6.3)

$$\text{Syarat} = \sigma_{\max} > 0,2 f'_c = 28,349 > 6 \rightarrow \text{Perlu elemen batas khusus}$$

- Tinggi elemen batas khusus (h_{BE})

(SNI 2847:2019 Pasal 18.10.6.3)

$$\begin{aligned}h_{BE} &= h_w - (0,15 f'_c / \sigma_{\max}) \times h_w \\ &= 27300 - (0,15 \times 30 / 28,349) \times 27300 \\ &= 22966 \text{ mm}\end{aligned}$$

4.6.6.8. Penulangan Elemen Batas Khusus

Penulangan elemen batas khusus dilakukan pada daerah kolom dan daerah badan sebagai berikut:

1. Daerah Kolom

- Selimut beton (c_c)

$$c_c = 40 \text{ mm}$$

- Diameter *confinement* (d_s)

$$d_s = 13 \text{ mm}$$

- Jumlah kaki sejajar lebar kolom (n_1)

$$n_1 = 4$$

- Jumlah kaki sejajar panjang kolom (n_2)

$$n_2 = 4$$

- Spasi (s)

$$s = 100 \text{ mm}$$

- Luas penampang total tulangan transversal (A_{sh})

$$A_{sh\ 1} = n_1 \times \frac{\pi}{4} \times d_s^2 = 4 \times \frac{\pi}{4} \times 13^2 = 530,929 \text{ mm}^2$$

$$\frac{A_{sh\ 1}}{s} = \frac{530,929}{100} = 5,309 \text{ mm}^2/\text{mm}$$

$$A_{sh\ 2} = n_1 \times \frac{\pi}{4} \times d_s^2 = 4 \times \frac{\pi}{4} \times 13^2 = 530,929 \text{ mm}^2$$

$$\frac{A_{sh\ 2}}{s} = \frac{530,929}{100} = 5,309 \text{ mm}^2/\text{mm}$$

- Lebar penampang inti beton (b_c)

(SNI 2847:2019 Pasal R18.10.6.4.1)

$$b_c = b_k - 2 c_c = 700 - 2 \times 30 = 620 \text{ mm}$$

- Panjang penampang inti beton (h_c)

(SNI 2847:2019 Pasal R18.10.6.4.1)

$$h_c = h_k - 2 c_c = 700 - 2 \times 30 = 620 \text{ mm}$$

- Luas penampang kolom (A_g)

(SNI 2847:2019 Pasal R18.10.6.4.1)

$$A_g = b_k \times h_k = 700 \times 700 = 490000 \text{ mm}^2$$

- Luas penampang inti beton (A_{ch})

(SNI 2847:2019 Pasal R18.10.6.4.1)

$$A_{ch} = b_c \times h_c = 620 \times 620 = 384400 \text{ mm}^2$$

- Sejajar lebar kolom

(SNI 2847:2019 Pasal R18.10.6.4)

$$\begin{aligned} \square \frac{A_{sh}}{s} \text{ min1} &= 0,3 \times (h_c \times \frac{f_c}{f_y}) \times (\frac{A_g}{A_{ch}} - 1) \\ &= 0,3 \times (620 \times \frac{30}{240}) \times (\frac{490000}{384400} - 1) \\ &= 3,650 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

- $\frac{A_{sh}}{s} \text{ min2} = 0,09 \times h_c \times \frac{f_c}{f_y} = 0,09 \times 620 \times \frac{30}{240} = 3,986 \text{ mm}^2$
- $\frac{A_{sh}}{s} \text{ min} = \text{maksimum} \left(\frac{A_{sh}}{s} \text{ min1} ; \frac{A_{sh}}{s} \text{ min2} \right) = 3,986 \text{ mm}^2$
- Cek:
- Syarat $= \frac{A_{sh1}}{s} > \frac{A_{sh}}{s} \text{ min} = 5,309 > 3,986 \rightarrow \text{OK}$

- Sejajar panjang kolom

(SNI 2847:2019 Pasal R18.10.6.4)

- $\frac{A_{sh}}{s} \text{ min1} = 0,3 \times (h_c \times \frac{f_c}{f_y}) \times (\frac{A_g}{A_{ch}} - 1)$
 $= 0,3 \times (620 \times \frac{30}{240}) \times (\frac{490000}{384400} - 1)$
 $= 3,650 \text{ mm}^2$
- $\frac{A_{sh}}{s} \text{ min2} = 0,09 \times h_c \times \frac{f_c}{f_y} = 0,09 \times 620 \times \frac{30}{240} = 3,986 \text{ mm}^2$
- $\frac{A_{sh}}{s} \text{ min} = \text{maksimum} \left(\frac{A_{sh}}{s} \text{ min1} ; \frac{A_{sh}}{s} \text{ min2} \right) = 3,986 \text{ mm}^2$
- Cek:
- Syarat $= \frac{A_{sh1}}{s} > \frac{A_{sh}}{s} \text{ min} = 5,309 > 3,986 \rightarrow \text{OK}$

2. Daerah Badan

- Selimut beton (c_c)

$$c_c = 40 \text{ mm}$$

- Diameter *confinement* (d_s)

$$d_s = 13 \text{ mm}$$

- Jumlah kaki sejajar lebar kolom (n_1)

$$n_1 = 7$$

- Jumlah kaki sejajar panjang kolom (n_2)

$$n_2 = 7$$

- Spasi (s)

$$s = 100 \text{ mm}$$

- Diameter *confinement* (d_s)

$$d_s = 13 \text{ mm}$$

- Luas penampang total tulangan transversal (A_{sh})

$$A_{sh1} = n_1 \times \frac{\pi}{4} \times d_s^2 = 7 \times \frac{\pi}{4} \times 13^2 = 929,126 \text{ mm}^2$$

$$\frac{A_{sh1}}{s} = \frac{929,126}{100} = 9,291 \text{ mm}^2/\text{mm}$$

$$A_{sh2} = n_1 \times \frac{\pi}{4} \times d_s^2 = 7 \times \frac{\pi}{4} \times 13^2 = 929,126 \text{ mm}^2$$

$$\frac{A_{sh2}}{s} = \frac{929,126}{100} = 9,291 \text{ mm}^2/\text{mm}$$

- Panjang daerah EBK badan (b)

$$b = L_{BE} - h_k = 1220 - 700 = 520 \text{ mm}$$

- Lebar daerah EBK tebal dinding (h)

$$h = t_w = 200 \text{ mm}$$

- Lebar penampang inti beton (b_c)

(SNI 2847:2019 Pasal R18.10.6.4.1)

$$b_c = b - 2 c_c = 520 - 2 \times 40 = 440 \text{ mm}$$

- Panjang penampang inti beton (h_c)

(SNI 2847:2019 Pasal R18.10.6.4.1)

$$h_c = h - 2 c_c = 200 - 2 \times 40 = 120 \text{ mm}$$

- Luas penampang kolom (A_g)

(SNI 2847:2019 Pasal R18.10.6.4.1)

$$A_g = b \times h = 520 \times 200 = 104000 \text{ mm}^2$$

- Luas penampang inti beton (A_{ch})

(SNI 2847:2019 Pasal R18.10.6.4.1)

$$A_{ch} = b_c \times h_c = 440 \times 120 = 52800 \text{ mm}^2$$

- Sejajar dinding

(SNI 2847:2019 Pasal R18.10.6.4)

$$\begin{aligned} \frac{A_{sh}}{s} \text{ min1} &= 0,3 \times (h_c \times \frac{f_c}{f_y}) \times (\frac{A_g}{A_{ch}} - 1) \\ &= 0,3 \times (120 \times \frac{30}{240}) \times (\frac{104000}{52800} - 1) \\ &= 2,494 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

$$\frac{A_{sh}}{s} \text{ min2} = 0,09 \times h_c \times \frac{f_c}{f_y} = 0,09 \times 120 \times \frac{30}{240} = 0,771 \text{ mm}^2$$

$$\frac{A_{sh}}{s} \text{ min} = \text{maksimum} (\frac{A_{sh}}{s} \text{ min1} ; \frac{A_{sh}}{s} \text{ min2}) = 2,494 \text{ mm}^2$$

- Cek:

$$\text{Syarat} = \frac{A_{sh1}}{s} > \frac{A_{sh}}{s} \text{ min} \quad 9,291 > 2,494 \rightarrow \text{OK}$$

- Tegak lurus dinding

(SNI 2847:2019 Pasal R18.10.6.4)

$$\begin{aligned}
 \blacksquare \frac{A_{sh}}{s} \text{ min1} &= 0,3 \times (b_c \times \frac{f_c}{f_y}) \times (\frac{A_g}{A_{ch}} - 1) \\
 &= 0,3 \times (440 \times \frac{30}{240}) \times (\frac{104000}{52800} - 1) \\
 &= 9,143 \text{ mm}^2 \\
 \blacksquare \frac{A_{sh}}{s} \text{ min2} &= 0,09 \times b_c \times \frac{f_c}{f_y} = 0,09 \times 440 \times \frac{30}{240} = 2,829 \text{ mm}^2 \\
 \blacksquare \frac{A_{sh}}{s} \text{ min} &= \text{maksimum} (\frac{A_{sh}}{s} \text{ min1} ; \frac{A_{sh}}{s} \text{ min2}) = 9,143 \text{ mm}^2 \\
 \blacksquare \text{Cek:} \\
 \text{Syarat} &= \frac{A_{sh2}}{s} > \frac{A_{sh}}{s} \text{ min} = 9,291 > 9,143 \rightarrow \text{OK}
 \end{aligned}$$

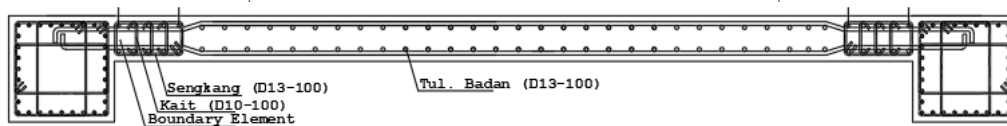
4.6.6.9. Rekapitulasi Hasil Tulangan Dinding Geser

Rekapitulasi hasil penulangan dinding geser yang dapat dilihat pada Tabel 4.81 sebagai berikut:

Tabel 4. 81. Rekapitulasi Hasil Tulangan Dinding Geser

Tulangan Kolom	
Longitudinal	36 D22
Transversal (Sejajar Lebar)	4 D13-100
Transversal (Sejajar Panjang)	4 D13-100
Tulangan Badan	
Longitudinal	2 D13-100
Transversal	2 D13-100
Confinement EBK (Sejajar Lebar)	4 D13-150
Confinement EBK (Sejajar Panjang)	4 D13-150

Gambar detail tulangan dinding geser dari hasil perhitungan yang telah dilakukan dapat dilihat pada Gambar 4.37 sebagai berikut:



Gambar 4. 37. Detail Tulangan Dinding Geser

4.6.6.10. Rekapitulasi Hasil Analisis dan Perancangan

1. Permodelan 1 merupakan rancangan yang menghindari terjadinya ketidakberaturan torsi sehingga Permodelan 1 hanya memiliki konsekuensi pembesaran torsi sebesar 5% sesuai dengan SNI 1726 2019 pasal 7.8.4.3
2. Permodelan 2 merupakan rancangan struktur yang menyesuaikan agar terjadi ketidakberaturan 1a untuk mengetahui konsekuensi pembesaran torsi apabila struktur tersebut mengalami ketidakberaturan 1a. dapat dilihat pada tabel 4.82 eksentrisitas konsekuensi pembesaran torsi sebagai berikut.

Tabel 4. 82. Eksentrisitas Konsekuensi Pembesaran Torsi Pemodelan 2

Arah X	$\Delta_{max}/\Delta_{avg}$	A_x	%	ecc. (m)
Storey7	1,312	2,058	10,3%	2,469
Storey6	1,303	2,002	10,0%	2,402
Storey5	1,305	2,014	10,1%	2,417
Storey4	1,295	1,953	9,8%	2,344
Storey3	1,295	1,953	9,8%	2,344
Storey2	1,292	1,935	9,7%	2,322
Storey1	1,237	1,626	8,1%	1,951

Arah Y	$\Delta_{max}/\Delta_{avg}$	A_x	%	ecc. (m)
Storey7	1,109	1,050	5,3%	2,731
Storey6	1,110	1,054	5,3%	2,741
Storey5	1,107	1,043	5,2%	2,711
Storey4	1,103	1,028	5,1%	2,672
Storey3	1,099	1,013	5,1%	2,634
Storey2	1,100	1,017	5,1%	2,644
Storey1	1,119	1,089	5,4%	2,831

3. Permodelan 3 adalah rancangan yang direncanakan agar terjadi ketidakberaturan torsi 1b, namun apabila permodelan 3 mengalami ketidakberaturan 1b maka satu dari salah satu syarat sistem struktur tahan gempa tidak memenuhi syarat. Upaya yang dilakukan adalah melakukan konfigurasi shearwall agar stuktur tersebut mendekati ketidakberaturan 1b, namun tetap memenuhi syarat sistem struktur tahan gempa dan tetap memperhatikan konsekuensi pembesaran torsi tak terduga. Dapat dilihat pada Tabel 4.83

Tabel 4. 83. Eksentrisitas Konsekuensi Pembesaran Torsi Permodelan 3

Arah X	$\Delta_{max}/\Delta_{avg}$	A_x	%	ecc. (m)
Storey7	1,338	2,226	11,1%	2,671
Storey6	1,328	2,160	10,8%	2,592
Storey5	1,329	2,166	10,8%	2,600
Storey4	1,317	2,089	10,4%	2,507
Storey3	1,315	2,077	10,4%	2,492
Storey2	1,307	2,026	10,1%	2,432
Storey1	1,248	1,685	8,4%	2,022

Arah Y	$\Delta_{max}/\Delta_{avg}$	A_x	%	ecc. (m)
Storey7	1,269	1,801	9,0%	4,682
Storey6	1,075	0,927	4,6%	2,411
Storey5	1,075	0,927	4,6%	2,411
Storey4	1,073	0,921	4,6%	2,393
Storey3	1,073	0,921	4,6%	2,393
Storey2	1,077	0,934	4,7%	2,429
Storey1	1,088	0,973	4,9%	2,530

Penulis menggunakan permodelan 3 untuk tahapan perancangan karena torsi pada rancangan tersebut memiliki torsi paling besar dari ketiga permodelan yang dirancang. Selain itu permodelan 3 juga telah memenuhi syarat tentang beton bertulang struktural tahan gempa yang telah dibahas pada bab-bab sebelumnya sebagai berikut:

1. Sistem struktur merupakan Sistem Ganda (SRPMK dan Dinding Geser SDSK).
2. Berikut merupakan hasil respon struktur yang diperoleh:

- Gaya Dalam

- a) Pelat

Dimensi pelat 8000 x 8000 mm dengan tebal 125 mm

- $M_{\max}$ akibat $M_{11 \max}$ = 10,303 kN-m
- $M_{\min}$ akibat $M_{11 \min}$ = -9,35 kN-m
- $M_{\max}$ akibat $M_{22 \max}$ = 9,646 kN-m
- $M_{\min}$ akibat $M_{22 \min}$ = -11,009 kN-m
- V_u = 16,228 kN

- b) Balok

Dimensi balok G1 sampel 400 x 800 mm dengan panjang 8000 mm

- M_u tumpuan (-) = -421,305 kN-m
- M_u tumpuan (+) = 111,947 kN-m
- M_u lapangan (-) = -40,313 kN-m
- M_u lapangan (+) = 248,634 kN-m
- P_u = 0 kN
- V_u tumpuan = 282,5748 kN
- V_u lapangan = 229,1807 kN
- T_u = 33938 kN-m

- c) Kolom

Dimensi kolom K1 sampel 700 x 700 mm dengan tinggi 4000 mm

- P_u kolom atas = 5185,768 kN
- P_u kolom desain = 6073,536 kN
- V_u kolom desain = 99,765 kN

- d) Dinding Geser

Dimensi Dinding Geser 150 x 6000 mm dengan tinggi total 27300 mm

Gaya dalam dapat dilihat pada Tabel 4.84 dan Tabel 4.85.

Tabel 4. 84. Gaya dalam Tulangan Dinding Geser

Aksial - Lentur			
Kondisi	P (kN)	M2 (kN-m)	M3 (kN-m)
P max	64,942	0,026	1304,258
P min	-5004,733	-742,351	-43563,735
M2 Max	-3210,784	851,708	47332,635
M2 Min	-3088,328	-769,839	-44519,522
M3 Max	-3364,388	319,842	59944,267
M3 Min	-2934,725	-237,973	-57131,154

Tabel 4. 85. Gaya dalam Tulangan Dinding Geser

Geser	
V2 (kN)	4792,532
V3 (kN)	237,675

- Ragam Getar
 - a) Ragam 1
Struktur mengalami translasi pada arah Y dengan $T_{cx} = 0,780$ detik
 - b) Ragam 2
Struktur mengalami translasi pada arah X dengan $T_{cy} = 0,735$ detik
 - c) Ragam 3
Struktur mengalami rotasi pada arah Z dengan $T_{cz} = 0,503$ detik
- Periode Getar
 - a) Periode Minimum
 - $T_{min} = 0,5175$ detik
 - b) Periode Maksimum
 - $T_{max} = 0,725$ detik
 - c) Periode yang Digunakan
 - T arah X (T_x) = 0,725 detik
 - T arah Y (T_y) = 0,725 detik

- Simpangan Antar Tingkat

a) Arah X

- Simpangan terbesar = 24,739 mm
- Simpangan izin = 31,769 mm
- Kontrol simpangan = 24,739 mm < 31,769 mm → OK

b) Arah Y

- Simpangan terbesar = 29,726 mm
- Simpangan izin = 31,769 mm
- Kontrol simpangan = 29,726 mm < 31,769 mm → OK

- Efektivitas Struktur

Gaya lateral yang ditahan rangka pemikul momen (*frame*) pada arah X sebesar 26 % dan pada arah Y sebesar 25 % maka *frame* mampu menahan minimal 25% gaya lateral berdasarkan SNI 1726:2019 Tabel 12.

3. Berikut merupakan hasil dari perhitungan dimensi dan penulangan pada struktur yang memenuhi persyaratan:

a) Pelat

Pelat dengan dimensi 8000 x 8000 mm dengan tebal 125 mm diperoleh lendutan total (δ_{LT}) sebesar 20,792 mm kurang dari batas lendutan maksimum ($L_x/240$) sebesar 33,333 mm menggunakan tulangan D10-150.

b) Balok

Perancangan balok ada 9 tipe dengan dimensi G1 sampel 400 x 800 mm didapatkan $M_u = 248,634 \text{ kNm} < \phi M_n = 596,638 \text{ kNm}$ menggunakan tulangan tumpuan 10 D22 dan tulangan lapangan 10 D22.

c) Kolom

Perancangan kolom ada 4 tipe dengan dimensi K1 sampel 700 x 700 mm menggunakan tulangan pokok 36 D22 dan tulangan geser D10-100. Hasil *strong column-weak beam* diperoleh kuat lentur kolom lebih besar dari kuat lentur balok dengan rasio 0,72 lebih dari rasio minimumnya yaitu 1,2.

d) Dinding Geser

Dinding Geser dengan tebal 150 mm didapatkan $V_u = 6390,042 \text{ kN} < \phi V_n = 8813,186 \text{ kN}$ menggunakan tulangan badan 2 D13-100 dengan tulangan elemen batas khusus 4 D13-150.

BAB V

KESIMPULAN

5.1 Kesimpulan

Kesimpulan yang didapat berdasarkan hasil analisis dan perancangan tentang ”STUDI KETIDAKBERATURAN TORSI PADA REDESAIN STRUKTUR GEDUNG 7 LANTAI DENGAN SISTEM GANDA BERDASARKAN SNI 1726-2019” yang telah dibahas pada bab sebelumnya yaitu :

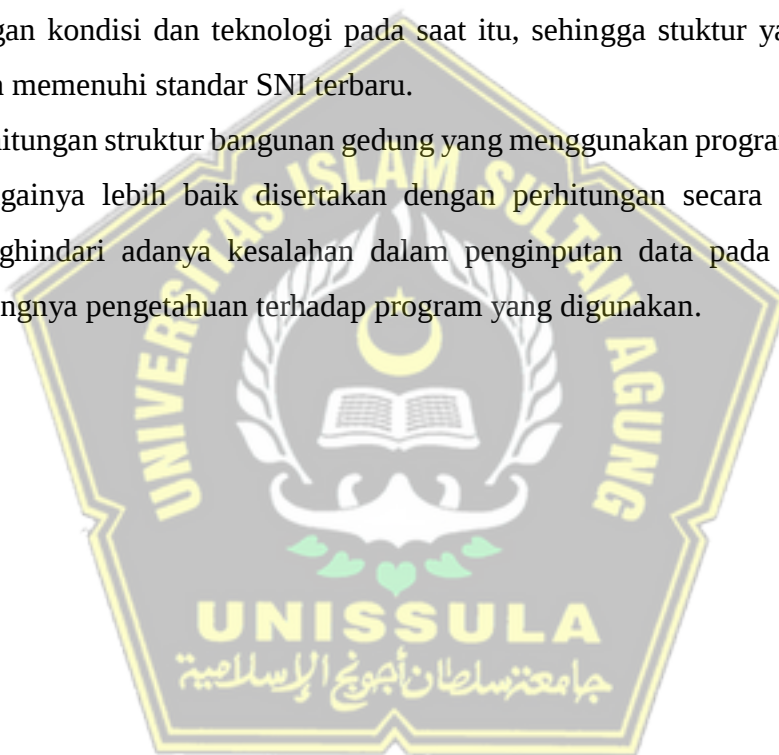
1. Pada dasarnya pusat kekakuan (*Centre of Rigidity*) akan berpengaruh terhadap salah satu sistem perkuatan struktur tahan gempa. Perlu beberapa perancangan yang sesuai agar bangunan tersebut tetap optimal akibat beban gempa, serta bangunan tersebut tetap memenuhi syarat bangunan gedung tahan gempa. Salah satunya adalah mengatur pembesaran torsi bawaan dan mengatur letak lokasi eksentrisitas bangunan yang direncanakan.
2. Pada Permodelan 1 memiliki karakteristik berat struktur seismik efektif sebesar 52846 kN/m dengan struktur gedung tanpa torsi. Pada torsi bawaan didapat sebesar arah $X = 165419,2$ kN/m dan $Y = 165419,2$ kN/m. Setelah menerapkan konsekuensi pembesaran torsi mendapatkan hasil sebesar arah $X = 175893$ kN/m dan $Y = 213982,1$ kN/m.
3. Pada Permodelan 2 memiliki karakteristik berat struktur seismik efektif sebesar 51484 kN/m pada struktur gedung dengan torsi kategori 1A. Pada torsi bawaan didapat sebesar arah $X = 103790,3$ kN/m dan $Y = 209480,4$ kN/m. Setelah menerapkan konsekuensi pembesaran torsi mendapatkan hasil sebesar arah $X = 111783,2$ kN/m dan $Y = 210183,5$ kN/m.
4. Pada Permodelan 3 memiliki karakteristik berat struktur seismik efektif sebesar 50810 kN/m pada struktur gedung dengan torsi kategori 1A. Pada torsi bawaan didapat sebesar arah $X = 110544,5$ kN/m dan $Y = 209127,4$ kN/m. Setelah menerapkan konsekuensi pembesaran torsi mendapatkan hasil sebesar arah $X = 123543,6$ kN/m dan $Y = 210796,4$ kN/m.
5. Rancangan yang terjadi ketidakberaturan torsi dapat diatasi dengan beberapa konfigurasi sistem perkuatan tahan gempa. Namun perlu beberapa rancangan yang tepat agar bangunan tersebut tetap memenuhi syarat bangunan gedung tahan

gempa sesuai SNI 1726-2019 dan Persyaratan Beton Struktural SNI 2847-2019. Untuk tahapan analisis tentang konsekuensi pembesaran torsi serta pemilihan permodelan untuk tahap perancangan yang telah dibahas pada bab-bab sebelumnya.

5.2 Saran

Saran yang didapat berdasarkan hasil analisis dan perancangan yang telah dibahas pada bab-bab sebelumnya sebagai berikut:

1. Rancangan bangunan gedung bertingkat lebih baik dirancang sesuai dengan perkembangan standar SNI terbaru. Karena standar SNI terbaru menyesuaikan dengan kondisi dan teknologi pada saat itu, sehingga struktur yang dihasilkan akan memenuhi standar SNI terbaru.
2. Perhitungan struktur bangunan gedung yang menggunakan program ETABS dan sebagainya lebih baik disertakan dengan perhitungan secara manual untuk menghindari adanya kesalahan dalam penginputan data pada program atau kurangnya pengetahuan terhadap program yang digunakan.



DAFTAR PUSTAKA

- Arifin, Z., Suyaadi., & Sebayang, S. (2015) Analisis Struktur Gedung POP Hotel Terhadap Beban Gempa Metode Pushover Analysis. *JRSDD*, 3(3), 430.
- Fauziah, L., Sumajouw, M. D., Dapas, S. O., & Windah, R. S. (2013). Pengaruh Penempatan dan Posisi Dinding Geser Terhadap Simpangan Bangunan Beton Bertulang Bertingkat Banyak Akibat Beban Gempa. *Jurnal Sipil Statik*, 1(7), 466.
- Reza, Alif Muhammad. (2021, 27 Januari). *Penulangan Dinding Geser*. 8 Minutes Learn, <https://youtu.be/OvmMcXg0hVU>
- Reza, Alif Muhammad. (2022, 1 September). *Desain Penulangan Lentur Pelat*. 8 Minutes Learn, <https://youtu.be/q7AhrEsfZOE>
- Setiawan, Agus. (2020, 16 Juli). *Desain Kolom SRPMK #1 Sesuai SNI Beton Terbaru*. Agus Setiawan, https://youtu.be/Uyu_sS2IxpW
- Setiawan, Agus. (2020, 29 Juli). *Bagaimana Cara Mendesain Kolom SRPMK ? #2 Contoh Soal*. Agus Setiawan, <https://youtu.be/GEF6-xvf3Ks>
- Sofian, A., & Arrosyid, A. (2019). *Analisis Perbandingan Sistem Ganda dan Sistem Rangka Pemikul Khusus pada Desain Struktur Gedung Asrama Mahasiswa Unimus di Semarang*. (Tugas Akhir, Universitas Islam Sultan Agung).

