

TUGAS AKHIR

PERANCANGAN ULANG

STRUKTUR GEDUNG RUMAH SAKIT 4 LANTAI

DENGAN SISTEM RANGKA PEMIKUL MOMEN KHUSUS

Diajukan untuk Memenuhi Persyaratan dalam Menyelesaikan

Program Sarjana Program Studi Teknik Sipil

Fakultas Teknik Universitas Islam Sultan Agung



Disusun Oleh :

Timur Paras Mukti
NIM : 30201900206

Istifham Prainka
NIM : 30201900251

PROGRAM STUDI TEKNIK SIPIL FAKULTAS TEKNIK

UNIVERSITAS ISLAM SULTAN AGUNG

2023

**PERANCANGAN ULANG
STRUKTUR GEDUNG RUMAH SAKIT 4 LANTAI
DENGAN SISTEM RANGKA PEMIKUL MOMEN KHUSUS**

Fakultas Teknik Universitas Islam Sultan Agung



UNIVERSITAS ISLAM SULTAN AGUNG

UNISSULA

جامعة سلطان أبو جني

Disusun Oleh :

Timur Paras Mukti Istifham Prain

NIM : 30201900206 NIM : 302019000

NIM : 30201900251

i

LEMBAR PENGESAHAN

PERANCANGAN ULANG STRUKTUR GEDUNG RUMAH SAKIT 4
LANTAI DENGAN SISTEM RANGKA PEMIKUL MOMEN KHUSUS



Timur Paras Mukti

NIM : 30201900206



Istifham Prainka

NIM : 30201900251

Telah disetujui dan disahkan di Semarang, 8 Agustus 2023

Tim Penguji

Tanda Tangan

1. **Dr. Ir. H. Sumirin, MS.**
NIDN: 0004056302
2. **Muhamad Rusli Ahyar, ST., M.Eng.**
NIDN: 0625059102
3. **Ir. H. Prabowo Setiyawan, MT., Ph.D**
NIDN: 0607046802

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:

Pada hari ini tanggal 8-Agustus-2023 berdasarkan surat keputusan Dekan Fakultas Teknik, Universitas Islam Sultan Agung perihal penunjukan Dosen Pembimbing Utama dan Dosen Pembimbing Pendamping:

1. Nama : Dr. Ir. H. Sumirin, MS.
Jabatan Akademik : Lektor
Jabatan : Dosen Pembimbing Utama
2. Nama : Muhamad Rusli Ahyar, ST., M.Eng.
Jabatan Akademik : Lektor
Jabatan : Dosen Pembimbing Pendamping

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

Timur Paras Mukti
NIM : 30201900206

Istifham Prainka
NIM : 30201900251

Judul : PERANCANGAN ULANG STRUKTUR GEDUNG RUMAH SAKIT 4 LANTAI DENGAN SISTEM RANGKA PEMIKUL MOMEN KHUSUS

Dengan tahapan sebagai berikut :

No	Tahapan	Tanggal	Keterangan
1	Penunjukan dosen pembimbing	08/Maret/2023	ACC
2	Seminar Proposal	12/Juni/2023	
3	Pengumpulan data	10/April/2023	
4	Analisis data	16/Mei/2023	
5	Penyusunan laporan	30/Mei/2023	
6	Selesai laporan	9/Agustus/2023	

Demikian Berita Acara Bimbingan Tugas Akhir / Skripsi ini dibuat untuk diketahui dan dipergunakan seperlunya oleh pihak-pihak yang berkepentingan

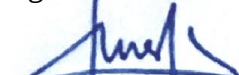
Dosen Pembimbing Utama


Dr. Ir. H. Sumirin, MS.

Dosen Pembimbing Pendamping


Muhamad Rusli Ahyar, ST., M.Eng.

Mengetahui,
Ketua Program Studi Teknik Sipil


Muhamad Rusli Ahyar, ST., M.Eng.

PERNYATAAN BEBAS PLAGIASI

Saya yang bertanda tangan di bawah ini :

Timur Paras Mukti
NIM : 30201900206

Istifham Prainka
NIM : 30201900251

dengan ini menyatakan bahwa Tugas Akhir yang berjudul :

PERANCANGAN ULANG STRUKTUR GEDUNG RUMAH SAKIT 4
LANTAI DENGAN SISTEM RANGKA PEMIKUL MOMEN KHUSUS

benar bebas dari plagiat dan apabila pernyataan ini terbukti tidak benar maka saya bersedia menerima sanksi sesuai ketentuan yang berlaku.

Demikian surat pernyataan ini saya buat untuk dipergunakan sebagaimana mestinya.

Yang membuat pernyataan,

Semarang, 8/Agustus/2023

Yang membuat pernyataan,



Timur Paras Mukti

NIM : 30201900206



Istifham Prainka

NIM : 30201900251



PERNYATAAN KEASLIAN

Saya yang bertanda tangan dibawah ini:

Timur Paras Mukti
NIM : 30201900206

Istifham Prainka
NIM : 30201900251

JUDUL TUGAS AKHIR :

PERANCANGAN ULANG STRUKTUR GEDUNG RUMAH SAKIT 4
LANTAI DENGAN SISTEM RANGKA PEMIKUL MOMEN KHUSUS

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 di kemudian 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, 8/Agustus/2023

Yang membuat pernyataan,

Yang membuat pernyataan,



Timur Paras Mukti
NIM : 30201900206



Istifham Prainka
NIM : 30201900251

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]

“Dan janganlah kamu berputus asa dari rahmat Allah. Sesungguhnya tidaklah seseorang itu berputus asa kecuali orang-orang yang kafir”.

[Q.S. Yusuf : 87]

“Sesungguhnya para malaikat selalu meletakkan sayapnya kepada orang yang mencari ilmu sebagai tanda ridha apa yang dia cari”.

[H.R. At-Tarmidzi : 3535]

“Barangsiapa yang pergi untuk menuntut ilmu, maka dia telah termasuk golongan sabilillah (orang yang menegakkan agama Allah) hingga ia pulang kembali.”

[HR. Tirmidzi]

“Belajarlah kamu semua, dan mengajarlah kamu semua, dan hormatilah guru-gurumu, serta berlaku baiklah terhadap orang yang mengajarkanmu.”

[HR Thabrani]

PERSEMBAHAN

Alhamdulillah, Puji Syukur kehadiran Allah SWT atas segala rahmat dan hidayah-Nya, sehingga penulis bisa menyelesaikan Laporan Tugas Akhir ini. Laporan Tugas Akhir ini penulis persembahkan untuk :

1. Kedua orang tua tercinta Bapak Djoko Djuratno SP. dan Ibu Hendang Susilowati SP., terima kasih atas doa, semangat, motivasi, pengorbanan, nasihat serta kasih sayang yang tidak pernah henti hingga saat ini.
2. Adik Saya Candra Farnessa Herlanggeng ini telah memberikan semua dukungan, pengertian, kasih sayang, dan do'a. Semoga kelak kita dapat menjadi anak yang membanggakan kedua orang tua.
3. Dosen-dosen Fakultas Teknik Jurusan Teknik Sipil UNISSULA yang telah membagikan ilmunya.
4. Bapak dosen pembimbing Dr. Ir. H. Sumirin, MS, Muhamad Rusli Ahyar, ST., M.Eng. dan Ir. H. Prabowo Setiyawan, MT.,Ph.D, yang dengan sabar membimbing dan memberikan ilmunya dalam pengerjaan tugas akhir ini.
5. Istifham Prainka rekan tugas, teman seperjuangan, teman sepermainan dan saudara seiman. Serta Aziz Musyafaq dan teman-teman satu bimbingan yang telah sabar membantu dan mengajari dalam proses pengerjaan tugas akhir ini.
6. Kekasih Saya Haidaroh Kholifatun Nur Khasanah, S.Ked., yang selama ini selalu menemani, memberikan dukungan positif serta motivasi.
7. Sahabat-sahabat seperjuangan saya Joko, Zel Zel, Teguh, Syafaat, Satrio, Rizky Bayu, Firman, Anugerah, Alfian, Duta, Prayoga, Nungky, Aqila dan Bryan, sebagai tempat bertukar pikiran yang telah memberikan arahan, dukungan, serta motivasi dan semangat.
8. Teman-teman Mahasiswa Teknik Sipil UNISSULA, khususnya Angkatan 2019 Kelas C, yang telah memberikan dukungan dan semangat.

Timur Paras Mukti

NIM : 30201900206

PERSEMBAHAN

Alhamdulillah, Puji Syukur kehadiran Allah SWT atas segala rahmat dan hidayah-Nya, sehingga penulis bisa menyelesaikan Laporan Tugas Akhir ini. Laporan Tugas Akhir ini penulis persembahkan untuk :

1. Kedua orang tua tercinta Bapak Supraja, S. Pd. dan Ibu In Qoma Ina, atas doa serta dukungannya selama ini yang selalu memberikan motivasi serta harapan kepada anaknya dengan kasih sayang, kesabaran tiada henti sampai sekarang.
2. Kedua Adik saya tercinta Nur Fadhila Sari dan Muhammad Jaka Bawana yang selalu memberikan semangat hingga tiada henti dan akan saya banggakan hingga kelak dapat membahagiakan kedua orang tuanya.
3. Dosen-dosen UNISSULA Fakultas Teknik Jurusan Teknik Sipil yang telah membagikan ilmu.
4. Bapak dosen pembimbing Dr. Ir. H. Sumirin, MS, Muhamad Rusli Ahyar, ST., M. Eng., dan Ir. H. Prabowo Setiyawan, MT., Ph. D, yang dengan sabar membimbing dalam pengerjaan tugas akhir kami.
5. Kekasih Saya Ityana Zena Mumtaza, SH., yang tidak pernah berhenti memberikan semangat dan doa untuk menemani menyelesaikan studi Tugas Akhir di Unissula
6. Timur Paras Mukti, Aziz Musyafaq, Moch Ali Camid, Muhammad Taufan Putra, Rendika Santoso, grub Para Pejuang Bangsa(t) dan rekan sebangkungan TA, dan saudara seiman.
7. Teman-teman teknik sipil C, se-Angkatan 2019 yang selalu mendukung dan memberi semangat.
8. Teman-teman Fakultas Teknik Jurusan Teknik Sipil dan seluruh Mahasiswa Teknik UNISSULA

Istifham Prainka

NIM : 30201900251

KATA PENGANTAR

Segala Puji dan syukur penulis panjatkan kehadiran Allah SWT yang telah melimpahkan segala rahmat-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir dengan judul **“Perancangan Ulang Struktur Gedung Rumah Sakit 4 Lantai Dengan Sistem Rangka Pemikul Momen Khusus”** guna memenuhi salah satu persyaratan untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik Program Studi Teknik Sipil pada Fakultas Teknik Universitas Islam Sultan Agung.

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

1. Bapak Ir. H. Rachmat Mudiyo, MT, Ph.D selaku Dekan Fakultas Teknik Universitas Islam Sultan Agung Semarang.
2. Bapak Muhammad Rusli Ahyar, ST.,M.Eng. selaku Ketua Program Studi Teknik Sipil UNISSULA dan Dosen Pembimbing Pendamping, yang telah memberikan kelancaran pelayanan dalam urusan Akademik dan yang selalu memberikan waktu bimbingan dan arahan selama penyusunan tugas akhir ini.
3. Bapak Dr. Ir. H. Sumirin, MS selaku Dosen Pembimbing Utama yang selalu memberikan waktu bimbingan dan arahan selama penyusunan tugas akhir ini.
4. 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 ini dapat bermanfaat tidak hanya bagi penulis juga bagi para pembaca.

Semarang, 8/Agustus/2023

Timur Paras Mukti (30201900206)

Istifham Prainka (30201900251)

DAFTAR ISI

TUGAS AKHIR.....	i
LEMBAR PENGESAHAN	ii
BERITA ACARA BIMBINGAN TUGAS AKHIR	iii
PERNYATAAN BEBAS PLAGIASI	iv
PERNYATAAN KEASLIAN.....	v
PERSEMBAHAN	vii
PERSEMBAHAN	viii
KATA PENGANTAR	ix
DAFTAR ISI.....	x
DAFTAR GAMBAR	xiii
DAFTAR TABEL	xv
DAFTAR NOTASI DAN SIMBOL	xvi
DAFTAR LAMPIRAN	xxiii
Abstrak	xxiv
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1. Latar Belakang.....	1
1.2. Rumusan Masalah.....	2
1.3. Tujuan	2
1.4. Batasan Masalah	2
1.5. Sistematika Laporan	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	4
2.1. Konsep Struktur	4
2.2. Sistem Struktur Penahan Gempa	4
2.2.1. Sistem Rangka Pemikul Momen Khusus (SRPMK).....	5
2.3. Beban yang Bekerja pada Struktur Bangunan Gedung	5
2.3.1. Beban Mati (<i>Dead Load</i>).....	5
2.3.2. Beban Hidup (<i>Live Load</i>)	6
2.3.3. Beban Gempa	8
2.3.4. Faktor Beban dan Kombinasi Beban.....	9
2.3.5. Faktor Reduksi Kekuatan (ϕ)	10
2.4. Perancangan Struktur Bangunan Gedung.....	11
2.5. Perancangan Struktur Tahan Gempa Berdasarkan SNI 1726:2019.....	11
2.5.1. Gempa Rencana.....	11
2.5.2. Kategori Risiko Bangunan dan Faktor Keutamaan Gempa	11
2.5.3. Klasifikasi Situs.....	13
2.5.4. Parameter Respons Spektral Percepatan Gempa Tertarget	14
2.5.5. Parameter Percepatan Spektral Desain.....	16
2.5.6. Spektrum Respons Desain	16
2.5.7. Kategori Desain Seismik	18
2.5.8. Kombinasi Sistem Pemikul Gaya Seismik pada Arah yang Berbeda ..	18
2.5.9. Periode Fundamental Pendekatan	19
2.5.10. Periode Fundamental Struktur.....	20
2.5.11. Gaya Geser Dasar Seismik	21
2.5.12. Simpangan Antar Tingkat	22
2.5.13. Pengaruh P-Delta.....	23
2.5.14. Analisis Spektrum Respons Ragam	24

2.5.15. Ketidakberaturan Struktur	24
2.5.15.1. Ketidakberaturan Horizontal	24
2.5.15.2. Ketidakberaturan Vertikal	27
2.6. Perancangan Elemen Struktur Beton Bertulang Berdasarkan SNI 2847:2019	29
2.6.1. Perancangan Pelat	29
2.6.2. Perancangan Balok Sistem Rangka Pemikul Momen Khusus (SRPMK)	30
2.6.3. Perancangan Kolom Sistem Rangka Pemikul Momen Khusus (SRPMK)	35
2.6.4. Pengecekan Syarat <i>Strong Column-Weak Beam</i>	38
2.6.5. Perancangan Hubungan Balok Kolom (<i>Joint</i>) pada SRPMK	38
BAB III METODE PERANCANGAN	40
3.1. Pengumpulan Data	40
3.2. Standar Perancangan	40
3.3. Tahapan Analisis dan Perancangan	40
3.3.1. Tahapan Analisis	40
3.3.1.1. Pemodelan Struktur	41
3.3.1.2. Pembebanan Struktur	49
3.3.1.3. Analisis Struktur	61
3.3.2. Tahapan Perancangan	61
3.3.2.1. Tahapan Perancangan Pelat	61
3.3.2.2. Tahapan Perancangan Balok	62
3.3.2.3. Tahapan Perancangan Kolom	62
3.3.2.4. Tahapan Pengecekan Syarat <i>Strong Column-Weak Beam</i>	62
3.3.2.5. Tahapan Perancangan Hubungan Balok-Kolom (<i>Joint</i>)	63
3.4. Diagram Alir	64
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	65
4.1. Data Struktur Gedung	65
4.1.1. Deskripsi Umum Struktur	65
4.1.2. Perencanaan Awal Dimensi Struktur (<i>Preliminary Design</i>)	71
4.1.2.1. <i>Preliminary</i> Elemen Pelat	71
4.1.2.2. <i>Preliminary</i> Elemen Balok	73
4.1.2.3. <i>Preliminary</i> Elemen Kolom	73
4.2. Pemodelan Elemen Struktur	74
4.2.1. Pemodelan Pelat	74
4.2.2. Pemodelan Balok	74
4.2.3. Pemodelan Kolom	75
4.3. Pemodelan Struktur	77
4.4. Pembebanan Struktur	82
4.4.1. Pembebanan Gravitasi	82
4.4.2. Pembebanan Gempa	83
4.4.3. Kombinasi Pembebanan Struktur	88
4.5. Pengecekan Perilaku Struktur Bangunan	90
4.5.1. Rasio Partisipasi Massa	90
4.5.2. Perhitungan Faktor Skala Gempa	90
4.5.2.1. Perhitungan Koefisien Respons Seismik (C_s)	90
4.5.2.2. Perhitungan Faktor Skala Gaya	92

4.5.3. Pengecekan Gaya Geser	95
4.5.4. Pengecekan Simpangan Antar Tingkat (<i>Story Drift</i>).....	96
4.5.5. Pengecekan P-Delta.....	98
4.5.6. Pengecekan Eksentrisitas dan Torsi	101
4.5.6.1. Pengecekan Eksentrisitas	101
4.5.6.2. Perhitungan Ketidakberaturan Torsi	103
4.5.7. Pengecekan Ketidakberaturan Horizontal dan Vertikal	104
4.5.8. Pengecekan Kontribusi <i>Frame</i> Memikul Minimal 25% Gaya Lateral	109
4.6. Perancangan Elemen Struktur Beton Bertulang	110
4.6.1. Perancangan Pelat.....	110
4.6.1.1. Properti Material dan Penampang.....	110
4.6.1.2. Gaya Dalam.....	111
4.6.1.3. Penulangan Lentur Pelat (analisis untuk per m')	111
4.6.1.4. Pengecekan Kapasitas Geser	124
4.6.1.5. Pengecekan Lendutan Pelat.....	125
4.6.1.6. Rekapitulasi Hasil Tulangan Pelat	130
4.6.2. Perancangan Balok	131
4.6.2.1. Properti Material dan Penampang	131
4.6.2.2. Perhitungan Tulangan Longitudinal Balok	132
4.6.2.3. Perhitungan Tulangan Transversal Balok	147
4.6.2.4. Perhitungan Tulangan Torsi Balok	154
4.6.2.5. Rekapitulasi Hasil Tulangan Balok.....	165
4.6.3. Perancangan Kolom	165
4.6.3.1. Properti Material dan Penampang	166
4.6.3.2. Perhitungan Tulangan Longitudinal Kolom	167
4.6.3.3. Perhitungan Tulangan Transversal Kolom	169
4.6.3.4. Rekapitulasi Hasil Tulangan Kolom	175
4.6.4. Pengecekan Syarat <i>Strong Column-Weak Beam</i>	175
4.6.5. Perancangan Hubungan Balok-Kolom (<i>Joint</i>)	176
4.6.5.1. Syarat Panjang <i>Joint</i>	176
4.6.5.2. Tulangan Geser untuk <i>Confinement</i>	176
4.6.5.3. Gaya Geser pada <i>Joint</i>	176
4.6.5.4. Gaya Geser pada Kolom	177
4.6.5.5. Gaya Geser pada Tulangan Longitudinal Balok	177
4.6.5.6. Kuat Geser pada <i>Joint</i>	177
4.6.5.7. Kuat Geser yang dikekang Keempat Sisi.....	178
4.7. Rekapitulasi Hasil Analisis dan Perancangan.....	179
BAB V PENUTUP.....	183
5.1. Kesimpulan	183
5.2. Saran	185
DAFTAR PUSTAKA	186
LAMPIRAN.....	187

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1. Parameter Gerak Tanah (S_s) Gempa Maksimum yang Dipertimbangkan Risiko-Tertarget (MCE_R).....	14
Gambar 2. 2. Parameter Gerak Tanah (S_1) Gempa Maksimum yang Dipertimbangkan Risiko-Tertarget (MCE_R).....	15
Gambar 2. 3. Spektrum Respons Desain	17
Gambar 2. 4. Peta Transisi Periode Panjang (T_L).....	17
Gambar 2. 5. Penentuan Simpangan Antar Tingkat	22
Gambar 2. 6. Bentuk Ketidakberaturan Horizontal.....	26
Gambar 2. 7. Bentuk Ketidakberaturan Vertikal.....	28
Gambar 2. 8. Lebar Efektif Maksimum Balok Lebar (<i>Wide Beam</i>).....	31
Gambar 2. 9. Persyaratan Tulangan Lentur SRPMK	32
Gambar 2. 10. Persyaratan Sambungan Lewatan SRPMK	33
Gambar 2. 11. Contoh Senggang Tertutup (<i>Hoop</i>) yang Dipasang Bertumpuk dan Ilustrasi Batasan Maksimum Spasi Horizontal Penumpu Batang Longitudinal	34
Gambar 2. 12. Geser Desain untuk Balok dan Kolom	35
Gambar 2. 13. Contoh Penulangan Transversal pada Kolom.....	36
Gambar 2. 14. Luas <i>Joint</i> Efektif	38
Gambar 3. 1. Tampilan Awal ETABS.....	41
Gambar 3. 2. <i>Model Initialization</i>	41
Gambar 3. 3. <i>Model Grid</i>	42
Gambar 3. 4. <i>Edit Grid</i>	42
Gambar 3. 5. Tampilan <i>Grid</i> dan <i>Story</i>	43
Gambar 3. 6. <i>Input Material Properties</i>	43
Gambar 3. 7. <i>Section Shape Concrete</i>	44
Gambar 3. 8. <i>Input Dimensi Kolom/Balok</i>	44
Gambar 3. 9. <i>Reinforcement Data Column</i>	45
Gambar 3. 10. <i>Reinforcement Data Beam</i>	45
Gambar 3. 11. <i>Input Dimensi Pelat</i>	46
Gambar 3. 12. <i>Plan View Lantai 1</i> Pemodelan Awal	46
Gambar 3. 13. <i>Plan View Lantai 2 – 8</i> Pemodelan Awal	47
Gambar 3. 14. <i>Plan View Atap</i> Pemodelan Awal.....	48
Gambar 3. 15. <i>3D View</i> Pemodelan Awal	48
Gambar 3. 16. <i>Define Load Patterns</i>	49
Gambar 3. 17. <i>Load Case Data</i>	50
Gambar 3. 18. <i>Input Beban Mati Tambahan</i>	51
Gambar 3. 19. <i>Input Beban Hidup</i>	51
Gambar 3. 20. <i>Input Gaya Lateral EX</i>	52
Gambar 3. 22. Spektrum Respons Desain Kota Banyumas	55
Gambar 3. 24. <i>Input Gaya Lateral EY</i>	56
Gambar 3. 25. <i>ASCE 7 – 16 Seismic Loading Y-Direction (Time Period</i> <i>Respon Spektrum dengan ASCE 7-16</i>	58
Gambar 3. 27. <i>Load Case Data SPEC-X</i>	59
Gambar 3. 28. <i>Load Case Data SPEC-Y</i>	60
Gambar 4. 1. Denah Lantai Gedung Rumah Sakit di Purwokerto Banyumas.....	66

Gambar 4. 2. Denah Lantai 1-4 Pemodelan Awal.....	66
Gambar 4. 3. Denah Lantai 1-4	77
Gambar 4. 4. Model 3D	79
Gambar 4. 5. Diagram <i>Story Drift</i> Arah X	80
Gambar 4. 6. Diagram <i>Story Drift</i> Arah Y	81
Gambar 4. 15. Spektrum Respons Desain Lokasi Perancangan.....	88
Gambar 4. 16. Diagram Gaya Geser Gempa Arah X.....	95
Gambar 4. 17. Diagram Gaya Geser Gempa Arah Y.....	95
Gambar 4. 18. Diagram <i>Story Drift</i> Arah X.....	97
Gambar 4. 19. Diagram <i>Story Drift</i> Arah Y.....	98
Gambar 4. 20. Diagram P-Delta Arah X.....	99
Gambar 4. 21. Diagram P-Delta Arah Y.....	100
Gambar 4. 22. Tipe Pelat.....	134
Gambar 4. 23. Penulangan Pelat.....	130
Gambar 4. 24. Denah Balok G1 Sampel.....	131
Gambar 4. 25. Momen Ultimit Tumpuan Balok G1.....	133
Gambar 4. 26. Momen Ultimit Lapangan Balok G1.....	133
Gambar 4. 27. Gaya Geser Ultimit Tumpuan Balok G1.....	147
Gambar 4. 28. Gaya Geser Ultimit Lapangan Balok G1.....	148
Gambar 4. 29. Gaya Torsi Balok G1.....	155
Gambar 4. 30. Potongan Memanjang Balok.....	163
Gambar 4. 31. Tulangan Tumpuan Balok.....	164
Gambar 4. 32. Tulangan Lapangan Balok.....	170
Gambar 4. 33. Denah Kolom K1 Sampel.....	166
Gambar 4. 34. Tulangan Longitudinal Kolom K1.....	168
Gambar 4. 35. Diagram Interaksi P_n-M_{pr} SPColumn Kolom K1.....	168
Gambar 4. 36. Diagram Interaksi P_n-M SPColumn Kolom K1 dengan $1,25 f_y$	171
Gambar 4. 37. Potongan Memanjang Kolom K1.....	174
Gambar 4. 38. Tulangan Ujung Kolom K1.....	174
Gambar 4. 39. Tulangan Tengah Kolom K1.....	174
Gambar 4. 40. Hubungan Balok Kolom (<i>Joint</i>).....	178

DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1. Berat Sendiri Bahan Bangunan dan Komponen Gedung	6
Tabel 2. 2. Beban Hidup Terdistribusi Merata Minimum (L_o) dan Beban Hidup Terpusat Minimum	6
Tabel 2. 3. Kombinasi Beban	9
Tabel 2. 4. Faktor Reduksi Kekuatan (ϕ)	10
Tabel 2. 5. Kategori Risiko Bangunan	12
Tabel 2. 6. Faktor Keutamaan Gempa	12
Tabel 2. 7. Klasifikasi Situs	13
Tabel 2. 8. Koefisien Situs (F_a)	15
Tabel 2. 9. Koefisien Situs (F_v)	15
Tabel 2. 10. Kategori Desain Seismik Berdasarkan Parameter Respons Percepatan pada Periode Pendek (S_{Ds})	18
Tabel 2. 11. Kategori Desain Seismik Berdasarkan Parameter Respons Percepatan pada Periode 1 Detik (S_1)	18
Tabel 2. 12. Faktor R , C_d , dan Ω_0 untuk Sistem Pemikul Gaya Seismik	19
Tabel 2. 13. Nilai Parameter Periode Pendekatan C_t dan x	20
Tabel 2. 14. Koefisien untuk Batas Atas pada Periode yang Dihitung (C_u)	20
Tabel 2. 15. Simpangan Antar Tingkat Izin	23
Tabel 2. 16. Persyaratan Ketidakberaturan Horizontal pada Struktur	25
Tabel 2. 17. Persyaratan Ketidakberaturan Vertikal pada Struktur	27
Tabel 2. 18. Ketebalan Minimum Pelat 1 Arah	29
Tabel 2. 19. Ketebalan Minimum Pelat 2 Arah	30
Tabel 2. 20. A_{smin} untuk Pelat	30
Tabel 2. 21. Tinggi Balok Minimum (h)	31
Tabel 2. 22. Tulangan Transversal untuk Kolom-Kolom Sistem Rangka Pemikul Momen Khusus (SRPMK)	37
Tabel 3. 1. Parameter Perioda Pendekatan C_t dan x	54
Tabel 4. 1. Data Model Struktur Gedung	65
Tabel 4. 2. Tinggi Antar Lantai Bangunan	70
Tabel 4. 3. Mutu Baja Tulangan	70
Tabel 4. 4. Mutu Beton Balok dan Pelat	70
Tabel 4. 6. Tebal Minimum Pelat 1 Arah	71
Tabel 4. 7. Tebal Minimum Pelat 2 Arah	72

DAFTAR NOTASI DAN SIMBOL

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_t	= 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 <i>joint</i> 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	= Perioda fundamental pendekatan
T_{cr}	= Momen retak torsi (N-mm)
T_L	= Peta transisi perioda 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
δ_{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 1 : Berita Acara Seminar Proposal Tugas Akhir
Lampiran 2 : Berita Acara Seminar Hasil Tugas Akhir
Lampiran 3 : Lembar Koreksi Tugas Akhir
Lampiran 4 : Daftar Hadir Dosen Penguji Seminar Hasil Tugas Akhir
Lampiran 5 : Daftar Hadir Seminar Hasil Tugas Akhir
Lampiran 6 : Lembar Bimbingan Tugas Akhir
Lampiran 7 : Turnitin
Lampiran 8 : Gambar Kerja



PERANCANGAN ULANG DESAIN STRUKTUR GEDUNG RUMAH SAKIT 4 LANTAI DENGAN SISTEM RANGKA PEMIKUL MOMEN KHUSUS

Abstrak

Seiring dengan meningkatnya kerusakan struktur bangunan bertingkat akibat terjadinya gempa bumi yang melanda Indonesia pada beberapa tahun terakhir, maka diperlukan adanya perancangan struktur bangunan tahan gempa yang lebih baik berdasarkan peraturan gempa terbaru yaitu SNI 1726-2019.

Pada tugas akhir ini dilakukan perancangan ulang struktur gedung tahan gempa yaitu struktur gedung Rumah Sakit 4 lantai di Purwokerto, banyumas dengan menggunakan program aplikasi ETABS.

Berdasarkan hasil analisis dan perancangan yang dilakukan, diperoleh sistem struktur yang digunakan yaitu SRPMK (Sistem Rangka Pemikul Momen Khusus). Efektivitas struktur *frame* mampu memikul melebihi minimal 25% gaya lateral yaitu 49,43%. Kontrol simpangan antar tingkat telah memenuhi syarat dimana simpangan terbesar 29,22 mm kurang dari batas izinnnya sebesar 31,38 mm. Terdapat 10 tipe balok dengan dimensi balok terbesar yaitu 400 x 850 mm dan 4 tipe kolom dengan dimensi kolom terbesar 700 x 700 mm pada Sistem Rangka Pemikul Momen Khusus. Pada pengecekan *strong column-weak beam* diperoleh kuat lentur kolom lebih besar dari kuat lentur balok dengan rasio 6,24 lebih dari rasio minimumnya yaitu 1,2.

Kata Kunci : Perancangan Ulang; Struktur Atas; Gempa

STRUCTURAL REDESIGN OF 4-STOREY HOSPITAL BUILDING WITH SPECIAL MOMENT BEARING FRAME SYSTEM

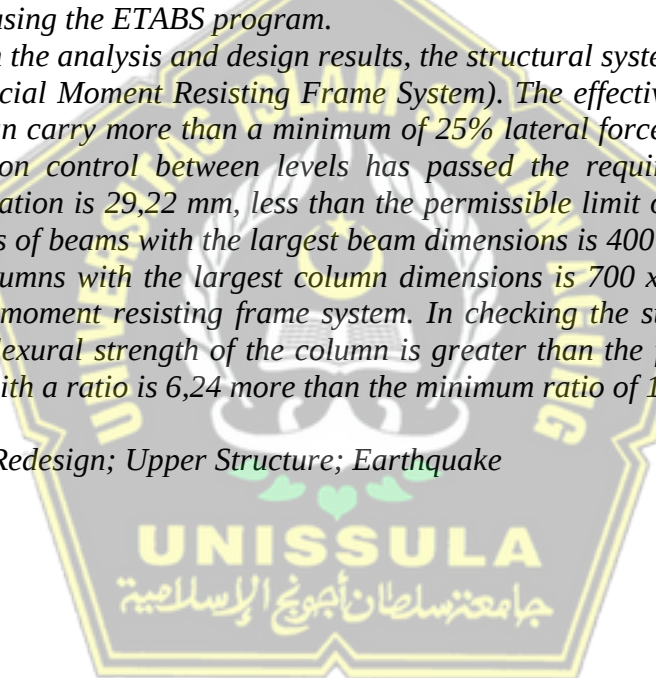
Abstract

Along with the increasing damage to high-rise buildings caused by the earthquake that has struck Indonesia in recent years, it is necessary to design a better earthquake-resistant building structure based on the most recent earthquake regulations, which is SNI 1726-2019.

In this final project, a redesign of the earthquake-resistant building structure is executed, namely the structure of a 4-storey Hospital building in Purwokerto, Banyumas using the ETABS program.

Based on the analysis and design results, the structural system used is a special system (Special Moment Resisting Frame System). The effectiveness of the frame structure can carry more than a minimum of 25% lateral force, which is 49,43%. The deviation control between levels has passed the requirements where the largest deviation is 29,22 mm, less than the permissible limit of 31,38 mm. There are six types of beams with the largest beam dimensions is 400 x 850 mm and four types of columns with the largest column dimensions is 700 x 700 mm based on the special moment resisting frame system. In checking the strong column-weak beam, the flexural strength of the column is greater than the flexural strength of the beam, with a ratio is 6,24 more than the minimum ratio of 1,2.

Keyword : Redesign; Upper Structure; Earthquake



BAB I

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Indonesia merupakan salah satu daerah rawan gempa bumi. Hal ini dikarenakan Indonesia memiliki kondisi area dengan tektonik yang sangat aktif, yang bisa memberikan dampak bencana alam yang cukup sering dan tidak terprediksi yang mengakibatkan kerusakan bangunan fasilitas umum. Kerusakan bangunan fasilitas umum yang terjadi seiring berjalannya waktu terus meningkat.

Gedung fasilitas umum seperti Rumah sakit sebagai tempat pelayanan kesehatan untuk publik memiliki berbagai macam fungsi dengan tujuan yang berbeda – beda, dan disesuaikan dengan bentuk arsitekturalnya, hal tersebut mengakibatkan konfigurasi Gedung Rumah Sakit menjadi tidak beraturan.

Konfigurasi bangunan tidak beraturan memiliki pengaruh yang kurang baik pada saat terjadi gempa bumi. Struktur Gedung Dengan Konfigurasi Bangunan Tidak Beraturan Berbentuk “L” dapat mengakibatkan kerusakan pada sudut atau pertemuan blok bangunan, pada saat terjadi gempa. Pembangunan gedung dengan konfigurasi tidak beraturan terkadang tidak dapat terhindarkan, Namun, perencanaan struktur dengan mengikuti peraturan gempa terbaru, SNI 1726-2019, tentang "Tata Cara Ketahanan Gempa untuk Struktur Gedung dan Non-Gedung", dapat membantu mengatasi masalah ini, sehingga dapat menghasilkan bangunan yang kuat dan aman dan berfungsi sebagaimana mestinya.

Obyek yang digunakan dalam laporan Tugas Akhir ini adalah Perancangan Gedung Rumah Sakit dr.Margono yang berlokasi di Purwokerto, Banyumas, yang memiliki Struktur Gedung dengan Konfigurasi Bangunan Tidak Beraturan Berbentuk “L”, dengan Faktor keutamaan gempa 1,5, yang termasuk dalam Klasifikasi Situs SD (tanah sedang). Dengan menggunakan Sistem Rangka Pemikul Momen Khusus (SRPMK).

1.2. Rumusan Masalah

Rumusan masalah pada Tugas Akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana menganalisis sistem dan dimensi struktur Gedung Rumah Sakit 4 Lantai di Purwokerto, Banyumas sesuai standar SNI 1726:2019?
2. Bagaimana menganalisis struktur untuk mendapatkan respon struktur (parameter desain, ragam getar, periode getar, simpangan antar tingkat) yang merujuk pada SNI 1726:2019?
3. Bagaimana merancang dimensi dan tulangan beton pada kolom, balok dan pelat, yang memenuhi standar Sistem Rangka Pemikul Momen Khusus (SRPMK) sesuai standar SNI 2847:2019?

1.3. Tujuan

Tujuan dari penulisan Tugas Akhir ini meliputi :

1. Menganalisis sistem dan dimensi struktur Gedung Rumah Sakit 4 Lantai di Purwokerto, Banyumas sesuai standar SNI 1726:2019.
2. Menganalisis struktur untuk mendapatkan respon struktur (parameter desain, ragam getar, periode getar, simpangan antar tingkat) yang merujuk pada SNI 1726:2019.
3. Merancang dimensi dan tulangan beton pada kolom, balok dan pelat, yang memenuhi standar Sistem Rangka Pemikul Momen Khusus (SRPMK) sesuai standar SNI 2847:2019.

1.4. Batasan Masalah

Batasan masalah dalam Tugas Akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Standar perancangan yang digunakan, antara lain :
 - SNI 1726:2019 : “Tata Cara Ketahanan Gempa untuk Struktur Gedung dan Non-Gedung”
 - SNI 2847:2019 : “Persyaratan Beton Struktural untuk Bangunan Gedung”
 - SNI 1727:2020 : “Beban Desain Minimum dan Kriteria Terkait untuk Bangunan Gedung dan Struktur Lain”
2. Pembebanan gempa menggunakan perhitungan respon spektrum.
3. Perancangan hanya membahas struktur atas.

1.5. Sistematika Laporan

Dalam penyusunan Tugas Akhir ini, sistematika laporan terdiri dari 5 bab, yaitu:

BAB I PENDAHULUAN

Berisikan Latar Belakang, Rumusan Masalah, Tujuan, Batasan Masalah dan Sistematika Laporan.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

Berisikan bahasan efek torsi bangunan terhadap respon struktur pada Sistem Rangk Pemikul Momen Khusus dan Sistem Ganda mengenai literatur yang berisikan teori dari berbagai sumber.

BAB III METODE PERANCANGAN

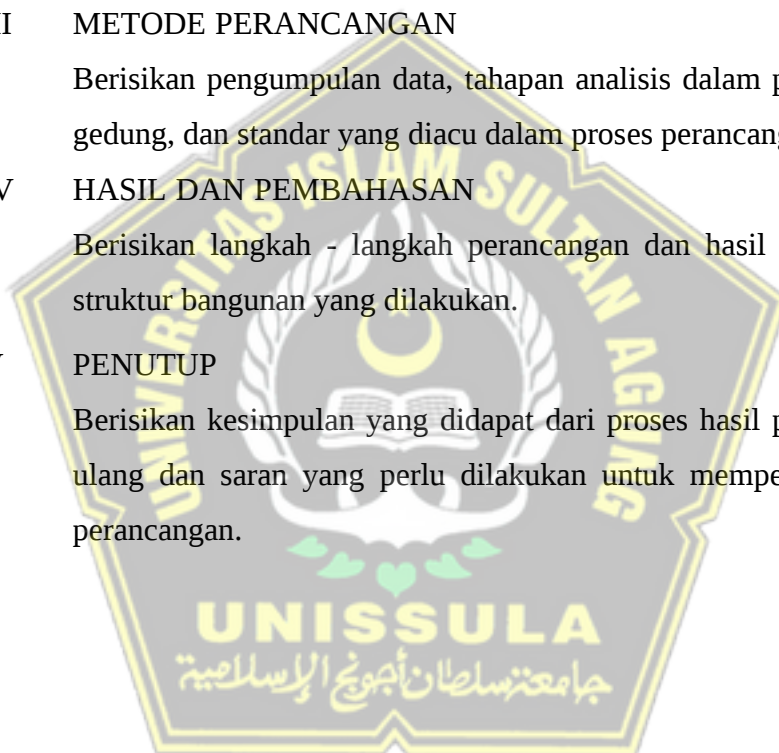
Berisikan pengumpulan data, tahapan analisis dalam perancangan gedung, dan standar yang diacu dalam proses perancangan.

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

Berisikan langkah - langkah perancangan dan hasil perhitungan struktur bangunan yang dilakukan.

BAB V PENUTUP

Berisikan kesimpulan yang didapat dari proses hasil perancangan ulang dan saran yang perlu dilakukan untuk memperbaiki hasil perancangan.



BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Konsep Struktur

Struktur bangunan adalah susunan komponen yang membentuk sebuah bangunan. fungsi utama dari struktur bangunan adalah untuk mendukung keberadaan elemen-elemen konstruksi lainnya, seperti tampak, interior dan arsitektur bangunan, hingga membentuk suatu kesatuan. Struktur bangunan terdiri dari dua jenis, yaitu struktur bawah (*sub structure*) dan struktur atas (*upper structure*). Dalam perencanaan struktur bangunan, diperlukan ketelitian dan kejelian karena ada beberapa ketentuan yang harus diikuti, seperti standar tata cara menghitung struktur beton dan peraturan pembebanan Indonesia untuk Gedung supaya benar-benar terjamin keamanannya, sehingga keseimbangan struktur secara keseluruhan dapat terjamin dengan baik.

2.2. Sistem Struktur Penahan Gempa

Sistem struktur merupakan gabungan dari berbagai elemen struktur tiga dimensi menjadi satu kesatuan. Fungsi dari sistem ini adalah untuk menentukan secara aman dan efisien mengambil gaya atau beban yang bekerja pada bangunan dan mendistribusikannya ke tanah melalui pondasi.

Ada beberapa macam sistemstruktur yang bisa dipakai untuk menganalisis Bangunan Gedung tahan gempa. Macam-macam sistem struktur yang terdapat pada SNI 1726:2019 diantaranya yaitu sistem dinding penumpu, Sistem Rangka gedung, Sistem Rangka pemikul momen, Sistem Ganda dengan Rangka Pemikul Momen Khusus, Sistem Rangka ruang dan sistem kolom kantilever. Di antara sistem tersebut, Sistem Ganda dengan rangka pemikul momen khusus yang dianalisis agar diperoleh kapasitas struktur maksimal dengan menambahkan Dinding Geser sebagai struktur tahan gempa.

2.2.1. Sistem Rangka Pemikul Momen Khusus (SRPMK)

Sistem Rangka Pemikul Momen Khusus merupakan bagian dari sistem seismik dan terutama dirancagluntuk menahan tekuk dan geser. Sistem Rangka Pemikul Momen Khusus adalah portal atau rangka yang terdiri dari balok horizontal dan kolom vertikal, yang dihubungkan oleh sambungan balok yang kaku dan secara bersamaan mendukung beban yang terjadi di dalam gedung melalui mekanisme lentur.

Sistem Rangka Pemikul Momen Khusus sangat mudah ditempa (*fully malleable*), sehingga menghindari kemungkinan runtuhnya struktur bangunan secara tiba-tiba akibat gempa bumi. Sistem ini digunakan di daerah dengan kategori risiko seismik yang lebih tinggi.

2.3. Beban yang Bekerja pada Struktur Bangunan Gedung

Beban menurut SNI 1727:2020 merupakan gaya atau aksi lainnya akibat berat seluruh bahan 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, sedangkan beban gempa (*earthquake*), beban angin (*wind load*), tekanan tanah dan air tanah merupakan bagian dari beban horizontal.

2.3.1. Beban Mati (*Dead Load*)

Beban mati yaitu berat dari seluruh bagian konstruksi Bangunan Gedung yang terpasang, mencakup dinding, lantai, atap, plafon, tangga, dinding partisi tetap, *finishing*, komponen arsitektural dan struktura lainnya yang tetap dan tidak terpisahkan dari bangunan itu. Berat sendiri dari beberapa material konstruksi dan komponen Bangunan Gedung dapat dilihat pada Tabel 2.1.

Tabel 2. 1. Berat Sendiri Bahan Bangunan dan Komponen Gedung

No.	Jenis Beban Mati	Beban (kN/m ²)
1.	Beban Pasir+Spesi setebal 4 cm	0,88
2.	Beban Keramik setebal 1 cm	0,22
3.	Beban Plafond	0,2
4.	Beban Mekanikal & Elektrikal	0,25

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

2.3.2. Beban Hidup (Live Load)

Beban hidup yaitu beban yang bersifat berpindah-pindah dan tidak tetap yang diakibatkan oleh pengguna dan penghuni Bangunan Gedung atau struktur lain yang tidak termasuk beban konstruksi dan beban lingkungan, seperti beban angin, beban hujan, beban gempa, beban banjir, atau beban mati. Beban hidup yang digunakan dalam perancangan Bangunan Gedung dan struktur bangunan rumah sakit harus merupakan beban maksimum yang diharapkan terjadi akibat penggunaan Bangunan Gedung, akan tetapi tidak boleh kurang dari beban merata minimum yang dapat dilihat dalam 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)
Rumah sakit		
Ruang operasi, laboratorium	60 (2,87)	1.000 (4,45)
Ruang pasien	40 (1,92)	1.000 (4,45)
Koridor di atas lantai pertama	80 (3,83)	1.000 (4,45)
Gudang perkantoran		
Ruang arsip dan komputer harus dirancang untuk beban yang lebih berat berdasarkan perkiraan hunian		
Lobi dan koridor lantai pertama	100 (4,79)	2.000 (8,90)
Kantor	50 (2,40)	2.000 (8,90)
Koridor di atas lantai pertama	80 (3,83)	2.000 (8,90)

(sumber : Tabel 4.3 SNI1727:2020)

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)
Tangga permanen		Lihat Pasal 4.5.4
Garasi/Parkir (Lihat Pasal 4.10)		
Mobil penumpang saja	40 (1,92)	Lihat Pasal 4.10.2
Truk dan bus	Lihat Pasal 4.10.2	Lihat Pasal 4.10.2
Pegangan tangga dan pagar pengaman	Lihat 4.5.1	Lihat 4.5.1
Batang pegangan		Lihat 4.5.2
Rumah sakit		
Ruang operasi, laboratorium	60 (2,87)	1.000 (4,45)
Ruang pasien	40 (1,92)	1.000 (4,45)
Koridor di atas lantai pertama	80 (3,83)	1.000 (4,45)
Gudang perkantoran		
Ruang arsip dan komputer harus dirancang untuk beban yang lebih berat berdasarkan perkiraan hunian		
Lobi dan koridor lantai pertama	100 (4,79)	2.000 (8,90)
Kantor	50 (2,40)	2.000 (8,90)
Koridor di atas lantai pertama	80 (3,83)	2.000 (8,90)

(sumber : Tabel 4.3 SNI 1727:2020)

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 ruang kecuali tangga	40 (1,92)	
Semua hunian rumah tangga lainnya		
Ruang pribadi dan koridornya	40 (1,92)	
Ruang publik	100 (4,79)	
Koridor ruang publik	100 (4,79)	
Atap		
Atap datar, berbubung dan lengkung	20 (0,96)	
Atap yang digunakan penghuni	Sama dengan penggunaan yang dilayani	
Atap untuk tempat berkumpul	100 (4,70)	
Atap vegetatif dan atap lansekap		
Atap bukan untuk hunian	20 (0,96)	
Atap untuk tempat berkumpul	100 (4,79)	
Atap untuk penggunaan lainnya	Sama dengan penggunaan yang dilayani	

(sumber : Tabel 4.3 SNI1727:2020)

2.3.3. Beban Gempa

Beban gempa yaitu beban statik ekuivalen pada sebuah bangunan yang terjadi akibat pengaruh gerakan tanah di bawah struktur bangunan atau bukan bangunan berdasarkan suatu analisa dinamik. Besarnya beban gempa rencana yang diperhitungkan bekerja pada struktur adalah gempa rencana sedang sesuai yang tercantum dalam standar SNI 1726:2019. Maka dari itu, jika terjadi gempa kuat, maka gaya-gaya dalam yang terjadi pada elemen-elemen struktur dapat melampaui gaya-gaya dalam yang sudah diperhitungkan. Gempa rencana ditetapkan sebagai gempa dengan kemungkinan terlewat sebesar 2 %.

2.3.4. Faktor Beban dan Kombinasi Beban

Beban terfaktor adalah beban yang ditetapkan oleh standar pembebanan yang berlaku, kemudian dikalikan dengan faktor-faktor beban yang sesuai. Faktor yang dikenakan pada masing-masing beban dipengaruhi oleh tingkat ketelitian sejauh mana pengaruh beban biasanya dapat dihitung dan variasi yang mungkin terjadi pada beban selama umur layan struktur.

Faktor-faktor beban memperhitungkan variabilitas dalam analisis struktur yang digunakan untuk menghitung momen-momen dan gaya-gaya geser. Dalam memberikan faktor-faktor pada kombinasi beban, beberapa pertimbangan harus diberikan terhadap kemungkinan terjadinya beban yang bersamaan.

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

(sumber : Tabel 5.3.1 SNI 2847:2019)

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 dan 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	-

(sumber : Tabel 21.2.1 SNI 2847:2019)

2.4. Perancangan Struktur Bangunan Gedung

Perancangan struktur bangunan gedung mengacu pada standar 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. Selain itu, faktor penting lain dalam perancangan bangunan gedung adalah analisa struktur karena akan dihasilkan gaya-gaya seperti momen lentur, gaya geser dan gaya aksial dari analisa struktur yang akan menjadi patokan dalam mendesain elemen-elemen struktur sehingga diharapkan mampu menahan semua beban yang ada termasuk beban akibat gempa.

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 Resiko Bangunan dan Faktor Keutamaan Gempa

Kategori resiko merupakan pengelompokan bangunan-bangunan gedung atau struktur-struktur lainnya untuk menentukan besaran beban-beban gempa berdasarkan resiko 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 gedung dan non gedung dapat dilihat pada Tabel 2.5 dan Faktor Keutamaan Gempa dapat dilihat pada Tabel 2.6.

Tabel 2. 6. Kategori Risiko Bangunan

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

(sumber : Tabel 3 SNI 1726:2019)

Tabel 2. 7. Faktor Keutamaan Gempa

Kategori risiko	Faktor Keutamaan Gempa, I_e
I atau II	1,0
III	1,25
IV	1,5

(sumber : Tabel 4 SNI 1726:2019)

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 2.8.

Tabel 2. 8. Klasifikasi Situs

Kelas Situs	V_s (m/detik)	N atau N_{ch}	S_u (kPa)
SA (batuan keras)	>1500	N/A	N/A
SB (batuan)	750 sampai 1500	N/A	N/A
SC (tanah keras, sangat padat dan batuan lunak)	350 sampai 750	>50	≥ 100
SD (tanah sedang)	175 sampai 350	15 sampai 50	50 sampai 100
	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 niralinir, $S_u < 25$ kPa		
SF (tanah khusus, yang membutuhkan investigasi geoteknik spesifik dan analisis respon spesifik-situs)	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)		

(sumber : Tabel 5 SNI 1726:2019)

Keterangan :

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

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

$\bar{S}_u$ = Kuat geser niralinir 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.

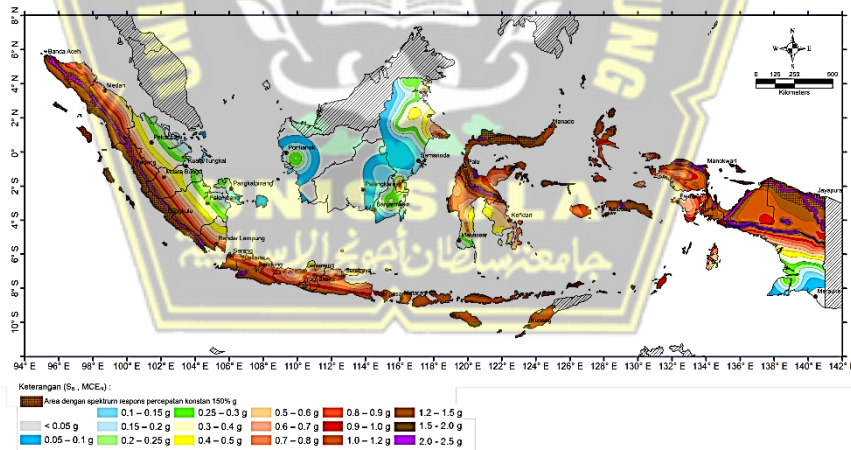
$$S_{MS} = F_a \cdot S_s \dots\dots\dots (2.1)$$

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

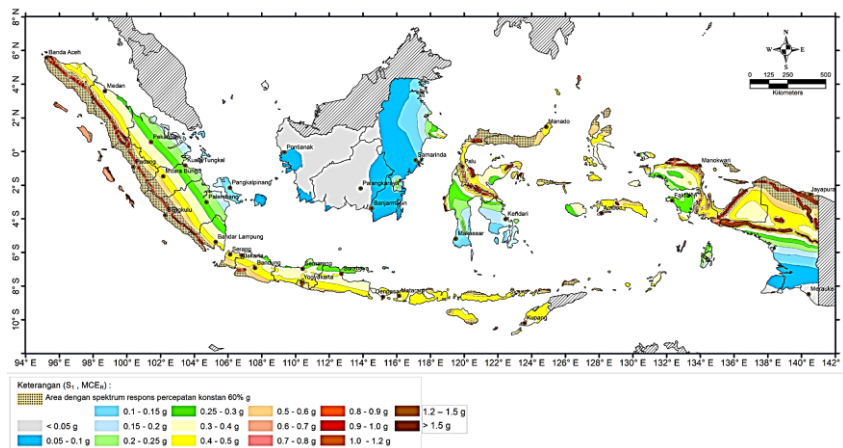
Keterangan :

S_s = Parameter Respons Spektral Percepatan Gempa (MCE_R) terpetakan untuk periode pendek (dapat dilihat pada Gambar 2.1)

S_1 = Parameter Respons Spektral Percepatan Gempa (MCE_R) terpetakan untuk Periode 1,0 detik (dapat dilihat pada Gambar 2.2)



Gambar 2. 1. Parameter Gerak Tanah (S_s) Gempa Maksimum yang Dipertimbangkan Risiko-Tertarget (MCE_R)



Gambar 2. 2. Parameter Gerak Tanah (S_1) Gempa Maksimum yang Dipertimbangkan Risiko-Tertarget (MCE_R)

Tabel 2. 9. 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	$S_s^{(a)}$					

(sumber : Tabel 6 SNI 1726:2019)

Tabel 2. 10. 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

(sumber : Tabel 7 SNI 1726:2019)

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 Respons Percepatan Desain (S_a) dapat dicari berdasarkan ketentuan pada Persamaan 2.5 sampai Persamaan 2.8.

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

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

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

U

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

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

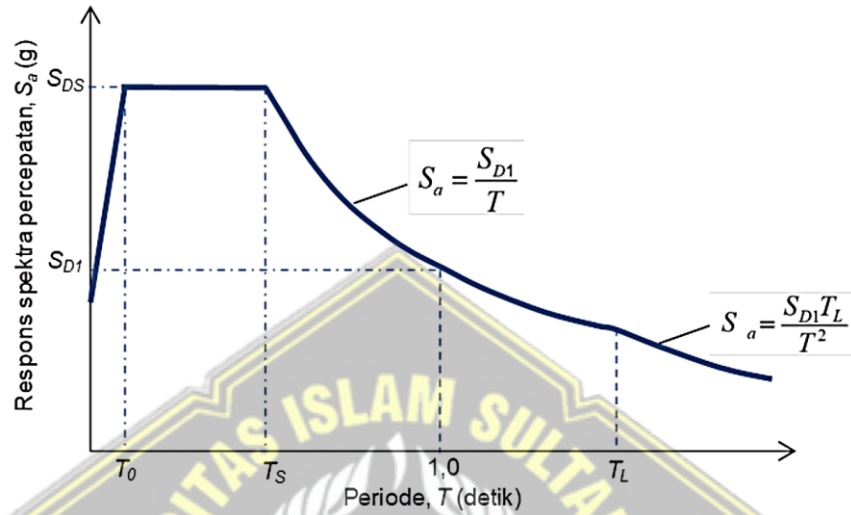
$$T_s = \frac{S_{D1}}{S_{DS}}$$

T_L = Peta Transisi Periode Panjang yang ditunjukkan pada Gambar 2.3 yang

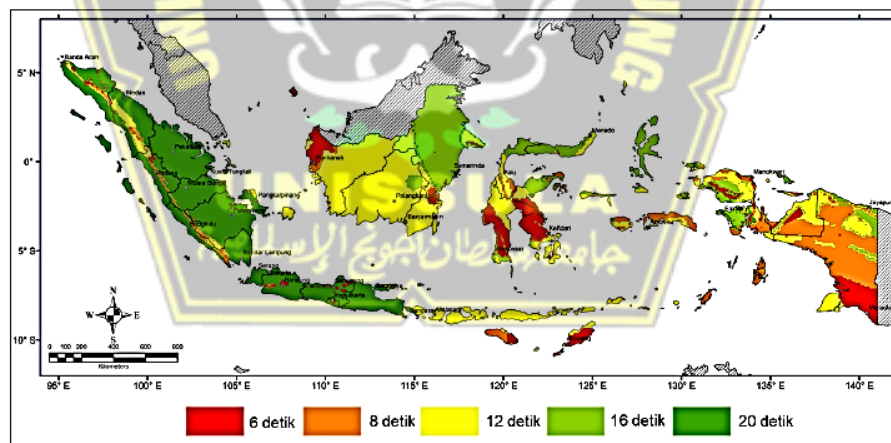
nilainya diambil dari Gambar 2.4

S_{DS} = Parameter Respons Spektral Percepatan Desain Pada Periode Pendek

S_{D1} = Parameter Respons Spektral Percepatan Desain Pada 1 Detik



Gambar 2. 3. Spektrum Respons Desain



Gambar 2. 4. 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. 11. 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

(sumber : Tabel 8 SNI 1726:2019)

Tabel 2. 12. Kategori Desain Seismik Berdasarkan Parameter Respons Percepatan pada Periode 1 Detik (S_{D1})

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

(sumber : Tabel 9 SNI 1726:2019)

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 (Ω_0) dan Faktor Pembesaran Defleksi (C_d) harus diterapkan pada setiap sistem bila menggunakan sistem tersebut. Ketentuan mengenai nilai R , Ω_0 dan C_d dapat dilihat pada Tabel 2.12.

Tabel 2. 13. Faktor R , Ω_0 dan C_d 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

(sumber : Tabel 12 SNI 1726:2019)

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

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

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. 14. Nilai Parameter Periode Pendekatan C_t dan α

Tipe Struktur	C_t	α
Sistem Rangka Pemikul Momen dimana rangka memikul 100 % gaya seismik yang disyaratkan dan tidak dilingkupi atau dihubungkan dengan komponen yang lebih kaku dan akan mencegah rangka dari defleksi jika dikenai Gaya Seismik:		
• Rangka Baja Pemikul Momen	0,0724	0,8
• Rangka Beton Pemikul Momen	0,0466	0,9
Rangka Baja dengan Bresing Eksentris	0,0731	0,75
Rangka Baja dengan Bresing Terkekang Terhadap Tekuk	0,0731	0,75
Semua Sistem Struktur lainnya	0,0488	0,75

(sumber : Tabel 18 SNI 1726:2019)

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. 15. 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

(sumber : Tabel 17 SNI 1726:2019)

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.

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

Keterangan:

C_s = Koefisien Respons 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.

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

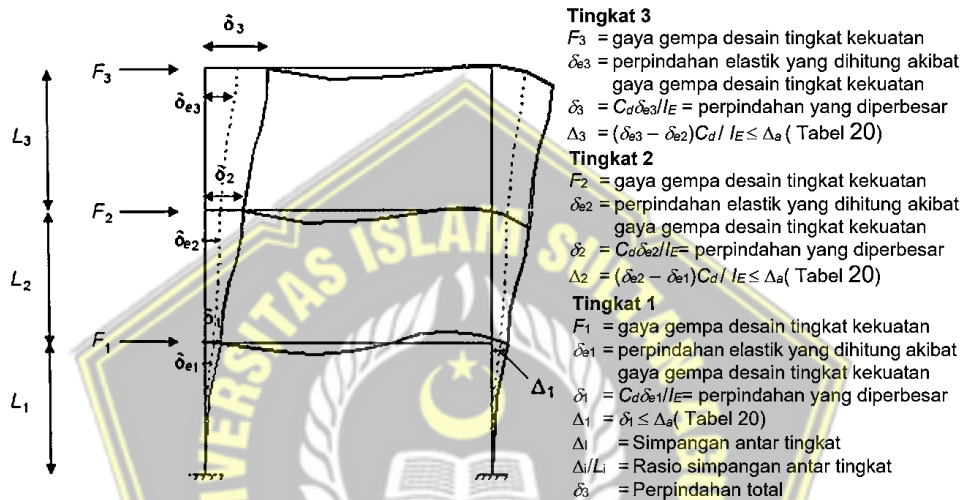
S_{D1} = Parameter Percepatan Respons Spektral Desain pada Periode 1,0 Detik

T = Periode Fundamental Struktur (detik)

S_1 = Parameter Percepatan Respon Spektral Maksimum yang ditetapkan

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.



(sumber : Gambar 10 SNI 1726:2019)

Gambar 2. 5. 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. 16. 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}

(sumber : Tabel 20 SNI 1726:2019)

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 antar 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

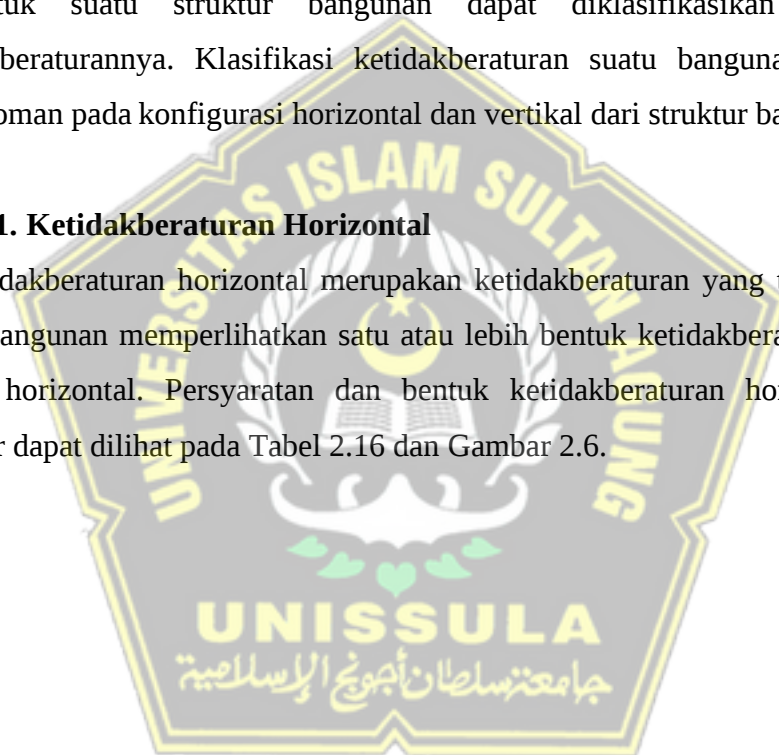
Analisis Spektrum Respons Ragam dilakukan untuk menentukan Ragam Getar Alami suatu struktur. Analisis memerlukan jumlah ragam yang cukup untuk mendapatkan partisipasi massa ragam terkombinasi sebesar 100% dari massa struktur. Untuk mencapai ketentuan tersebut, ragam satu badan kaku (*single rigid body*) 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 2.6.



Tabel 2. 2. Persyaratan Ketidakberaturan Horizontal pada Struktur

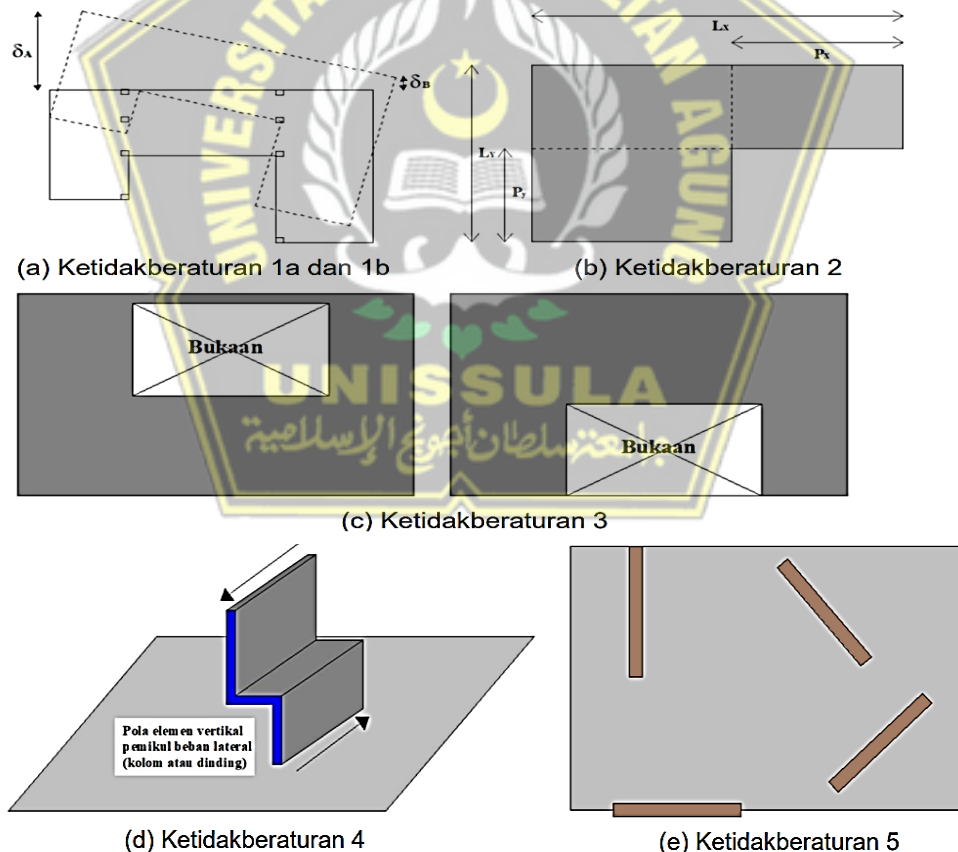
	Tipe dan penjelasan ketidakberaturan	Pasal Referensi	Penerapan Kategori Desain Seismik
1a.	Ketidakberaturan Torsi Apabila simpangan antar tingkat maksimum, yang dihitung termasuk torsi tak terduga dengan $A_x = 1,0$, di salah satu ujung struktur melintang terhadap suatu sumbu $> 1,2$ kali simpangan antar 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
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 diafragmanya 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

(sumber : Tabel 13 SNI 1726:2019)

Tabel 2. 16. Persyaratan Ketidakberaturan Horizontal pada Struktur (lanjutan)

	Tipe dan penjelasan ketidakberaturan	Pasal Referensi	Penerapan kategori desain seismik
4.	Ketidakberaturan Akibat Pergeseran Tegak Turus 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

(sumber : Tabel 13 SNI 1726:2019)



(sumber : Gambar 5 SNI 1726:2019)

Gambar 2. 6. Bentuk Ketidakberaturan Horizontal

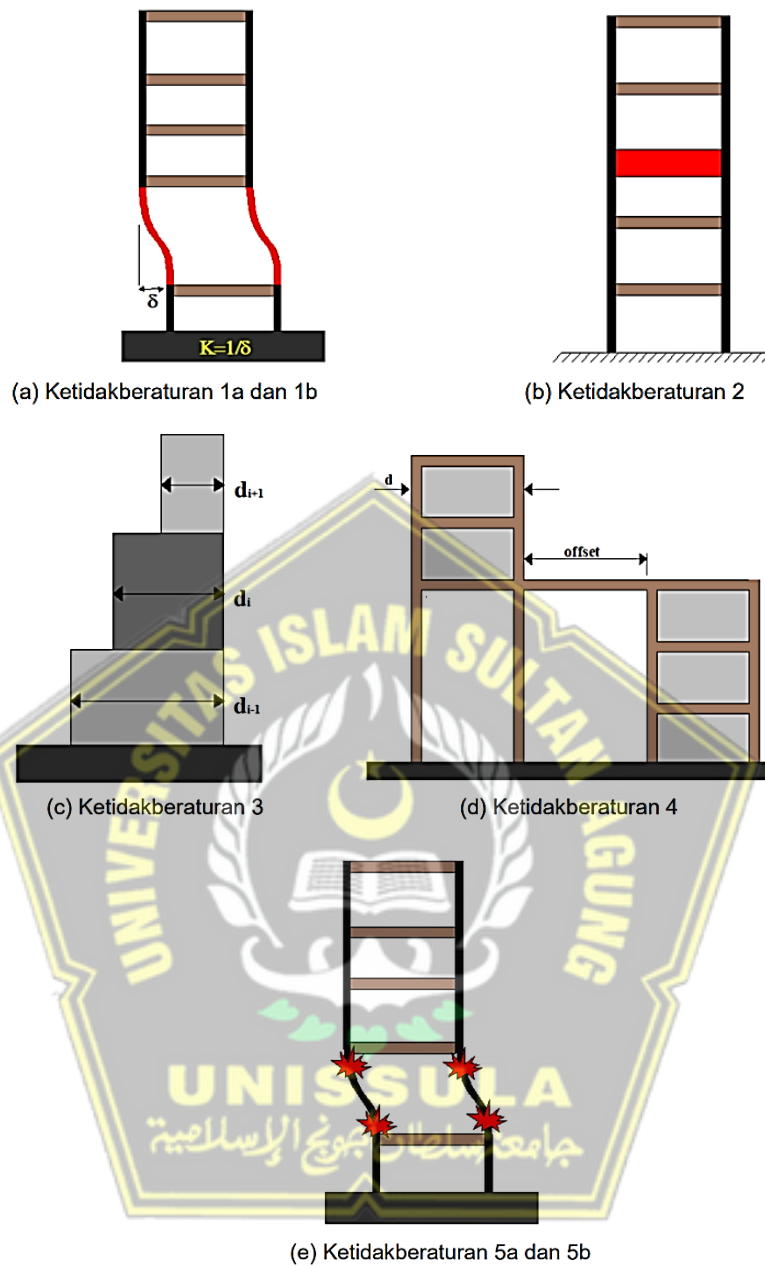
2.5.15.2. Ketidakberaturan Vertikal

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 2.16 dan Gambar 2.7.

Tabel 2. 3. 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 di dekatnya. Atap yang lebih ringan dari lantai di bawahnya tidak perlu ditinjau.	D, E dan F
3.	Ketidakberaturan Geometri Vertikal Apabila dimensi horizontal sistem pemikul gaya seismik di sembarang tingkat > 130% dimensi horizontal Sistem Pemikul Gaya Seismik tingkat di dekatnya.	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

(sumber : Tabel 14 SNI 1726:2019)



(sumber : Gambar 6 SNI 1726:2019)

Gambar 2. 7. Bentuk Ketidakberaturan Vertikal

2.6. Perancangan Elemen Struktur Beton Bertulang Berdasarkan SNI 2847:2019

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

Pelat Beton Bertulang merupakan struktur tipis dari bahan beton bertulang dengan arah bidang horizontal yang tegak lurus beban yang bekerja pada bidang tersebut. Bidang Pelat Beton Bertulang mempunyai ketebalan yang relatif sangat kecil dibandingkan dengan bentang panjang maupun lebarnya. Pelat Beton Bertulang mempunyai sifat sangat kaku dan arahnya horizontal yang berfungsi sebagai diafragma atau unsur pengaku horizontal pada bangunan gedung untuk mendukung ketegaran balok portal (Asroni, A, 2014a: 161).

Ketebalan minimum pelat tidak tergantung pada pembebanan dan modulus elastisitas beton yang mempunyai pengaruh signifikan pada lendutan. Batasan ketebalan minimum pelat yang digunakan dalam merencanakan dimensi pelat dapat dilihat berdasarkan ketentuan pada Tabel 2.17 dan Tabel 2.18.

Tabel 2. 4. 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	$L/10$

(sumber : Tabel 7.3.1.1 SNI 2847:2019)

Tabel 2. 5. Ketebalan 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)

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

Tabel 2. 6. A_{smin} untuk Pelat

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

(sumber : Tabel 8.6.1.1 SNI 2847:2019)

2.6.2. Perancangan Balok Sistem Rangka 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 ($A_g \cdot f_c' / 10$) 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:

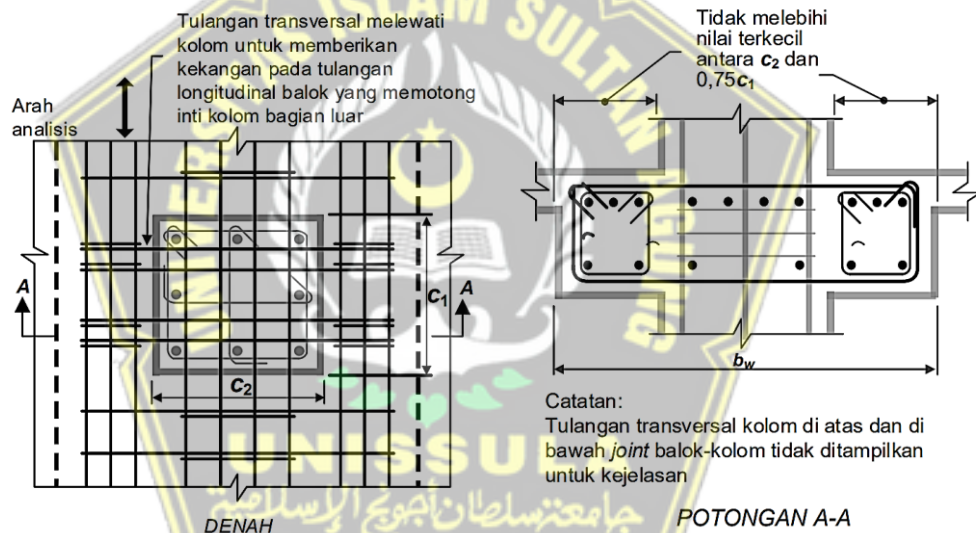
- a) Batasan tinggi minimum dimensi balok sesuai Tabel 2.21.

Tabel 2. 7. 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	$L/8$

(sumber : Tabel 9.3.1.1 SNI 2847:2019)

- b) Bentang bersih (L_n) diharuskan minimal $4'd$
- 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 $0,75'c_1$.



(sumber : Gambar R.18.6.2 SNI 2847:2019)

Gambar 2. 8. 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.

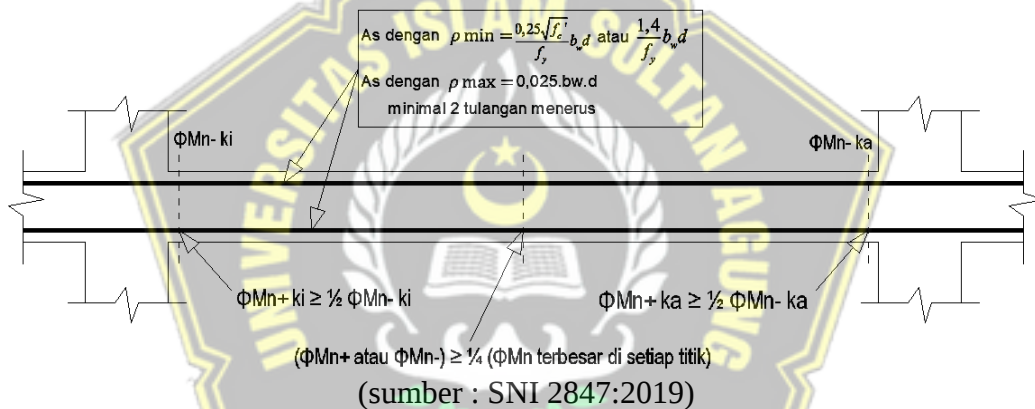
$$\phi M_n^+ \geq \frac{1}{2} \phi M_n^- \text{ (tumpuan kiri) } \dots\dots\dots (2.21)$$

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

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.

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

Persyaratan tulangan lentur dapat dilihat pada Gambar 2.9.

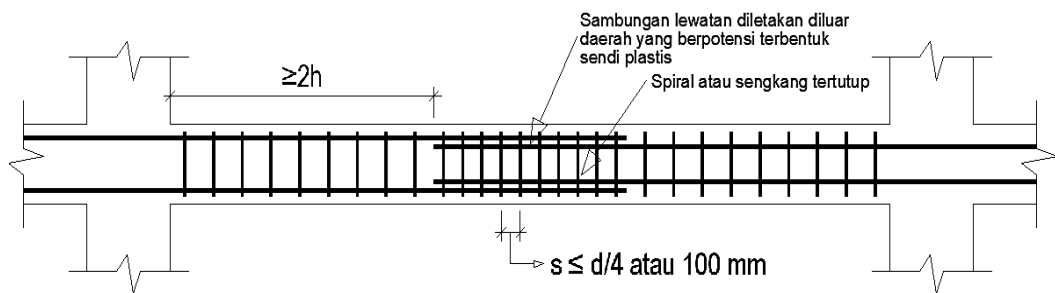


Gambar 2. 9. Persyaratan Tulangan Lentur SRPMK

- 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 $2x$ tinggi balok dari muka kolom.
- Tempat yang berdasarkan analisis menunjukkan kemungkinan terjadinya leleh lentur akibat perpindahan inelastis struktur rangka.

Persyaratan sambungan lewatan dapat dilihat pada Gambar 2.10.

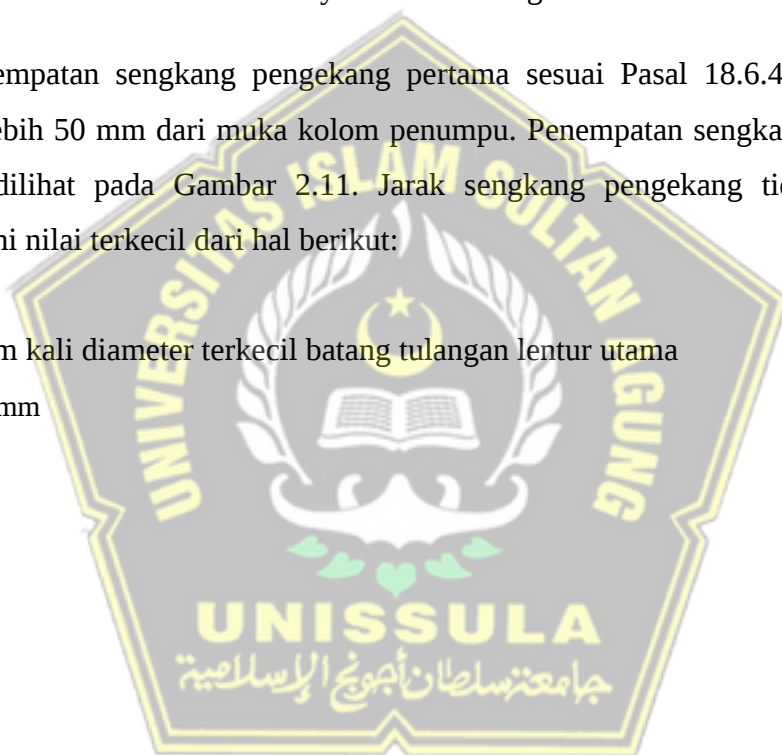


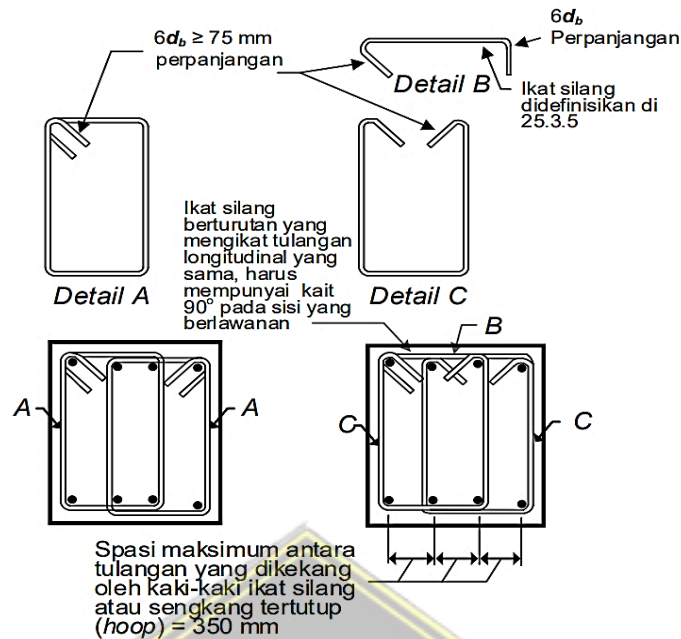
(sumber : SNI 2847:2019)

Gambar 2. 10. Persyaratan Sambungan Lewatan SRPMK

Penempatan sengkang pengekat pertama sesuai Pasal 18.6.4.4 diharuskan tidak lebih 50 mm dari muka kolom penumpu. Penempatan sengkang pengekat dapat dilihat pada Gambar 2.11. Jarak sengkang pengekat tidak diizinkan melebihi nilai terkecil dari hal berikut:

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





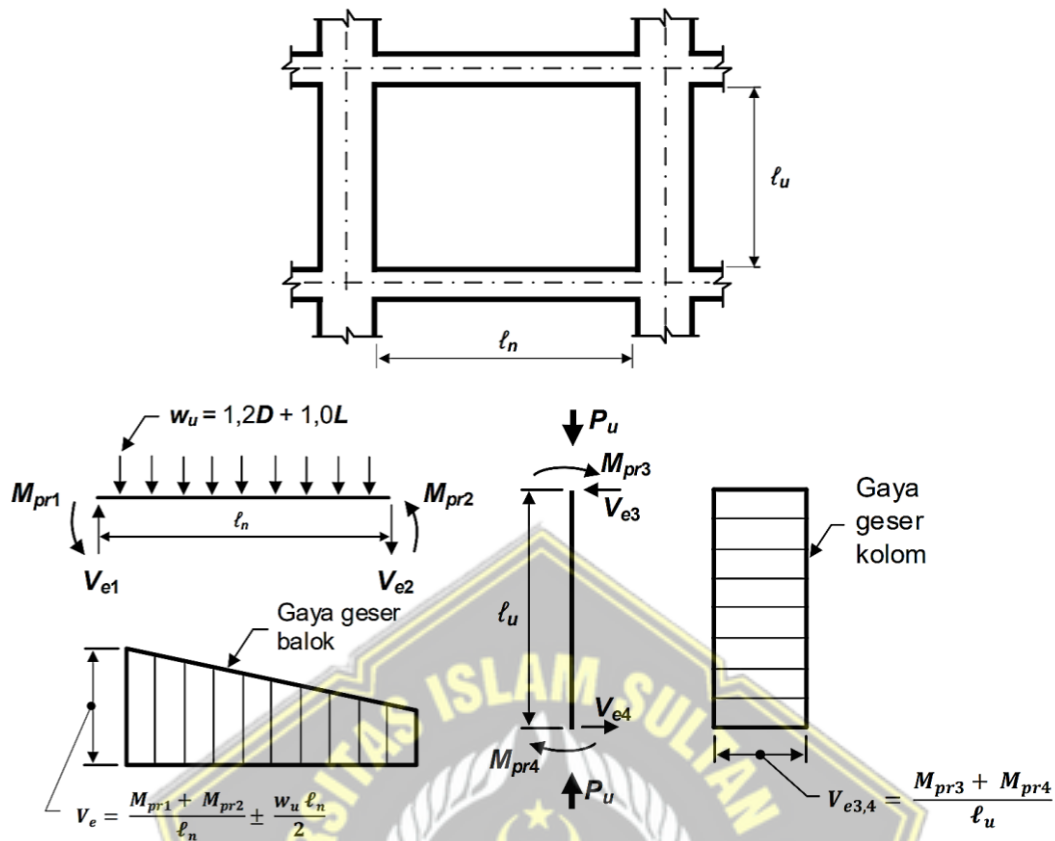
(sumber : Gambar R.18.6.4 SNI 2847:2019)

Gambar 2. 11. 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 $A_g f'_c / 20$



(sumber : Gambar R.18.6.5 SNI 2847:2019)

Gambar 2. 12. Gaya 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:

1. 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 nya 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



(sumber : Gambar R.18.7.5.2 SNI 2847:2019)

Gambar 2. 13. Contoh Penulangan Transversal pada Kolom

5. Spasi Tulangan Transversal sesuai Pasal 18.7.5.3 tidak diizinkan melebihi nilai terkecil dari hal-hal berikut :
 - a) 0,25 dimensi terkecil penampang kolom
 - b) Enam kali diameter tulangan longitudinal terkecil
 - c) 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 2.21.

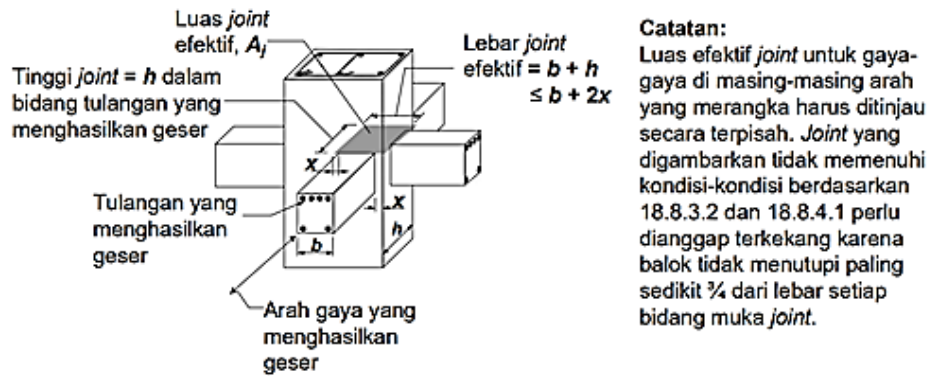
Tabel 2. 8.Tulangan Transversal untuk Kolom-Kolom Sistem Rangka Pemikul Momen Khusus (SRPMK)

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)	$0,3 \left(\frac{A_g}{A_{ch}} - 1 \right) \frac{f_c'}{f_{yt}}$ (a) $0,09 \frac{f_c'}{f_{yt}}$ (b)
	$P_u \leq 0,3A_g \times f_c'$ dan $f_c' \leq 70 \text{ MPa}$	Terbesar antara (a), (b) dan (c)	$0,2 k_f \times k_n \frac{P_u}{f_{yt} \times A_{ch}}$ (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)	$0,45 \left(\frac{A_g}{A_{ch}} - 1 \right) \frac{f_c'}{f_{yt}}$ (a) $0,12 \frac{f_c'}{f_{yt}}$ (b)
			$0,35 k_f \times k_n \frac{P_u}{f_{yt} \times A_{ch}}$ (c)

(sumber : Tabel 18.7.5.4 SNI 2847:2019)

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.



(sumber : Gambar R.18.8.4 SNI 2847:2019)

Gambar 2. 14. Luas Joint Efektif

2.6.4. Pengecekan Syarat *Strong Column-Weak Beam*

Persyaratan mekanisme *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 geser pada *joint*

Momen balok yang timbul, sesuai dengan Persamaan 2.27.

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

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

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

5. Hitung gaya pada tulangan balok longitudinal

- Luas tulangan atas, sesuai Persamaan 2.29.

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

- 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.

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

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 harus lebih besar daripada Gaya Geser *Joint* yang ditimbulkan.

BAB III

METODE PERANCANGAN

3.1. Pengumpulan Data

Data yang digunakan dalam Tugas Akhir ini berupa data primer. Data primer merupakan data yang didapatkan langsung dari pihak yang bersangkutan yang dapat digunakan sebagai sumber dalam pembuatan laporan tugas akhir.

Fungsi dari pengumpulan data adalah untuk proses perancangan dalam struktur bangunan. Data-data tersebut adalah sebagai berikut:

1. Data Tanah Proyek
 - Data Sondir
 - Data SPT (*Standart Penetration Test*)
2. Data Gambar

3.2. Standar Perancangan

Standar yang digunakan dalam perancangan, antara lain :

- SNI 1726:2019
“Tata Cara Ketahanan Gempa untuk Struktur Gedung dan Non-Gedung”
- SNI 2847:2019
“Persyaratan Beton Struktural untuk Bangunan Gedung”
- SNI 1727:2020
“Beban Desain Minimum dan Kriteria Terkait untuk Bangunan Gedung dan Struktur Lain”

3.3. Tahapan Analisis dan Perancangan

Ada beberapa tahapan analisis dan perancangan yang dilakukan, sebagai berikut:

3.3.1. Tahapan Analisis

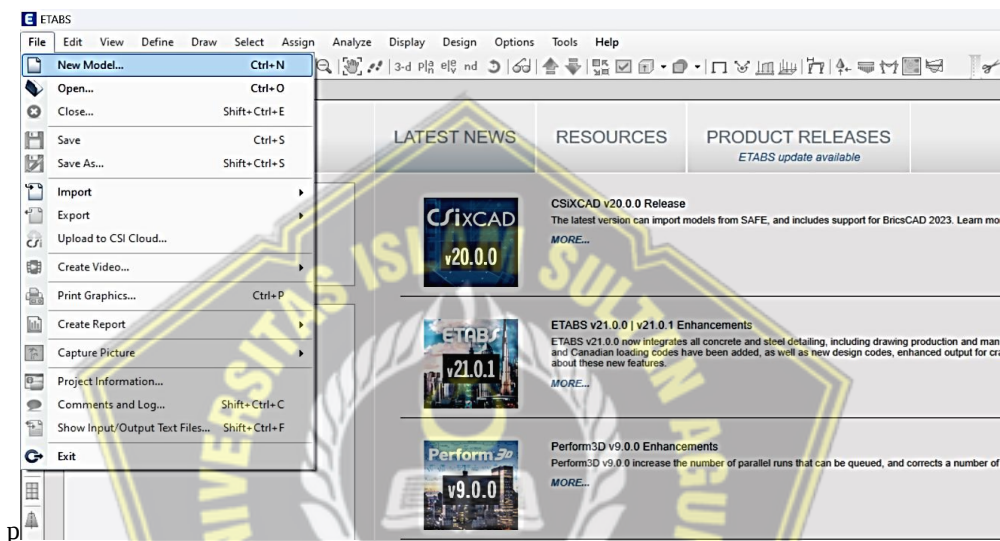
Analisis struktur bertujuan untuk mencari gaya-gaya dalam berupa gaya geser, gaya aksial dan momen. Untuk selanjutnya gaya-gaya itu digunakan untuk perhitungan tulangan pelat, balok dan kolom.

3.3.1.1. Pemodelan Struktur

Pemodelan struktur bangunan menggunakan bantuan program perangkat lunak ETABS berdasarkan gambar kerja dan program dapat membantu sebagai tolak ukur dalam perancangan sehingga proses keluaran dapat dihasilkan gaya internal dan gaya eksternal sebagai akibat dari beban yang telah diberikan.

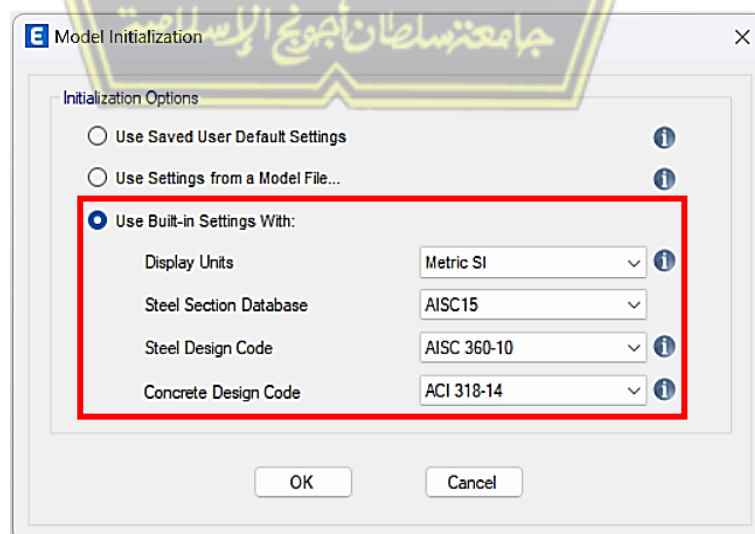
Langkah-langkah pemodelan struktur bangunan dengan bantuan program perangkat lunak ETABS adalah sebagai berikut:

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



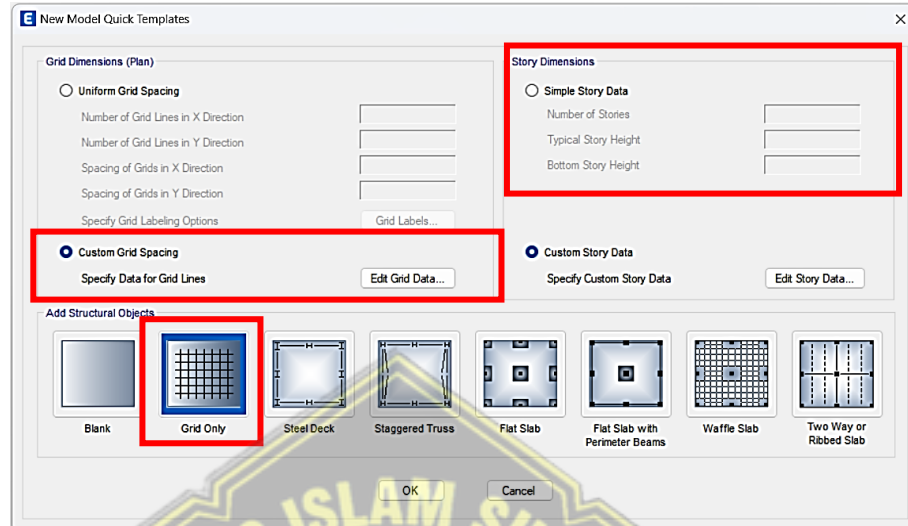
Gambar 3. 1. Tampilan Awal ETABS

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



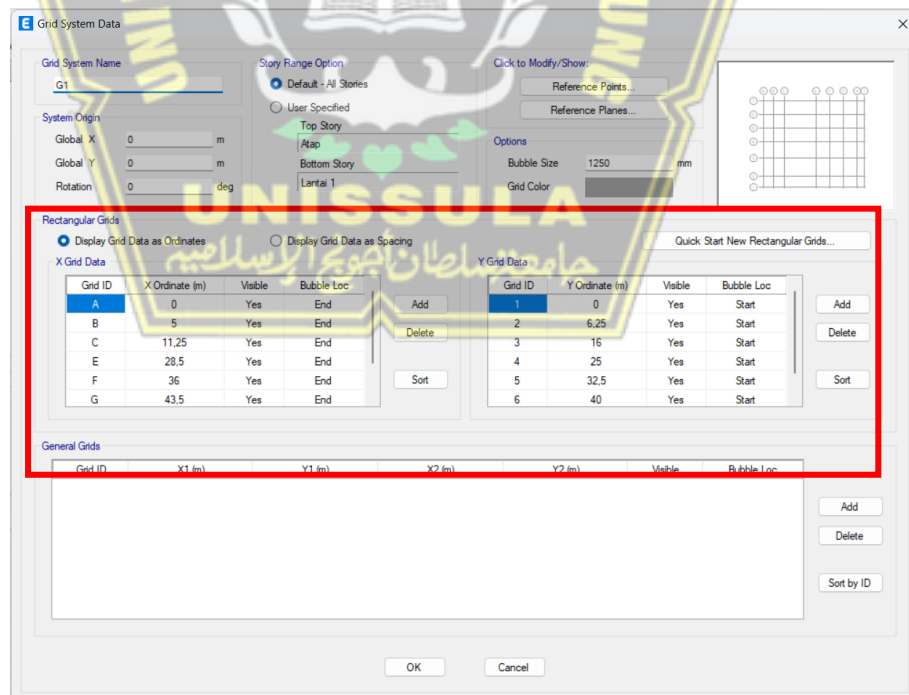
Gambar 3. 2. Model Initialization

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*



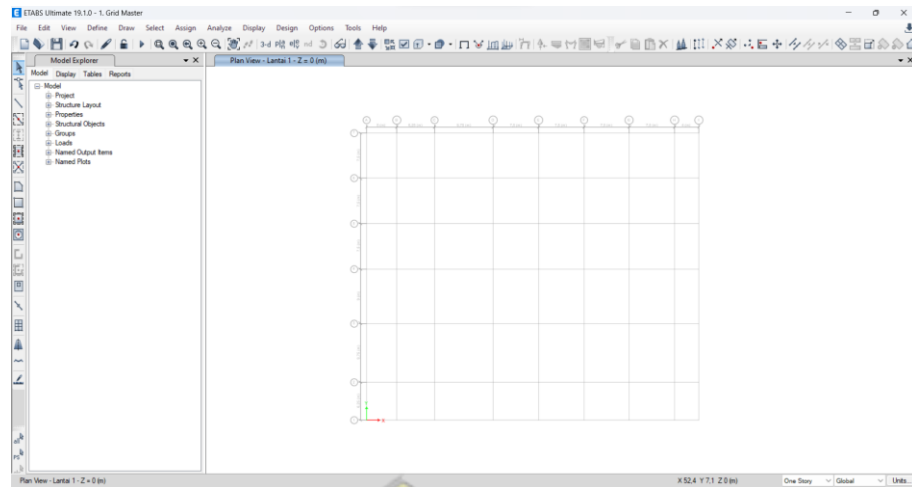
Gambar 3. 3. Model Grid

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



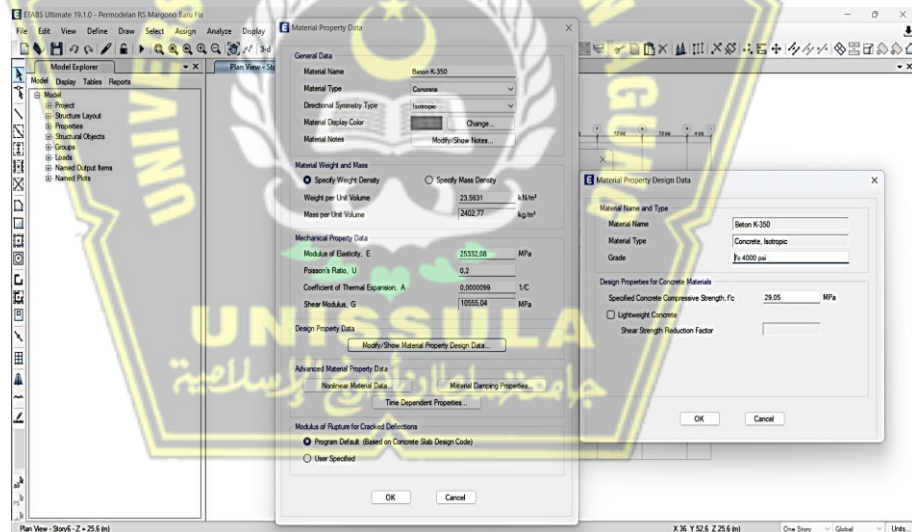
Gambar 3. 4. Edit Grid

5. Tampilan *Grid* dan *Story*



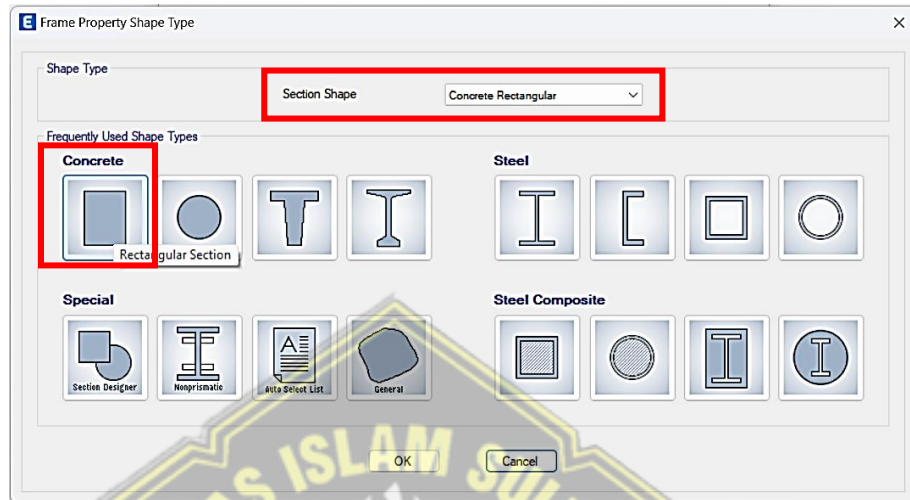
Gambar 3. 5. Tampilan Grid dan Story

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



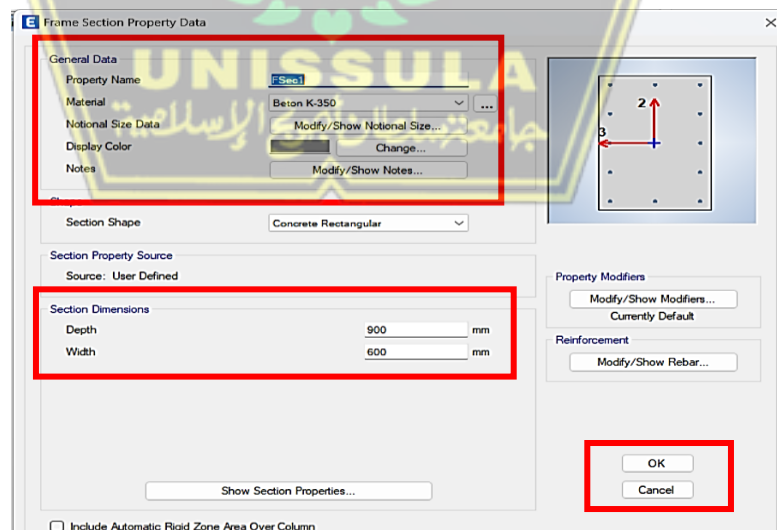
Gambar 3. 6. Input Material Properties

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*

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 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*

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

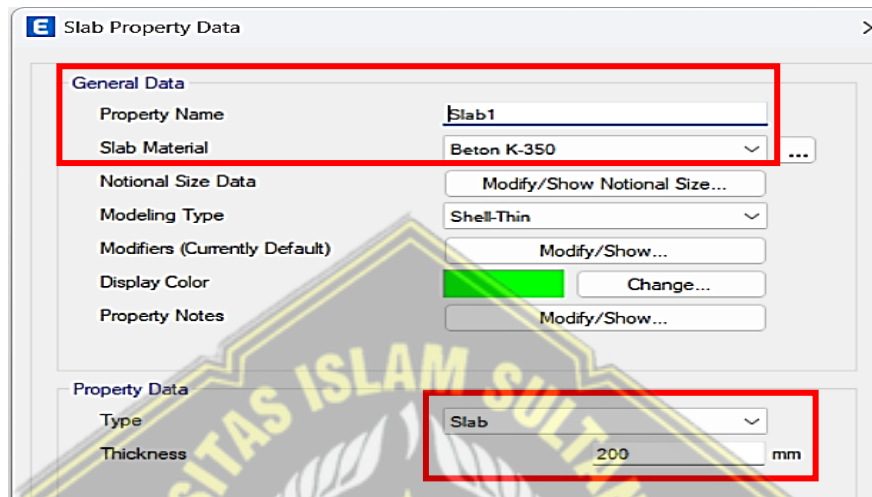
Bottom Bars at I-End: 0 mm²

Bottom Bars at J-End: 0 mm²

OK Cancel

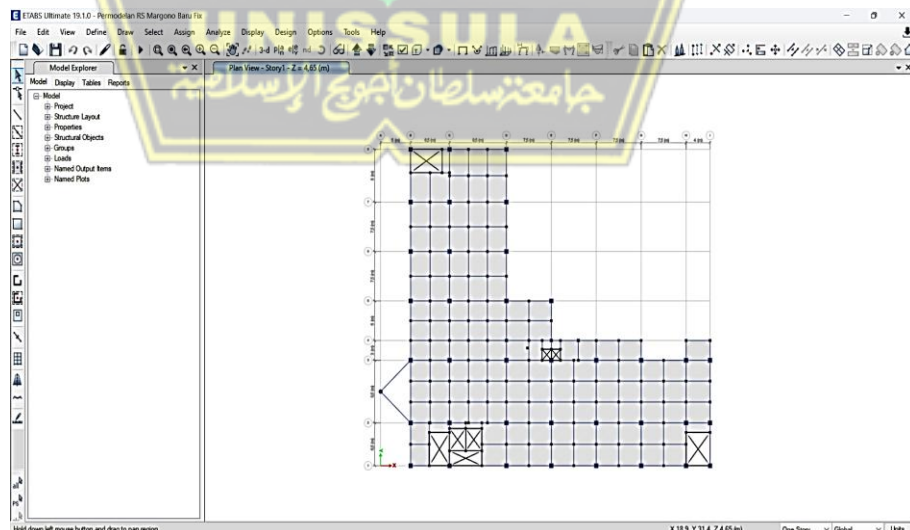
Gambar 3. 10. Reinforcement Data Beam

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



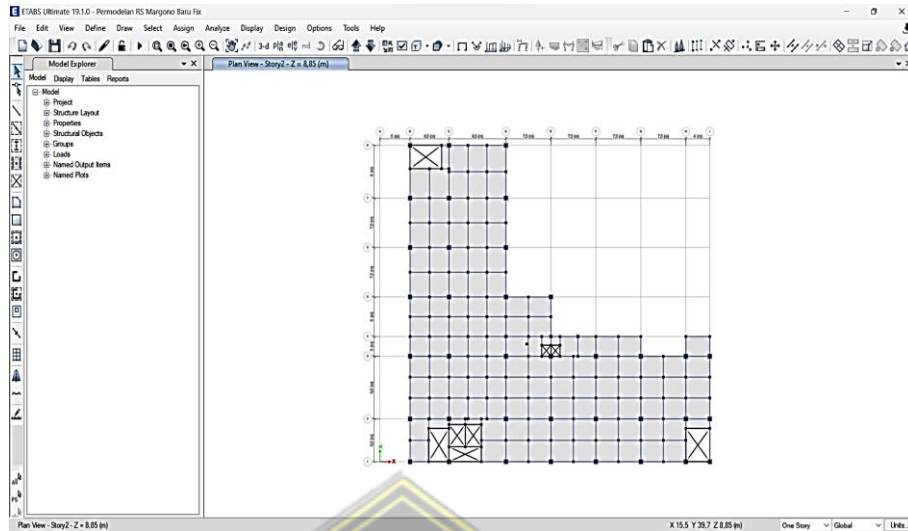
Gambar 3. 11. Input Dimensi Pelat

12. Tampilan dari pemodelan struktur bangunan pada perangkat lunak ETABS adalah sebagai berikut
- *Plan View* Lantai 1 dan 2



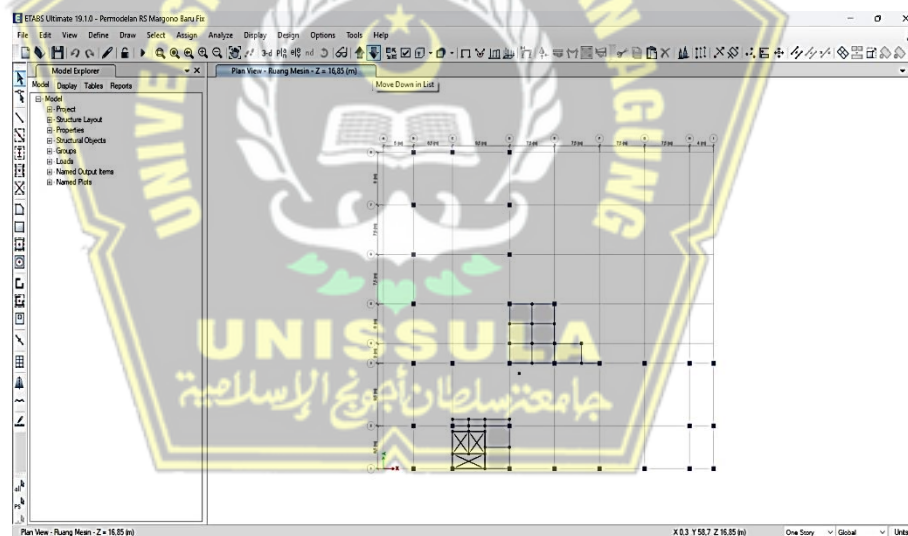
Gambar 3. 12. Plan View Lantai 1 dan 2 Pemodelan Awal

- *Plan View Lantai 3 dan 4*



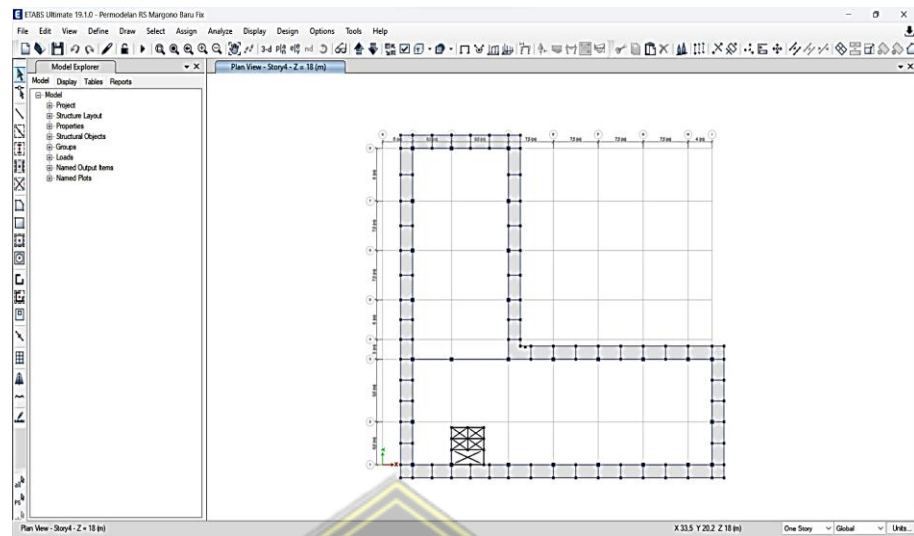
Gambar 3. 13. *Plan View Lantai 3 – 4 Pemodelan Awal*

- *Plan View Lantai Ruang Mesin*



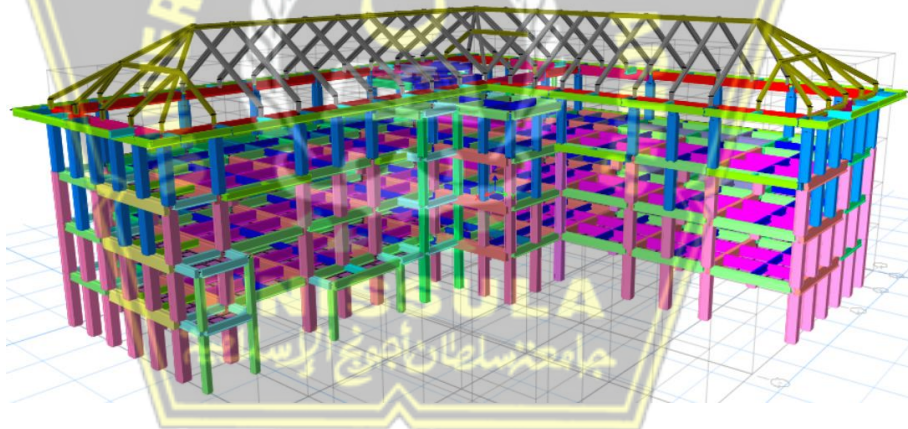
Gambar 3. 14. *Plan View Lantai Ruang Mesin*

- *Plan View Atap*



Gambar 3. 15. *Plan View Atap* Pemodelan Awal

- *3D View*



Gambar 3. 16. 3D View Pemodelan Awal

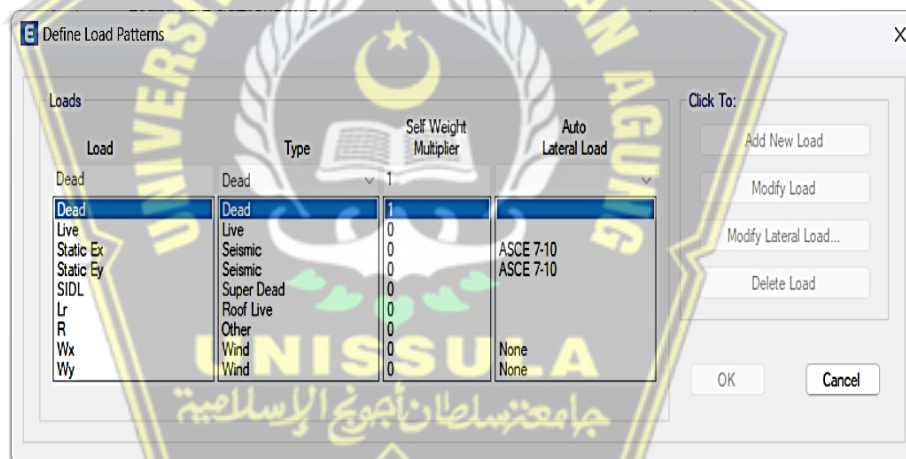
3.3.1.2. Pembebanan Struktur

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

a) Pembebanan Statik

Pembebanan statik meliputi semua beban yang bekerja dalam struktur bangunan yaitu beban mati dan beban hidup. Pembebanan untuk analisis struktur adalah Beban Mati Struktur + Beban Mati Tambahan + Beban Hidup. Beban mati struktur adalah beban yang diakibatkan oleh elemen struktur penyusun bangunan seperti kolom, balok, dan pelat. Beban mati tambahan adalah beban yang diakibatkan elemen tambahan sehubungan dengan *finishing* bangunan karena sifatnya yang permanen. Beban hidup adalah beban yang diambil berdasarkan fungsi bangunan.

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



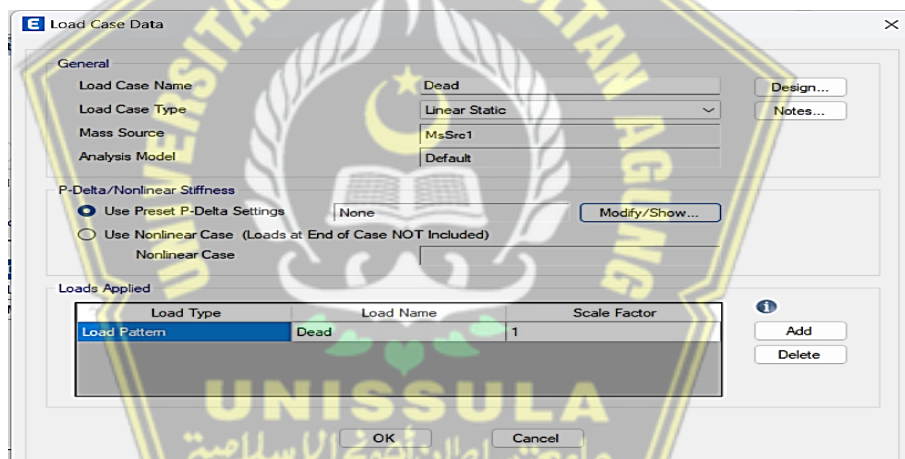
Gambar 3. 17. Define Load Patterns

- Pada *Load* : *Dead*, dapat mengganti nama *Dead* menjadi *DL* (*Dead Load*) kemudian *click to Modify Load*. *Type* untuk beban mati adalah *Dead* dan *Self Weight Multiplier* untuk beban mati adalah 1 (untuk beban mati struktur yang akan otomatis dihitung oleh ETABS dan juga *input* beban mati tambahan yang akan dimasukan sendiri).

- Pada *Load* : *Live*, dapat diganti nama *Live* menjadi *LL* (*Live Load*) kemudian *click to Modify Load. Type* untuk beban hidup adalah *Live* dengan *Self Weight Multiplier* = 0 (karena akan *menginput* sendiri beban hidup sesuai dengan fungsi bangunan).
- Jika ingin membedakan beban mati tambahan sebagai beban statik tersendiri, dapat *meng-input* beban *SIDL* dengan *Type Super Dead* dan *Self Weight Multiplier* = 0 kemudian ditambahkan dengan cara *klik Add New Load*.

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

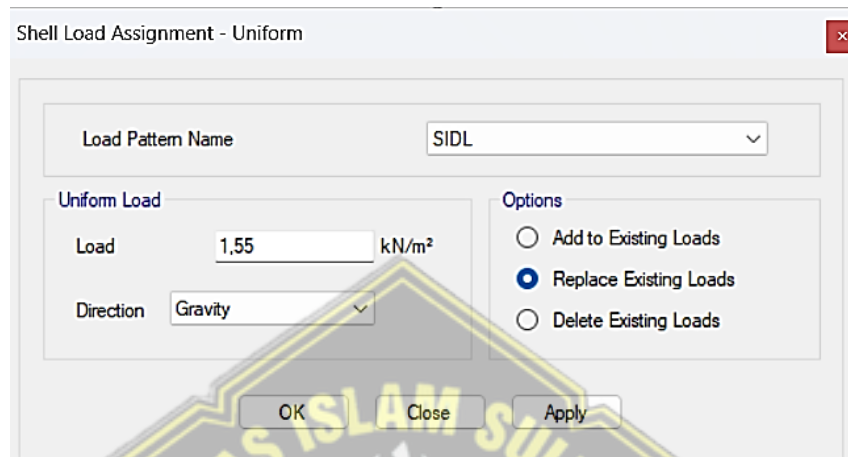
Pilih *Load Case Name Dead* → *klik Modify/Show Case* → pada kotak dialog *Load Case Data* di bagian *Load Case Name* ganti menjadi *DL* agar sesuai dengan nama pada *Load Patterns* sebelumnya → *klik OK*.



Gambar 3. 18. Load Case Data

- *Input Beban Mati Tambahan*

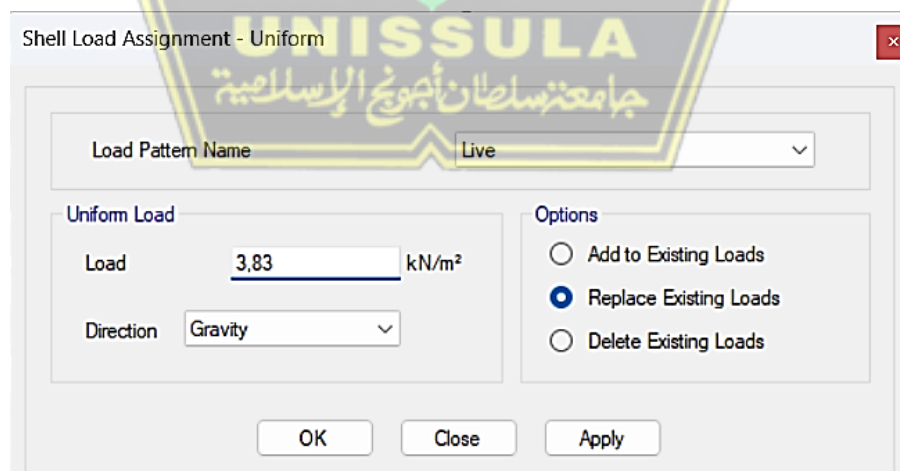
Klik menu *Select* → pilih *Select* → pilih *Properties* → klik *Slab Sections* → pilih pelat yang akan dimasukan beban → klik *Select* → klik *Close*. Klik menu *Assign* → pilih *Shell Loads* → klik *Uniform* → input beban → klik *Apply* → klik OK



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

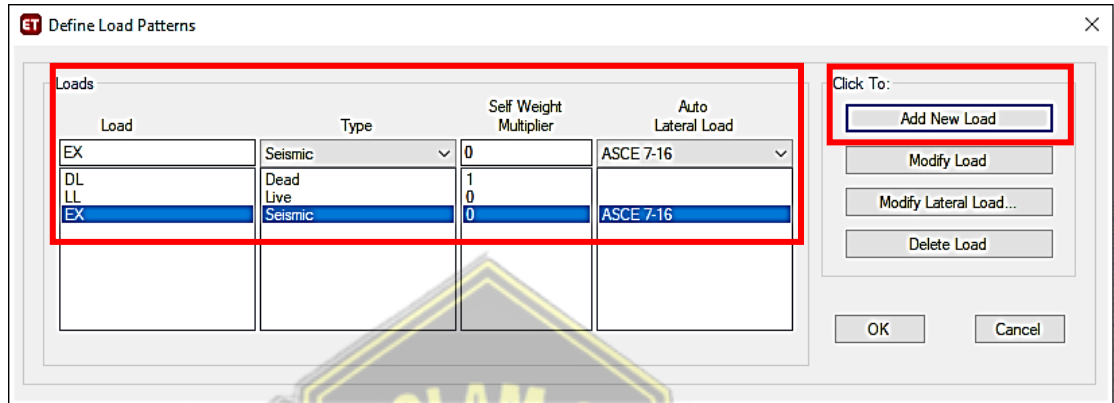


Gambar 3. 20. Input Beban Hidup

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* = isikan EX sebagai 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. *Seismic Loading X-Direction (Time Period Program)*
(Sesuai standar yang ditentukan)

- *Direction and Eccentricity* : pilih X Dir
- Metode Pemilihan *Time Period* :
 - a. *Approximate* = jika 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* = jika memilih metode ini maka program akan langsung menghitung otomatis waktu getar/perioda desain dengan mempertimbangkan batas atas dan batas bawah perioda .
 - c. *User Defined* = jika memilih metode ini dapat langsung memberikan nilai perioda desain yang telah dihitung 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 • 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

(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* :

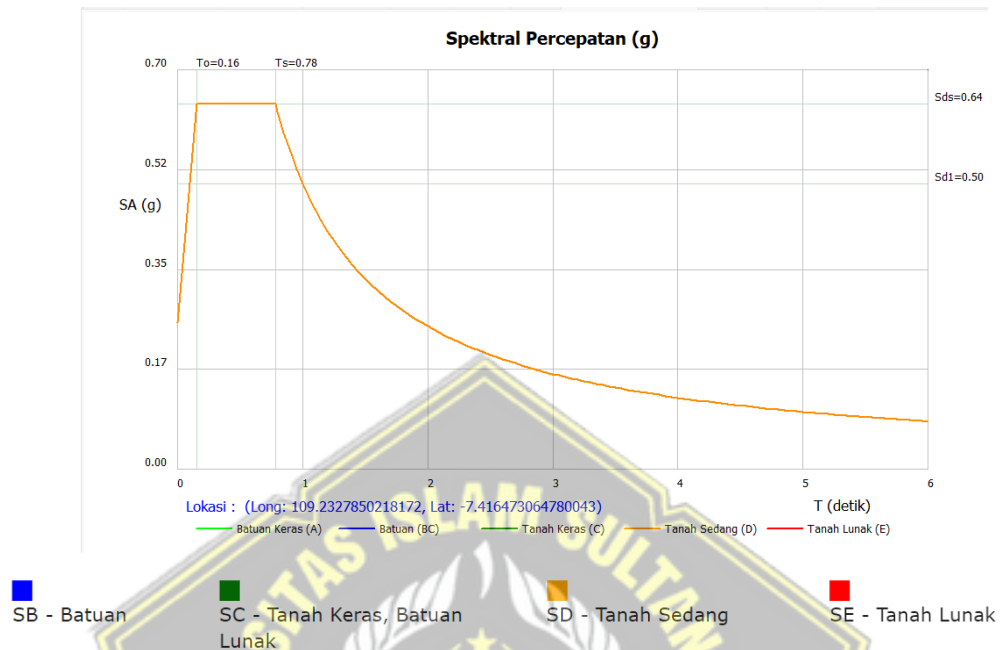
- Top Story for Seismic Loads* = Lantai Ring Balok (Lantai paling atas)
- Bottom Story for Seismic Loads* = Lantai 1 (Lantai dasar penjepitan lateral)

- *Factors* :

- Response Modification (R)* = 8
- System Overstrength (Ω_0)* = 3
- Deflection Amplification (C_d)* = 5,5
- Occupancy Important (I_e)* = 1,5

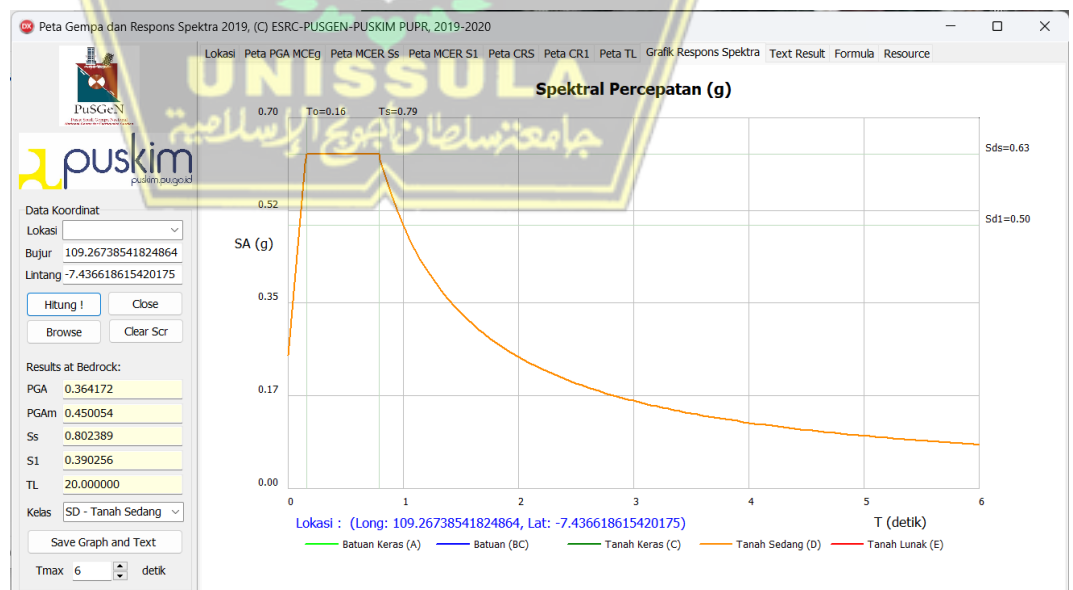
- Seismic Coefficients :

Spektrum Respons Desain Kota Banyumas berdasarkan situs Desain Spektra Indonesia dapat dilihat pada Gambar 3.23.



Gambar 3. 23. Spektrum Respons Desain Kota Banyumas

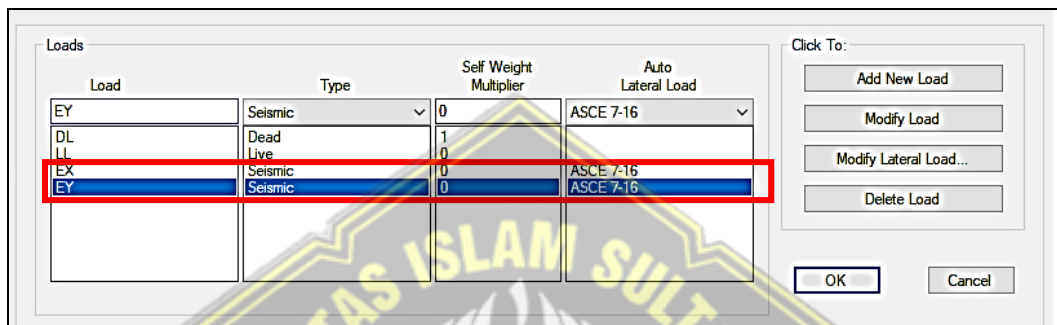
Parameter spektral tanah sedang Kota Banyumas berdasarkan web Desain Spektra Indonesia dapat dilihat pada Gambar 3.24.



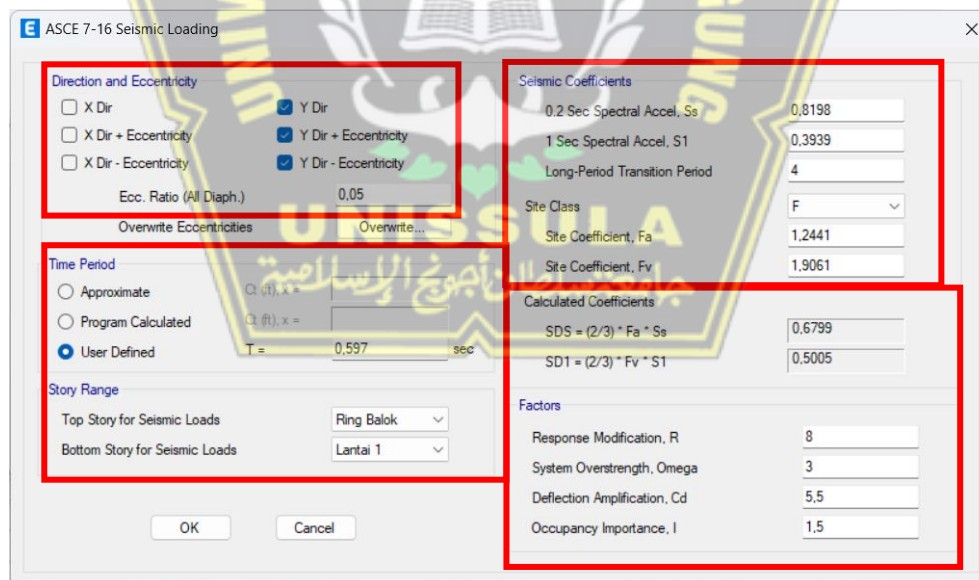
Gambar 3. 24. Parameter Spektral Tanah Sedang Kota Banyumas

- a. 0,2 Sec Spectral Accel (S_s) = 0,8198
- b. 1 Sec Spectral Accel (S_1) = 0,3939
- c. Long Period-Transition Period = 20 sec
- d. Site Class = D (Situs SD, Tanah Sedang)

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.



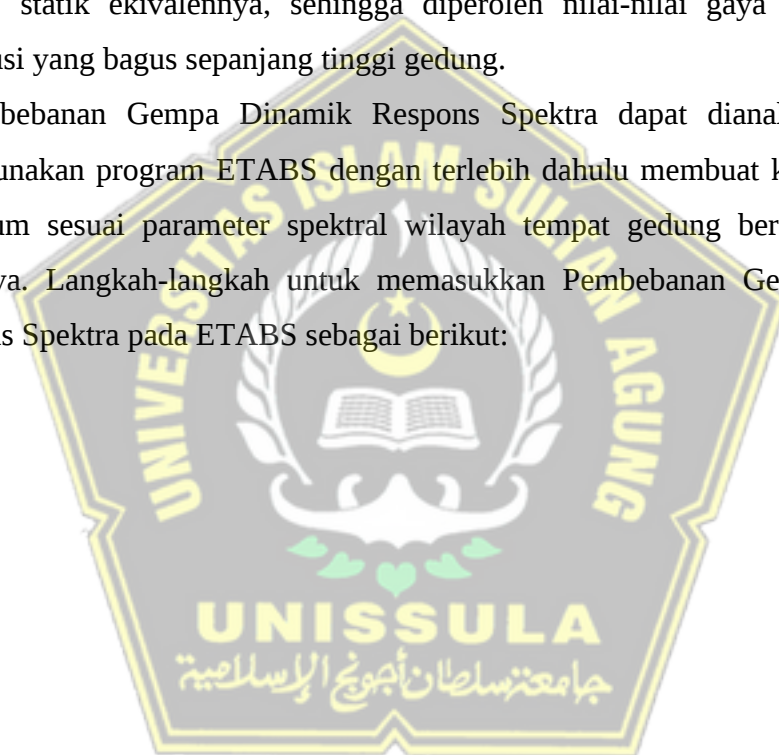
Gambar 3. 25. Input Gaya Lateral EY



Gambar 3. 26. Seismic Loading Y-Direction (Time Period Program)
(Sesuai standar yang ditentukan)

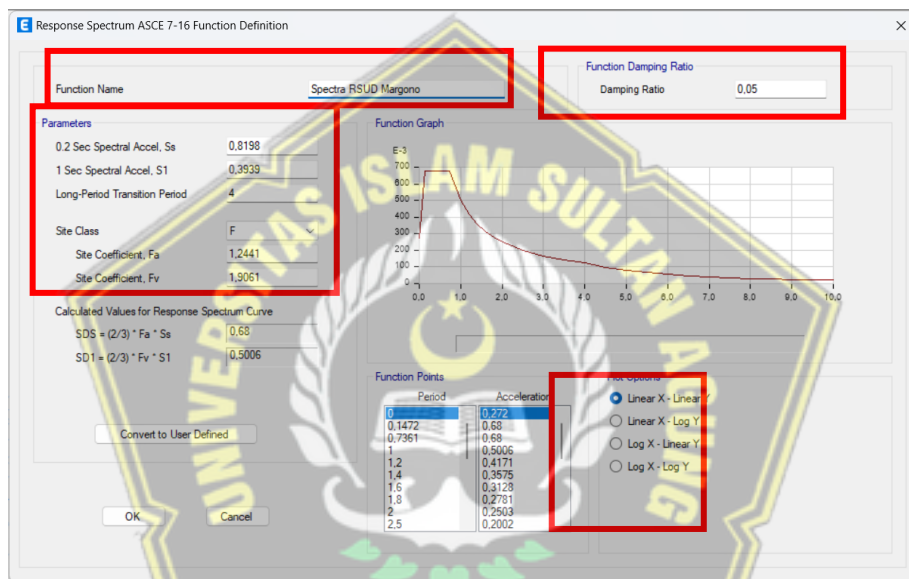
Selain Pembebanan Gempa Statik Ekuivalen, ada juga Pembebanan Gempa Dinamik Respons Spektra. Pembebanan Gempa dengan Respons Spektra bertujuan untuk mengetahui perilaku dinamik dari pola gaya geser bangunan-bangunan tinggi yang dipengaruhi oleh banyak *mode/modal* yang berkontribusi. Analisis gempa dinamik dalam perencanaan harus disertakan untuk bangunan-bangunan yang memiliki sisi ketidakberaturan/*irregurality*. Perilaku dinamik akan menentukan dan dapat menjadi standar untuk memperoleh nilai gaya geser rencana dengan semakin tingginya suatu bangunan dan semakin banyaknya *mode* yang berkontribusi. Hasil analisis gempa dinamik dibandingkan dengan hasil analisis statik ekivalennya, sehingga diperoleh nilai-nilai gaya geser dengan distribusi yang bagus sepanjang tinggi gedung.

Pembebanan Gempa Dinamik Respons Spektra dapat dianalisis langsung menggunakan program ETABS dengan terlebih dahulu membuat kurva Respons Spektrum sesuai parameter spektral wilayah tempat gedung berdiri dan jenis tanahnya. Langkah-langkah untuk memasukkan Pembebanan Gempa Dinamik Respons Spektra 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*

- *Function Name* : ASCE 7-16 SPEKTRA BANYUMAS
- *Damping Ratio* : 0,05 (5%)
- 0,2 Sec Spectral Accel (S_s) : 0,8198
- 1 Sec Spectral Accel (S_1) : 0,3939
- *Site Class* : D (tanah sedang, situs SD)
- *Plot Options* : Linear X – Linear Y



Gambar 3. 27. Respon Spektrum RSUD Margono Purwokerto

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

General

Load Case Name: Spectra Ex Unscaled

Load Case Type: Response Spectrum

Mass Source: Previous (MsSrc1)

Analysis Model: Default

Loads Applied

Load Type	Load Name	Function	Scale Factor
Acceleration	U1	Spectra Banyumas	2101,43

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 BANYUMAS*
 - d. *Scale Factor* = $G \times I_e/R = 9810 \text{ mm/sec}^2 \times 1,5/8 = 1839,375$

- *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.

Load Case Data

General

Load Case Name: Spectra Ey Unscaled [Design...]

Load Case Type: Response Spectrum [Notes...]

Mass Source: Previous (MsSrc1)

Analysis Model: Default

Loads Applied

Load Type	Load Name	Function	Scale Factor
Acceleration	U2	Spectra Banyumas	2101.43

[Add] [Delete] [Advanced]

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 [Modify/Show...]

Diaphragm Eccentricity: 0.05 for All Diaphragms [Modify/Show...]

[OK] [Cancel]

Gambar 3. 29. *Load Case Data SPEC-Y*

3.3.1.3. Analisis Struktur

Analisis struktur berupa gaya dalam bertujuan untuk mengetahui gaya dalam akibat beban yang bekerja pada struktur yang selanjutnya akan digunakan untuk perhitungan kebutuhan tulangan. Gaya dalam tersebut meliputi gaya geser, gaya aksial dan momen. Selain itu, juga digunakan untuk mengetahui besarnya pergeseran 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.

3.3.2. Tahapan Perancangan

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

3.3.2.1. Tahapan Perancangan Pelat

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

- 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

3.3.2.2. Tahapan Perancangan Balok

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

- 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

3.3.2.3. Tahapan Perancangan Kolom

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

- 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

3.3.2.4. Tahapan Pengecekan Syarat *Strong Column-Weak Beam*

Ada tahapan-tahapan yang perlu untuk dilakukan dalam pengecekan syarat *Strong Column-Weak Beam*, antara lain:

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

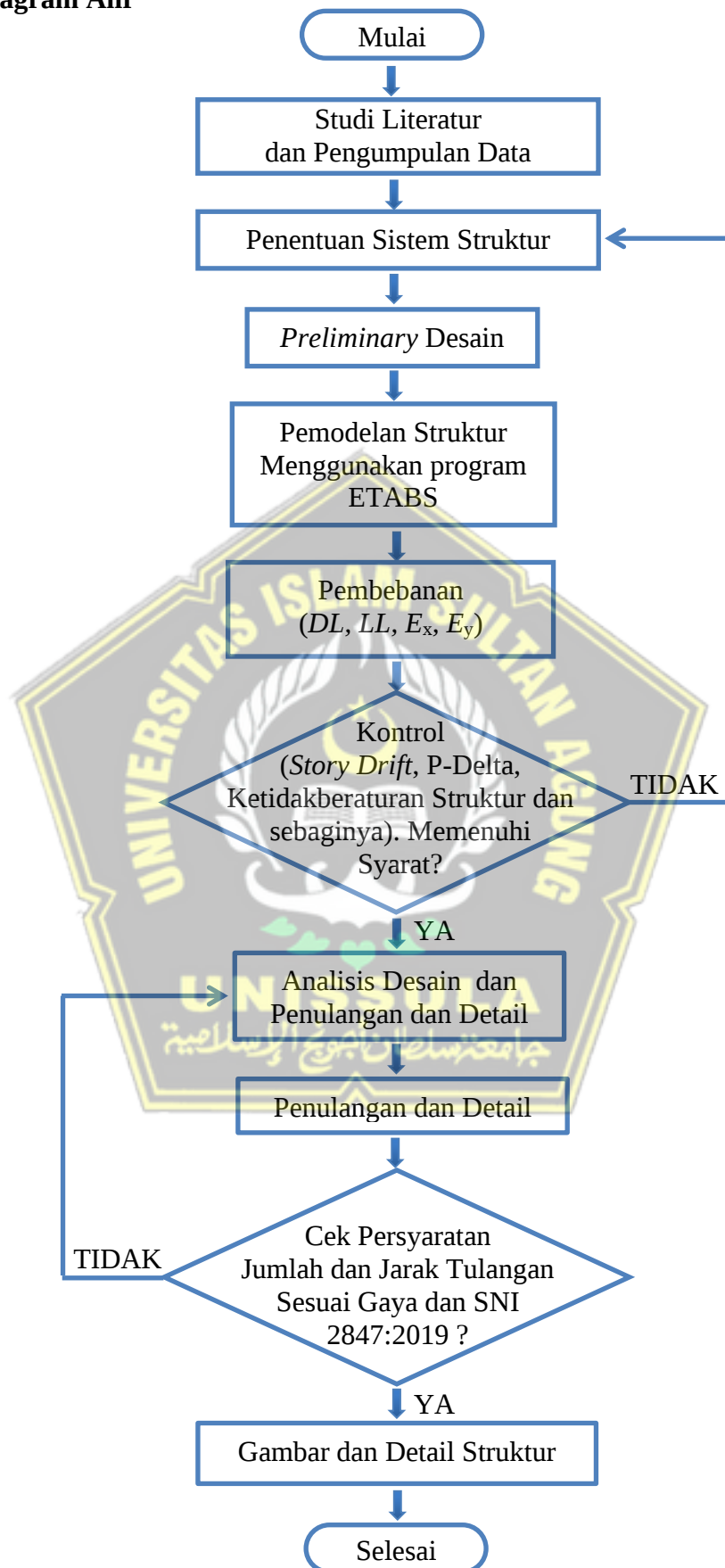
3.3.2.5. Tahapan Perancangan Hubungan Balok-Kolom (*Joint*)

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

- 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. Diagram Alir



BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1. Data Struktur Gedung

4.1.1. Deskripsi Umum Struktur

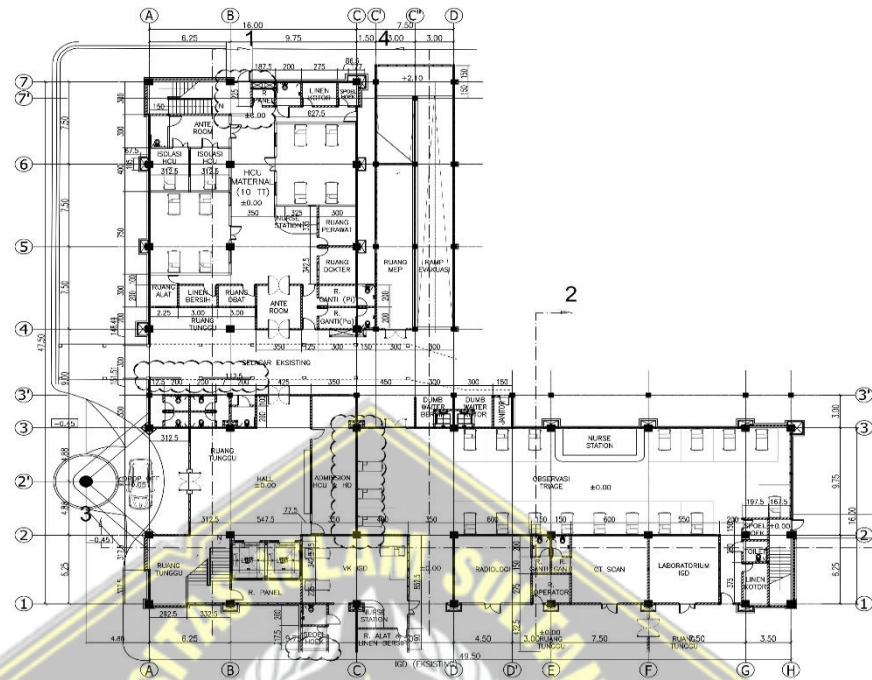
Gedung bertingkat dengan tinggi 4 lantai akan dimodelkan dengan pemodelan. Pada Pemodelan ini, akan dimodelkan sebagai Sistem Rangka Pemikul Momen Khusus (SRPMK). Pada model kedua sebagai sistem ganda, yaitu Sistem Rangka Pemikul Momen Khusus (SRPMK). Sementara, pada model ketiga berdasarkan model kedua dengan ditambahkan kolom keliling. Pemodelan dilakukan sesuai dengan standar SNI 1726:2019.

Bangunan ini berfungsi sebagai gedung rumah sakit yang berlokasi di Purwokerto Banyumas. Bangunan ini terdiri dari 4 lantai yang berfungsi sebagai kebutuhan rumah sakit dan 1 lantai paling atas sebagai atap bangunan. Secara umum, bangunan ini dirancang dengan material beton bertulang. Bangunan ini berbentuk persegi panjang dengan ketinggian total 18 meter. Data model struktur gedung dapat dilihat pada Tabel 4.1.

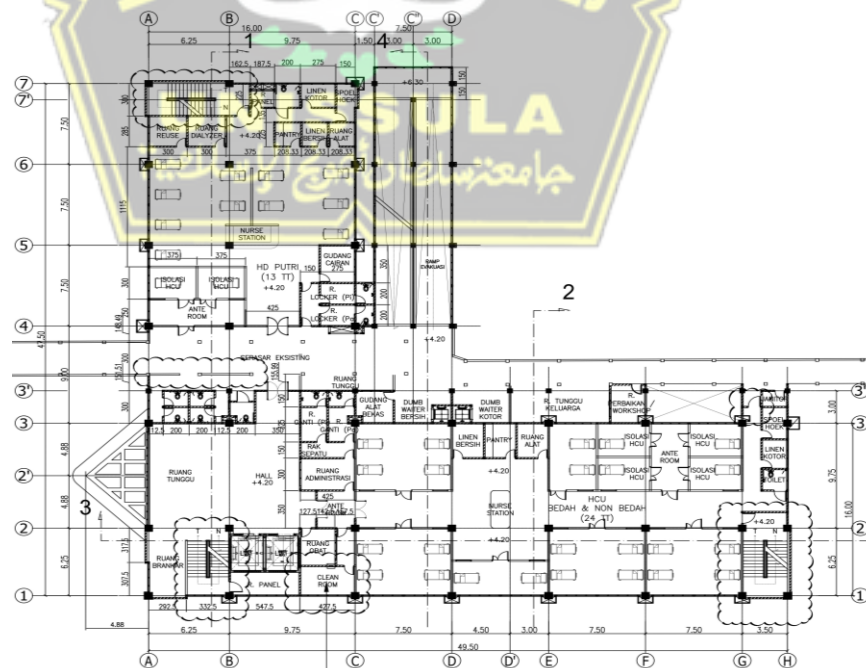
Tabel 4. 1. Data Model Struktur Gedung

Nama Proyek	: Desain Struktur Gedung Rumah Sakit 4 Lantai di Purwokerto
Lokasi Proyek	: Jl. Dr. Angka No.1, RW.2, Karang engkol, Sokanegara, Kec. Purwokerto, Kabupaten Banyumas, Jawa Tengah 53131
Fungsi Bangunan	: Gedung Rumah Sakit
Luas Bangunan	: 5518 m ²
Jumlah Lantai	: 4 Lantai
Sistem Struktur	: Sistem Rangka Pemikul Momen Khusus (SRPMK)

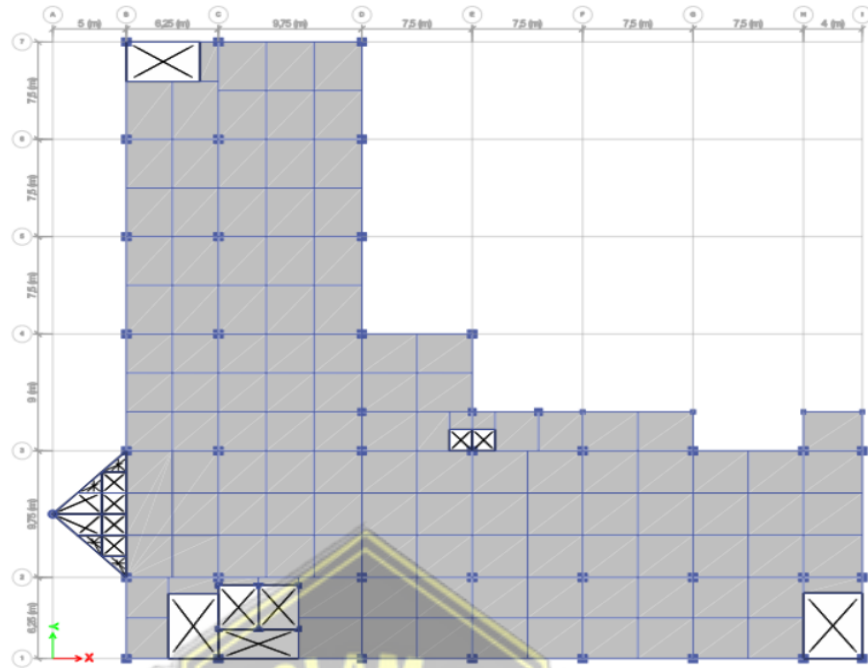
Berikut denah arsitektur dari gedung yang didesain dapat dilihat pada Gambar 4.1 sampai Gambar 4.8 sebagai berikut:



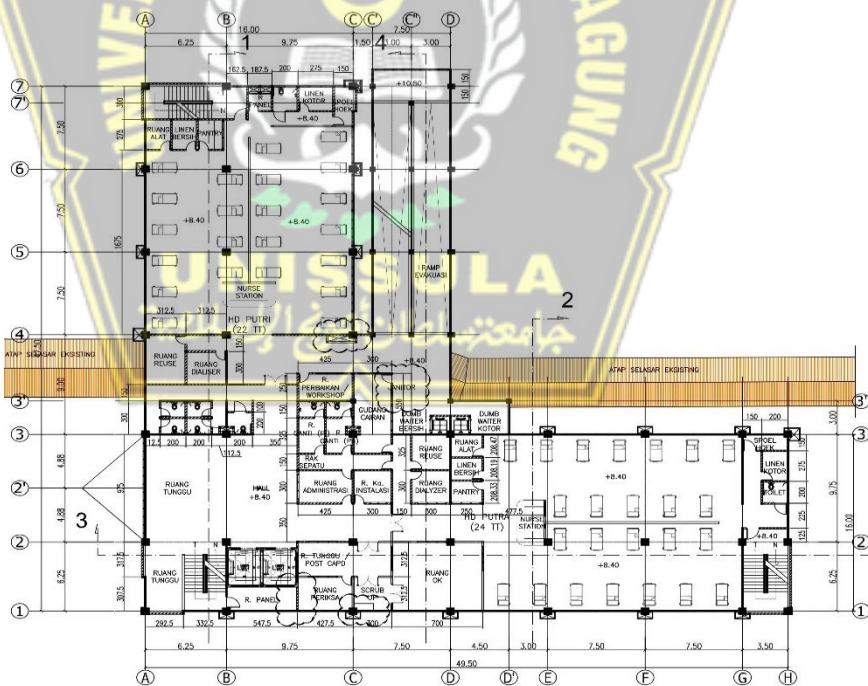
Gambar 4. 1. Denah Lantai 1 Gedung Rumah Sakit di Purwokerto, Banyumas



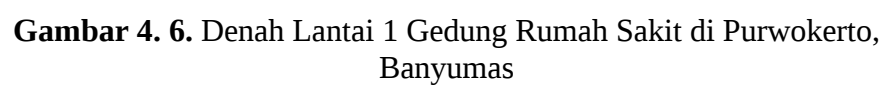
Gambar 4. 2. Denah Lantai 2 Pemodelan Awal

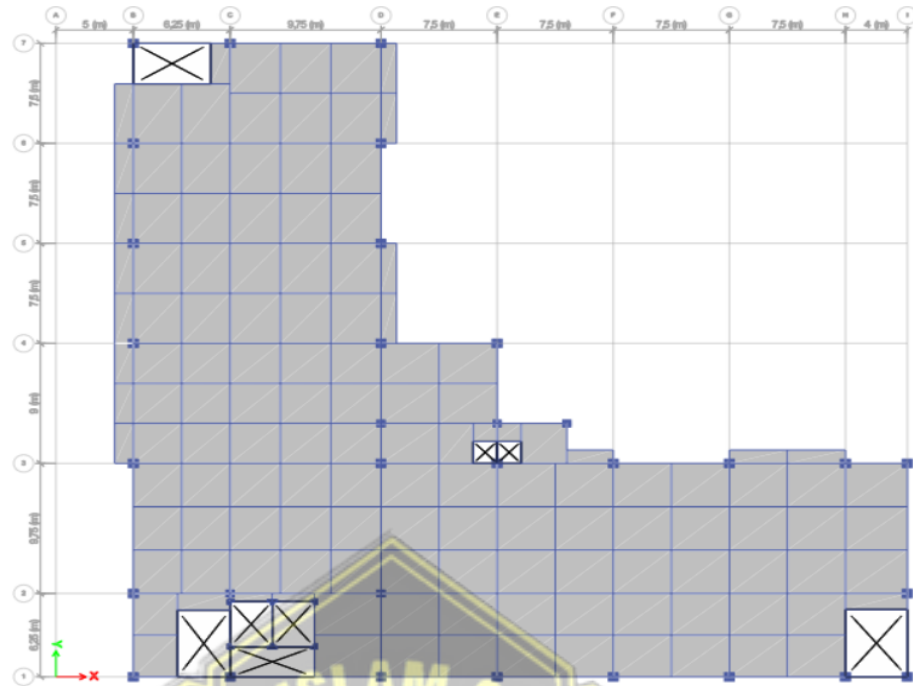


Gambar 4. 3. Denah Lantai 2 Gedung Pemodelan ETABS

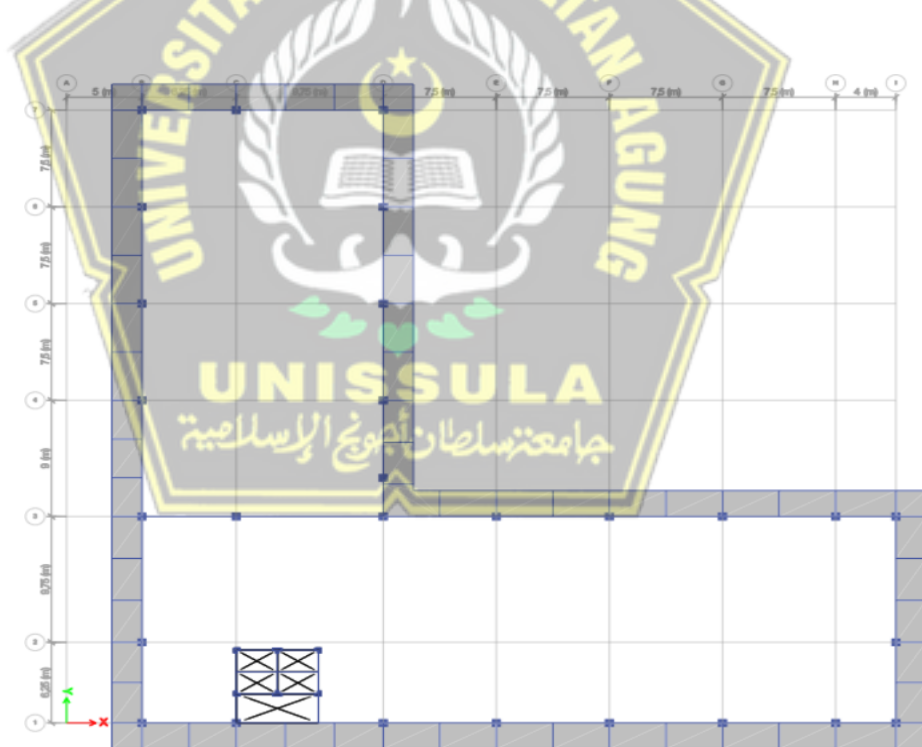


Gambar 4. 4. Denah Lantai 3 Gedung Rumah Sakit di Purwokerto, Banyumas





Gambar 4. 7. Denah Lantai 4 Gedung Pemodelan *ETABS*



Gambar 4.8. Denah Lantai Ring Balok Gedung Pemodelan *ETABS*

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	4,65
Lantai 2	4,20
Lantai 3	4,20
Lantai 4	3,8
Lantai Mesin Lift	1,15
Lantai Ring Balok	6,00

- 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	525	420	525
2	BJTP ($\emptyset \leq 10$ mm)	240	370	264	407

- 2) Mutu Beton, sesuai Tabel 4.4

- a) Balok dan Pelat

Tabel 4. 4. Mutu Beton Balok dan Pelat

f'_c	29,05	MPa
E	25332,084	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. Perencanaan Awal Dimensi Struktur (*Preliminary Design*)

Perencanaan awal dimensi pada elemen struktur (*preliminary design*) merupakan tahap awal perencanaan 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 dan 4.6

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/m³, persamaan pada Tabel 4.12 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.

Maka Dimensi pelat yang digunakan pada gedung Rumah Sakit 4 Lantai ini adalah sebagai berikut:

Tabel 4. 7. Dimensi Pelat Yang Dipakai

No	Nama Pelat	Tebal Pelat (mm)	Keterangan
1	Lantai	125	2 Arah
2	Atap	100	2 Arah

Dari Tabel 4.7 di atas, dapat diketahui dimensi pelat yang dapat digunakan yaitu 125 mm untuk lantai dan 100 mm untuk atap.

4.1.2.2. Preliminary Elemen Balok

Pada perhitungan dimensi awal elemen balok, digunakan rumus tinggi balok minimum untuk balok induk adalah $L/12$ dan untuk balok anak $L/15$. 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	9750	812,5	850	400	400
G2	Induk	Persegi panjang	9000	7500	800	400	400
G3	Induk	Persegi panjang	7500	625	600	300	300
G4	Induk	Persegi panjang	6250	520	600	300	250
G5	Induk	Persegi panjang	4000	333	450	300	300
B1	Anak	Persegi panjang	9750	650	700	350	300
B2	Anak	Persegi panjang	9000	600	600	300	250
B3	Anak	Persegi panjang	7500	500	500	250	250
B4	Anak	Persegi panjang	6250	416	400	200	250
B5	Anak	Persegi panjang	4000	266	400	200	200

4.1.2.3. Preliminary Elemen Kolom

Pada SNI 2847:2019, R10.3.1 batasan dimensi ukuran minimum eksplisit pada kolom tidak ditentukan sehingga penggunaan kolom beton bertulang dengan penampang kecil untuk struktur dengan beban ringan diizinkan, seperti rumah tinggal dengan lantai rendah dan bangunan kantor sederhana. Jika penampang kecil dipakai, diperlukan ketelitian pekerjaan lebih baik dan tegangan susut meningkat secara signifikan. Dimensi kolom yang digunakan pada Struktur Gedung Rumah Sakit 4 Lantai ini adalah sebagai berikut

Tabel 4. 9. Hasil *Preliminary* Elemen Kolom

Nomor Kolom	Nama Kolom	Lebar Penampang Kolom (mm)	Tinggi Penampang Kolom (mm)
1	K1.A	700	700
2	K1.B	700	700
3	K1.C	Ø 600	Ø 600
4	K2.A	600	600
5	K2.B	600	600
6	K3.A	500	500
7	K4.A	400	400

4.2. Pemodelan Elemen Struktur

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

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.

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 4.10 sebagai berikut:

Tabel 4. 10. Dimensi Balok Setelah Pengecekan

Nama	Status Balok	Tipe Balok	L (mm)	H_{min}	H_{dipakai}	B_{min}	B_{dipakai}
G1	Induk	Persegi panjang	9750	812,5	850	400	400
G2	Induk	Persegi panjang	9000	7500	800	400	400
G3	Induk	Persegi panjang	7500	625	600	300	300
G4	Induk	Persegi panjang	6250	520	600	300	250
G5	Induk	Persegi panjang	4000	333	450	300	300
B1	Anak	Persegi panjang	9750	650	700	350	300
B2	Anak	Persegi panjang	9000	600	600	300	250
B3	Anak	Persegi panjang	7500	500	500	250	250
B4	Anak	Persegi panjang	6250	416	400	200	250
B5	Anak	Persegi panjang	4000	266	400	200	200

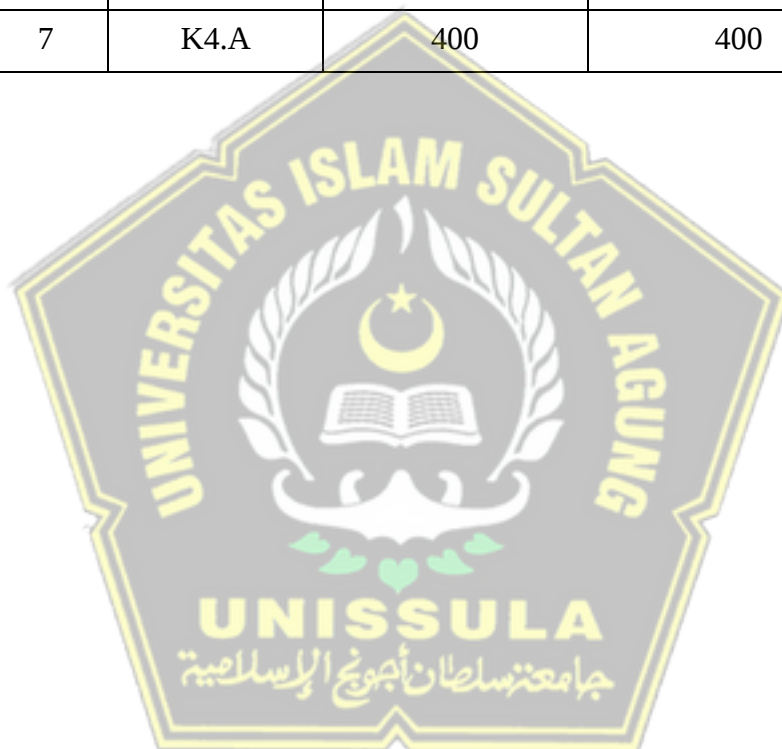
Untuk memperhitungkan pengaruh keretakan beton ketika gempa terjadi, momen inersia dari penampang balok dan torsi direduksi sebesar 25% untuk menyeimbangkan nilai reduksi terhadap inersia elemen struktur.

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 4.11.

Tabel 4. 11. Dimensi Kolom Setelah Pengecekan

Nomor Kolom	Nama Kolom	Lebar Penampang Kolom (mm)	Tinggi Penampang Kolom (mm)
1	K1.A	700	700
2	K1.B	700	700
3	K1.C	Ø 600	Ø 600
4	K2.A	600	600
5	K2.B	600	600
6	K3.A	500	500
7	K4.A	400	400

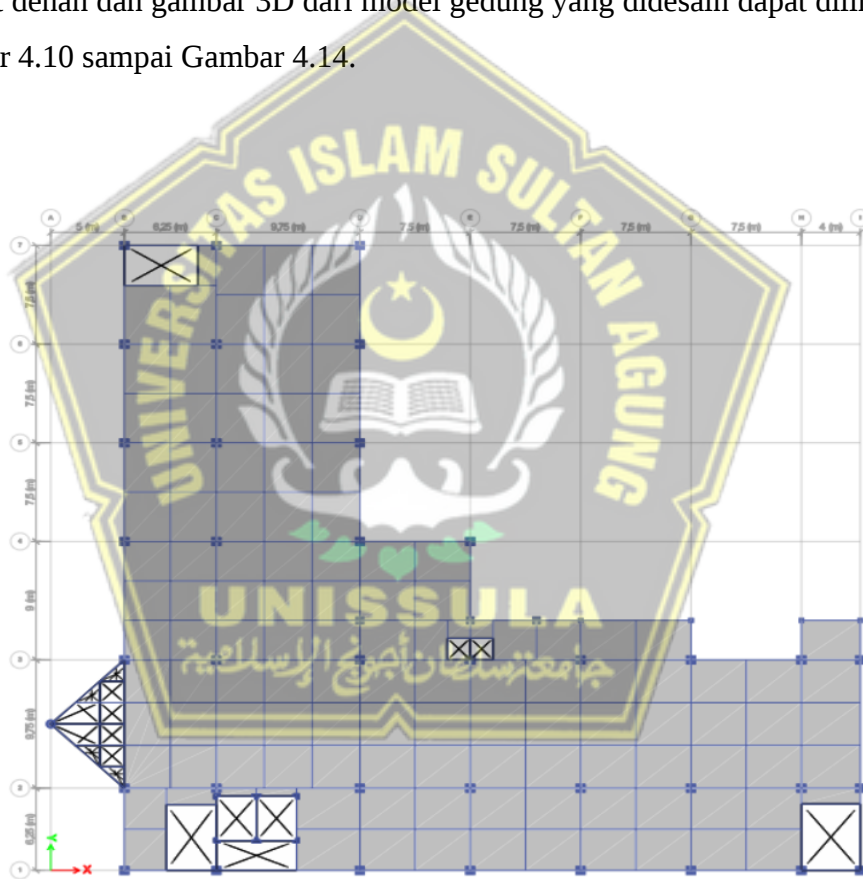


4.3. Pemodelan Struktur

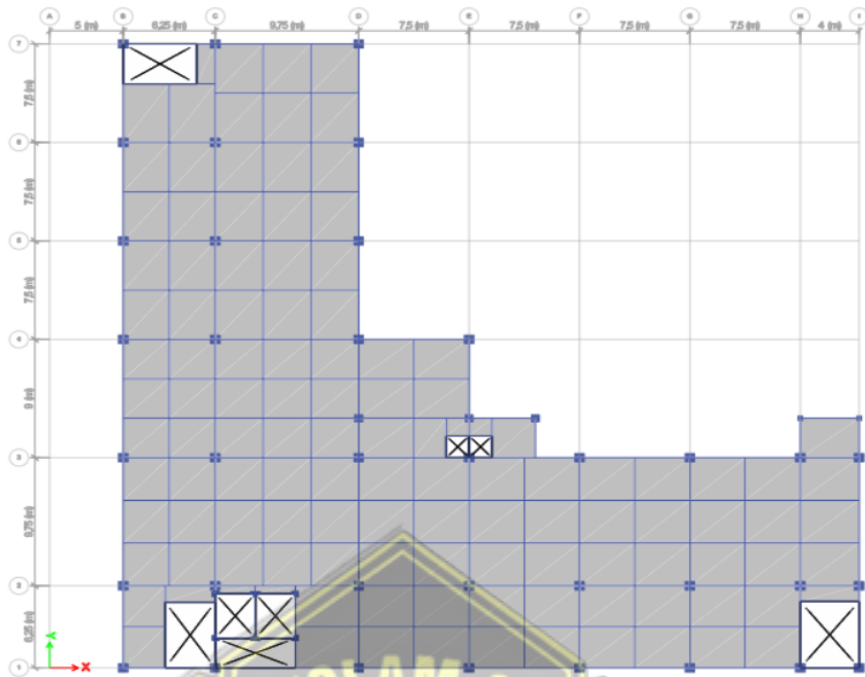
Pemodelan gedung pada akhirnya dirancang sebagai struktur gedung sistem ganda. Pemodelan awal dilakukan dengan bantuan program ETABS dengan dimodelkan sebuah sistem *grid*, dengan *grid* sebagai garis titik berat dan elemen struktur yang dimodelkan.

4.3.1. Permodelan

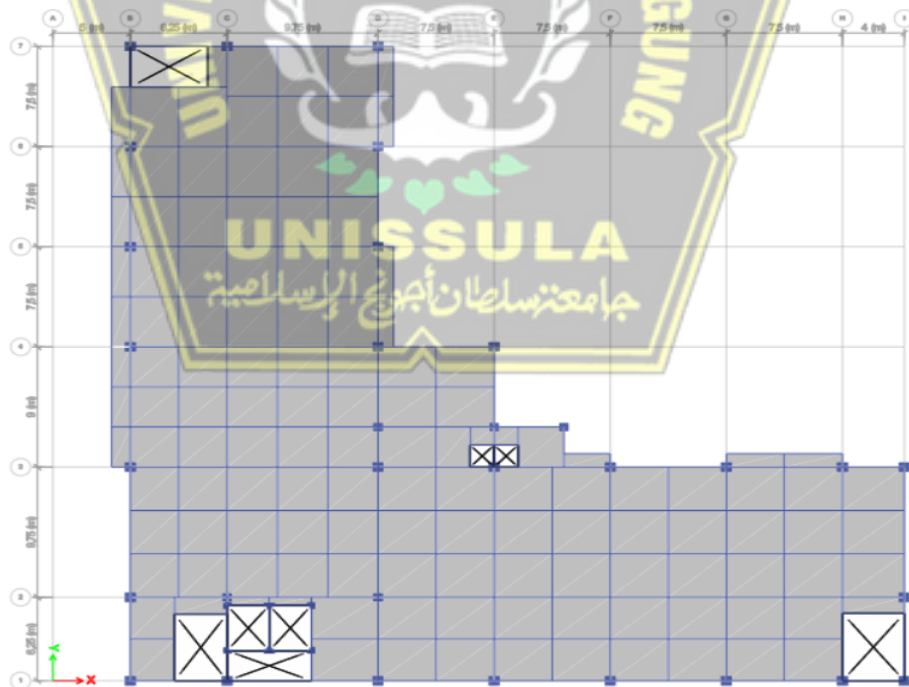
Pada Pemodelan ini, akan dimodelkan gedung tinggi 4 lantai yang direncanakan berdasarkan Sistem Rangka Pemikul Momen Khusus (SRPMK). Berikut denah dan gambar 3D dari model gedung yang didesain dapat dilihat pada Gambar 4.10 sampai Gambar 4.14.



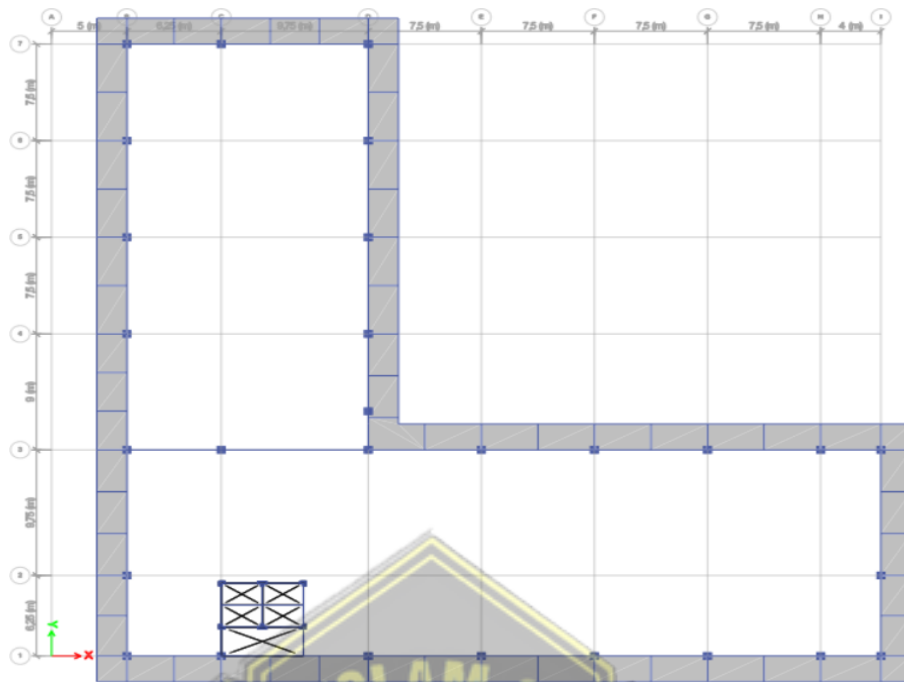
Gambar 4. 10. Denah Lantai 2



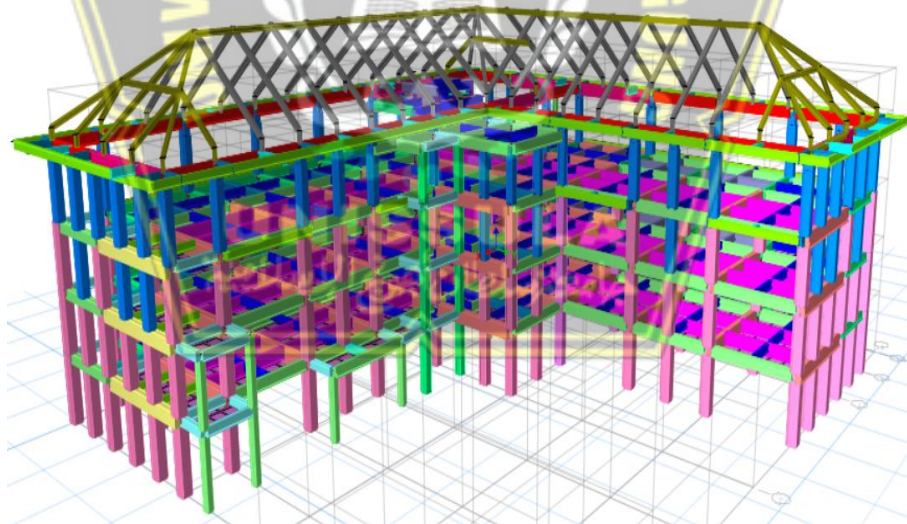
Gambar 4. 11. Denah Lantai 3



Gambar 4. 12. Denah Lantai 4



Gambar 4. 13. Denah Lantai Ring Balok



Gambar 4. 14. Model 3D .

Pada pemodelan, hasil analisis simpangan antar tingkat (*story drift*) arah X ditunjukkan pada Tabel 4.12 dan Gambar 4.15, sedangkan hasil analisis simpangan antar tingkat arah Y ditunjukkan pada Tabel 4.13 dan Gambar 4.16.

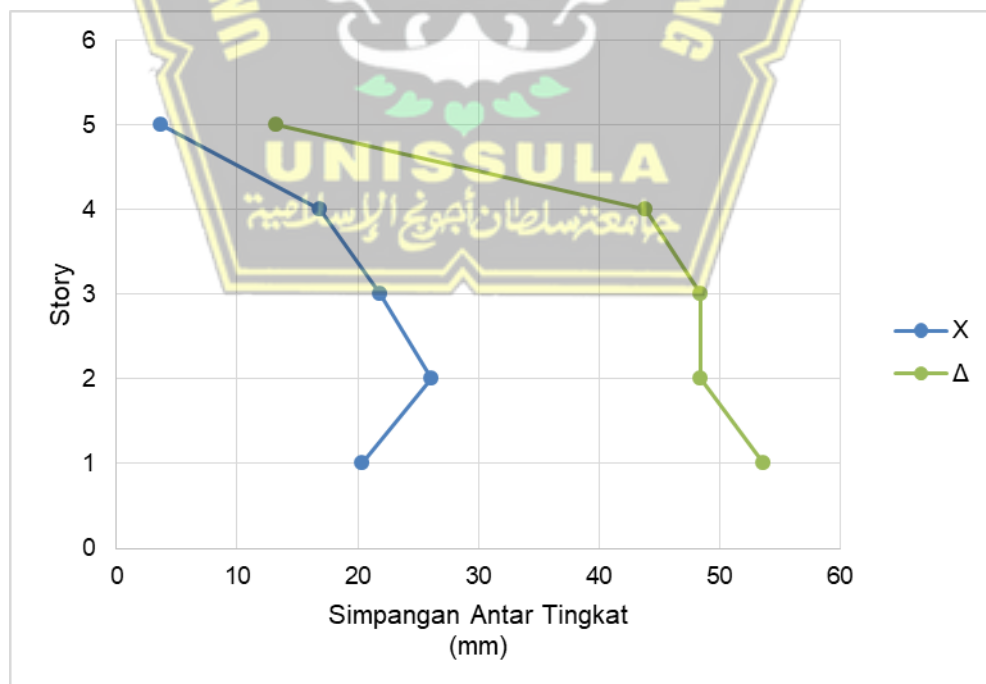
Tabel 4. 12. Pengecekan *Story Drift* Arah X .

Lantai	<i>h</i> (mm)	Simpangan Elastis (δ) (mm)	Perpindahan yang diperbesar (mm)	Simpangan antar tingkat (mm)	Simpangan yang diizinkan (mm)	Ket
Ring Balok	1150	24,223	1,010	3,703	13,269	OK
Ruang Mesin	3800	23,213	4,585	16,812	43,846	OK
4	4200	18,628	5,972	21,897	48,462	OK
3	4200	12,656	7,111	26,074	48,462	OK
2	4650	5,545	5,545	20,332	53,654	OK

Keterangan:

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

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



Gambar 4. 15. Diagram *Story Drift* Arah X.

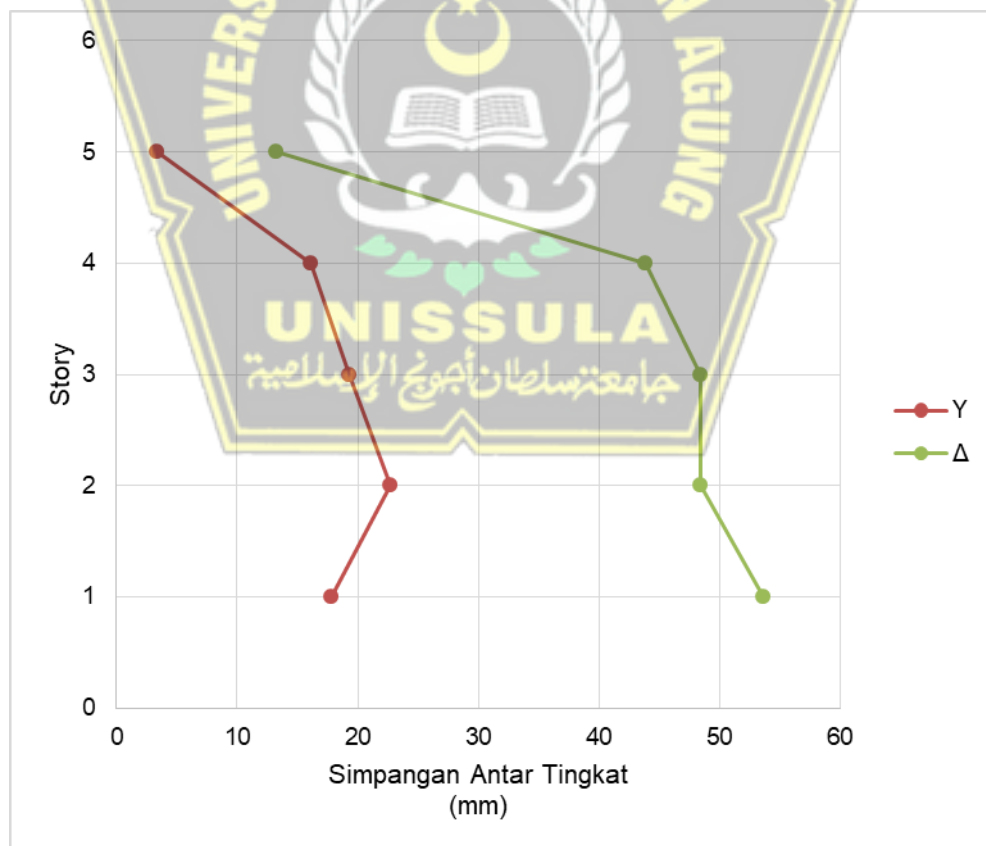
Tabel 4. 13. Pengecekan *Story Drift* Arah Y .

Lantai	<i>h</i> (mm)	Simpangan Elastis (δ) (mm)	Perpindahan yang diperbesar (mm)	Simpangan antar tingkat (mm)	Simpangan yang diizinkan (mm)	Ket
Ring Balok	1150	21,653	0,910	3,337	13,269	OK
Ruang Mesin	3800	20,743	4,408	16,163	43,846	OK
4	4200	16,335	5,263	19,298	48,462	OK
3	4200	11,072	6,203	22,744	48,462	OK
2	4650	4,869	4,869	17,853	53,654	OK

Keterangan:

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

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



Gambar 4. 16. Diagram *Story Drift* Arah Y .

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 perencanaan bangunan tinggi 4 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 dan kolom. 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 4.14 dan Tabel 4.15.

Tabel 4.14. Beban Mati Tambahan pada Lantai

No	Jenis Beban Mati	Berat Jenis (kN/m^3)	Beban Merata (kN/m^2)
1	Pasir + Spesi setebal 4 cm	22	0,88
2	Plafond & Penggantung		0,22
3	Dinding Rebah		0,20
4	ME (Mekanikal & Elektrikal)		0,25
TOTAL			1,55

* Beban dinding bata ringan $0,1 \text{ kN/m}$

Tabel 4. 15. Beban Mati Tambahan pada Atap

No	Jenis Beban Mati	Beban Merata (kN/m^2)
1	Finishing Beton	0,21
2	Plafond & Penggantung	0,2
3	ME (Mekanikal & Elektrikal)	0,25
4	Beban Waterproofing	0,1
TOTAL		0,76

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 dapat dilihat pada Tabel 4.16.

No	Jenis Ruangan	Beban Merata (kN/m ²)
1	Ruang Operasi/Laboratorium	2,87
2	Ruang Pasien	1,92
3	Koridor	3,83
4	Lobby	4,79
5	Atap	0,96

Tabel 4. 16. Beban Hidup

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 4.17.

Tabel 4. 17. Nilai N -SPT

Kedalaman	Tebal (d_i)	N -SPT	d_i / N_i
-2,5	2,5	24	9,6
-5	2,5	33	13,2
-7,5	2,5	36	14,4
-10	2,5	39	15,6
-12,5	2,5	53	21,2
-15	2,5	60	24
-17,5	2,5	60	24
-20	2,5	60	24
Total	20		146

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

$$N = \frac{\sum_{i=1}^n d_i}{\sum_{i=1}^n \frac{d_i}{N_i}} = \frac{146}{20} = 18,25$$

Dari hasil perhitungan yang telah dilakukan, didapatkan nilai tahanan penetrasi standar lapangan rata-rata (N) sebesar 17,617. Berdasarkan SNI 1726:2019 Tabel 5, nilai $15 < N < 50$ termasuk ke dalam kategori **Tanah Sedang (SD)**.

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 Purwokerto Banyumas dapat dilihat pada Tabel 4.18.

Tabel 4. 18. Data Parameter Respons Spektra Terpetakan

Variabel	Nilai
F_{PGA}	0,372493
S_s (g)	0,819837
S_1 (g)	0,393913
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:

$$F_a = 1,24413$$

$$F_v = 1,906087$$

$$S_{MS} = F_a \times S_s = 1,24413 \times 0,819837 = 1,019984$$

$$S_{M1} = F_v \times S_1 = 1,906087 \times 0,3939 = 0,750832$$

5. Parameter Respon 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.

$$S_{DS} = \frac{2}{3} \times S_{MS} = \frac{2}{3} \times 1,019984 = 0,6800$$

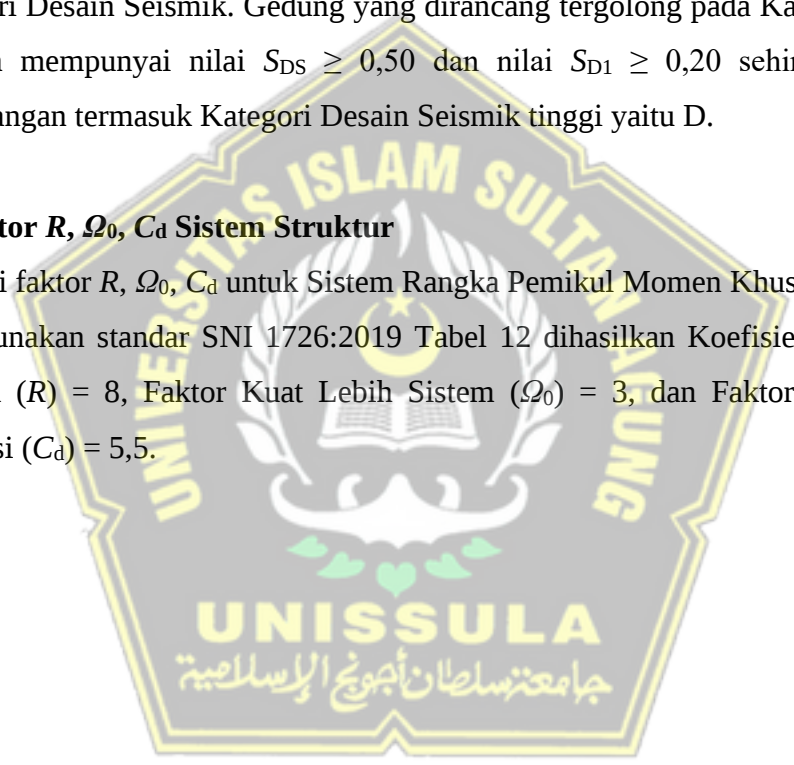
$$S_{D1} = \frac{2}{3} \times S_{M1} = \frac{2}{3} \times 0,750832 = 0,5006$$

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.



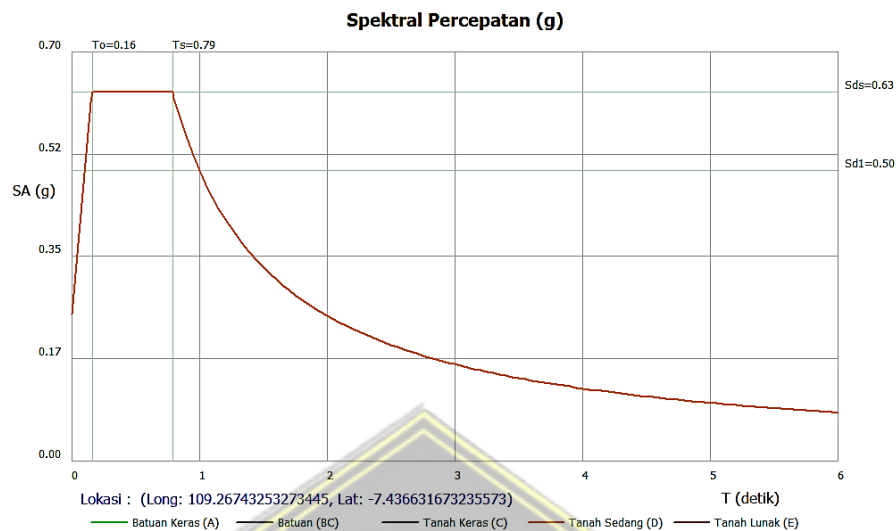
8. Rekap Analisis Beban Gempa

Berdasarkan SNI 1726:2019, pembebanan gempa untuk bangunan Sistem Rangka Pemikul Momen Khusus (SRPMK) dan Sistem Ganda yang terletak di Purwokerto Banyumas memiliki parameter seperti pada Tabel 4.19.

Tabel 4. 19. Parameter Respons Spektra

Parameter Respons Spektra		
Kategori Risiko		IV
Faktor Keutamaan	I_e	1,5
Klasifikasi Situs		SD (Tanah Sedang)
Percepatan Gempa MCE_R Terpetakan untuk Periode Pendek	S_s	0,819837
Percepatan Gempa MCE_R Terpetakan untuk Periode 1 Detik	S_1	0,393913
Faktor Amplifikasi Periode Pendek	F_a	1,24413
Faktor Amplifikasi Periode 1 Detik	F_v	1,906087
Percepatan pada Periode Pendek	S_{MS}	1,019984
Percepatan pada Periode 1 Detik	S_{M1}	0,750832
Percepatan Desain pada Periode Pendek	S_{DS}	0,6800
Percepatan Desain pada Periode 1 Detik	S_{D1}	0,5006
Parameter Periode	T_0	0,1472
	T_s	0,7361
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

Dari parameter respons spektra di atas, spektrum respons desain dapat dilihat pada Gambar 4.17.



Gambar 4. 17. 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:

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

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

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

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

$$S_{DS} (g) = 0,680 \text{ (Purwokerto Banyumas; Tanah Sedang)}$$

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

Berikut kombinasi pembebanan yang digunakan dapat dilihat pada Tabel 4.20.

Tabel 4. 20. 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 4.21.

Tabel 4. 21. Rekapitulasi Rasio Partisipasi Modal Massa

Case	Mode	Period	UX	UY	RZ	Keterangan
		(sec)				
Modal	1	0,677	0,926	0,022	0,051	Arah X
Modal	2	0,627	0,043	0,894	0,063	Arah Y
Modal	3	0,523	0,033	0,085	0,882	Rotasi
Modal	4	0,206	0,948	0,03	0,023	Arah X
Modal	5	0,201	0,041	0,922	0,037	Arah Y
Modal	6	0,176	0,014	0,052	0,934	Rotasi
Modal	7	0,149	0,019	0,708	0,273	Arah Y
Modal	8	0,115	0,752	0,229	0,019	Arah X
Modal	9	0,114	0,233	0,747	0,019	Arah X
Modal	10	0,106	0,601	0,047	0,352	Arah X
Modal	11	0,101	0,007	0,12	0,873	Rotasi
Modal	12	0,097	0,003	0,023	0,974	Rotasi
Modal	13	0,07	0,716	0,172	0,111	Arah X
Modal	14	0,067	0,201	0,777	0,022	Arah Y
Modal	15	0,066	0,798	0,164	0,038	Arah X
Modal	16	0,06	0,019	0,036	0,945	Rotasi
Modal	17	0,058	0,004	0,034	0,961	Rotasi
Modal	18	0,056	0,113	0,331	0,556	Rotasi
Modal	19	0,051	0,119	0,622	0,258	Rotasi
Modal	20	0,034	0,134	0,269	0,597	Rotasi

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

$$T_{\min} = C_t \times h_n^x = 0,0488 \times (24)^{0,75} = 0,5391 \text{ detik}$$

- Periode Maksimum

$$T_{\max} = C_u \times T_{\min} = 1,4 \times 0,5291 = 0,741 \text{ detik}$$

- Periode arah X dan Y pada ETABS

$$- T_a \text{ dari ETABS arah X } (T_{cx}) = 0,749 \text{ detik}$$

$$- T_a \text{ dari ETABS arah Y } (T_{cy}) = 0,7289 \text{ detik}$$

- 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:

$$- T \text{ arah X } (T_x) = 0,749 \text{ detik}$$

$$- T \text{ arah Y } (T_y) = 0,7289 \text{ detik}$$

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

$$• C_s \text{ arah X} = \frac{0,6800}{0,856 \times \left(\frac{8}{1,5} \right)} = 0,1246$$

$$• C_s \text{ arah Y} = \frac{0,6800}{0,856 \times \left(\frac{8}{1,5} \right)} = 0,1254$$

$$• C_{s \min} = 0,044 \times 0,6800 \times 1,5 = 0,0449$$

$$• C_{s \max} = \frac{0,6800}{\left(\frac{7}{1,5} \right)} = 0,1572$$

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 4.22.

Tabel 4. 22. Koefisien Respons Seismik

C_s arah X	0,1246	C_s arah Y	0,1254
C_s minimum	0,0464	C_s minimum	0,0464
C_s maksimum	0,1507	C_s maksimum	0,1507
C_s yang dipakai	0,1507	C_s yang dipakai	0,1507

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 4.23.

Tabel 4. 23. Output Gaya Geser Dasar Statik (V)

Lantai	Elevasi (m)	V_x (kN)	V_y (kN)
Ring Balok	18,00	471,7088	471,6875
Ruang Mesin	16,85	842,0413	842,0033
4	13,05	2614,7463	2614,6282
3	8,85	3809,584	3809,4121
2	4,65	4450,8019	4450,6011

Sedangkan perhitungan gaya geser dinamik yang dihasilkan oleh ETABS ditunjukkan pada Tabel 4.24.

Tabel 4. 24. Output Gaya Geser Dasar Dinamik (V_I)

Lantai	Elevasi (m)	V_{Ix} (kN)	V_{Iy} (kN)
Ring Balok	18,00	536,929	536,558
Ruang Mesin	16,85	933,776	925,021
4	13,05	2686,188	2663,282
3	8,85	3863,409	3852,105
2	4,65	4450,798	4450,608

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 di analisis, 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:

$$\eta_x = \frac{V_X}{V_{IX}} = \frac{4450,802}{3512,935} = 1,267$$

$$\eta_y = \frac{V_Y}{V_{IY}} = \frac{4450,601}{3483,053} = 1,2945$$

Maka, diperoleh rekapitulasi hasil pengecekan faktor skala pada Tabel 4.25 sebagai berikut:

Tabel 4. 25. Rekapitulasi Hasil Pengecekan Faktor Skala

W_t (berat total bangunan)	34032	kN
V_X	36151,331	kN
V_Y	36363,736	kN
V_{IX}	27252,416	kN
V_{IY}	27426,491	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	1,267	
Faktor skala arah Y	1,2945	

- Faktor pembesaran gempa arah X = $\frac{21487,174}{15420,502} = 1,393$
- Faktor pembesaran gempa arah Y = $\frac{22073,673}{16963,704} = 1,301$

Selanjutnya gempa dibesarkan dari kedua arahnya maka didapatkan nilai gaya geser dasar dinamik terkoreksi dapat dilihat pada Tabel 4.26.

Tabel 4. 26. Output Gaya Geser Dinamik Terkoreksi

Lantai	Elevasi (m)	V_{Spec-X} (kN)	V_{Spec-Y} (kN)
Ring Balok	18,00	6552,49	6573,52
Ruang Mesin	16,85	14511,51	14577,12
4	13,05	20675,99	20788,94
3	8,85	25652,91	25807,84
2	4,65	29708,69	29894,70

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 4.39.

Tabel 4. 27. Gaya Geser Desain

Lantai	Elevasi (m)	Statik		Dinamik Terkoreksi		Gaya Geser Desain	
		V_x (kN)	V_y (kN)	V_{Spec-X} (kN)	V_{Spec-Y} (kN)	V_x (kN)	V_y (kN)
Ring Balok	18,00	5654,10	5680,84	6552,49	6573,52	6552,49	6573,52
Ruang Mesin	16,85	13433,70	13499,83	14511,51	14577,12	14511,51	14577,12
4	13,05	20088,08	20190,48	20675,99	20788,94	20675,99	20788,94
3	8,85	25604,85	25739,85	25652,91	25807,84	25652,91	25807,84
2	4,65	29967,33	30130,56	29708,69	29894,70	29967,33	30130,56

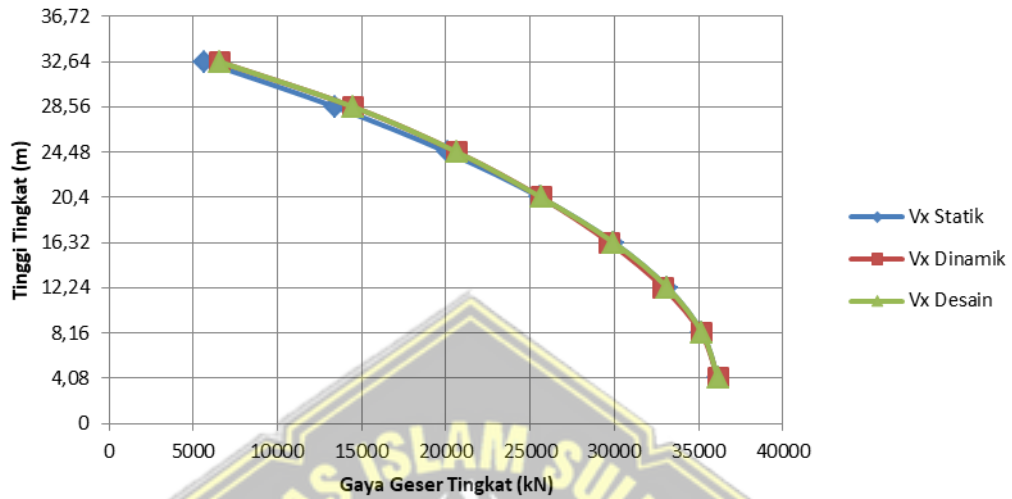
Keterangan :

V_{Spec-X} = Gaya geser dinamik arah X

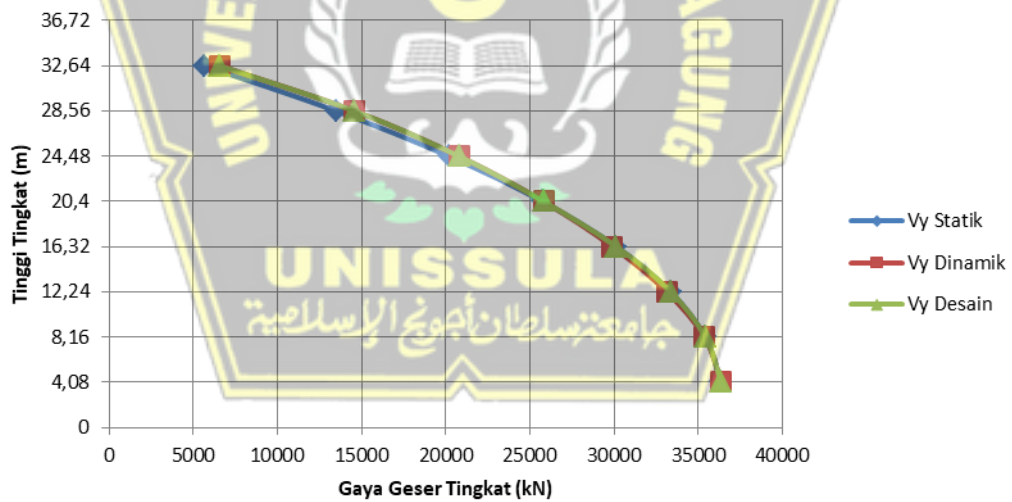
V_{Spec-Y} = Gaya geser dinamik arah Y

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 4.18. dan Gambar 4.19.



Gambar 4. 18. Diagram Gaya Geser Gempa Arah X



Gambar 4. 19. Diagram Gaya Geser Gempa Arah Y

4.5.4. Pengecekan Simpangan Antar Tingkat (*Story 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 $= (0,015) \times h$, 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 4.28 dan Tabel 4.29.

Tabel 4. 28. Pengecekan *Story Drift* Arah X

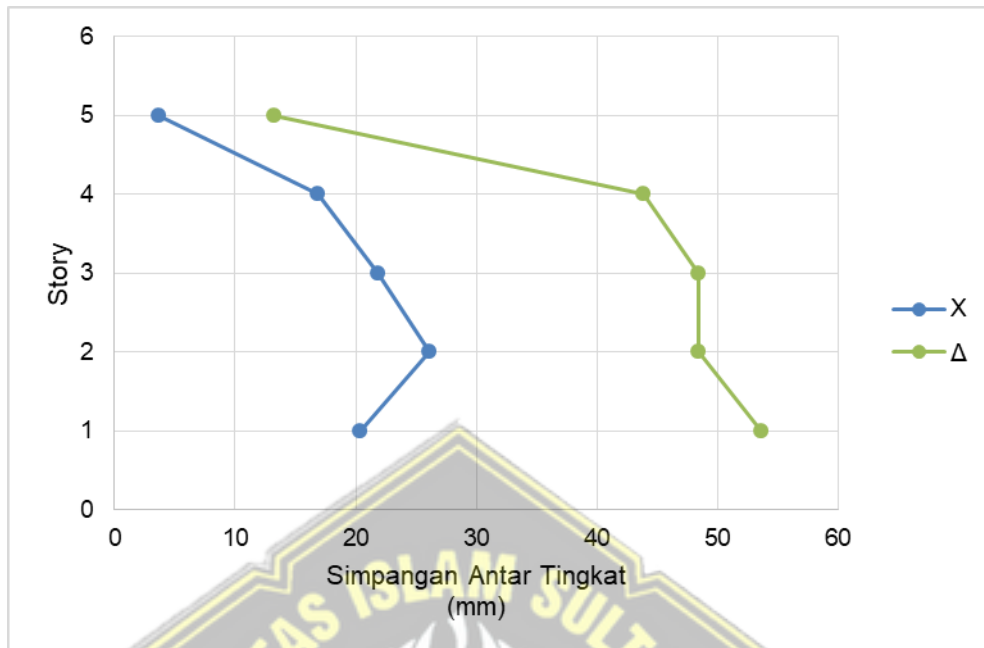
Lantai	h (mm)	Simpangan Elastis (δ) (mm)	Perpindahan yang diperbesar (mm)	Simpangan antar tingkat (mm)	Simpangan yang diizinkan (mm)	Ket
Ring Balok	1150	24,223	1,010	3,703	13,269	OK
Ruang Mesin	3800	23,213	4,585	16,812	43,846	OK
4	4200	18,628	5,972	21,897	48,462	OK
3	4200	12,656	7,111	26,074	48,462	OK
2	4650	5,545	5,545	20,332	53,654	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 4.20.



Gambar 4. 20. Diagram Story Drift Arah X

Tabel 4. 29. Pengecekan *Story Drift* Arah Y

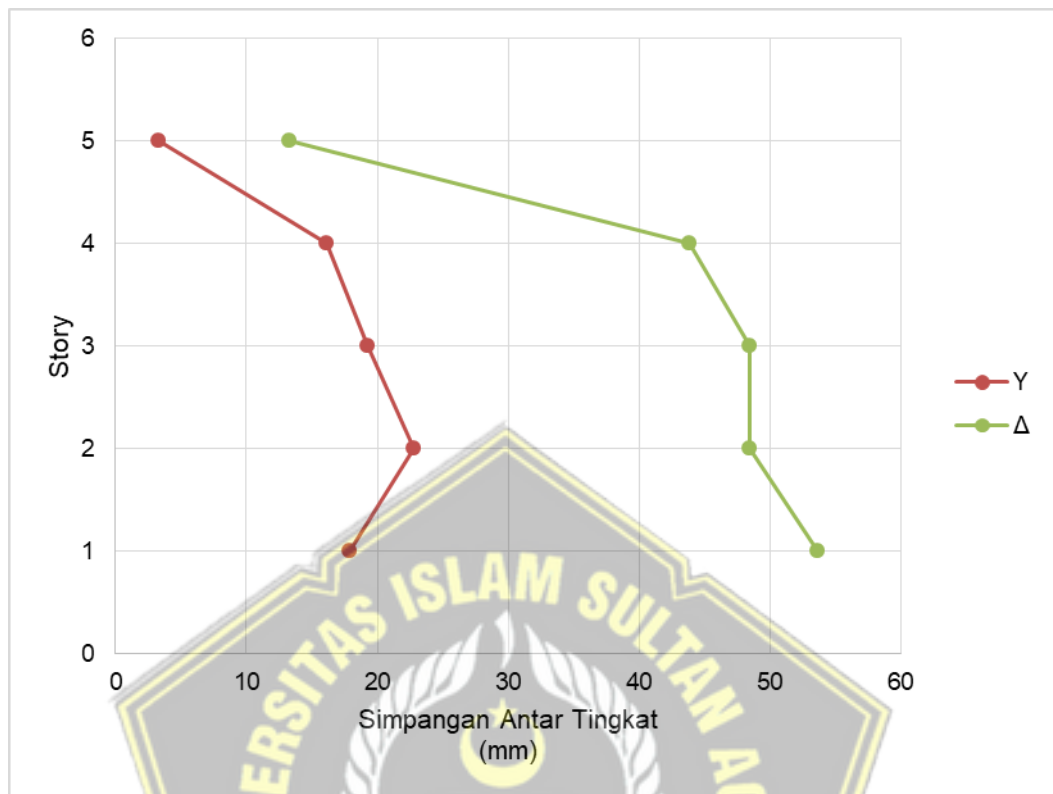
Lantai	h (mm)	Simpangan Elastis (δ) (mm)	Perpindahan yang diperbesar (mm)	Simpangan antar tingkat (mm)	Simpangan yang diizinkan (mm)	Ket
Ring Balok	1150	21,653	0,910	3,337	13,269	OK
Ruang Mesin	3800	20,743	4,408	16,163	43,846	OK
4	4200	16,335	5,263	19,298	48,462	OK
3	4200	11,072	6,203	22,744	48,462	OK
2	4650	4,869	4,869	17,853	53,654	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 Y dapat dilihat pada Gambar 4.21.



Gambar 4. 21. Diagram *Story Drift* Arah Y

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 4.30.

Tabel 4. 30. Pengecekan P-Delta Arah X

Lantai	h_{sx} (mm)	Δ_i (mm)	P (kN)	V_x (kN)	θ	θ_{max}	Cek
Ring Balok	1150	3,703	5016,90	760,86	0,0077	0,0909	STABIL
Ruang Mesin	3800	16,812	7007,72	1138,58	0,0100	0,0909	STABIL
4	4200	21,897	24408,58	2682,45	0,0120	0,0909	STABIL
3	4200	26,074	42825,79	3816,92	0,0186	0,0909	STABIL
2	4650	20,332	61614,86	4391,85	0,0142	0,0909	STABIL

Dari pengecekan P-Delta arah X menghasilkan diagram stabilitas P-Delta arah X dapat dilihat di Gambar 4.22.



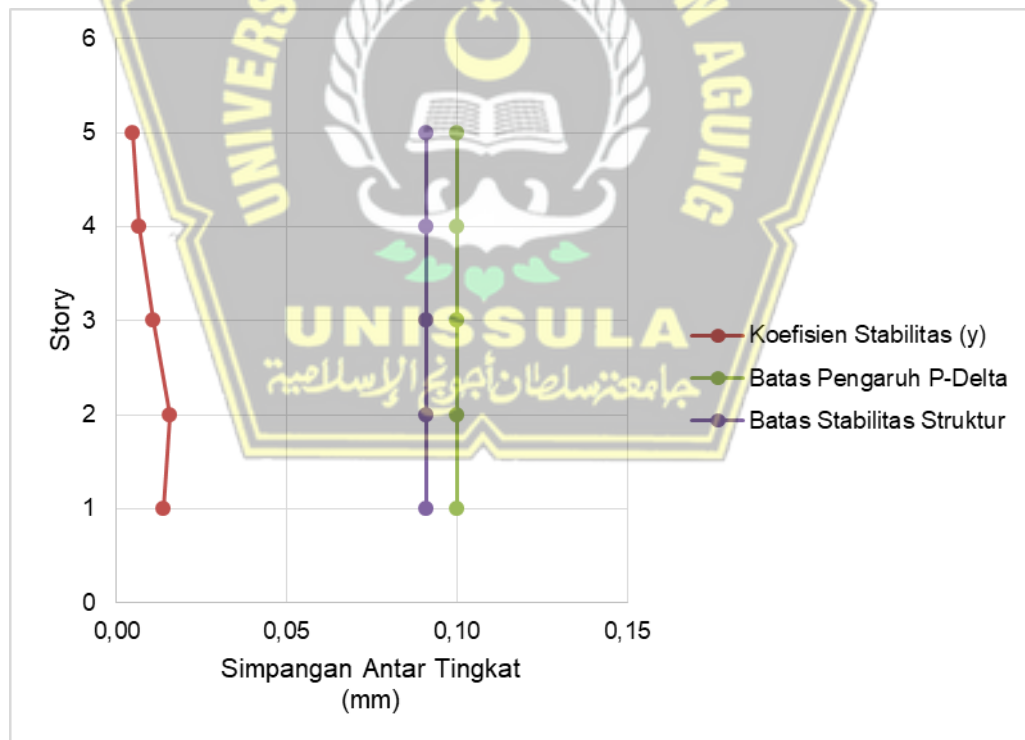
Gambar 4. 22. Diagram P-Delta Arah X

Sedangkan untuk hasil dari pengecekan P-Delta arah Y dapat dilihat pada Tabel 4.31 sebagai berikut:

Tabel 4. 31. Pengecekan P-Delta Arah Y

Lantai	h_{sx} (mm)	Δ_i (mm)	P (kN)	V_y (kN)	θ	θ_{max}	Cek
Ring Balok	1150	3,337	5016,90	823,2882	0,0048	0,0909	STABIL
Ruang Mesin	3800	16,163	7007,72	1232,6561	0,0066	0,0909	STABIL
4	4200	19,298	24408,58	2849,3739	0,0107	0,0909	STABIL
3	4200	22,744	42825,79	4047,1827	0,0156	0,0909	STABIL
2	4650	17,853	61614,86	4663,2821	0,0138	0,0909	STABIL

Kemudian dari pengecekan P-Delta arah Y menghasilkan diagram stabilitas P-Delta arah Y dapat dilihat pada Gambar 4.23.



Gambar 4. 23. Diagram P-Delta Arah Y

4.5.6. Pengecekan Eksentrisitas dan Torsi

4.5.6.1. Pengecekan Eksentrisitas

Berdasarkan SNI 1726:2019 Pasal 7.8.4.1 dan Pasal 7.8.4.2, torsi terdiri dari torsi bawaan dan torsi tidak terduga. Nilai eksentrisitas dari torsi bawaan dapat dilihat dari program ETABS. Data eksentrisitas torsi ditunjukkan pada Tabel 4.32.

Tabel 4. 32. Data Eksentrisitas Torsi Bawaan dari ETABS

Lantai	XCM	YCM	XCR	YCR	e_{ox}	e_{oy}
	m	m	m	m	m	m
Ring Balok	23,83	17,84	23,83	17,84	1,07	1,27
Ruang Mesin	20,38	10,71	22,69	15,49	0,73	1,15
4	23,51	18,14	23,33	17,56	0,68	0,93
3	24,08	17,94	23,66	17,73	0,63	0,66
2	24,17	17,87	23,83	17,77	0,57	0,39

Adapun eksentrisitas dari torsi tidak terduga adalah eksentrisitas tambahan sebesar 5% dari dimensi arah tegak lurus panjang bentang struktur bangunan tempat gaya gempa bekerja. Perhitungan eksentrisitas tidak terduga dapat dilihat pada Tabel 4.47.

Tabel 4. 7. Data Eksentrisitas Torsi Tidak Terduga

Lantai	Panjang bentang total sumbu x (L_x)	Panjang bentang total sumbu y (L_y)	$0,05 L_x$	$0,05 L_y$
	(m)	(m)	(m)	(m)
Ring Balok	50,00	47,50	2,50	2,375
Ruang Mesin	50,00	47,50	2,50	2,375
4	50,00	47,50	2,50	2,375
3	50,00	47,50	2,50	2,375
2	55,00	47,50	2,75	2,375

Berdasarkan Pasal 7.8.4.3 SNI 1726:2019, eksentrisitas torsi tidak terduga harus dikalikan dengan faktor pembesaran momen torsi tidak terduga (A). Faktor pembesaran torsi tidak terduga (A) ditentukan berdasarkan Persamaan 4.9.

$$A = \left(\frac{\delta_{\max}}{1,2 \times \delta_{\text{avg}}} \right)^2 \geq 1 \dots\dots\dots (4.9)$$

$$\delta_{\text{avg}} = \frac{\delta_{\max} + \delta_{\min}}{2} \dots\dots\dots (4.10)$$

Nilai-nilai $\delta_{\max}$, $\delta_{\min}$, dan δ_{avg} didapat dari beban *envelope* dan merupakan nilai simpangan total bukan simpangan antar tingkat. Perhitungan A_x dan A_y dapat dilihat pada Tabel 4.34 dan Tabel 4.35.

Tabel 4. 34. Nilai dari $\delta_{\max}$, $\delta_{\min}$, δ_{avg} dan A_x untuk Gempa Arah X

Lantai	$\delta_{\max}$ (mm)	$\delta_{\min}$ (mm)	δ_{avg} (mm)	$1,2 \delta_{\text{avg}}$ (mm)	$A_x =$ $(\delta_{\max}/1,2\delta_{\text{avg}})^2$	Kontrol Torsi
Ring Balok	69,284	67,836	68,560	82,272	0,918	Tanpa ketidakberaturan torsi
Ruang Mesin	60,390	59,221	59,806	71,767	0,917	Tanpa ketidakberaturan torsi
4	50,317	49,420	49,869	59,842	0,917	Tanpa ketidakberaturan torsi
3	39,829	39,180	39,505	47,405	0,917	Tanpa ketidakberaturan torsi
2	29,164	28,733	28,949	34,738	0,916	Tanpa ketidakberaturan torsi

Tabel 4. 35. Nilai dari $\delta_{\max}$, $\delta_{\min}$, δ_{avg} dan A_y untuk Gempa Arah Y

Lantai	$\delta_{\max}$ (mm)	$\delta_{\min}$ (mm)	δ_{avg} (mm)	$1,2 \delta_{\text{avg}}$ (mm)	$A_y =$ $(\delta_{\max}/1,2\delta_{\text{avg}})^2$	Kontrol Torsi
Ring Balok	68,544	66,208	67,376	80,851	0,921	Tanpa ketidakberaturan torsi
Ruang Mesin	59,841	57,964	58,903	70,683	0,920	Tanpa ketidakberaturan torsi
4	49,933	48,500	49,217	59,060	0,919	Tanpa ketidakberaturan torsi
3	39,592	38,562	39,077	46,892	0,919	Tanpa ketidakberaturan torsi
2	29,037	28,360	28,699	34,438	0,918	Tanpa ketidakberaturan torsi

Dari Tabel 4.34, nilai faktor amplifikasi (A) kurang dari satu sehingga untuk menghitung nilai eksentrisitas desain menggunakan nilai faktor amplifikasi (A) sebesar satu. Eksentrisitas desain merupakan gabungan eksentrisitas torsi bawaan dan torsi tidak terduga dihitung sesuai Persamaan 4.11 dan Persamaan 4.12.

$$e_{dx} = e_{ox} - 0,05 L_x \times A_y \dots\dots\dots (4.11)$$

$$e_{dy} = e_{oy} + 0,05 L_y \times A_x \dots\dots\dots (4.12)$$

Hasil perhitungan eksentrisitas desain pada arah sumbu X dan arah sumbu Y dapat dilihat pada Tabel 4.36 dan 4.37.

Tabel 4. 36. Perhitungan Eksentrisitas Desain pada Arah Sumbu X

Lantai	e_{ox}	$0,05 L_x$	A_y	e_{dx}	Eksentrisitas, x
	(m)	(m)			(m)
Ring Balok	1,069	3,600	1,000	2,532	0,035
Ruang Mesin	0,726	3,600	1,000	2,874	0,040
4	0,681	3,600	1,000	2,919	0,041
3	0,630	3,600	1,000	2,970	0,041
2	0,573	3,600	1,000	3,027	0,042

Tabel 4. 37. Perhitungan Eksentrisitas Desain pada Arah Sumbu Y

Lantai	e_{oy}	$0,05 L_y$	A_x	e_{dy}	Eksentrisitas, y
	(m)	(m)			(m)
Ring Balok	1,266	3,100	1,000	4,366	0,070
Ruang Mesin	1,154	3,100	1,000	4,254	0,069
4	0,931	3,100	1,000	4,031	0,065
3	0,657	3,100	1,000	3,757	0,061
2	0,386	3,100	1,000	3,486	0,056

4.5.6.2. Perhitungan Ketidakberaturan Torsi

Berdasarkan SNI 1726:2019, tipe dari ketidakberaturan torsi yang ditentukan berdasarkan defleksi maksimum (δ_{max}), defleksi minimum (δ_{min}), dan defleksi rata-rata (δ_{avg}). Pengecekan ketidakberaturan torsi arah X dan arah Y dapat dilihat pada Tabel 4.38 dan Tabel 4.39.

Tabel 4. 38. Pengecekan Ketidakberaturan Torsi pada Arah X

lantai	δ_{max} x	max story drift	max story drift x Cd	δ_{min}	min story drift	min story drift x Cd	δ_{avg}	1,2 δ_{avg}	1,4 δ_{avg}	Cek x
	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	
Ring Balok	69,28	8,89	48,9 2	67,84	8,62	47,3 8	48,1 5	57,78	67,41	Tanpa torsi
Ruang Mesin	60,39	10,0 7	55,4 0	59,22	9,80	53,9 1	54,6 5	65,58	76,52	Tanpa Torsi
4	50,32	10,4 9	57,6 8	49,42 4	10,2 4	56,3 2	57,0 0	68,40	79,80	Tanpa Torsi
3	39,83	10,6 7	58,6 6	39,18	10,4 5	57,4 6	58,0 6	69,67	81,28	Tanpa Torsi
2	29,16	10,0 6	55,3 2	28,73	9,88	54,3 4	54,8 3	65,79	76,76	Tanpa Torsi

Tabel 4. 39. Pengecekan Ketidakberaturan Torsi pada Arah Y

lantai	δ_{max}	max story drift	max story drift x Cd	δ_{min}	min story drift	min story drift x Cd	δ_{avg}	1,2 δ_{avg}	1,4 δ_{avg}	Cek y
	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	
Ring Balok	68,54	8,70	47,87	66,21	8,24	45,34	46,60	55,93	65,25	Tanpa torsi
Ruang Mesin	59,84	9,91	54,49	57,96	9,46	52,05	53,27	63,92	74,58	Tanpa Torsi
4	49,93	10,34	56,88	48,50	9,94	54,66	55,77	66,92	78,07	Tanpa Torsi
3	39,59	10,56	58,05	38,56	10,20	56,11	57,08	68,50	79,91	Tanpa Torsi
2	29,04	9,98	54,87	28,36	9,69	53,29	54,08	64,89	75,71	Tanpa Torsi

4.5.7. Pengecekan Ketidakberaturan Horizontal dan Vertikal

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

1. Ketidakberaturan Horizontal

a) Ketidakberaturan torsi 1a dan 1b

Hasil pengecekan ketidakberaturan torsi 1a dan 1b arah X dan arah Y dapat dilihat pada Tabel 4.40 dan Tabel 4.41.

Tabel 4. 40. Cek Ketidakberaturan Torsi 1a dan 1b Arah X

Lantai	Gaya Lateral	$\delta_{\max}$	δ_{avg}	$\delta_{\max} / \delta_{\text{avg}}$	Status			
					Cek	1a	Cek	1b
Ring Balok	EX	6,592	5,928	1,112	< 1,2	OK	< 1,4	OK
Ruang Mesin	EX	7,491	6,829	1,097	< 1,2	OK	< 1,4	OK
4	EX	7,818	7,164	1,091	< 1,2	OK	< 1,4	OK
3	EX	7,969	7,348	1,085	< 1,2	OK	< 1,4	OK
2	EX	7,528	6,972	1,080	< 1,2	OK	< 1,4	OK

Tabel 4. 41. Cek Ketidakberaturan Torsi 1a dan 1b Arah Y

Lantai	Gaya Lateral	$\delta_{\max}$	δ_{avg}	$\delta_{\max} / \delta_{\text{avg}}$	Status			
					Cek	1a	Cek	1b
Ring Balok	EY	6,241	5,865	8,005	< 1,2	OK	< 1,4	OK
Ruang Mesin	EY	7,169	6,749	1,062	< 1,2	OK	< 1,4	OK
4	EY	7,526	7,089	1,062	< 1,2	OK	< 1,4	OK
3	EY	7,727	7,283	1,061	< 1,2	OK	< 1,4	OK
2	EY	7,337	6,918	1,061	< 1,2	OK	< 1,4	OK

Dari hasil pengecekan ketidakberaturan torsi 1a dan 1b, tidak didapat simpangan antar tingkat maksimum > 1,2 kali simpangan antar lantai tingkat rata-rata (torsi 1a) dan tidak didapat simpangan antar tingkat maksimum < 1,4 kali simpangan antar lantai tingkat rata-rata (torsi 1b).

b) Ketidakberaturan Sudut Dalam

Struktur mengalami ketidakberaturan sudut dalam dikarenakan terdapat bukaan pada bagian tengah denah struktur dimana dimensi proyeksi denah struktur dari lokasi sudut dalam lebih besar dari 15% dimensi denah struktur. Untuk mengatasi hal tersebut, gaya desain diafragma harus ditingkatkan 25% untuk elemen-elemen sistem pemikul gaya seismik.

c) Ketidakberaturan Diskontinuitas Diafragma

Luas bukaan total adalah 717,85 m² dan luas bruto 3574,15 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.

d) Ketidakberaturan Akibat Pergeseran Tegak Turus Terhadap Bidang

Struktur tidak mengalami ketidakberaturan akibat pergeseran tegak turus terhadap bidang dikarenakan tidak ada dinding geser didesain menerus dari lantai 1 sampai lantai 4.

e) Ketidakberaturan Sistem Non Paralel

Struktur tidak mengalami ketidakberaturan sistem non paralel dikarenakan tidak ada 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 4.42 dan Tabel 4.43.

Tabel 4. 42. Cek Ketidakberaturan Kekakuan Tingkat Lunak 1a Arah X

Lantai	Load Case	Shear X	Story drift m	Kekakuan	Cek 70%	Cek 80%
		kN		kN/m		
Ring Balok	EX	6552,49	0,006	1105258		
Ruang Mesin	EX	14511,51	0,007	2124906	Tidak ada	
4	EX	20675,99	0,007	2886062	Tidak ada	
3	EX	25652,90	0,007	3491320	Tidak ada	Tidak ada
2	EX	29967,32	0,007	4298523	Tidak ada	Tidak ada

Tabel 4. 43. Cek Ketidakberaturan Kekakuan Tingkat Lunak 1a Arah Y

Lantai	Load Case	Shear Y	Story drift	Kekakuan	Cek 70%	Cek 80%
		kN	m	kN/m		
Ring Balok	EY	6573,52	0,006	1120831		
Ruang Mesin	EY	14577,12	0,007	2159780	Tidak ada	
4	EY	20788,94	0,007	2932525	Tidak ada	
3	EY	25807,84	0,007	3543368	Tidak ada	Tidak ada
2	EY	30130,56	0,007	4355246	Tidak ada	Tidak ada

Ketidakberaturan 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 1b arah X dan arah Y dapat dilihat pada Tabel 4.44 dan Tabel 4.45.

Tabel 4. 44. Cek Ketidakberaturan Kekakuan Tingkat Lunak 1b Arah X

Lantai	Load Case	Shear X	Story drift	Kekakuan	Cek 60%	Cek 70%
		kN	m	kN/m		
Ring Balok	EX	6552,49	0,006	1105258		
Ruang Mesin	EX	14511,51	0,007	2124906	Tidak ada	
4	EX	20675,99	0,007	2886062	Tidak ada	
3	EX	25652,90	0,007	3491320	Tidak ada	Tidak ada
2	EX	29967,32	0,007	4298523	Tidak ada	Tidak ada

Tabel 4. 45. Cek Ketidakberaturan Kekakuan Tingkat Lunak 1b Arah Y

Lantai	Load Case	Shear Y	Story drift	Kekakuan	Cek 60%	Cek 70%
		kN	m	kN/m		
Ring Balok	EY	6573,52	0,006	1120831		
Ruang Mesin	EY	14577,12	0,007	2159780	Tidak ada	
4	EY	20788,94	0,007	2932525	Tidak ada	
3	EY	25807,84	0,007	3543368	Tidak ada	Tidak ada
2	EY	30130,56	0,007	4355246	Tidak ada	Tidak ada

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 4.46.

Tabel 4. 46. Cek Ketidakberaturan Berat (Massa)

Lantai	Massa (kN)	Dibandingkan dengan 1,5 x massa di lantai atas	Dibandingkan dengan 1,5 x massa di lantai bawah
Ring Balok	22285,38		OK
Ruang Mesin	35886,26	OK	OK
4	36808,00	OK	OK
3	37826,37	OK	OK
2	38904,78	OK	OK

c) Ketidakberaturan Geometri Vertikal

Struktur tidak mengalami ketidakberaturan geometri vertikal dikarenakan tidak ada dinding geser yang digunakan memiliki ukuran yang sama sepanjang tinggi bangunan.

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

Struktur tidak mengalami ketidakberaturan akibat diskontinuitas bidang pada elemen vertikal pemikul gaya lateral dikarenakan tidak ada dinding geser didesain menerus dari lantai 1 sampai lantai 4.

e) Ketidakberaturan tingkat lemah akibat diskontinuitas pada kekuatan lateral tingkat 5a dan 5b

Hasil pengecekan ketidakberaturan tingkat lemah akibat diskontinuitas pada kekuatan lateral tingkat ditunjukkan pada Tabel 4.47. dan Tabel 4.48.

Tabel 4. 47. Pengecekan Ketidakberaturan Vertikal 5a

Lantai	Load Case / Combo	Location	V_x	V_y	Cek 80% arah X	Cek 80% arah Y
Ring Balok	Envelope Max	Bottom	8518,24	8545,57		
Ruang Mesin	Envelope Max	Bottom	18864,96	18950,25	OK	OK
4	Envelope Max	Bottom	26878,79	27025,63	OK	OK
3	Envelope Max	Bottom	33348,77	33550,20	OK	OK
2	Envelope Max	Bottom	38957,52	39169,73	OK	OK

Tabel 4. 48. Pengecekan Ketidakberaturan Vertikal 5b

Lantai	Load Case / Combo	Location	V_x	V_y	Cek 65% arah X	Cek 65% arah Y
Ring Balok	Envelope Max	Bottom	8518,24	8545,57		
Ruang Mesin	Envelope Max	Bottom	18864,96	18950,25	OK	OK
4	Envelope Max	Bottom	26878,79	27025,63	OK	OK
3	Envelope Max	Bottom	33348,77	33550,20	OK	OK
2	Envelope Max	Bottom	38957,52	39169,73	OK	OK

4.5.8. Pengecekan Kontribusi *Frame* Memikul Minimal 25% Gaya Lateral

Berdasarkan SNI 1726:2019 Pasal 7.2.5.1, dalam proses mendesain sistem ganda, rangka pemikul momen harus mampu menahan setidaknya 25% gaya gempa desain sehingga tahanan gaya gempa total harus disediakan oleh kombinasi rangka pemikul momen dan tidak adanya dinding geser dengan distribusi proporsional terhadap kekakuan.

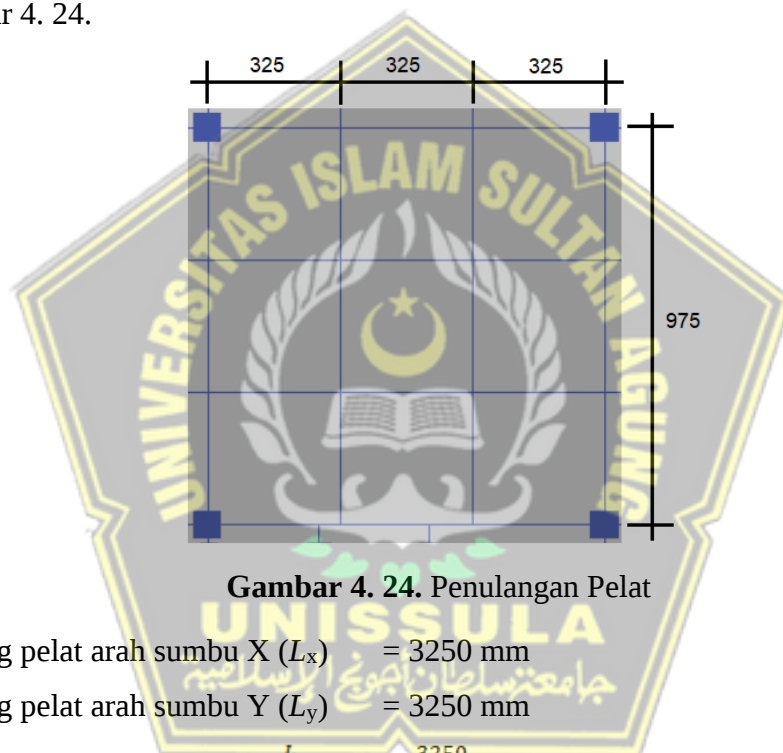
4.6. Perancangan Elemen Struktur Beton Bertulang

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. 24.



Gambar 4. 24. Penulangan Pelat

Panjang pelat arah sumbu X (L_x) = 3250 mm

Panjang pelat arah sumbu Y (L_y) = 3250 mm

Perbandingan panjang pelat ($\frac{L_y}{L_x}$) = $\frac{3250}{3250} = 1$

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) = 29,05 MPa

$$\begin{aligned}
 \text{Kuat leleh tulangan } (f_y) &= 420 \text{ MPa} \\
 \text{Modulus elastisitas beton } (E_c) &= 4700 \times \sqrt{f_c'} \\
 &= 4700 \times \sqrt{29,05} \\
 &= 25743 \text{ MPa}
 \end{aligned}$$

Faktor distribusi tegangan (β_1)

(SNI 2847:2019 Tabel 22.2.2.4.3)

$$\begin{aligned}
 \beta_1 &= 0,85 - 0,05 \times \frac{(f_c' - 28)}{7} \\
 &= 0,85 - 0,05 \times \frac{(30 - 28)}{7} \\
 &= 0,8425
 \end{aligned}$$

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 $M_{11 \max}$ = 7,963 kN-m
- $M_{\min}$ akibat $M_{11 \min}$ = -7,562 kN-m
- $M_{\max}$ akibat $M_{22 \max}$ = 3,801 kN-m
- $M_{\min}$ akibat $M_{22 \min}$ = -7,12280.796 kN-m
- V_u = 8,237 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)

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

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

$$\begin{aligned} A_s \text{ pasang} &= n \times \frac{1}{4} \times \pi \times d_b^2 \\ &= 6,67 \times \frac{1}{4} \times 3,14 \times 70,667 \\ &= 523,599 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

- 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)

$$\epsilon_t = \frac{(d-c)}{c} \times 0,003 = \frac{(90-10,319)}{10,319} \times 0,003 = 0,02$$

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

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

- Batas tulangan regangan tarik

$$\text{Batas} = 0,0048$$

- Faktor reduksi (ϕ)

(SNI 2847:2019 Tabel 21.2.2)

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

$$\phi = 0,65$$

- Untuk $\epsilon_{ty} < \epsilon_t < 0,0048$

$$\begin{aligned} \phi &= 0,65 + 0,25 \times \frac{(\epsilon_t - \epsilon_{ty})}{(0,0048 - \epsilon_{ty})} \\ &= 0,65 + 0,25 \times \frac{(0,025 - 0,002)}{(0,0048 - 0,002)} \\ &= 2,57 \end{aligned}$$

- Untuk $\epsilon_t \geq 0,0048$

$$\phi = 0,90$$

$$\phi_{\text{dipakai}} = 0,90 \text{ (karena } \epsilon_t \geq 0,0048 = 0,025 \geq 0,0048)$$

- 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)

$$\begin{aligned}M_u &= |M_{\max} \text{ akibat } M_{11 \max}| \\ &= |5,104| \\ &= 5,104 \text{ kN-m}\end{aligned}$$

- Cek kapasitas :

$$\begin{aligned}\text{Syarat} &= \phi M_n > M_u \\ &= 18,844 > 5,104 \rightarrow \text{OK}\end{aligned}$$

- 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)

$$n = \frac{b}{s} = \frac{1000}{s} = \frac{1000}{150} = 6,67 \text{ (7)}$$

- 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 pasang)

$$\begin{aligned} A_s \text{ pasang} &= n \times \frac{1}{4} \times \pi \times d_b^2 \\ &= 6,67 \times \frac{1}{4} \times 3,14 \times 70,667^2 \\ &= 523,599 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

- Luas tulangan minimum (A_s 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 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)

$$\epsilon_t = \frac{(d-c)}{c} \times 0,003 = \frac{(90-10,319)}{10,319} \times 0,003 = 0,025$$

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

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

- Batas tulangan regangan tarik

$$\text{Batas} = 0,0048$$

- Faktor reduksi (ϕ)

(SNI 2847:2019 Tabel 21.2.2)

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

$$\phi = 0,65$$

- Untuk $\epsilon_{ty} < \epsilon_t < 0,0048$

$$\begin{aligned} \phi &= 0,65 + 0,25 \times \frac{(\epsilon_t - \epsilon_{ty})}{(0,0048 - \epsilon_{ty})} \\ &= 0,65 + 0,25 \times \frac{(0,025 - 0,002)}{(0,0048 - 0,002)} \\ &= 2,57 \end{aligned}$$

- Untuk $\epsilon_t \geq 0,0048$

$$\phi = 0,90$$

$$\phi \text{ dipakai} = 0,90 \text{ (karena } \epsilon_t \geq 0,0048 = 0,025 \geq 0,0048)$$

- 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)

$$\begin{aligned} M_u &= |M_{\min} \text{ akibat } M_{11 \min}| \\ &= |12,318| \\ &= 12,318 \text{ kN-m} \end{aligned}$$

- Cek kapasitas :

$$\begin{aligned}\text{Syarat} &= \phi M_n > M_u \\ &= 16,959 > 12,318 \rightarrow \text{OK}\end{aligned}$$

- 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)

$$\begin{aligned}\text{Syarat} &= \text{Jarak bersih} \geq d_b \\ &= 140 \geq 10 \rightarrow \text{OK}\end{aligned}$$

- Luas tulangan yang dipasang (A_s pasang)

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

▪ 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)

$$\begin{aligned} a &= A_s \times \frac{f_y}{0,85 \times f'_c \times b} \\ &= 523,599 \times \frac{420}{0,85 \times 33,2 \times 1000} \\ &= 7,793 \text{ mm} \end{aligned}$$

▪ Kapasitas lentur (M_n)

(SNI 2847:2019 Pasal 22.2.2.4.1)

$$\begin{aligned} M_n &= A_s \times f_y \times \left(d - d_b - \frac{a}{2}\right) \times 10^{-6} \\ &= 523,599 \times 420 \times \left(90 - 10 - \frac{7,793}{2}\right) \times 10^{-6} \\ &= 16,736 \text{ kN-m} \end{aligned}$$

▪ Lokasi garis netral (c)

(SNI 2847:2019 Pasal 22.2.2.4.1)

$$c = \frac{a}{\beta_1} = \frac{7,793}{0,8129} = 9,587 \text{ mm}$$

- Regangan tulangan tarik (ε_t)

(SNI 2847:2019 Pasal 22.2.1.2 dan Pasal 22.2.2.1)

$$\begin{aligned}\varepsilon_t &= \frac{(d-c)}{c} \times 0,003 \\ &= \frac{(90-9,587)}{9,587} \times 0,003 \\ &= 0,025\end{aligned}$$

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

$$\begin{aligned}\phi &= 0,65 + 0,25 \times \frac{(\varepsilon_t - \varepsilon_{ty})}{(0,005 - \varepsilon_{ty})} \\ &= 0,65 + 0,25 \times \frac{(0,025 - 0,002)}{(0,005 - 0,002)} \\ &= 2,57\end{aligned}$$

- Untuk $\varepsilon_t \geq 0,005$

$$\phi = 0,90$$

$$\phi \text{ dipakai} = 0,90 \text{ (karena } \varepsilon_t \geq 0,005 = 0,025 \geq 0,005)$$

- Kapasitas lentur tereduksi (ϕM_n)

$$\begin{aligned}\phi M_n &= \phi \times M_n \\ &= 0,90 \times 16,736 \\ &= 15,062 \text{ kN-m}\end{aligned}$$

- Momen ultimit (M_u)

$$\begin{aligned}M_u &= |M_{\max} \text{ akibat } M_{22 \max}| \\ &= |13,829| \\ &= 13,829 \text{ kN-m}\end{aligned}$$

- Cek kapasitas :

$$\begin{aligned}\text{Syarat} &= \phi M_n > M_u \\ &= 15,062 > 13,829 \rightarrow \text{OK}\end{aligned}$$

- 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)

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

- 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)

$$\begin{aligned}\text{Syarat} &= \text{Jarak bersih} \geq d_b \\ &= 140 \geq 10 \rightarrow \text{OK}\end{aligned}$$

- Luas tulangan yang dipasang (A_s pasang)

$$\begin{aligned}A_s \text{ pasang} &= n \times \frac{1}{4} \times \pi \times d_b^2 \\ &= 6,67 \times \frac{1}{4} \times 3,14 \times 70,667 \\ &= 523,599 \text{ mm}^2\end{aligned}$$

▪ 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)

$$\begin{aligned}\varepsilon_t &= \frac{(d-c)}{c} \times 0,003 \\ &= \frac{(90-10,319)}{10,319} \times 0,003 \\ &= 0,025\end{aligned}$$

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

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

- Batas tulangan regangan tarik

$$\text{Batas} = 0,0048$$

- Faktor reduksi (ϕ)

(SNI 2847:2019 Tabel 21.2.2)

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

$$\phi = 0,65$$

- Untuk $\varepsilon_{ty} < \varepsilon_t < 0,0048$

$$\begin{aligned}\phi &= 0,65 + 0,25 \times \frac{(\varepsilon_t - \varepsilon_{ty})}{(0,0048 - \varepsilon_{ty})} \\ &= 0,65 + 0,25 \times \frac{(0,025 - 0,002)}{(0,0048 - 0,002)} \\ &= 2,57\end{aligned}$$

- Untuk $\varepsilon_t \geq 0,0048$

$$\phi = 0,90$$

$$\phi_{\text{dipakai}} = 0,90 \text{ (karena } \varepsilon_t \geq 0,0048 = 0,025 \geq 0,0048)$$

- Kapasitas lentur tereduksi (ϕM_n)

$$\begin{aligned}\phi M_n &= \phi \times M_n \\ &= 0,90 \times 16,736 \\ &= 14,980 \text{ kN-m}\end{aligned}$$

- Momen ultimit (M_u)

$$\begin{aligned}M_u &= |M_{\min} \text{ akibat } M_{22 \min}| \\ &= |-7,1570,199| \\ &= 7,12280.796 \text{ kN-m}\end{aligned}$$

- Cek kapasitas :

$$\begin{aligned}\text{Syarat} &= \phi M_n > M_u \\ &= 14,980 > 7,12280.796 \rightarrow \text{OK}\end{aligned}$$

- 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)

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

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

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

$$\begin{aligned} A_{s \text{ pasang}} &= n \times \frac{1}{4} \times \pi \times d_b^2 \\ &= 6,67 \times \frac{1}{4} \times 3,14 \times 70,667 \\ &= 523,599 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

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

(SNI 2847:2019 Pasal 7.6.1.1 dan Pasal 8.6.1.1)

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

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

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

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

- Untuk $f_y \geq 420$ MPa

$$A_{s \min 1} = (0,18\% \times \frac{420}{f_y}) \times b \times h$$

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

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

$$A_{s \min 2} = 0,14\% \times b \times h$$

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

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

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

- Cek $A_{s \min}$:

$$\text{Syarat} = A_{s \text{ pasang}} \geq A_{s \min}$$

$$= 523,599 \geq 225 \rightarrow \text{OK}$$

- Kesimpulan :

Digunakan Tulangan D 10 – 150

4.6.1.4. Pengecekan Kapasitas Geser

- Kapasitas geser beton (V_c)

$$V_c = 0,17 \times \sqrt{f'_c} \times b \times d$$

$$= 0,17 \times \sqrt{30} \times 1000 \times 90/1000$$

$$= 83,802 \text{ kN}$$

- 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)

$$\text{Batas} = 0,5 \times \phi \times V_c$$

$$= 0,5 \times 0,75 \times 83,802$$

$$= 31,426 \text{ kN}$$

- Cek keperluan tulangan geser pelat

$$\text{Syarat} = V_u > 0,5 \times \phi \times V_c$$

$$= 8,237 < 31,426 \rightarrow \text{Tidak perlu tulangan geser}$$

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})

$$M_{cr} = f_r \times \frac{I_g}{y} \times 10^{-6} = 3,396 \times \frac{162760417}{62,5} \times 10^{-6} = 8,834 \text{ kNm}$$

- Momen inersia retak (I_{cr})

$$I_{cr} = 0,25 \times I_g = 0,25 \times 162760417 = 40690104,2 \text{ mm}^4$$

b) Lendutan Arah Sumbu X

- Gaya dalam yang diperoleh dalam ETABS :

- $M_{11 \text{ max}}$ akibat $DL = 3,659 \text{ kN-m}$
- $M_{11 \text{ min}}$ akibat $DL = -4,708 \text{ kN-m}$
- $M_{11 \text{ max}}$ akibat $SIDL = 1,178 \text{ kN-m}$
- $M_{11 \text{ min}}$ akibat $SIDL = -0,696 \text{ kN-m}$
- $M_{11 \text{ max}}$ akibat $LL = 3,029 \text{ kN-m}$
- $M_{11 \text{ min}}$ akibat $LL = -1,79 \text{ kN-m}$

- Data hasil olah gaya dalam :

- $M_a \text{ lapangan (+)}$
 $= \sum M_{11 \text{ max}}$
 $= 3,659 + 1,178 + 3,029$
 $= 7,886 \text{ kN-m}$
- $M_a \text{ tumpuan (-)}$
 $= \sum M_{11 \text{ min}}$
 $= -4,708 + (-0,696) + (-1,79)$
 $= -7,194 \text{ kN-m}$
- $M_{cr} / M_a \text{ lapangan}$
 $= 8,834 / 7,886$
 $= 1,124 \text{ kN-m}$

- $M_{cr} / M_a \text{ tumpuan} = 8,834 / 7,194$
 $= 1,229 \text{ kN-m}$
- $I_e \text{ lapangan} = \left(\frac{M_{cr}}{M_a} \right)^3 \times I_g + \left[1 - \left(\frac{M_{cr}}{M_a} \right)^3 \right] \times I_{cr}$
 $= (1,1)^3 \times 1,63 \times 10^8 + [1 - (1,1)^3] \times 4,07 \times 10^7$
 $= 162760417 \text{ mm}^4$
- $I_e \text{ lapangan dipakai} = I_g = 162760417 \text{ mm}^4$ (karena $I_e \text{ lapangan} > I_g$)
- $I_e \text{ tumpuan} = \left(\frac{M_{cr}}{M_a} \right)^3 \times I_g + \left[1 - \left(\frac{M_{cr}}{M_a} \right)^3 \right] \times I_{cr}$
 $= (1,3)^3 \times 1,63 \times 10^8 + [1 - (1,3)^3] \times 4,07 \times 10^7$
 $= 162760417 \text{ mm}^4$
- $I_e \text{ tumpuan dipakai} = I_g = 162760417 \text{ mm}^4$ (karena $I_e \text{ tumpuan} > I_g$)
- $I_e \text{ rata-rata} = 0,5 \times I_e \text{ lapangan} + 0,5 \times I_e \text{ tumpuan}$
 $= 0,5 \times 162760417 + 0,5 \times 162760417$
 $= 162760417 \text{ mm}^4$

▪ Lendutan seketika akibat DL (δ_{DL})

$$\delta_{DL} = \frac{\frac{5}{570,199} \times L^2 \times (M_{lap} + 0,2 \times M_{tum})}{E_c \times I_e \text{ rata-rata}} \times 10^6$$

$$= \frac{\frac{5}{570,199} \times 5000 \times (3,659 + 0,2 \times 4,708)}{27081 \times 162760417} \times 10^6$$

$$= 10,873 \text{ mm}$$

▪ Lendutan seketika akibat $SIDL$ (δ_{SIDL})

$$\delta_{SIDL} = \frac{\frac{5}{570,199} \times L^2 \times (M_{lap} + 0,2 \times M_{tum})}{E_c \times I_e \text{ rata-rata}} \times 10^6$$

$$= \frac{\frac{5}{570,199} \times 5000 \times (1,178 + 0,2 \times 0,696)}{27081 \times 162760417} \times 10^6$$

$$= 3,110 \text{ mm}$$

▪ Lendutan seketika akibat LL (δ_{LL})

$$\delta_{LL} = \frac{\frac{5}{570,199} \times L^2 \times (M_{lap} + 0,2 \times M_{tum})}{E_c \times I_e \text{ rata-rata}} \times 10^6$$

$$= \frac{\frac{5}{570,199} \times 5000 \times (3,029 + 0,2 \times 1,79)}{27081 \times 162760417} \times 10^6$$

$$= 8,005 \text{ mm}$$

- Syarat lendutan seketika akibat LL (δ_{LL})

(SNI 2847:2019 Tabel 24.2.2)

$$\text{Syarat} = \frac{L}{360} = \frac{5000}{360} = 27,083 \text{ mm}$$

- Cek lendutan seketika akibat LL (δ_{LL})

$$\begin{aligned} \text{Cek} &= \delta_{LL} < \frac{L}{360} \\ &= 8,005 < 27,083 \rightarrow \text{OK} \end{aligned}$$

- Rasio tulangan pelat (ρ)

$$\rho = \frac{A_{s \text{ pakai}}}{b \times d} = \frac{529,599}{1000 \times 90} = 0,004888$$

- Faktor jangka panjang (λ)

$$\lambda = \frac{2}{1 + 50 \times \rho} = \frac{2}{1 + 50 \times 0,004888} = 1,549$$

- Lendutan jangka panjang (δ_{LT})

(SNI 2847:2019 Tabel 24.2.2)

$$\begin{aligned} \delta_{LT} &= \lambda \times (\delta_{DL} + \delta_{SIDL}) + \delta_{LL} \\ &= 1,549 \times (10,873 + 3,110) + 8,005 \\ &= 29,673 \text{ mm} \end{aligned}$$

- Syarat lendutan jangka panjang (δ_{LT})

(SNI 2847:2019 Tabel 24.2.2)

$$\text{Syarat} = \frac{L}{240} = \frac{5000}{240} = 34,821 \text{ mm}$$

- Cek lendutan jangka panjang (δ_{LT})

$$\begin{aligned} \text{Cek} &= \delta_{LT} < \frac{L}{240} \\ &= 29,673 < 34,821 \rightarrow \text{OK} \end{aligned}$$

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 $SIDL$ = 1,105 kN-m
- $M_{22 \text{ min}}$ akibat $SIDL$ = -0,918 kN-m
- $M_{22 \text{ max}}$ akibat LL = 2,919 kN-m

$$- M_{22 \text{ min akibat } LL} = -2,36 \text{ kN-m}$$

▪ Data hasil olah gaya dalam :

$$\begin{aligned} - M_a \text{ lapangan (+)} &= \sum M_{11 \text{ max}} \\ &= 3,905 + 1,105 + 2,919 \\ &= 7,959 \text{ kN-m} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} - M_a \text{ tumpuan (-)} &= \sum M_{11 \text{ min}} \\ &= -5,11 + (-0,918) + (-2,36) \\ &= -8,388 \text{ kN-m} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} - M_{cr} / M_a \text{ lapangan} &= 8,834 / 7,959 \\ &= 1,111 \text{ kN-m} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} - M_{cr} / M_a \text{ tumpuan} &= 8,834 / 8,388 \\ &= 1,054 \text{ kN-m} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} - I_e \text{ lapangan} &= \left(\frac{M_{cr}}{M_a} \right)^3 \times I_g + \left[1 - \left(\frac{M_{cr}}{M_a} \right)^3 \right] \times I_{cr} \\ &= (0,8)^3 \times 1,63 \times 10^8 + [1 - (0,8)^3] \times 4,07 \times 10^7 \\ &= 162760417 \text{ mm}^4 \end{aligned}$$

$$I_e \text{ lapangan dipakai} = 162760417 \text{ mm}^4 \text{ (karena } I_e \text{ lapangan} < I_g)$$

$$\begin{aligned} - I_e \text{ tumpuan} &= \left(\frac{M_{cr}}{M_a} \right)^3 \times I_g + \left[1 - \left(\frac{M_{cr}}{M_a} \right)^3 \right] \times I_{cr} \\ &= (1,1)^3 \times 1,63 \times 10^8 + [1 - (1,1)^3] \times 4,07 \times 10^7 \\ &= 162760417 \text{ mm}^4 \end{aligned}$$

$$I_e \text{ tumpuan dipakai} = I_g = 162760417 \text{ mm}^4 \text{ (karena } I_e \text{ tumpuan} > I_g)$$

$$\begin{aligned} I_e \text{ rata-rata} &= 0,5 \times I_e \text{ lapangan} + 0,5 \times I_e \text{ tumpuan} \\ &= 0,5 \times 162760417 + 0,5 \times 162760417 \\ &= 162760417 \text{ mm}^4 \end{aligned}$$

▪ Lendutan seketika akibat DL (δ_{DL})

$$\begin{aligned} \delta_{DL} &= \frac{\frac{5}{570,199} \times L^2 \times (M_{lap} + 0,2 \times M_{tum})}{E_c \times I_e \text{ rata-rata}} \times 10^6 \\ &= \frac{\frac{5}{570,199} \times 5000 \times (3,905 + 0,2 \times 5,11)}{27081 \times 162760417} \times 10^6 \\ &= 11,644 \text{ mm} \end{aligned}$$

▪ Lendutan seketika akibat $SIDL$ (δ_{SIDL})

$$\delta_{SIDL} = \frac{\frac{5}{570,199} \times L^2 \times (M_{lap} + 0,2 \times M_{tum})}{E_c \times I_e \text{ rata-rata}} \times 10^6$$

$$= \frac{\frac{5}{570,199} \times 5000 \times (1,105 + 0,2 \times 0,918)}{27081 \times 162760417} \times 10^6$$

$$= 3,116 \text{ mm}$$

- Lendutan seketika akibat LL (δ_{LL})

$$\delta_{LL} = \frac{\frac{5}{570,199} \times L^2 \times (M_{lap} + 0,2 \times M_{tum})}{E_c \times I_{e \text{ rata-rata}}} \times 10^6$$

$$= \frac{\frac{5}{570,199} \times 5000 \times (2,919 + 0,2 \times 2,36)}{27081 \times 162760417} \times 10^6$$

$$= 3,116 \text{ mm}$$

- Syarat lendutan seketika akibat LL (δ_{LL})

(SNI 2847:2019 Tabel 24.2.2)

$$\text{Syarat} = \frac{L}{360} = \frac{9750}{360} = 8,014 \text{ mm}$$

- Cek lendutan seketika akibat LL (δ_{LL})

$$\text{Cek} = \delta_{LL} < \frac{L}{360}$$

$$= 3,116 < 8,014 \rightarrow \text{OK}$$

- Rasio tulangan pelat (ρ)

$$\rho = \frac{A_{s \text{ pakai}}}{b \times d} = \frac{529,599}{1000 \times 90} = 0,004888$$

- Faktor jangka panjang (λ)

$$\lambda = \frac{2}{1 + 50 \times \rho} = \frac{2}{1 + 50 \times 0,004888} = 1,549$$

- Lendutan jangka panjang (δ_{LT})

(SNI 2847:2019 Tabel 24.2.2)

$$\delta_{LT} = \lambda \times (\delta_{DL} + \delta_{SIDL}) + \delta_{LL}$$

$$= 1,549 \times (11,644 + 3,116) + 3,116$$

$$= 31,589 \text{ mm}$$

- Syarat lendutan jangka panjang (δ_{LT})

(SNI 2847:2019 Tabel 24.2.2)

$$\text{Syarat} = \frac{L}{240} = \frac{9750}{240} = 40,625 \text{ mm}$$

- Cek lendutan jangka panjang (δ_{LT})

$$\text{Cek} = \delta_{LT} < \frac{L}{240}$$

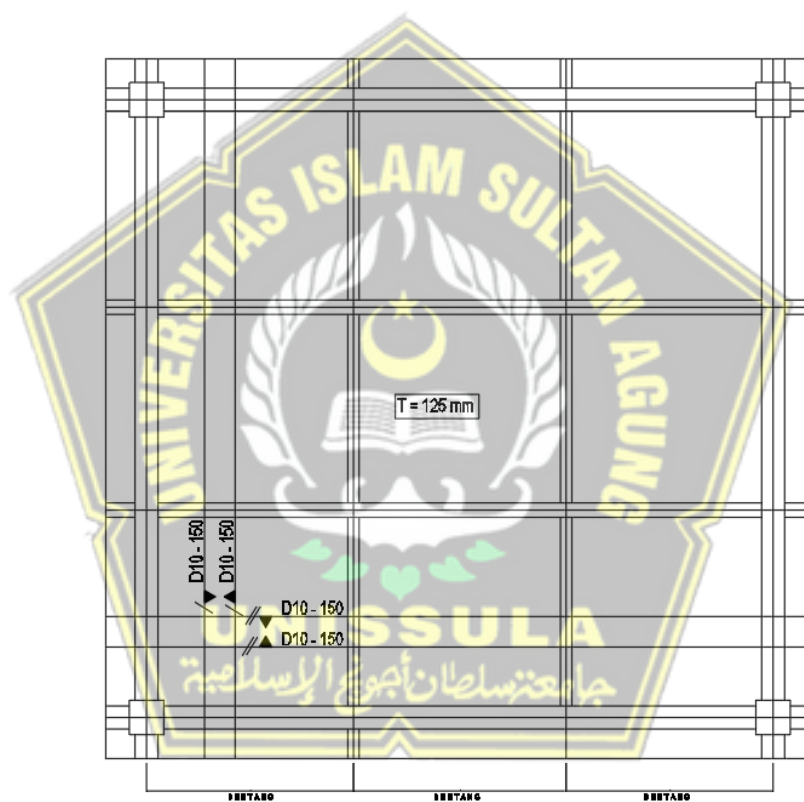
$$= 31,589 < 40,625 \rightarrow \text{OK}$$

4.6.1.6. Rekapitulasi Hasil Tulangan Pelat

Rekapitulasi hasil tulangan pelat dan gambar penulangan pelat beton pada perancangan ditunjukkan pada Tabel 4.62 dan Gambar 4.25.

Tabel 4. 49. Rekapitulasi Hasil Tulangan Pelat

Pelat	L_x (m)	L_y (m)	Arah	Tumpuan		Lapangan	
				Atas	Bawah	Atas	Bawah
S1	9,75	9,75	X	D10-150	D10-150	D10-150	D10-150
			Y	D10-150	D10-150	D10-150	D10-150



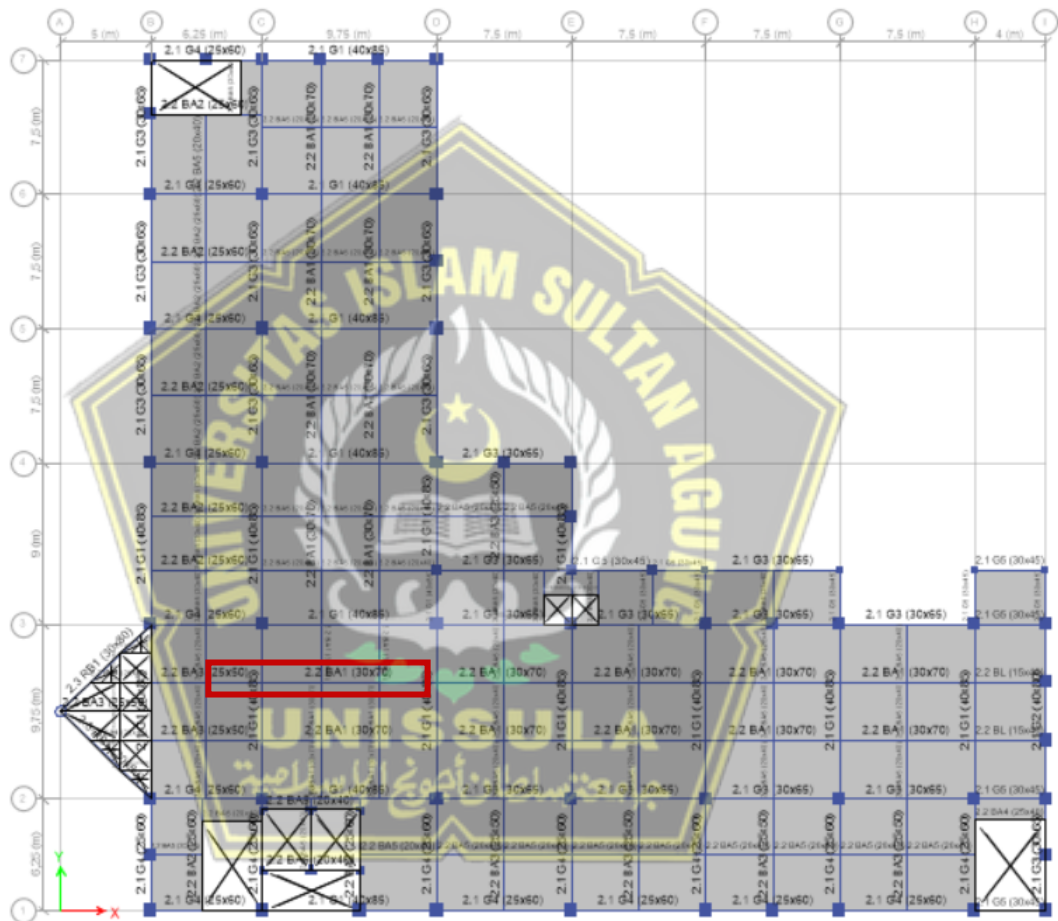
Gambar 4. 25. Penulangan Pelat

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 4.26.



Gambar 4. 26. Denah Balok G1 Sampel

Panjang balok (L)	= 9750 mm
Lebar balok (b)	= 400 mm
Tinggi balok (h)	= 850 mm
Panjang tumpuan	= $2 \times h = 2 \times 850 = 1700$ mm
Diamater tulangan longitudinal (d_b)	= 22 mm

$$\begin{aligned}
\text{Diamater tulangan pinggang } (d_{bt}) &= 10 \text{ mm} \\
\text{Diamater tulangan sengkang } (d_s) &= 10 \text{ mm} \\
\text{Tebal selimut bersih } (c_c) &= 40 \text{ mm} \\
\text{Tebal efektif balok } (d) &= h - c_c - d_s - d_b/2 \\
&= 700 - 30 - 10 - 22/2 \\
&= 789 \text{ mm} \\
\text{Kuat tekan beton } (f'_c) &= 29,05 \text{ MPa} \\
\text{Kuat leleh tulangan longitudinal } (f_y) &= 420 \text{ MPa} \\
\text{Kuat leleh tulangan transversal } (f_y) &= 420 \text{ MPa} \\
\text{Faktor distribusi tegangan } (\beta_1) &= 0,85 - 0,05 \times \frac{(f'_c - 28)}{7} \\
&= 0,85 - 0,05 \times \frac{(29,05 - 28)}{7} \\
&= 0,8425 \\
\text{Panjang Kolom } (c_1) &= 700 \text{ mm} \\
\text{Lebar Kolom } (c_2) &= 700 \text{ mm} \\
\text{Panjang bersih balok } (L_n) &= L - c_1 = 9750 - 700 = 9050 \text{ mm} \\
\text{Faktor modifikasi } (\lambda) &= 1 \text{ (beton normal)}
\end{aligned}$$

4.6.2.2. Perhitungan Tulangan Longitudinal Balok

Tahapan-tahapan perhitungan tulangan longitudinal balok yang dilakukan, antara lain:

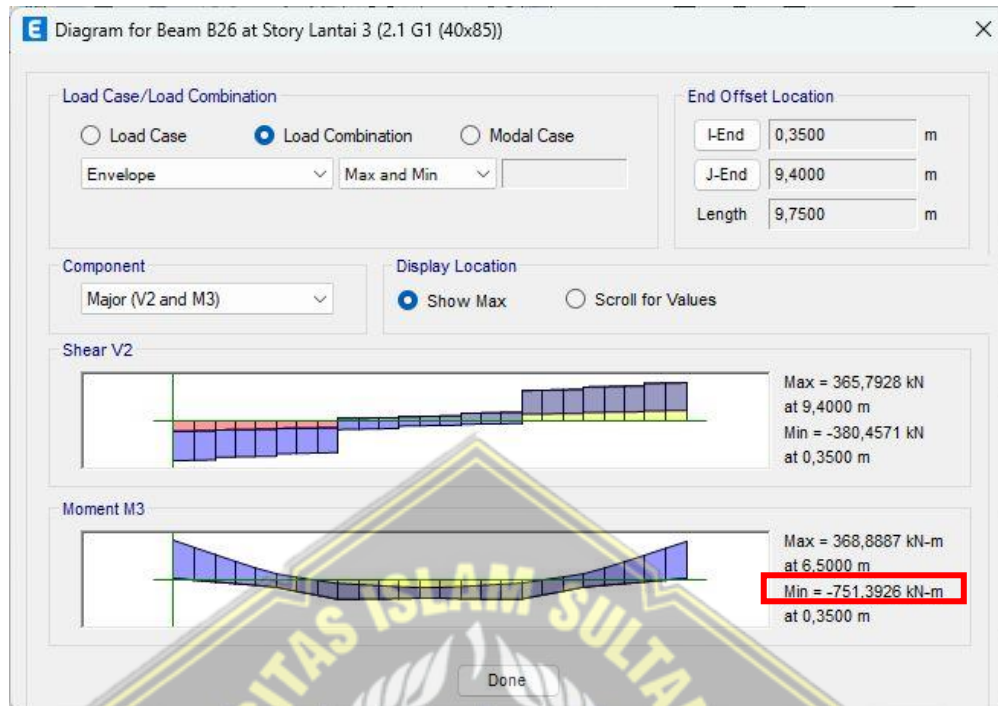
1. Gaya Dalam

Gaya dalam berupa momen ultimit tumpuan dan lapangan pada balok G1 yang didapat dari ETABS yang digunakan untuk mendesain tulangan longitudinal balok sebagai berikut:

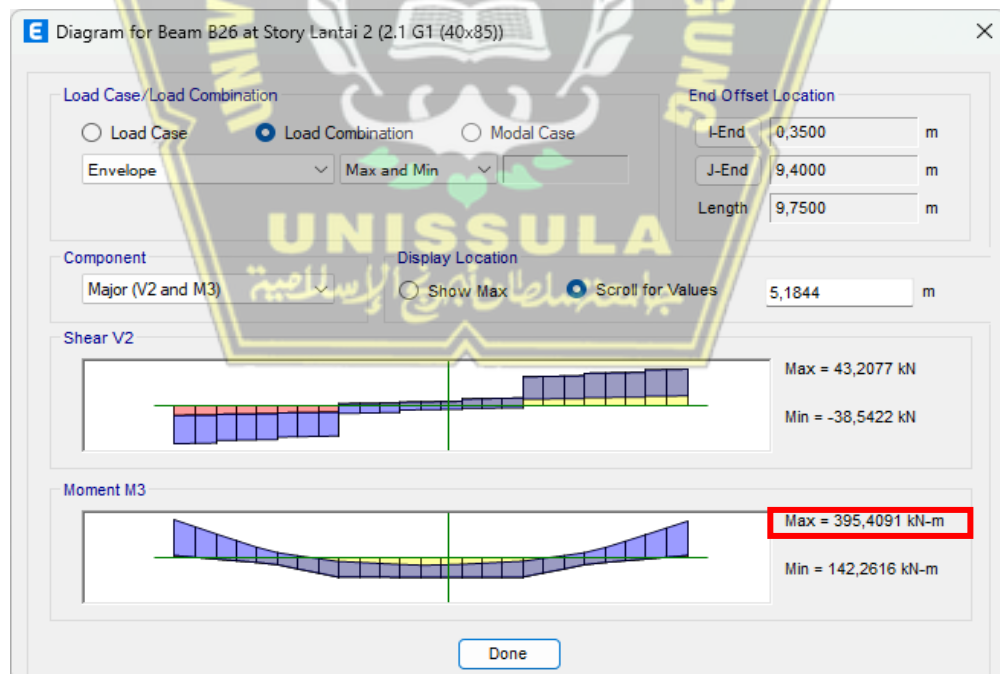
- M_u tumpuan (-) = -751,3926 kN-m
- M_u tumpuan (+) = 386,8887 kN-m
- M_u lapangan (-) = -113,999 kN-m
- M_u lapangan (+) = 395,4091 kN-m
- P_u = 0 kN

Tampilan momen ultimit tumpuan dan lapangan pada balok G1 yang didapat

dari ETABS dapat dilihat pada Gambar 4.27 dan Gambar 4.28.



Gambar 4. 27. Momen Ultimit Tumpuan Balok G1



Gambar 4. 28. Momen Ultimit Lapangan Balok G1

2. Syarat Gaya dan Geometri

3. Syarat Gaya Aksial

(SNI 2847:2019 pada Penjelasan R18.6.1 dan Pasal 18.6.4.7)

$$\begin{aligned}\text{Syarat} &= P_u \leq 0,1 A_g \times f'_c \\ &= 0 \leq 0,1 \times 450 \times 800 \times 29,05 \\ &= 0 \leq 1045800 \rightarrow \text{OK}\end{aligned}$$

4. Syarat Tinggi Efektif

(SNI 2847:2019 pada Pasal 18.6.2.1)

$$\begin{aligned}\text{Syarat} &= L_n \geq 4 d \\ &= 9050 \geq 4 \times 789 \\ &= 9050 \geq 3156 \rightarrow \text{OK}\end{aligned}$$

5. Syarat Lebar 1

(SNI 2847:2019 pada Pasal 18.6.2.1)

$$\begin{aligned}\text{Syarat} &= b \geq \text{minimal } (0,3 h \text{ atau } 250 \text{ mm}) \rightarrow \text{ambil nilai terkecil} \\ &= 400 \geq \text{minimal } (0,3 \times 850 \text{ atau } 250 \text{ mm}) \\ &= 400 \geq \text{minimal } (255 \text{ atau } 250 \text{ mm}) \\ &= 400 \geq 250 \rightarrow \text{OK}\end{aligned}$$

6. Syarat Lebar 2

(SNI 2847:2019 pada Pasal 18.6.2.1)

$$\begin{aligned}\text{Syarat} &= b \leq c_2 + 2 \times \text{minimal } (c_2 \text{ atau } 0,75 c_1) \rightarrow \text{ambil terkecil} \\ &= 400 \leq 850 + 2 \times \text{minimal } (850 \text{ atau } 0,75 \times 850) \\ &= 400 \leq 850 + 2 \times \text{minimal } (700 \text{ atau } 525) \\ &= 400 \leq 850 + 2 \times 525 \\ &= 400 \leq 1900 \rightarrow \text{OK}\end{aligned}$$

3. Tulangan Tumpuan Atas

- Jumlah tulangan tumpuan atas (n)

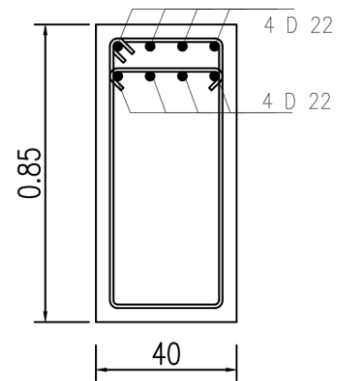
$$n = 8$$

- Diamater tulangan longitudinal (d_b)

$$d_b = 22 \text{ mm}$$

- Jarak bersih antar tulangan

$$\begin{aligned} \text{Jarak bersih} &= \frac{b - 2c_c - 2d_s - n \times d_b}{n - 1} \\ &= \frac{400 - 2 \times 40 - 2 \times 10 - 6 \times 22}{6 - 1} \\ &= 43,600 \text{ mm} \end{aligned}$$



- Cek jarak bersih

(SNI 2847:2019 pada Pasal 25.2.1)

$$\begin{aligned} \text{Syarat} &= \text{Jarak Bersih} \geq \text{maksimal } (d_b \text{ dan } 25 \text{ mm}) \\ &= 43,600 \geq \text{maksimal } (22 \text{ dan } 25) \rightarrow \text{ambil nilai terbesar} \\ &= 43,600 \geq 25 \rightarrow \text{OK} \end{aligned}$$

- Luas tulangan yang dipasang (A_s pasang)

$$\begin{aligned} A_s \text{ pasang} &= n \times \frac{1}{4} \times \pi \times d_b^2 \\ &= 8 \times \frac{1}{4} \times 3,14 \times 22^2 \\ &= 3041,062 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

- Luas tulangan minimum (A_s min)

(SNI 2847:2019 pada Pasal 9.6.1.2)

$$\begin{aligned} A_{s \text{ min } 1} &= \frac{0,25 \times \sqrt{f_c}}{f_y} \times b \times d \\ &= \frac{0,25 \times \sqrt{29,05}}{420} \times 450 \times 789 \\ &= 1012,513 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} A_{s \text{ min } 2} &= \frac{1,4}{f_y} \times b \times d \\ &= \frac{1,4}{420} \times 450 \times 789 \\ &= 1052,000 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

$$A_{s \text{ min}} = \text{maksimum } (A_{s \text{ min } 1} \text{ atau } A_{s \text{ min } 2})$$

$$= 1052,000 \text{ mm}^2$$

- Cek $A_s \text{ min}$:

$$\begin{aligned}\text{Syarat} &= A_s \text{ pasang} \geq A_s \text{ min} \\ &= 3041,062 \geq 1052,000 \rightarrow \text{OK}\end{aligned}$$

- Rasio tulangan (ρ)

$$\rho = \frac{A_s \text{ pasang}}{b \times d} = \frac{2280,796}{450 \times 789} = 0,0096$$

Rasio tulangan maksimum (ρ_{max})

$$\begin{aligned}\bullet \rho_{\text{max } 1} &= 0,75 \times \beta_1 \times 0,85 \times \frac{f_c'}{f_y} \times \frac{600}{600 + f_y} \\ &= 0,75 \times 0,8425 \times 0,85 \times \frac{29,05}{420} \times \frac{600}{600 + 420} \\ &= 0,021852344\end{aligned}$$

$$\bullet \rho_{\text{max } 2} = 0,023 \text{ (SNI 2847:2019 pada Pasal 18.6.3.1)}$$

$$\begin{aligned}\rho_{\text{max}} &= \text{maksimum} (\rho_{\text{max } 1} \text{ atau } \rho_{\text{max } 2}) \\ &= 0,025\end{aligned}$$

Cek $A_s \text{ max}$:

$$\begin{aligned}\text{Syarat} &= \rho \leq \rho_{\text{max}} \\ &= 0,0064 \leq 0,025 \rightarrow \text{OK}\end{aligned}$$

- Tinggi blok beton (a)

(SNI 2847:2019 pada Pasal 22.2.2.4.1)

$$\begin{aligned}a &= A_s \times \frac{f_y}{0,85 \times f_c' \times b} \\ &= 3041,062 \times \frac{420}{0,85 \times 29,05 \times 450} \\ &= 129,315 \text{ mm}\end{aligned}$$

- Kapasitas lentur (M_n)

(SNI 2847:2019 pada Pasal 22.2.2.4.1)

$$\begin{aligned}M_n &= A_s \times f_y \times \left(d - \frac{a}{2}\right) \times 10^{-6} \\ &= 3041,062 \times 420 \times \left(789 - \frac{129,315}{2}\right) \times 10^{-6} \\ &= 925,163 \text{ kN-m}\end{aligned}$$

- Lokasi garis netral (c)

(SNI 2847:2019 pada Pasal 22.2.2.4.1)

$$c = \frac{a}{\beta_1} = \frac{129,315}{0,8425} = 153,490 \text{ mm}$$

- Regangan tulangan tarik (ϵ_t)

(SNI 2847:2019 pada Pasal 22.2.1.2 dan 22.2.2.1)

$$\begin{aligned}\epsilon_t &= \frac{(d-c)}{c} \times 0,003 \\ &= \frac{(789-153,490)}{153,490} \times 0,003 \\ &= 0,012\end{aligned}$$

- Faktor reduksi (ϕ)

(SNI 2847:2019 pada Pasal 22.2.1.2 dan 22.2.2.1)

$$\phi = 0,90 \text{ (karena } \epsilon_t \geq 0,005 = 0,018 \geq 0,005)$$

- Kapasitas lentur tereduksi (ϕM_n)

$$\begin{aligned}\phi M_n &= \phi \times M_n \\ &= 0,90 \times 925,163 \\ &= 824,647 \text{ kN-m}\end{aligned}$$

- Momen ultimit (M_u)

$$\begin{aligned}M_u &= |M_{u \text{ tumpuan}} (-)| \\ &= |-751,393| \\ &= 751,393 \text{ kN-m}\end{aligned}$$

- Cek kapasitas :

$$\begin{aligned}\text{Syarat} &= \phi M_n > M_u \\ &= 824,647 > 751,393 \rightarrow \text{OK}\end{aligned}$$

- Luas tulangan yang diperlukan ($A_s \text{ perlu}$)

$$\begin{aligned}A_s \text{ perlu} &= \frac{M_u}{f_y \times (d - \frac{a}{2})} \times 10^6 \\ &= \frac{751,393}{420 \times (789 - \frac{129,315}{2})} \times 10^6 \\ &= 2639,868 \text{ mm}^2\end{aligned}$$

4. Tulangan Tumpuan Bawah

- Jumlah tulangan tumpuan bawah (n)

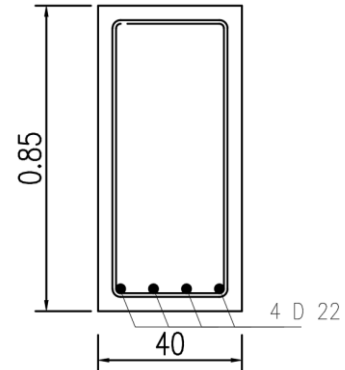
$$n = 4$$

- Diamater tulangan longitudinal (d_b)

$$d_b = 22 \text{ mm}$$

- Jarak bersih antar tulangan

$$\begin{aligned} \text{Jarak bersih} &= \frac{b - 2c_c - 2d_s - n \times d_b}{n - 1} \\ &= \frac{400 - 2 \times 40 - 2 \times 10 - 4 \times 22}{3 - 1} \\ &= 70,667 \text{ mm} \end{aligned}$$



- Cek jarak bersih

(SNI 2847:2019 pada Pasal 25.2.1)

$$\begin{aligned} \text{Syarat} &= \text{Jarak bersih} \geq \text{maksimal } (d_b \text{ dan } 25 \text{ mm}) \\ &= 70,667 \geq \text{maksimal } (22 \text{ dan } 25) \rightarrow \text{ambil nilai terbesar} \\ &= 70,667 \geq 25 \rightarrow \text{OK} \end{aligned}$$

- 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 ($A_{s \text{ min}}$)

(SNI 2847:2019 pada Pasal 9.6.1.2 dan 18.6.3.2)

$$\begin{aligned} A_{s \text{ min } 1} &= \frac{0,25 \times \sqrt{f_c}}{f_y} \times b \times d \\ &= \frac{0,25 \times \sqrt{29,05}}{420} \times 450 \times 789 \\ &= 1012,513 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} A_{s \text{ min } 2} &= \frac{1,4}{f_y} \times b \times d \\ &= \frac{1,4}{420} \times 450 \times 789 \\ &= 1052,000 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 A_{s \text{ min } 3} &= 0,5 \times A_{s \text{ tumpuan (-)}} \\
 &= 0,5 \times 1520,531 \\
 &= 760,265 \text{ mm}^2
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 A_{s \text{ min}} &= \text{maksimum } (A_{s \text{ min } 1} ; A_{s \text{ min } 2} ; \text{ atau } A_{s \text{ min } 3}) \\
 &= 1052,000 \text{ mm}^2
 \end{aligned}$$

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

$$\begin{aligned}
 \text{Syarat} &= A_{s \text{ pasang}} \geq A_{s \text{ min}} \\
 &= 1520,531 \geq 1052,000 \rightarrow \text{OK}
 \end{aligned}$$

- Rasio tulangan (ρ)

$$\rho = \frac{A_{s \text{ pasang}}}{b \times d} = \frac{1520,531}{400 \times 789} = 0,0028$$

- Rasio tulangan maksimum (ρ_{max})

$$\begin{aligned}
 \rho_{\text{max } 1} &= 0,75 \times \beta_1 \times 0,85 \times \frac{f'_c}{f_y} \times \frac{600}{600 + f_y} \\
 &= 0,75 \times 0,8357 \times 0,85 \times \frac{30}{420} \times \frac{600}{600 + 420} \\
 &= 0,0219
 \end{aligned}$$

$$\rho_{\text{max } 2} = 0,023 \text{ (SNI 2847:2019 pada Pasal 18.6.3.1)}$$

$$\begin{aligned}
 \rho_{\text{max}} &= \text{maksimum } (\rho_{\text{max } 1} \text{ atau } \rho_{\text{max } 2}) \\
 &= 0,025
 \end{aligned}$$

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

$$\begin{aligned}
 \text{Syarat} &= \rho \leq \rho_{\text{max}} \\
 &= 0,0219 \leq 0,0250 \rightarrow \text{OK}
 \end{aligned}$$

- Tinggi blok beton (a)
(SNI 2847:2019 pada Pasal 22.2.2.4.1)

$$\begin{aligned}
 a &= A_s \times \frac{f_y}{0,85 \times f'_c \times b} \\
 &= 1520,531 \times \frac{420}{0,85 \times 29,05 \times 400} \\
 &= 64,658 \text{ mm}
 \end{aligned}$$

- Kapasitas lentur (M_n)

(SNI 2847:2019 pada Pasal 22.2.2.4.1)

$$\begin{aligned}
 M_n &= A_s \times f_y \times \left(d - \frac{a}{2}\right) \times 10^{-6} \\
 &= 1520,531 \times 420 \times \left(789 - \frac{64,658}{2}\right) \times 10^{-6} \\
 &= 483,228 \text{ kN-m}
 \end{aligned}$$

- Lokasi garis netral (c)

(SNI 2847:2019 pada Pasal 22.2.2.4.1)

$$c = \frac{a}{\beta_1} = \frac{64,658}{0,8425} = 76,745 \text{ mm}$$

- Regangan tulangan tarik (ϵ_t)

(SNI 2847:2019 pada Pasal 22.2.1.2 dan 22.2.2.1)

$$\begin{aligned}\epsilon_t &= \frac{(d-c)}{c} \times 0,003 \\ &= \frac{(789-76,745)}{76,745} \times 0,003 \\ &= 0,028\end{aligned}$$

- Faktor reduksi (ϕ)

(SNI 2847:2019 pada Pasal 22.2.1.2 dan 22.2.2.1)

$$\phi = 0,90 \text{ (karena } \epsilon_t \geq 0,005 = 0,030 \geq 0,005)$$

- Kapasitas lentur tereduksi (ϕM_n)

$$\begin{aligned}\phi M_n &= \phi \times M_n \\ &= 0,90 \times 485,522 \\ &= 436,969 \text{ kN-m}\end{aligned}$$

- Momen ultimit (M_u)

$$\begin{aligned}M_u &= |M_{u \text{ tumpuan}} (+)| \\ &= |368,889| \\ &= 368,889 \text{ kN-m}\end{aligned}$$

- Cek kapasitas :

$$\begin{aligned}\text{Syarat} &= \phi M_n > M_u \\ &= 436,969 > 368,889 \rightarrow \text{OK}\end{aligned}$$

- Luas tulangan yang diperlukan ($A_s \text{ perlu}$)

$$\begin{aligned}A_s \text{ perlu} &= \frac{M_u}{f_y \times (d - \frac{a}{2})} \times 10^6 \\ &= \frac{368,889}{420 \times (789 - \frac{64,658}{2})} \times 10^6 \\ &= 1160,750 \text{ mm}^2\end{aligned}$$

5. Tulangan Lapangan Atas

- Jumlah tulangan lapangan atas (n)

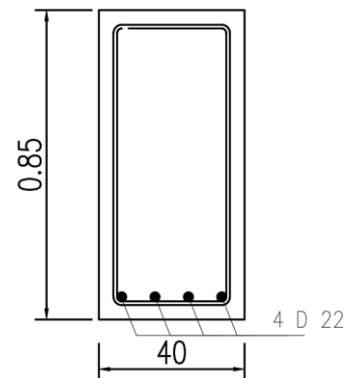
$$n = 4$$

- Diamater tulangan longitudinal (d_b)

$$d_b = 22 \text{ mm}$$

- Jarak bersih antar tulangan

$$\begin{aligned} \text{Jarak bersih} &= \frac{b - 2c_c - 2d_s - n \times d_b}{n - 1} \\ &= \frac{400 - 2 \times 40 - 2 \times 10 - 4 \times 22}{4 - 1} \\ &= 70,677 \text{ mm} \end{aligned}$$



- Cek jarak bersih

(SNI 2847:2019 pada Pasal 25.2.1)

$$\begin{aligned} \text{Syarat} &= \text{Jarak Bersih} \geq \text{maksimal } (d_b \text{ dan } 25 \text{ mm}) \\ &= 70,677 \geq \text{maksimal } (22 \text{ dan } 25) \rightarrow \text{ambil nilai terbesar} \\ &= 70,677 \geq 25 \rightarrow \text{OK} \end{aligned}$$

- 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 ($A_{s \text{ min}}$)

(SNI 2847:2019 pada Pasal 9.6.1.2 dan 18.6.3.2)

$$\begin{aligned} A_{s \text{ min } 1} &= \frac{0,25 \times \sqrt{f_c}}{f_y} \times b \times d \\ &= \frac{0,25 \times \sqrt{29,05}}{420} \times 400 \times 789 \\ &= 1012,513 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} A_{s \text{ min } 2} &= \frac{1,4}{f_y} \times b \times d \\ &= \frac{1,4}{420} \times 400 \times 789 \\ &= 1052,00 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 A_{s \text{ min } 3} &= 0,25 \times A_{s \text{ tumpuan (-)}} \\
 &= 0,25 \times 2280,796 \\
 &= 570,199 \text{ mm}^2
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 A_{s \text{ min}} &= \text{maksimum } (A_{s \text{ min } 1} ; A_{s \text{ min } 2} ; \text{ atau } A_{s \text{ min } 3}) \\
 &= 1052,00 \text{ mm}^2
 \end{aligned}$$

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

$$\begin{aligned}
 \text{Syarat} &= A_{s \text{ pasang}} \geq A_{s \text{ min}} \\
 &= 1900,664 \geq 1052,00 \rightarrow \text{OK}
 \end{aligned}$$

- Rasio tulangan (ρ)

$$\rho = \frac{A_{s \text{ pasang}}}{b \times d} = \frac{1900,664}{400 \times 789} = 0,0006$$

- Rasio tulangan maksimum (ρ_{max})

$$\begin{aligned}
 \rho_{\text{max } 1} &= 0,75 \times \beta_1 \times 0,85 \times \frac{f_c'}{f_y} \times \frac{600}{600 + f_y} \\
 &= 0,75 \times 0,8425 \times 0,85 \times \frac{29,05}{420} \times \frac{600}{600 + 420} \\
 &= 0,0219
 \end{aligned}$$

$$\rho_{\text{max } 2} = 0,023 \text{ (SNI 2847:2019 pada Pasal 18.6.3.1)}$$

$$\begin{aligned}
 \rho_{\text{max}} &= \text{maksimum } (\rho_{\text{max } 1} \text{ atau } \rho_{\text{max } 2}) \\
 &= 0,025
 \end{aligned}$$

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

$$\begin{aligned}
 \text{Syarat} &= \rho \leq \rho_{\text{max}} \\
 &= 0,0219 \leq 0,0250 \rightarrow \text{OK}
 \end{aligned}$$

- Tinggi blok beton (a)

(SNI 2847:2019 pada Pasal 22.2.2.4.1)

$$\begin{aligned}
 a &= A_s \times \frac{f_y}{0,85 \times f_c' \times b} \\
 &= 1520,531 \times \frac{420}{0,85 \times 29,05 \times 400} \\
 &= 80,822 \text{ mm}
 \end{aligned}$$

- Kapasitas lentur (M_n)

(SNI 2847:2019 pada Pasal 22.2.2.4.1)

$$\begin{aligned} M_n &= A_s \times f_y \times \left(d - \frac{a}{2}\right) \times 10^{-6} \\ &= 1520,531 \times 420 \times \left(789 - \frac{80,822}{2}\right) \times 10^{-6} \\ &= 597,583 \text{ kN-m} \end{aligned}$$

- Lokasi garis netral (c)

(SNI 2847:2019 pada Pasal 22.2.2.4.1)

$$c = \frac{a}{\beta_1} = \frac{80,822}{0,8425} = 96,05 \text{ mm}$$

- Regangan tulangan tarik (ϵ_t)

(SNI 2847:2019 pada Pasal 22.2.1.2 dan 22.2.2.1)

$$\begin{aligned} \epsilon_t &= \frac{(d-c)}{c} \times 0,003 \\ &= \frac{(789-96,05)}{96,05} \times 0,003 \\ &= 0,022 \end{aligned}$$

- Faktor reduksi (ϕ)

(SNI 2847:2019 pada Pasal 22.2.1.2 dan 22.2.2.1)

$$\phi = 0,90 \text{ (karena } \epsilon_t \geq 0,005 = 0,022 \geq 0,005)$$

- Kapasitas lentur tereduksi (ϕM_n)

$$\begin{aligned} \phi M_n &= \phi \times M_n \\ &= 0,90 \times 597,583 \\ &= 537,824 \text{ kN-m} \end{aligned}$$

- Momen ultimit (M_u)

$$\begin{aligned} M_u &= |M_{u \text{ lapangan}} (-)| \\ &= |-395,4901| \\ &= 395,4901 \text{ kN-m} \end{aligned}$$

- Cek kapasitas :

$$\begin{aligned} \text{Syarat} &= \phi M_n > M_u \\ &= 537,824 > 395,4901 \rightarrow \text{OK} \end{aligned}$$

- Luas tulangan yang diperlukan (A_s perlu)

$$\begin{aligned}
 A_{s \text{ perlu}} &= \frac{M_u}{f_y \times (d - \frac{a}{2})} \times 10^6 \\
 &= \frac{395,4901}{420 \times (789 - \frac{80,822}{2})} \times 10^6 \\
 &= 1257,633 \text{ mm}^2
 \end{aligned}$$

6. Tulangan Lapangan Bawah

- Jumlah tulangan lapangan bawah (n)

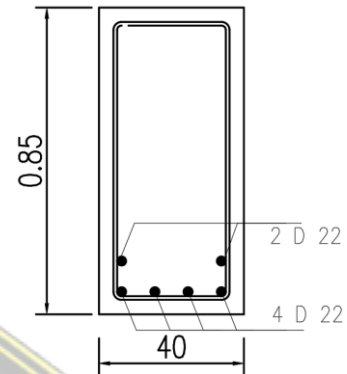
$$n = 6$$

- Diameter tulangan longitudinal (d_b)

$$d_b = 22 \text{ mm}$$

- Jarak bersih antar tulangan

$$\begin{aligned}
 \text{Jarak bersih} &= \frac{b - 2c_c - 2d_s - n \times d_b}{n - 1} \\
 &= \frac{400 - 2 \times 40 - 2 \times 10 - 6 \times 22}{6 - 1} \\
 &= 33,600 \text{ mm}
 \end{aligned}$$



- 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)

$$\begin{aligned}
 A_{s \text{ min } 1} &= \frac{0,25 \times \sqrt{f_c}}{f_y} \times b \times d \\
 &= \frac{0,25 \times \sqrt{29,05}}{420} \times 400 \times 789 \\
 &= 1012,513 \text{ mm}^2
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 A_{s \text{ min } 2} &= \frac{1,4}{f_y} \times b \times d \\
 &= \frac{1,4}{420} \times 400 \times 789 \\
 &= 1052,00 \text{ mm}^2
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 A_{s \text{ min } 4} &= 0,25 \times A_{s \text{ tumpuan } (-)} \\
 &= 0,25 \times 2280,796 \\
 &= 760,265 \text{ mm}^2
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 A_{s \text{ min}} &= \text{maksimum } (A_{s \text{ min } 1} ; A_{s \text{ min } 2} ; \text{ atau } A_{s \text{ min } 4}) \\
 &= 1052,00 \text{ mm}^2
 \end{aligned}$$

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

$$\begin{aligned}
 \text{Syarat} &= A_{s \text{ pasang}} \geq A_{s \text{ min}} \\
 &= 1520,531 \geq 1052,00 \rightarrow \text{OK}
 \end{aligned}$$

- Rasio tulangan (ρ)

$$\rho = \frac{A_{s \text{ pasang}}}{b \times d} = \frac{1520,531}{400 \times 789} = 0,004817905$$

- Rasio tulangan maksimum (ρ_{max})

$$\begin{aligned}
 \rho_{\text{max } 1} &= 0,75 \times \beta_1 \times 0,85 \times \frac{f_c'}{f_y} \times \frac{600}{600 + f_y} \\
 &= 0,75 \times 0,8425 \times 0,85 \times \frac{29,05}{420} \times \frac{600}{600 + 420} \\
 &= 0,0219
 \end{aligned}$$

$$\rho_{\text{max } 2} = 0,0250 \text{ (SNI 2847:2019 pada Pasal 18.6.3.1)}$$

$$\begin{aligned}
 \rho_{\text{max}} &= \text{maksimum } (\rho_{\text{max } 1} \text{ atau } \rho_{\text{max } 2}) \\
 &= 0,0250
 \end{aligned}$$

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

$$\begin{aligned}
 \text{Syarat} &= \rho \leq \rho_{\text{max}} \\
 &= 0,004817905 \leq 0,0250 \rightarrow \text{OK}
 \end{aligned}$$

- Tinggi blok beton (a)

(SNI 2847:2019 pada Pasal 22.2.2.4.1)

$$\begin{aligned}
 a &= A_s \times \frac{f_y}{0,85 \times f_c' \times b} \\
 &= 1520,531 \times \frac{420}{0,85 \times 29,05 \times 400} \\
 &= 96,986 \text{ mm}
 \end{aligned}$$

- Kapasitas lentur (M_n)

(SNI 2847:2019 pada Pasal 22.2.2.4.1)

$$\begin{aligned} M_n &= A_s \times f_y \times \left(d - \frac{a}{2}\right) \times 10^{-6} \\ &= 1520,531 \times 420 \times \left(789 - \frac{96,986}{2}\right) \times 10^{-6} \\ &= 709,357 \text{ kN-m} \end{aligned}$$

- Lokasi garis netral (c)

(SNI 2847:2019 pada Pasal 22.2.2.4.1)

$$c = \frac{a}{\beta_1} = \frac{96,986}{0,8425} = 115,117 \text{ mm}$$

- Regangan tulangan tarik (ϵ_t)

(SNI 2847:2019 pada Pasal 22.2.1.2 dan 22.2.2.1)

$$\begin{aligned} \epsilon_t &= \frac{(d-c)}{c} \times 0,003 \\ &= \frac{(789-96,986)}{96,986} \times 0,003 \\ &= 0,018 \end{aligned}$$

- Faktor reduksi (ϕ)

(SNI 2847:2019 pada Pasal 22.2.1.2 dan 22.2.2.1)

$$\phi = 0,900 \text{ (karena } \epsilon_t \geq 0,005 = 0,018 \geq 0,005)$$

- Kapasitas lentur tereduksi (ϕM_n)

$$\begin{aligned} \phi M_n &= \phi \times M_n \\ &= 0,90 \times 483,881 \\ &= 683,421 \text{ kN-m} \end{aligned}$$

- Momen ultimit (M_u)

$$\begin{aligned} M_u &= |M_{u \text{ lapangan}} (+)| \\ &= |395,409| \\ &= 395,409 \text{ kN-m} \end{aligned}$$

- Cek kapasitas :

$$\begin{aligned} \text{Syarat} &= \phi M_n > M_u \\ &= 638,421 > 395,409 \rightarrow \text{OK} \end{aligned}$$

- Luas tulangan yang diperlukan (A_s perlu)

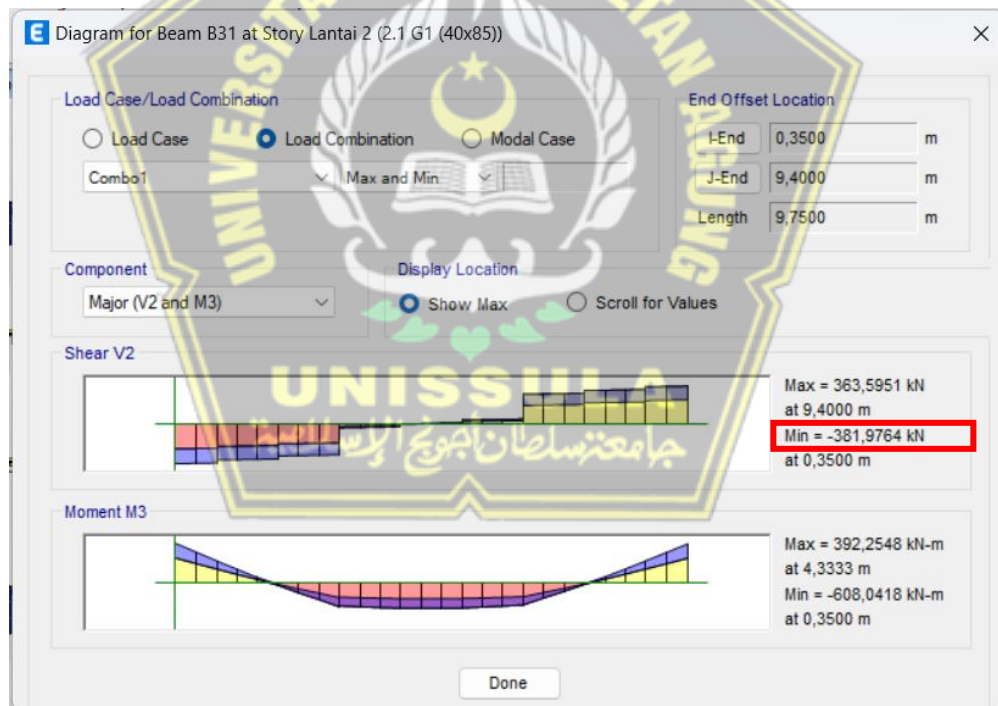
$$\begin{aligned}
 A_s \text{ perlu} &= \frac{M_u}{f_y \times (d - \frac{a}{2})} \times 10^6 \\
 &= \frac{395,409}{420 \times (789 - \frac{96,986}{2})} \times 10^6 \\
 &= 1271,359 \text{ mm}^2
 \end{aligned}$$

4.6.2.3. Perhitungan Tulangan Transversal Balok

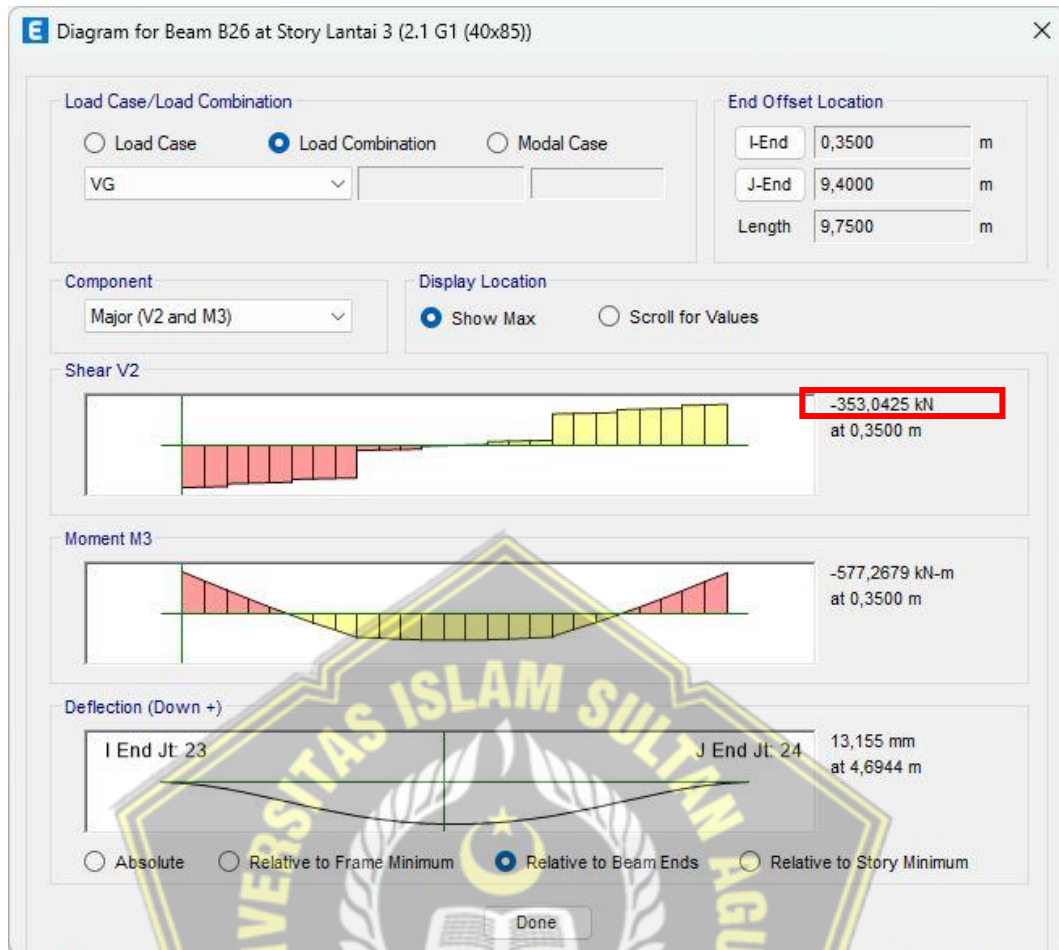
Tulangan transversal pada balok merupakan tulangan yang berguna untuk menahan gaya geser ultimit yang diterima balok. Tahapan-tahapan perhitungan tulangan transversal balok yang dilakukan, antara lain:

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 4.29 dan Gambar 4.30.



Gambar 4. 29. Gaya Geser Ultimit Tumpuan Balok G1



Gambar 4. 30. Gaya Geser Ultimit Lapangan 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 = 381,9764 kN
- V_u lapangan = 293,0064 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:

$$V_{g \text{ tumpuan}} = 381,9764 \text{ kN}$$

Dari hasil perhitungan tulangan longitudinal balok di atas, didapatkan luas tulangan pada daerah tumpuan sebagai berikut:

$$A_s^+ \text{ tumpuan} = 1520,531 \text{ mm}^2$$

$$A_s^- \text{ tumpuan} = 381,9764 \text{ mm}^2$$

• *Probable Moment Capacities (M_{pr})*

$$a_{pr}^+ = 1,25 a \text{ (tumpuan positif desain lentur)}$$

$$= 1,25 \times 64,658$$

$$= 80,882 \text{ mm}^2$$

$$a_{pr}^- = 1,25 a \text{ (tumpuan negatif desain lentur)}$$

$$= 1,25 \times 129,315$$

$$= 161,644 \text{ mm}^2$$

$$\begin{aligned} M_{pr}^+ &= A_s^+ \times 1,25 f_y \times \left(d - \frac{a_{pr}^+}{2}\right) \\ &= 1520,531 \times 1,25 \times 420 \times \left(789 - \frac{80,882}{2}\right) \\ &= 597582657 \text{ Nmm} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} M_{pr}^- &= A_s^- \times 1,25 f_y \times \left(d - \frac{a_{pr}^-}{2}\right) \\ &= 2280,796 \times 1,25 \times 420 \times \left(789 - \frac{121,233}{2}\right) \\ &= 1130646849 \text{ Nmm} \end{aligned}$$

• Gaya Geser Akibat Goyangan (V_{sway})

(SNI 2847:2019 pada Pasal 18.6.5.1)

Gaya geser akibat goyangan dihitung dengan rumus berikut:

$$\begin{aligned} V_{sway} \text{ atau } V_{pr} &= \frac{M_{pr}^+ + M_{pr}^-}{L_n} \\ &= \frac{597582657 + 872179561}{9050} \\ &= 190965 \text{ N} \end{aligned}$$

• 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:

$$\begin{aligned} V_e &= V_g + V_{pr} \\ &= 381,9764 \times 10^3 + 190965 \\ &= 544007 \text{ N} \end{aligned}$$

b) Tahanan Geser Beton

- Gaya Geser Akibat Goyangan (V_{sway})

$$V_{\text{sway}} \text{ atau } V_{\text{pr}} = 190965 \text{ N}$$

- $\frac{1}{2}$ Gaya Geser Desain Akibat Goyangan ($\frac{1}{2} V_e$)

$$\frac{1}{2} V_e = \frac{1}{2} \times 544007 = 272004 \text{ N}$$

- Gaya Aksial Terfaktor (P_u)

$$P_u = 0 \text{ N}$$

- Menghitung $A_g f_c' / 20$:

$$\begin{aligned} \frac{A_g f_c'}{20} &= \frac{400 \times 850 \times 29,05}{20} \\ &= 493850 \text{ N} \end{aligned}$$

- Kuat Geser Nominal Beton (V_c)

(SNI 2847:2019 pada Pasal 18.6.5.2)

$$\text{Syarat} = V_c = 0, \text{ jika } V_{\text{pr}} \geq \frac{1}{2} V_e \text{ dan } P_u < \frac{A_g f_c'}{20}$$

$$V_{\text{pr}} \geq \frac{1}{2} V_e = 190965 \geq 272004 \rightarrow \text{OK}$$

$$P_u < \frac{A_g f_c'}{20} = 0 < 493850 \rightarrow \text{OK}$$

$$V_c = 0$$

c) Penulangan Geser

- Jumlah kaki (n)

$$n = 3$$

- Luas tulangan geser (A_v)

$$A_v = n \times \frac{1}{4} \times \pi \times d_s^2$$

$$= 4 \times \frac{1}{4} \times 3,14 \times 70,667^2$$

$$= 235,619 \text{ mm}^2$$

- Spasi tulangan (s)

$$s = 100 \text{ mm}$$

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

(SNI 2847:2019 pada Pasal 18.6.4.4)

$$s_{\max 1} = \frac{1}{4} \times d = \frac{1}{4} \times 789 = 197,25 \text{ mm}$$

$$s_{\max 2} = 6 \times d_b = 6 \times 22 = 132 \text{ mm}$$

$$s_{\max 3} = 150 \text{ mm}$$

$$s_{\max} = \text{minimal } (s_{\max 1} ; s_{\max 2} ; \text{atau } s_{\max 3}) \\ = 132 \text{ mm}$$

- 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)

$$V_s = \frac{A_v \times f_y \times d}{s} \\ = \frac{157,080 \times 420 \times 789}{100} \\ = 780796 \text{ N}$$

- Batas kuat geser nominal akibat penulangan geser (V_s) :

(SNI 2847:2019 pada Pasal 22.5.1.2)

$$\text{Batas } V_s = 0,66 \times \sqrt{f_c} \times b \times d \\ = 0,66 \times \sqrt{29,05} \times 400 \times 789 \\ = 1122675 \text{ N}$$

- 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)

$$V_n = V_c + V_s \\ = 0 + 1122675 \\ = 1122675 \text{ N}$$

- Kapasitas geser tereduksi (ϕV_n)

$$\phi V_n = \phi \times V_n \\ = 0,75 \times 1122675 \\ = 802477 \text{ N}$$

- Gaya geser ultimit (V_u)

$$\begin{aligned} V_u &= V_{u \text{ tumpuan}} \times 10^3 \\ &= 381,9764 \times 10^3 \\ &= 381976 \text{ N} \end{aligned}$$

- Cek kapasitas :

$$\begin{aligned} \text{Syarat} &= \frac{\phi V_n}{V_u} \geq 1 \\ &= \frac{447146}{229180,7} \geq 1 \\ &= 2,101 \geq 1 \rightarrow \text{OK} \end{aligned}$$

3. Tulangan Transversal Lapangan

a) Gaya Dalam

$$V_{u \text{ lapangan}} = 293,0064 \text{ kN}$$

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)

$$s_{\max} = \frac{1}{2} \times d = \frac{1}{2} \times 649 = 394,50 \text{ mm}$$

- Cek spasi :

$$s < s_{\max} = 150 < 394,5 \rightarrow \text{OK}$$

- Kuat geser nominal akibat penulangan geser (V_s)

(SNI 2847:2019 pada Pasal 22.5.10.5.3)

$$\begin{aligned} V_s &= \frac{A_v \times f_y \times d}{s} \\ &= \frac{157,080 \times 420 \times 789}{150} \\ &= 347020 \text{ N} \end{aligned}$$

- Batas kuat geser nominal akibat penulangan geser (V_s) :
(SNI 2847:2019 pada Pasal 22.5.1.2)

$$\begin{aligned} \text{Batas } V_s &= 0,66 \times \sqrt{f'_c} \times b \times d \\ &= 0,66 \times \sqrt{29,05} \times 400 \times 789 \\ &= 11226725 \text{ N} \end{aligned}$$

- Kuat geser nominal beton (V_c)
(SNI 2847:2019 pada Pasal 22.5.5.1)

$$\begin{aligned} V_c &= 0,17 \times \sqrt{f'_c} \times b \times d \\ &= 0,17 \times \sqrt{29,05} \times 400 \times 789 \\ &= 289174 \text{ N} \end{aligned}$$

- 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)

$$\begin{aligned} V_n &= V_c + V_s \\ &= 289174 + 289174 \\ &= 578348 \text{ N} \end{aligned}$$

- Kapasitas geser tereduksi (ϕV_n)

$$\begin{aligned} \phi V_n &= \phi \times V_n \\ &= 0,75 \times 578348 \\ &= 433761 \text{ N} \end{aligned}$$

- Gaya geser ultimit (V_u)

$$\begin{aligned} V_u &= V_{u \text{ lapangan}} \times 10^3 \\ &= 229,1807 \times 10^3 \\ &= 229180,7 \text{ N} \end{aligned}$$

- Cek kapasitas :

$$\begin{aligned} \text{Syarat} &= \frac{\phi V_n}{V_u} \geq 1 \\ &= \frac{433761}{229180,7} \geq 1 \\ &= 1,628 \geq 1 \rightarrow \text{OK} \end{aligned}$$

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})

$$A_{cp} = b \times h = 400 \times 850 = 340000 \text{ mm}^2$$

- Keliling luar penampang beton (p_{cp})

$$\begin{aligned} p_{cp} &= 2 \times (b + h) \\ &= 2 \times (400 + 850) \\ &= 2500 \text{ mm} \end{aligned}$$

- x_0
$$\begin{aligned} &= b - 2c_c - d_s \\ &= 400 - 2 \times 40 - 10 \\ &= 310 \text{ mm} \end{aligned}$$

- y_0
$$\begin{aligned} &= h - 2c_c - d_s \\ &= 850 - 2 \times 40 - 10 \\ &= 760 \text{ mm} \end{aligned}$$

- Luas lingkup garis pusat tulangan torsi (A_{oh})
(SNI 2847:2019 pada Penjelasan Pasal R22.7.6.1.1)

$$\begin{aligned} A_{oh} &= x_0 \times y_0 \\ &= 310 \times 760 \\ &= 235600 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

- Luas bruto lingkup lintasan alir geser (A_o)

(SNI 2847:2019 pada Pasal 22.7.6.1.1)

$$\begin{aligned} A_o &= 0,85 \times A_{oh} \\ &= 0,85 \times 235600 \\ &= 200260 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

- Keliling garis pusat tulangan torsi (p_h)

(SNI 2847:2019 pada Pasal 22.7.6.1)

$$\begin{aligned} p_h &= 2 \times (x_0 + y_0) \\ &= 2 \times (310 + 760) \\ &= 2140 \text{ mm} \end{aligned}$$

- 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)

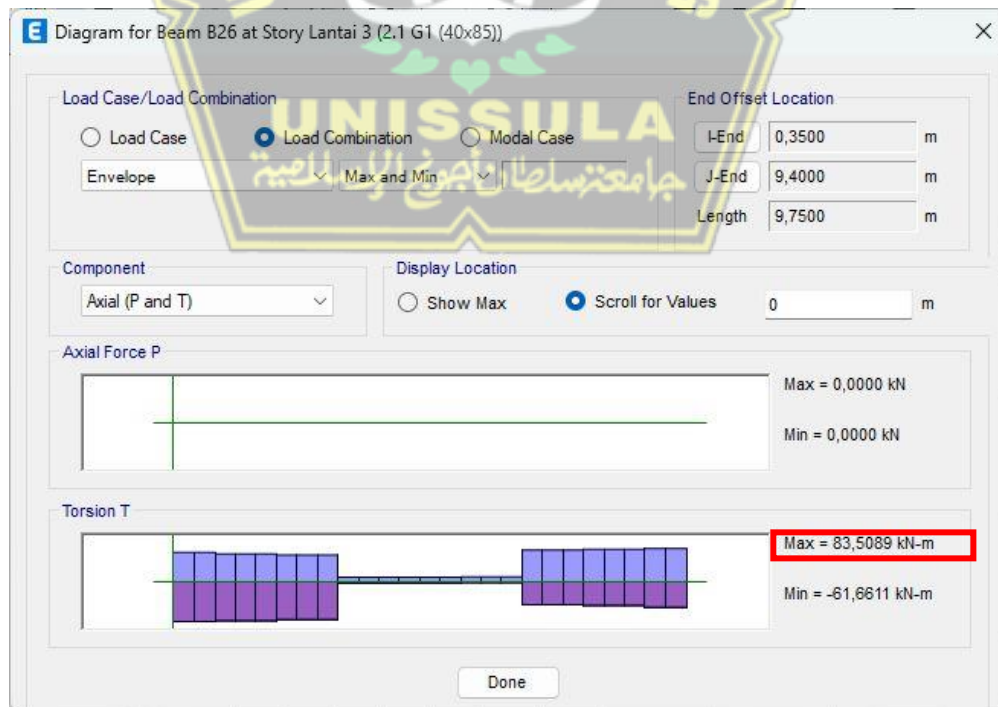
$$\theta = 45^\circ \text{ (non prategang)}$$

2. Gaya Dalam

Gaya dalam berupa gaya torsi pada balok G1 yang didapat dari ETABS yang digunakan untuk mendesain tulangan torsi balok sebagai berikut:

$$\begin{aligned} T_u &= 75,0145 \text{ kN-m} \\ &= 75,0145 \times 10^6 \\ &= 75014500 \text{ N-mm} \end{aligned}$$

Tampilan gaya torsi pada balok G1 yang didapat dari ETABS dapat dilihat pada Gambar 4. 31.



Gambar 4. 31. Gaya Torsi Balok G1

3. Pengecekan Kebutuhan Tulangan Torsi

- Momen retak torsi (T_{cr})

$$\begin{aligned}T_{cr} &= 0,33 \times \sqrt{f_c'} \times \frac{A_{cp}^2}{p_{cp}} \\&= 0,33 \times \sqrt{29,05} \times \frac{340000^2}{2500} \\&= 82244115 \text{ N-mm}\end{aligned}$$

- Faktor reduksi kuat torsi (ϕ)

(SNI 2847:2019 pada Tabel 21.2.1)

$$\phi = 0,75$$

- Kapasitas torsi tereduksi (ϕT_{cr})

$$\begin{aligned}\phi T_{cr} &= \phi \times T_{cr} \\&= 0,75 \times 82244115 \\&= 61683086,53 \text{ N-mm}\end{aligned}$$

- Cek perlu tulangan torsi :

(SNI 2847:2019 pada Tabel 22.7.4.1)

$$\begin{aligned}\text{Syarat} &= T_u > \frac{1}{4} \phi T_{cr} \\&= 38635700 > \frac{1}{4} \times 61683086,53 \\&= 38635700 > 15420772 \rightarrow \text{Perlu}\end{aligned}$$

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)

$$\begin{aligned}T_u \text{ pakai} &= \text{minimal } (\phi T_{cr} \text{ atau } T_u) \\&= \text{minimal } (61683086,53 \text{ atau } 75014500) \\&= 61683086,53 \text{ N-mm}\end{aligned}$$

- Gaya geser ultimit (V_u)

$$\begin{aligned}V_u &= V_{u \text{ tumpuan}} \times 10^3 \\&= 381,976 \times 10^3 \\&= 381976 \text{ N}\end{aligned}$$

- Kuat geser nominal beton (V_c)

(SNI 2847:2019 pada Pasal 22.5.5.1)

$$\begin{aligned} V_c &= 0,17 \times \sqrt{f'_c} \times b \times d \\ &= 0,17 \times \sqrt{29,05} \times 400 \times 789 \\ &= 289174 \text{ N} \end{aligned}$$

- Tegangan ultimit geser + torsi

(SNI 2847:2019 pada Tabel 22.7.7.1)

$$\begin{aligned} \text{Tegangan ultimit geser + torsi} &= \sqrt{\left(\frac{V_u}{b \times d}\right)^2 + \left(\frac{T_u \times p_h}{1,7 \times A_{oh}^2}\right)^2} \\ &= \sqrt{\left(\frac{191437}{400 \times 789}\right)^2 + \left(\frac{61683086,53 \times 2140}{1,7 \times 200260^2}\right)^2} \\ &= 1,85 \text{ MPa} \end{aligned}$$

- Kapasitas tegangan beton

(SNI 2847:2019 pada Tabel 22.7.7.1)

$$\begin{aligned} \text{Kapasitas tegangan beton} &= \phi \times \left(\frac{V_c}{b \times d} + 0,66 \times \sqrt{f'_c}\right) \\ &= \phi \times \left(\frac{289174}{400 \times 789} + 0,66 \times \sqrt{29,05}\right) \\ &= 3,355 \text{ MPa} \end{aligned}$$

- Cek dimensi penampang :

$$\begin{aligned} \sqrt{\left(\frac{V_u}{b \times d}\right)^2 + \left(\frac{T_u \times p_h}{1,7 \times A_{oh}^2}\right)^2} &\leq \phi \times \left(\frac{V_c}{b \times d} + 0,66 \times \sqrt{f'_c}\right) \\ 1,661 &\leq 3,355 \rightarrow \text{OK} \end{aligned}$$

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)

$$s_{\text{max } 1} = \frac{1}{8} \times p_h = \frac{1}{8} \times 2140 = 268 \text{ mm}$$

$$s_{\text{max } 2} = 300 \text{ mm}$$

$$S_{\max} = \text{minimal } (S_{\max 1} \text{ atau } S_{\max 2})$$

$$= 268 \text{ mm}$$

Cek spasi :

$$S_{\text{tumpuan}} < S_{\max} = 100 < 228 \rightarrow \text{OK}$$

$$S_{\text{lapangan}} < S_{\max} = 150 < 228 \rightarrow \text{OK}$$

- Luas tulangan geser + torsi (A_{v+t})

$$A_{v+t \text{ tumpuan}} = n_{\text{tumpuan}} \times \frac{1}{4} \times \pi \times d_s^2$$

$$= 3 \times \frac{1}{4} \times 3,14 \times 70,667^2$$

$$= 235,619 \text{ mm}^2$$

$$A_{v+t \text{ lapangan}} = n_{\text{lapangan}} \times \frac{1}{4} \times \pi \times d_s^2$$

$$= 2 \times \frac{1}{4} \times 3,14 \times 70,667^2$$

$$= 157,079 \text{ mm}^2$$

- Luas tulangan geser + torsi (A_{v+t}) / spasi pasang (s_{pasang})

$$A_{v+t} / S_{\text{tumpuan pasang}} = \frac{A_{v+t \text{ tumpuan}}}{s_{\text{tumpuan pasang}}}$$

$$= \frac{235,619}{100}$$

$$= 2,356 \text{ mm}^2/\text{mm}$$

$$A_{v+t} / S_{\text{lapangan pasang}} = \frac{A_{v+t \text{ lapangan}}}{s_{\text{lapangan pasang}}}$$

$$= \frac{157,079}{150}$$

$$= 1,047 \text{ mm}^2/\text{mm}$$

- Luas satu kaki sengkang penahan torsi (A_t) / spasi (s)
(SNI 2847:2019 pada Pasal 22.7.6.1)

$$A_t / s = \frac{T_u}{2 \times \phi \times A_o \times f_{yt}}$$

$$= \frac{38635700}{2 \times 0,75 \times 149940 \times 420}$$

$$= 0,489 \text{ mm}^2/\text{mm}$$

- Luas tulangan geser (A_v) / spasi perlu (s_{perlu})

$$A_v / S_{\text{tumpuan perlu}} = \left(\frac{V_u \text{ tumpuan}}{\phi} - V_c \text{ tumpuan} \right) / (f_y \times d)$$

$$= \left(\frac{282,575}{0,75} - 0 \right) / (420 \times 789)$$

$$\begin{aligned}
 &= 0,264 \text{ mm}^2/\text{mm} \\
 A_v / s \text{ lapangan perlu} &= \left(\frac{V_u \text{ lapangan}}{\phi} - V_c \text{ lapangan} \right) / (f_y \times d) \\
 &= \left(\frac{229,1807}{0,75} - 289174 \right) / (420 \times 789) \\
 &= 0,049 \text{ mm}^2/\text{mm}
 \end{aligned}$$

- Luas tulangan geser + torsi (A_{v+t}) / spasi perlu (s_{perlu})
(SNI 2847:2019 pada Penjelasan Pasal R9.5.4.3)

$$\begin{aligned}
 A_{v+t} / s \text{ tumpuan perlu} &= 2 \times (A_t / s) + (A_v / s \text{ tumpuan perlu}) \\
 &= 2 \times 0,489 + 0,264 \\
 &= 1,242 \text{ mm}^2/\text{mm}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 A_{v+t} / s \text{ lapangan perlu} &= 2 \times (A_t / s) + (A_v / s \text{ lapangan perlu}) \\
 &= 2 \times 0,489 + 0,049 \\
 &= 1,027 \text{ mm}^2/\text{mm}
 \end{aligned}$$

- Luas tulangan geser + torsi (A_{v+t}) / spasi minimum (s_{min})
(SNI 2847:2019 pada Pasal 9.6.4.2)

$$\begin{aligned}
 A_{v+t} / s_{\text{min 1}} &= 0,062 \times \sqrt{f_c'} \times \frac{b}{f_y} \\
 &= 0,062 \times \sqrt{29,05} \times \frac{400}{420} \\
 &= 0,318 \text{ mm}^2/\text{mm}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 A_{v+t} / s_{\text{min 2}} &= 0,35 \times \frac{b}{f_y} \\
 &= 0,35 \times \frac{400}{420} \\
 &= 0,333 \text{ mm}^2/\text{mm}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 A_{v+t} / s_{\text{min}} &= \text{maksimum } (A_{v+t} / s_{\text{min 1}} \text{ atau } A_{v+t} / s_{\text{min 2}}) \\
 &= 0,318 \text{ mm}^2/\text{mm}
 \end{aligned}$$

- Cek geser + torsi :

$$\begin{aligned}
 A_{v+t} / s \text{ tumpuan pasang} &\geq \text{maksimum } (A_{v+t} / s_{\text{perlu}} \text{ atau } A_{v+t} / s_{\text{min}}) \\
 2,356 &\geq \text{maksimum } (1,242 \text{ atau } 0,318) \\
 2,356 &\geq 1,242 \rightarrow \text{OK}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 A_{v+t} / s \text{ lapangan pasang} &\geq \text{maksimum } (A_{v+t} / s_{\text{perlu}} \text{ atau } A_{v+t} / s_{\text{min}}) \\
 1,047 &\geq \text{maksimum } (0,489 \text{ atau } 0,333) \\
 1,047 &\geq 0,489 \rightarrow \text{OK}
 \end{aligned}$$

6. Penulangan Longitudinal Torsi

- Diameter tulangan pinggang (d_b)

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

- Diameter tulangan pinggang minimum ($d_{b \text{ min}}$)

(SNI 2847:2019 pada Pasal 9.7.5.2)

$$d_{b \text{ min}} = 0,042 s$$

$$= 0,042 \times \text{maksimum } (S_{\text{tumpuan}} \text{ atau } S_{\text{lapangan}})$$

$$= 0,042 \times 150$$

$$= 6,3 \text{ mm}$$

- Cek d_b :

Syarat

$$= d_b \geq d_{b \text{ min}}$$

$$= 10 \geq 6,3 \rightarrow \text{OK}$$

- Luas tulangan yang diperlukan ($A_s \text{ perlu}$)

$$A_s \text{ perlu tumpuan atas} = 481,633 \text{ mm}^2$$

$$A_s \text{ perlu tumpuan bawah} = 374,282 \text{ mm}^2$$

$$A_s \text{ perlu lapangan atas} = 440,916 \text{ mm}^2$$

$$A_s \text{ perlu lapangan bawah} = 1268,728 \text{ mm}^2$$

- Luas tulangan longitudinal torsi (A_l)

(SNI 2847:2019 pada Pasal 22.7.6.1)

$$A_l = (A_t / s) \times p_h$$

$$= 0,479 \times 2140$$

$$= 1063,243 \text{ mm}^2$$

- Luas tulangan longitudinal torsi minimum ($A_{l \text{ min}}$)

(SNI 2847:2019 pada Pasal 9.6.4.3)

$$A_{l \text{ min}} = 0,42 \times \sqrt{f_c} \times \frac{A_{cp}}{f_y} - \left(\frac{A_t}{s} \right) \times p_h$$

$$= 0,42 \times \sqrt{29,05} \times \frac{340000}{420} - 0,489 \times 2140$$

$$= 799,013 \text{ mm}^2$$

- Luas tulangan longitudinal (A_s)

$$A_s = \text{maksimum } (A_l \text{ atau } A_{l \text{ min}})$$

$$= \text{maksimum } (1063,243 \text{ atau } 799,013)$$

$$= 1063,243 \text{ mm}^2$$

- Luas tulangan longitudinal torsi perlu (A_l perlu)

$$\begin{aligned} A_l \text{ perlu tumpuan} &= A_s \text{ perlu tumpuan atas} + A_s \text{ perlu tumpuan bawah} \\ &= 481,633 + 374,282 \\ &= 855,916 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} A_l \text{ perlu lapangan} &= A_s \text{ perlu lapangan atas} + A_s \text{ perlu lapangan bawah} \\ &= 440,916 + 1268,728 \\ &= 1709,644 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

- Luas tul. longitudinal (A_s) + luas tul. longitudinal torsi perlu (A_l perlu)

$$\begin{aligned} A_s + A_l \text{ perlu tumpuan} &= 1063,243 + 855,916 \\ &= 1919,159 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} A_s + A_l \text{ perlu lapangan} &= 1063,243 + 1709,644 \\ &= 2772,888 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

- Jumlah tulangan negatif (n)

$$\begin{aligned} n \text{ tumpuan atas} &= 6 \\ n \text{ tumpuan tengah} &= 4 \text{ (angka kelipatan 2)} \\ n \text{ tumpuan bawah} &= 4 \\ n \text{ tumpuan vertikal} &= 2 + n \text{ tumpuan tengah} / 2 \\ &= 2 + 4 / 2 \\ &= 4 \\ n \text{ lapangan atas} &= 4 \\ n \text{ lapangan tengah} &= 4 \text{ (angka kelipatan 2)} \\ n \text{ lapangan bawah} &= 4 \\ n \text{ lapangan vertikal} &= 2 + n \text{ lapangan tengah} / 2 \\ &= 2 + 4 / 2 \\ &= 4 \end{aligned}$$

- Minimal n (n_{atas} atau n_{bawah})

$$\begin{aligned} \text{Minimal } n \text{ tumpuan} &= \text{minimal } (n \text{ tumpuan atas atau } n \text{ tumpuan bawah}) \\ &= \text{minimal } (6 \text{ atau } 3) \\ &= 6 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Minimal } n \text{ lapangan} &= \text{minimal } (n \text{ lapangan atas atau } n \text{ lapangan bawah}) \\ &= \text{minimal } (3 \text{ atau } 4) \\ &= 4 \end{aligned}$$

- Spasi tumpuan (s_{tumpuan})

$S_{\text{horizontal tumpuan}}$

$$= \frac{b - 2c_c - 2d_s - d_b}{\min(n_{\text{atas}} \text{ atau } n_{\text{bawah}}) - 1}$$

$$= \frac{400 - 2 \times 40 - 2 \times 10 - 22}{4 - 1}$$

$$= 93 \text{ mm}$$

$S_{\text{vertikal tumpuan}}$

$$= \frac{h - 2c_c - 2d_s - d_b}{n_{\text{vertikal}} - 1}$$

$$= \frac{850 - 2 \times 40 - 2 \times 10 - 22}{4 - 1}$$

$$= 243$$

S_{tumpuan}

$$= \text{maksimum } (s_{\text{horizontal}} \text{ atau } s_{\text{vertikal}})$$

$$= \text{maksimum } (93 \text{ atau } 299)$$

$$= 243$$

- Spasi lapangan (s_{lapangan})

$S_{\text{horizontal lapangan}}$

$$= \frac{b - 2c_c - 2d_s - d_b}{\min(n_{\text{atas}} \text{ atau } n_{\text{bawah}}) - 1}$$

$$= \frac{400 - 2 \times 40 - 2 \times 10 - 22}{4 - 1}$$

$$= 93 \text{ mm}$$

$S_{\text{vertikal lapangan}}$

$$= \frac{h - 2c_c - 2d_s - d_b}{n_{\text{vertikal}} - 1}$$

$$= \frac{850 - 2 \times 40 - 2 \times 10 - 22}{3 - 1}$$

$$= 243$$

S_{lapangan}

$$= \text{maksimum } (s_{\text{horizontal}} \text{ atau } s_{\text{vertikal}})$$

$$= \text{maksimum } (93 \text{ atau } 243)$$

$$= 243$$

- Cek spasi tulangan longitudinal :

$$s_{\text{tumpuan}} \leq 300$$

$$= 243 \leq 300 \rightarrow \text{OK}$$

$$s_{\text{lapangan}} \leq 300$$

$$= 243 \leq 300 \rightarrow \text{OK}$$

- Luas tulangan longitudinal (A_s)

$A_{s \text{ tumpuan}}$

$$= (n_{\text{atas}} + n_{\text{bawah}}) \times \frac{\pi}{4} \times d_b^2$$

$$= (6 + 3) \times \frac{3,14}{4} \times 22^2$$

$$= 3421,194 \text{ mm}^2$$

$A_{s \text{ lapangan}}$

$$= (n_{\text{atas}} + n_{\text{bawah}}) \times \frac{\pi}{4} \times d_b^2$$

$$= (3 + 4) \times \frac{3,14}{4} \times 22^2$$

$$= 2660,929 \text{ mm}^2$$

- Luas tulangan longitudinal torsi pasang ($A_{l \text{ pasang}}$)

$$A_{l \text{ pasang tumpuan}} = (n_{\text{tengah}}) \times \frac{\pi}{4} \times d_{bt}^2$$

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

$$= 314,159 \text{ mm}^2$$

$$A_{l \text{ pasang lapangan}} = (n_{\text{tengah}}) \times \frac{\pi}{4} \times d_{bt}^2$$

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

$$= 314,159 \text{ mm}^2$$

- Luas tul. longitudinal (A_s) + luas tul. longitudinal torsi pasang ($A_{l \text{ pasang}}$)

$$A_s \text{ tumpuan} + A_{l \text{ pasang tumpuan}} = 3421,194 + 314,159$$

$$= 3753,535 \text{ mm}^2$$

$$A_s \text{ lapangan} + A_{l \text{ pasang lapangan}} = 2660,929 + 314,159$$

$$= 2975,088 \text{ mm}^2$$

- Cek lentur + torsi :

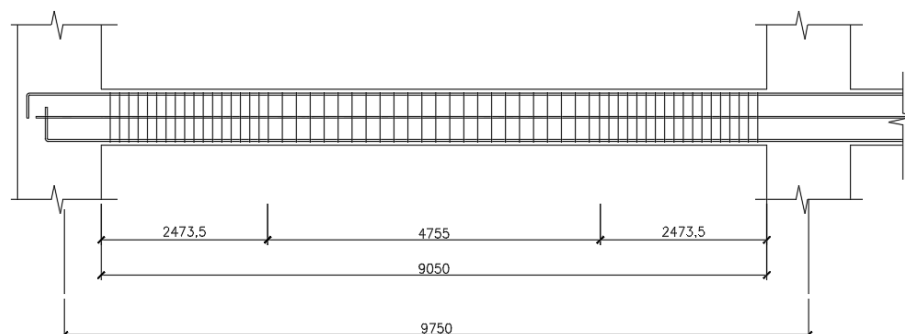
$$A_s \text{ tumpuan} + A_{l \text{ pasang tumpuan}} \geq A_s + A_{l \text{ perlu tumpuan}}$$

$$3753,535 \geq 4115,486 \rightarrow \text{OK}$$

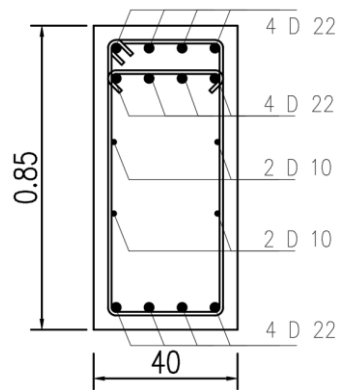
$$A_s \text{ lapangan} + A_{l \text{ pasang lapangan}} \geq A_s + A_{l \text{ perlu lapangan}}$$

$$2975,088 \geq 4115,486 \rightarrow \text{OK}$$

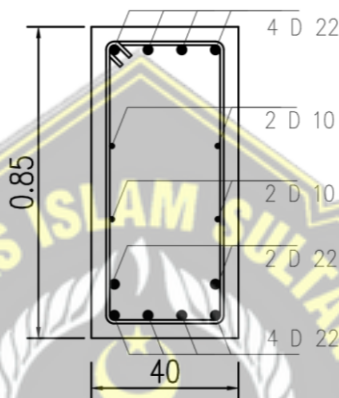
Gambar tulangan balok G1 yang didapat berdasarkan perhitungan di atas dapat dilihat pada Gambar 4. 32 sampai Gambar 4.34.



Gambar 4. 32. Potongan Memanjang Balok



Gambar 4. 33. Tulangan Tumpuan Balok



Gambar 4. 34. Tulangan Tumpuan Balok



4.6.2.5. Rekapitulasi Hasil Tulangan Balok

Dari hasil perhitungan terdapat rekapitulasi tulangan balok yang dapat dilihat pada Tabel 4. 49 di bawah ini.

Tabel 4. 8. Rekapitulasi Tulangan Balok

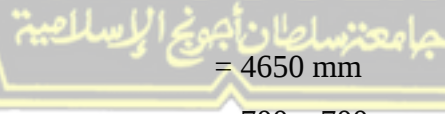
Balok Kode	Dimensi (cm)	Lokasi	Tulangan Longitudinal		Tulangan Transversal		Tul. Torsi
			Tumpuan	Lapangan	Tumpuan	Lapangan	
G1	40 × 85	Atas	8 D22	4 D22	3D10-100	2D10-150	2 D16
		Bawah	4 D22	6 D22			
G2	40 × 80	Atas	6 D22	2 D22	2D10-100	2D10-100	2 D16
		Bawah	3 D22	5 D22			
G3	30 × 60	Atas	4 D19	2 D19	2D10-100	2D10-150	2 D16
		Bawah	2 D19	3 D19			
G4	25 × 60	Atas	4 D19	2 D19	2D10-100	2D10-150	2 D16
		Bawah	2 D19	3 D19			
G5	30 × 45	Atas	4 D19	2 D19	2D10-100	2D10-150	2 D16
		Bawah	2 D19	3 D19			
B1	30 × 70	Atas	4 D16	2 D16	2D10-100	2D10-150	2 D13
		Bawah	3 D16	2 D16			
B2	25 × 60	Atas	3 D16	2 D16	2D10-100	2D10-100	2 D13
		Bawah	3 D16	2 D16			
B3	25 × 50	Atas	3 D16	2 D16	2D10-100	2D10-150	2 D13
		Bawah	3 D16	2 D16			
B4	25 × 40	Atas	3 D16	2 D16	2D10-100	2D10-100	2 D13
		Bawah	3 D16	2 D16			
B5	20 × 40	Atas	3 D16	2 D16	2D10-100	2D10-100	2 D13
		Bawah	3 D16	2 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 P_n - M kolom juga disertakan dalam analisis kapasitas desain kolom untuk mengetahui kapasitas kolom terhadap gaya aksial yang menumpunya.

Gambar 4. 35. Denah Kolom K1 Sampel

جامعہ سلطان أبوبنج الإسلامية
= 4650 mm



جامعہ سلطان أبوبنج الإسلامیہ
= 4650 mm

جامعہ سلطان أبوبنج الإسلامية
= 4650 mm

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+})	= 294,814 kNm
Momen kapasitas balok (M_{nb-})	= 526,138 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 atas = 173,104 kN
- P_u kolom desain = 63,340 kN
- V_u kolom desain = 1084,751 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

$$\text{Syarat} \quad = \frac{b}{h} \geq 0,4 = \frac{700}{700} \geq 0,4 = 1 \geq 0,4 \rightarrow \text{OK}$$

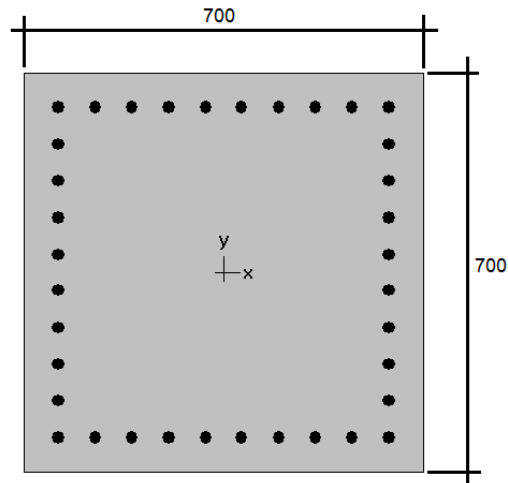
3. Cek syarat komponen struktur tahan gempa

Gaya tekan aksial P_u akibat kombinasi beban yang kurang dari $0,3 A_g f_c'$

$$\begin{aligned} \text{Syarat} &= P_u \leq 0,3 A_g \times f_c' \\ &= 173,104 \leq 0,3 \times 490000 \times 29,05 \times 10^{-3} \\ &= 173,104 \leq 9720 \rightarrow \text{OK} \end{aligned}$$

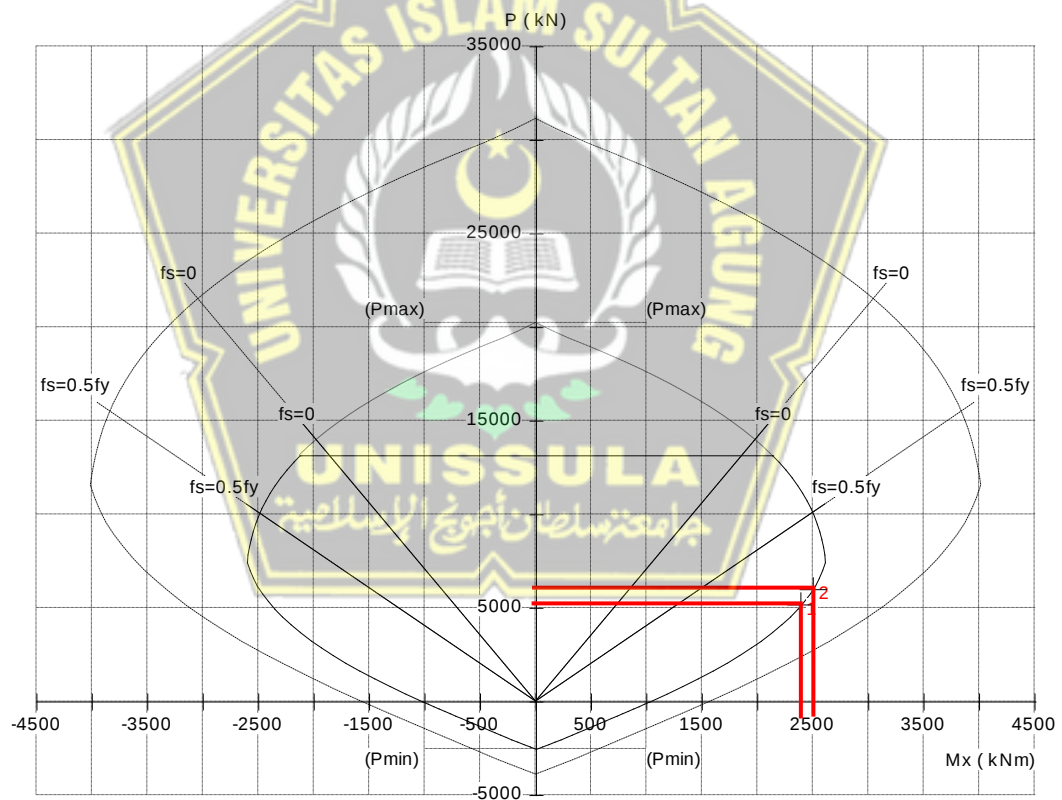
4. Menentukan tulangan longitudinal penahan lentur

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 *trial and error* menggunakan program *SPColumn* ditunjukkan pada Gambar 4. 36.



Gambar 4. 36. 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 4.37 dan Tabel 4.50.



Gambar 4. 37. Diagram Interaksi P_n - M_{pr} SPColumn Kolom K1

Tabel 4. 50. 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	839	0,00082	0,65

$$\begin{aligned}
0,01 A_g &= 0,01 \times 490000 \\
&= 4900 \text{ mm}^2 \\
0,06 A_g &= 0,06 \times 490000 \\
&= 29400 \text{ mm}^2 \\
A_{st} &= n \times 1/4 \times \pi \times D^2 \\
&= 24 \times 1/4 \times 3,14 \times 22^2 \\
&= 9118,56 \text{ mm}^2 \\
\text{Syarat} &= 0,01 A_g < A_{st} < 0,06 A_g \\
&= 4900 < 9118,56 < 29400 \rightarrow \text{OK}
\end{aligned}$$

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:

- a. $1/6$ tinggi bersih kolom $= 4650 / 6 = 775 \text{ mm}$
- b. Dimensi maksimum kolom $= 700 \text{ mm}$
- c. 450 mm

Jadi, jarak ℓ_o digunakan 700 mm

- b) Penentuan $s_{\max}$ merupakan nilai terbesar dari:

- a. $1/4$ dimensi komponen struktur minimum $= 700 / 4 = 175 \text{ mm}$
- b. $6D = 6 \times 22 = 132 \text{ mm}$
- c. s_o , tidak melebihi 150 mm dan tidak kurang dari 100 mm

$$s_o = 100 + \frac{350 - 0,33 (700 - 2 \times 40 - 2(10) - 2)}{3} = 150,45 \text{ mm}$$

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_{c1})

$$b_{c1} = h - (2 \times c_c) = 700 - (2 \times 40) = 620 \text{ mm}$$

- 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)

$$k_f = \frac{f'_c}{175} + 0,6 = \frac{29,05}{175} + 0,6 = 0,776 \rightarrow \text{minimal } 1$$

- Faktor efektivitas pengekangan (k_n)

$$k_n = \frac{n_i}{n_i - 2} = \frac{24}{24 - 2} = 1,09$$

- Luas penampang total tulangan transversal (A_{sh})

$$\begin{aligned} A_{sh1} &= 0,3 \times \left(\frac{A_g}{A_{ch}} - 1 \right) \times \frac{f'_c}{f_{yt}} \\ &= 0,3 \times \left(\frac{490000}{384400} - 1 \right) \times \frac{29,05}{420} \\ &= 0,0057 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} A_{sh2} &= 0,09 \times \frac{f'_c}{f_{yt}} \\ &= 0,09 \times \frac{40}{420} \\ &= 0,00623 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} A_{sh3} &= 0,2 \times k_f \times k_n \times \frac{P_u}{f_{yt} \times A_{ch}} \\ &= 0,2 \times 1 \times 1,09 \times \frac{173,104 \times 10^3}{420 \times 384400} \\ &= 0,00463 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{A_{sh}}{s} &= b_c \times A_{sh \text{ max}} \\ &= 620 \times 0,00623 \\ &= 3,859 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} A_{sh} &= s \times \frac{A_{sh}}{s} \\ &= 100 \times 3,8595 \\ &= 385,95 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

Maka dapat digunakan Sengkang (*hoop*) 6 D13-100

$$A_s \text{ pasang} = 6 \text{ kaki} \times 1/4 \times 3,14 \times 13^2 = 795,99 \text{ mm}^2$$

$$\text{Syarat} = A_s \text{ pasang} > A_{sh}$$

$$= 795,99 > 702,86 \text{ mm}^2 \rightarrow \text{OK}$$

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:

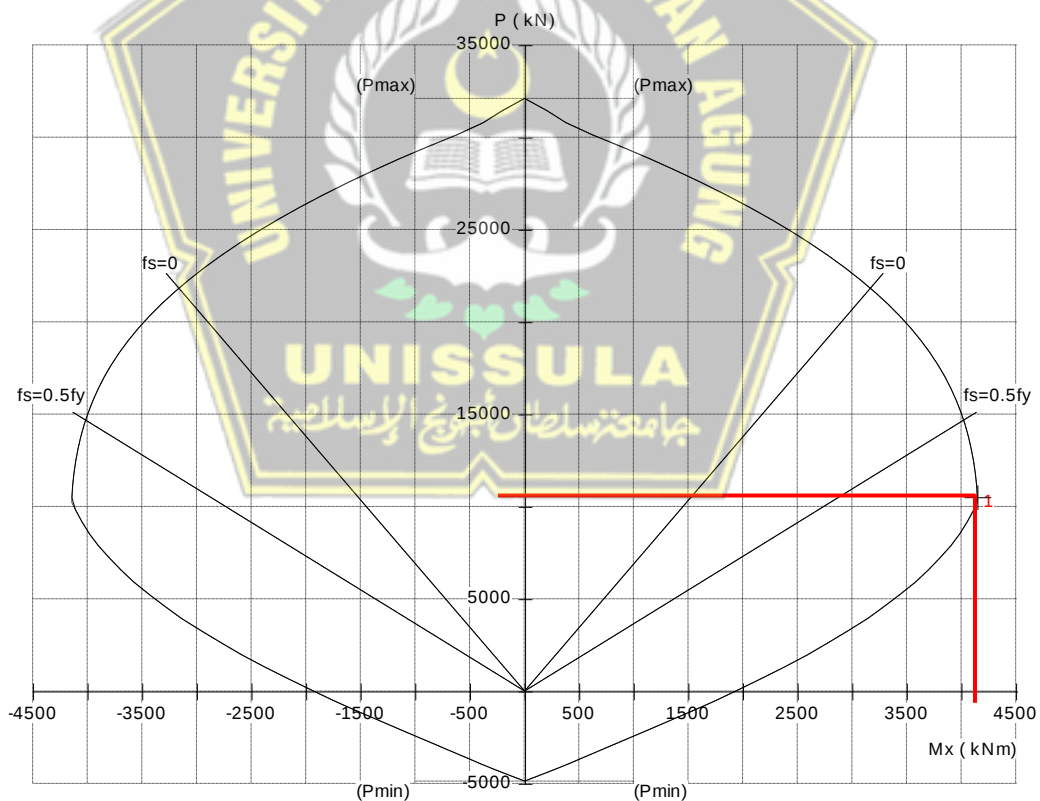
a. $6D = 6 \times 22 = 132 \text{ mm}$

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 $1,25 f_y$ dan hasil analisis interaksi P_n - M SPColumn dengan $1,25 f_y$ dapat dilihat pada Gambar 4.38 dan Tabel 4.51.



Gambar 4. 38. Diagram Interaksi P_n - M SPColumn Kolom K1 dengan $1,25 f_y$

Tabel 4. 51. 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	10524	4138	4140,98	1,001	456	839	0,00253	1,000

- Probable Moment of Column (M_{prc})

$$M_{prc} = 2061,028 \text{ kNm}$$

- Tinggi bersih kolom (L_n)

$$L_n = \text{Tinggi Kolom} - \text{Tinggi Balok}$$

$$= 4650 - 500$$

$$= 3800 \text{ mm}$$

$$= 3,80 \text{ m}$$

- Probable Moment of Beam (M_{prb})

$$M_{prb \text{ atas}} = 128881810 \text{ Nmm} = 128,88 \text{ kNm}$$

$$M_{prb \text{ bawah}} = 247294877 \text{ Nmm} = 247,29 \text{ kNm}$$

$$\Sigma M_{prb} = 128,88 + 247,29$$

$$= 376,18 \text{ kNm}$$

- 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)

$$V_{e1} = \frac{M_{prc \text{ atas}} + M_{prc \text{ bawah}}}{L_n}$$

$$= \frac{4140,98 + 4140,98}{3,58}$$

$$= 2313,40 \text{ kN}$$

V_e tidak perlu melebihi dari:

$$V_{e2} = \frac{\Sigma M_{prb} \times D_{f \text{ atas}} + \Sigma M_{prb} \times D_{f \text{ bawah}}}{L_n}$$

$$= \frac{376,18 \times 0,5 + 376,18 \times 0,5}{3,58}$$

$$= 105,08 \text{ kN}$$

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 $s = 100 \text{ mm}$, 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)

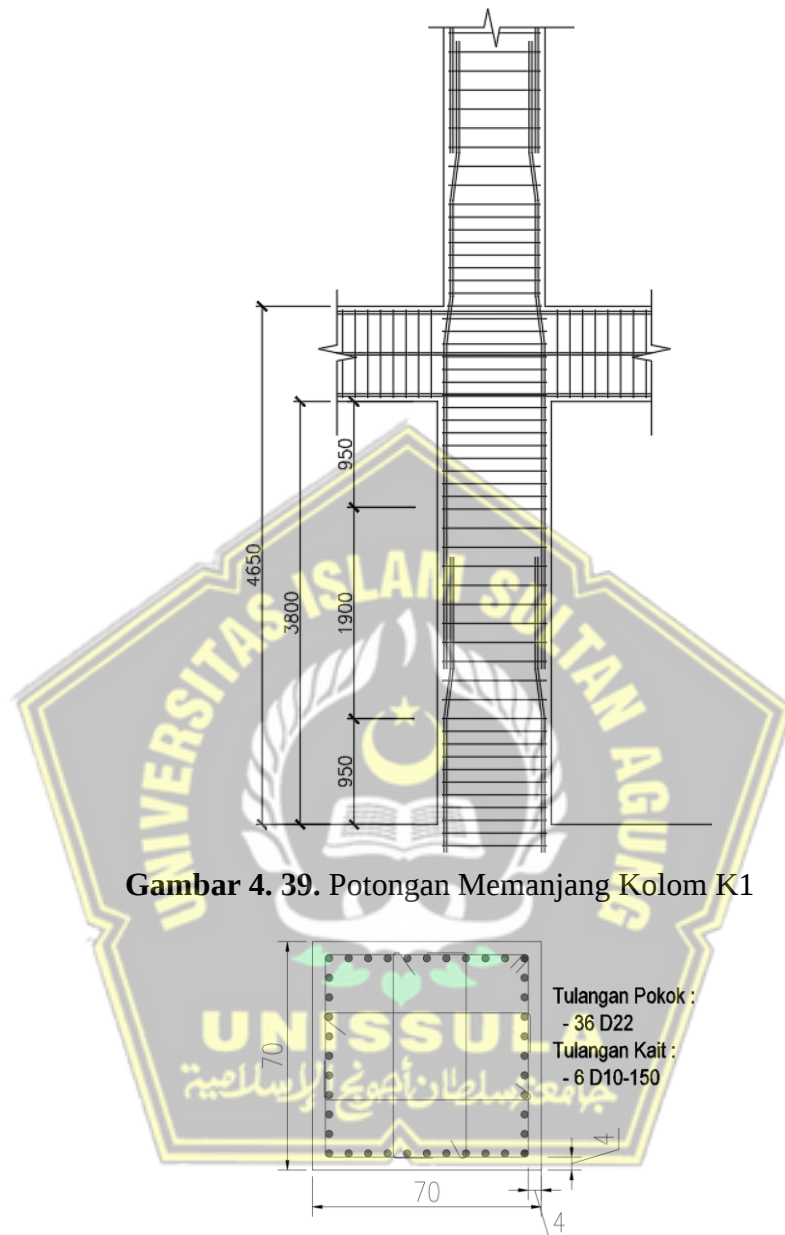
$$\begin{aligned} V_c &= 0,17 \times \left(1 + \frac{P_u}{14 A_g}\right) \times \lambda \times \sqrt{f'_c} \times b_w \times d \\ &= 0,17 \times \left(1 + \frac{173,104 \times 10^3}{14 \times 490000}\right) \times 1 \times \sqrt{29,05} \times 700 \times 636 \\ &= 420,188 \text{ kN} \end{aligned}$$

Karena $V_c > V_u$ ($V_u = 105,08 \text{ kN}$) maka daerah di luar ℓ_0 dipasang tulangan sengkang dengan jarak:

$$s = \frac{d}{2} = \frac{636}{2} = 318 \text{ mm}$$

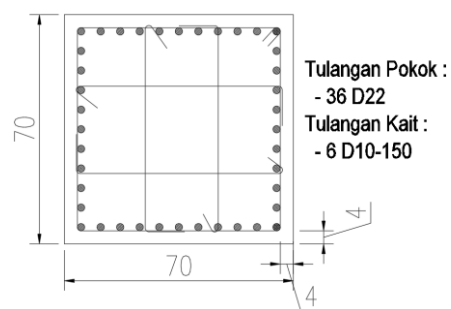
Berdasarkan SNI 2847:2019 Pasal 18.7.5.5, jarak tulangan transversal diluar ℓ_0 tidak boleh lebih dari 150 mm atau $6d_b$ (132 mm). Maka dipasang jarak maksimal 150 mm.

Berikut adalah gambar dari hasil perhitungan ditunjukkan pada Gambar 4.39 sampai Gambar 4.41.



Gambar 4. 39. Potongan Memanjang Kolom K1

Gambar 4. 40. Tulangan Ujung Kolom K1



Gambar 4. 41. Tulangan Tengah 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 4.66.

Tabel 4. 9. Rekapitulasi Tulangan Kolom

No	Tipe Kolom	Dimensi Kolom	Tulangan Pokok	Tulangan Geser	
				Tumpuan	Lapangan
1	K1	700 × 700	36 D22	6 D13-100	6 D13-150
2	K2	600 × 600	28 D22	5 D13-100	5 D13-150
3	K3	500 × 500	16 D22	6 D10-100	6 D10-150
4	K4	400 × 400	16 D19	6 D10-100	6 D10-150

4.6.4. Pengecekan Syarat *Strong Column-Weak Beam*

Kekuatan lentur kolom harus memenuhi Persamaan 4.13 sesuai SNI 2847:2019 Pasal 18.7.3.2 sebagai berikut:

$$\sum M_{nc} \geq 1,2 \sum M_{nb} \dots\dots\dots (4.13)$$

1. Menentukan nilai $\sum M_{nb}$

$$\begin{aligned} \sum M_{nb} &= M_{nb}^+ + M_{nb}^- \\ &= 203,71 + 384,96 \\ &= 588,67 \text{ kNm} \end{aligned}$$

2. Menentukan nilai $\sum M_{nc}$

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:

$$\begin{aligned} \sum M_{nc} &= M_{nc \text{ atas}} + M_{nc \text{ bawah}} \\ &= 3675,80 + 0 \\ &= 3675,80 \text{ kNm} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Syarat} &= \sum M_{nc} \geq 1,2 \sum M_{nb} \\ &= \frac{\sum M_{nc}}{\sum M_{nb}} \geq 1,2 \\ &= \frac{3675,80}{588,67} \geq 1,2 \\ &= 6,24 \geq 1,2 \rightarrow \text{OK} \end{aligned}$$

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 B3 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}^+)
 $M_{prb}^+ = 598,60 \text{ kNm}$
- Probable Moment of Beam Negative (M_{prb}^-)
 $M_{prb}^- = 874,48 \text{ kNm}$
- Faktor distribusi kolom (D_f)
 $D_f = 0,5 \rightarrow \text{OK}$
- Momen terfaktor diperbesar (M_c)
 $M_c = 0,5 \times (M_{prb}^+ + M_{prb}^-)$
 $= 0,5 \times (598,66 + 874,48)$
 $= 736,54 \text{ kNm}$

4.6.5.4. Gaya Geser pada Kolom

- Tinggi efektif kolom (L_n)

$$\begin{aligned}L_n &= \text{Tinggi Kolom} - \text{Tinggi Balok} \\&= 4650 - 850 \\&= 3800 \text{ mm} \\&= 3,80 \text{ m}\end{aligned}$$

- Gaya geser kolom (V_h)

$$\begin{aligned}V_h &= \frac{M_c}{L_n} \\&= \frac{736,54}{3,80} \\&= 193,83 \text{ kN}\end{aligned}$$

4.6.5.5. Gaya Geser pada Tulangan Longitudinal Balok

- Luas tulangan atas 6 D22, $A_s = 2280,80 \text{ mm}^2$

$$\begin{aligned}T_1 &= 1,25 \times A_s \times f_y \\&= 1,25 \times 2280,80 \times 420 \\&= 1197,42 \text{ kN}\end{aligned}$$

- Gaya tekan yang bekerja pada beton di sisi kiri hubungan balok kolom, sebesar:

$$C_1 = T_1 = 1197,42 \text{ kN}$$

- Luas tulangan bawah 2 D19, $A_s = 567,06 \text{ mm}^2$

$$\begin{aligned}T_2 &= 1,25 \times A_s \times F_y \\&= 1,25 \times 2280,80 \times 420 \\&= 1197,42 \text{ kN}\end{aligned}$$

- Gaya tekan yang bekerja pada beton di sisi kanan hubungan balok kolom, sebesar :

$$C_2 = T_2 = 1197,42 \text{ kN}$$

4.6.5.6. Kuat Geser pada Joint

- Kuat geser pada joint (V_j) sebesar:

$$\begin{aligned}V_j &= T_1 + T_2 - V_h \\&= 1197,42 + 1197,42 - 193,83 \\&= 2201,01 \text{ kN}\end{aligned}$$

4.6.5.7. Kuat Geser yang dikekang Keempat Sisi

- Kuat geser nominal (V_n)

$$\begin{aligned} V_n &= 1,7 \times \lambda \times \sqrt{f'_c} \times A_g \\ &= 1,7 \times 1 \times \sqrt{29,05} \times 810000 \times 10^{-3} \\ &= 4489,71 \text{ kN} \end{aligned}$$

- Kapasitas geser tereduksi (ϕV_n)

$$\phi V_n = \phi \times V_n = 0,85 \times 4489,71 = 3816,25 \text{ kN}$$

- Cek $\phi V_n > V_j$

$$\begin{aligned} \text{Syarat} &= \phi V_n > V_j \\ &= 3816,25 > 2201,01 \rightarrow \text{OK} \end{aligned}$$

Dari analisis perhitungan yang telah dilakukan, kuat geser yang dikekang keempat sisinya lebih besar daripada gaya geser *joint* yang ditimbulkan. Dengan nilai 6744,07 kN > 840,58 kN maka memenuhi persyaratan. Gambar tulangan hubungan balok-kolom dari hasil perhitungan dapat dilihat pada Gambar 4.42.



Gambar 4. 42. Hubungan Balok Kolom (*Joint*)

4.7. Rekapitulasi Hasil Analisis dan Perancangan

Rekapitulasi hasil analisis dan perancangan yang telah dilakukan pada Gedung Rumah Sakit di Purwokerto Banyumas sebagai berikut:

1. Perancangan Gedung Rumah Sakit 4 lantai di Purwokerto Banyumas dengan kondisi Tanah Sedang (SD) yang menggunakan sistem struktur ganda (SRPMK) dengan parameter desain pada Tabel 4.71 sebagai berikut:

Tabel 4. 10. Parameter Respons Spektra

Parameter Respons Spektra		
Kategori Risiko		IV
Faktor Keutamaan	I_e	1,5
Klasifikasi Situs		SD (Tanah Sedang)
Percepatan gempa MCE_R terpetakan untuk periode pendek	S_s	0,8189
Percepatan gempa MCE_R terpetakan untuk periode 1 detik	S_1	0,3939
Faktor amplifikasi periode pendek	F_a	1,22413
Faktor amplifikasi periode 1 detik	F_v	1,906087
Percepatan pada periode pendek	S_{MS}	1,019984
Percepatan pada periode 1 detik	S_{M1}	0,750832
Percepatan desain pada periode pendek	S_{DS}	0,6800
Percepatan desain pada periode 1 detik	S_{D1}	0,5006
Parameter periode	T_0	0,1472
	T_s	0,7361

2. Analisis hasil respon dinamik struktur akibat pembebanan gempa sebagai berikut:

a) Analisis Respon Dinamik

Dari analisis respon dinamik, diperoleh hasil partisipasi massa sebagai berikut:

- Mode 1 = Translasi arah X sebesar 69%
- Mode 2 = Translasi arah Y sebesar 69%
- Mode 3 = Rotasi arah Z sebesar 69%

b) Analisis Gempa dari Struktur Atas

Dari analisis dinamik respon spektrum, diperoleh hasil sebagai berikut:

- Beban gempa untuk arah X

- $T_x = 0,856$ detik
- $V_{\text{dinamik } X} = 27252,416$ kN
- Beban gempa untuk arah Y
 - $T_y = 0,851$ detik
 - $V_{\text{dinamik } Y} = 27426,491$ kN

c) Simpangan Antar Tingkat

Simpangan antar tingkat (*Story Drift*) telah memenuhi syarat. Adapun simpangan antar tingkat maksimum yang terjadi adalah:

- $\text{Story Drift } X = 29,22 \text{ mm} < 0,01 h / \rho = 31,38 \text{ mm}$
- $\text{Story Drift } Y = 28,33 \text{ mm} < 0,01 h / \rho = 31,38 \text{ mm}$

d) Pengecekan Efek P-Delta

Pengecekan efek P-Delta dari struktur menyimpulkan bahwa struktur tidak dipengaruhi oleh efek P-Delta.

e) Pengecekan Ketidakberaturan Torsi

Pengecekan ketidakberaturan torsi menyimpulkan bahwa tidak terdapat ketidakberaturan torsi horizontal dan tidak terdapat ketidakberaturan torsi vertikal arah X dan arah Y.

3. Analisis gaya dalam yang diperoleh dengan menggunakan ETABS sebagai berikut:

a) Pelat

Dimensi pelat 9750 x 9750 mm dengan tebal 125 mm

- M_{max} akibat $M_{11 \text{ max}} = 5,134$ kN-m
- M_{min} akibat $M_{11 \text{ min}} = -12,318$ kN-m
- M_{max} akibat $M_{22 \text{ max}} = 3,801$ kN-m
- M_{min} akibat $M_{22 \text{ min}} = -7,148$ kN-m
- $V_u = 8,237$ kN

b) Balok

Dimensi balok G1 400 x 850 mm

- | | |
|---------------------------------------|--------------------------------|
| ▪ M_u tumpuan (-) = -150,1048 kN-m | ▪ $P_u = 0$ kN |
| ▪ M_u tumpuan (+) = 199,1086 kN-m | ▪ V_u tumpuan = 282,5748 kN |
| ▪ M_u lapangan (-) = -140,3135 kN-m | ▪ V_u lapangan = 229,1807 kN |
| ▪ M_u lapangan (+) = 395,4091 kN-m | ▪ $T_u = 75,0145$ kN-m |

c) Kolom

Dimensi kolom K1 700 x 700 mm

▪ P_u kolom atas = 7103,00 kN

▪ P_u kolom desain = 5998,853 kN

▪ V_u kolom desain = 99,765 kN

▪ P_u kolom bawah = 0 kN

4. Hasil perancangan berupa desain elemen struktur yang dapat memikul beban gempa dan beban gravitasi sebagai berikut:

a) Pelat

Rekapitulasi hasil penulangan pelat beton pada perancangan ditunjukkan pada Tabel 4.73 sebagai berikut:

Tabel 4. 11. Rekapitulasi Hasil Tulangan Pelat

Pelat	L_x (m)	L_y (m)	Arah	Tumpuan		Lapangan	
				Atas	Bawah	Atas	Bawah
S1	9,75	9,75	X	D10-150	D10-150	D10-150	D10-150
			Y	D10-150	D10-150	D10-150	D10-150

b) Balok

Rekapitulasi hasil penulangan balok pada perancangan ditunjukkan pada Tabel 4.54 sebagai berikut:

Tabel 4. 12. Rekapitulasi Tulangan Balok

Balok Kode	Dimensi (cm)	Lokasi	Tulangan Longitudinal		Tulangan Transversal		Tul. Torsi
			Tumpuan	Lapangan	Tumpuan	Lapangan	
G1	40 × 85	Atas	8 D22	4 D22	3D10-100	2D10-150	2 D16
		Bawah	4 D22	6 D22			
G2	40 × 80	Atas	6 D22	2 D22	2D10-100	2D10-100	2 D16
		Bawah	3 D22	5 D22			
G3	30 × 60	Atas	4 D19	2 D19	2D10-100	2D10-150	2 D16
		Bawah	2 D19	3 D19			
G4	25 × 60	Atas	4 D19	2 D19	2D10-100	2D10-150	2 D16
		Bawah	2 D19	3 D19			
G5	30 × 45	Atas	4 D19	2 D19	2D10-100	2D10-150	2 D16
		Bawah	2 D19	3 D19			
B1	30 × 70	Atas	4 D16	2 D16	2D10-100	2D10-150	2 D13
		Bawah	3 D16	2 D16			
B2	25 × 60	Atas	3 D16	2 D16	2D10-100	2D10-100	2 D13
		Bawah	3 D16	2 D16			
B3	25 × 50	Atas	3 D16	2 D16	2D10-100	2D10-150	2 D13
		Bawah	3 D16	2 D16			
B4	25 × 40	Atas	3 D16	2 D16	2D10-100	2D10-100	2 D13
		Bawah	3 D16	2 D16			
B5	20 × 40	Atas	3 D16	2 D16	2D10-100	2D10-100	2 D13
		Bawah	3 D16	2 D16			

c) Kolom

Rekapitulasi hasil penulangan kolom pada perancangan ditunjukkan pada Tabel 4.55 sebagai berikut:

Tabel 4. 13. Rekapitulasi Tulangan Kolom

No	Tipe Kolom	Dimensi Kolom	Tulangan Pokok	Tulangan Geser	
				Tumpuan	Lapangan
1	K1	700 × 700	36 D22	6 D13-100	6 D13-150
2	K2	600 × 600	28 D22	5 D13-100	5 D13-150
3	K3	500 × 500	16 D22	6 D10-100	6 D10-150
4	K4	400 × 400	16 D19	6 D10-100	6 D10-150

BAB V

PENUTUP

5.1. Kesimpulan

Kesimpulan yang didapat berdasarkan hasil analisis dan perancangan yang telah dibahas pada bab-bab sebelumnya sebagai berikut:

1. Sistem struktur merupakan Sistem Rangka Pemikul Momen Khusus (SRPMK) dengan Faktor Koefisien Modifikasi (R) = 8, Faktor Kuat Lebih Sistem (Q_0) = 3 dan Faktor Pembesaran Defleksi (C_d) = 5,5.
2. Berikut merupakan hasil respon spektra yang diperoleh:

- Parameter Desain

Parameter Desain Pada Perancangan Gedung Rumah Sakit 4 lantai di Purwokerto Banyumas sebagai berikut:

- Kategori Risiko = IV
- Faktor Keutamaan (I_e) = 1,5
- Klasifikasi Situs = SD (Tanah Sedang)
- Percepatan Gempa Terpetakan Periode Pendek (S_s) = 0,8198
- Percepatan Gempa Terpetakan Periode 1 Detik (S_1) = 0,3939
- Percepatan Desain Pada Periode Pendek (S_{DS}) = 0,7469
- Percepatan Desain Pada Periode 1 Detik (S_{D1}) = 0,6800

Berikut merupakan hasil respon struktur yang diperoleh:

- Ragam Getar

Struktur mengalami translasi pada arah X pada ragam 1 dan struktur mengalami translasi pada arah Y pada ragam 2.

- Periode Getar

Periode Getar yang diperoleh yaitu periode minimum ($T_{\min}$) = 0,666 detik, periode maksimum ($T_{\max}$) = 0,933 detik, dan periode yang digunakan yaitu T_x = 0,856 detik dan T_y = 0,851 detik.

- Simpangan Antar Tingkat

Kontrol simpangan antar tingkat telah memenuhi syarat dimana simpangan terbesar arah X = 29,22 mm kurang dari batas izin = 31,38 mm dan simpangan terbesar arah Y = 28,33 mm kurang dari batas izin = 31,38 mm.

- Efektivitas Struktur

Gaya lateral yang ditahan rangka pemikul momen (*frame*) pada arah X = $(17868,04 \text{ kN} / 36151,33 \text{ kN}) \times 100\% = 49,43 \%$ dan pada arah Y = $(18065,14 \text{ kN} / 36364,82 \text{ kN}) \times 100\% = 49,68 \%$, 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 yang terbesar dimensinya dengan tebal 125 mm diperoleh lendutan total (δ_{LT}) = 8,244 mm < batas lendutan maksimum ($L_x/240$) = 20,833 mm sudah memenuhi syarat sesuai SNI 2847:2019 Tabel 24.2.2 menggunakan tulangan D10-150.

b) Balok

Perancangan balok dengan dimensi yang terbesar didapatkan syarat penulangan lentur $\phi M_n^+ \text{ tumpuan} = 301,06 \text{ kNm} > 1/2 \phi M_n^- = 291,43 \text{ kNm}$ dan $\phi M_n^+ \text{ lapangan} = 282,99 \text{ kNm} > 1/4 \phi M_{n \text{ max}} = 145,72 \text{ kNm}$ sudah memenuhi syarat sesuai SNI 2847:2019 Pasal 9.6.1 dan syarat penulangan geser $\phi V_n = 481,69 \text{ kN} / V_u = 191,44 \text{ kN} = 2,51 > 1$ sudah memenuhi syarat sesuai SNI 2847:2019 Pasal 22.5 menggunakan tulangan tumpuan atas 6 D22 dan tulangan lapangan bawah 4 D22.

c) Kolom

Perancangan kolom dengan dimensi yang terbesar didapatkan kekuatan lentur kolom ($\sum M_{nc}$) = 3675,80 kNm / kekuatan lentur balok ($\sum M_{nb}$) = 588,67 kNm = 6,24 > 1,2 sudah memenuhi syarat sesuai SNI 2847:2019 Pasal 18.7.3.2 menggunakan tulangan pokok 24 D22 dan tulangan geser 6 D13-100.

5.2. Saran

Saran yang didapat berdasarkan hasil analisis dan perancangan yang telah dibahas pada bab-bab sebelumnya sebagai berikut:

1. Struktur bangunan gedung yang dirancang lebih baik mengikuti perkembangan standar SNI yang terbaru dikarenakan standar SNI terbaru menyesuaikan dengan kondisi dan teknologi pada saat itu sehingga struktur yang dihasilkan nantinya selalu memenuhi standar SNI terbaru.
2. Perhitungan struktur bangunan gedung yang menggunakan program ETABS dan sebagainya lebih baik disertakan dengan perhitungan secara manual agar dapat menghindari adanya kesalahan dalam penginputan data pada program atau kurangnya pengetahuan terhadap program yang digunakan.



DAFTAR PUSTAKA

- Atmadja, H. S., & Maulana, S. A. (2017). *Redesign Gedung Training Centre II Universitas Diponegoro Kota Semarang*. (Tugas Akhir, Universitas Islam Sultan Agung).
- Budiono, B. dkk. (2017). *Contoh Desain Bangunan Tahan Gempa*. Bandung: ITB Press.
- Musthofa, E., & Fasikhullisan. (2019). *Perencanaan Gedung Enam Tingkat Rumah Sakit Royal Biringkanaya di Makasar Berdasarkan SNI 1726-2012*. (Tugas Akhir, Universitas Islam Sultan Agung).
- Nasional, B. S. (2019). *SNI 1726-2019 : Tata Cara Perencanaan Ketahanan Gempa untuk Struktur Bangunan Gedung dan Non Gedung*. Jakarta: Badan Standarisasi Nasional, 693.
- Nasional, B. S. (2019). *SNI 2847-2019 : Persyaratan Beton Struktural untuk Bangunan Gedung dan Penjelasannya*. Jakarta: Badan Standarisasi Nasional, 694.
- Nasional, B. S. (2020). *SNI 1727-2020 : Beban Desain Minimum dan Kriteria Terkait untuk Bangunan Gedung dan Struktur Lain*. Jakarta: Badan Standarisasi Nasional, 235.
- PU, Puskim. (2021). *Desain Spektra Indonesia*. <http://rsa.ciptakarya.pu.go.id/2021>
- Putra, R. B. A. & Budiyanto, S. (2022). *Redesain Struktur Gedung Dua Belas Lantai Berdasarkan SNI 1726-2019 (Studi pada Struktur Gedung FT-MIPA UNIMUS Semarang)*. (Tugas Akhir, Universitas Islam Sultan Agung).
- Reza, Alif Muhammad. (2021, 13 Januari). *Penulangan Balok*. 8 Minutes Learn, <https://youtu.be/iWj6L-jefoU>
- Reza, A. M. (2022, 1 September). *Desain Penulangan Lentur Pelat*. 8 Minutes Learn, <https://youtu.be/q7AhrEsfZOE>
- Setiawan, A. (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).