

TUGAS AKHIR

SISTEM PERKUATAN STRUKTUR MENGGUNAKAN *CARBON FIBER REINFORCED POLYMER (CFRP)* PADA GEDUNG 7 LANTAI

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



Disusun Oleh :

**Nunik Rizkia
NIM : 30201900161**

**Olifah Putri
NIM : 30201900165**

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

LEMBAR PENGESAHAN

SISTEM PERKUATAN STRUKTUR MENGGUNAKAN *CARBON FIBER REINFORCED POLYMER (CFRP)* PADA GEDUNG 7 LANTAI



Nunik Rizkia
NIM : 30201900161



Olifah Putri
NIM : 30201900165

Telah disetujui dan disahkan di Semarang, 23 Januari 2023

Tim Penguji

1. **Prof. Dr. Ir. Antonius, M.T.**
NIDN: 0605046703
2. **Muhamad Rusli Ahyar, ST., M.Eng.**
NIDN: 0625059102
3. **Ir. H. Prabowo Setiyawan, M.T., Ph.D**
NIDN: 0607046802

Tanda Tangan

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: 33 / A.2 / SA – T / I / 2023

Pada hari ini tanggal 23-01-2023 berdasarkan surat keputusan Dekan Fakultas Teknik, Universitas Islam Sultan Agung perihal penunjukan Dosen Pembimbing Utama dan Dosen Pembimbing Pendamping:

1. Nama : Prof. Dr. Ir. Antonius, MT
Jabatan Akademik : Guru Besar
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:

Nunik Rizkia
NIM : 30201900161

Olifah Putri
NIM : 30201900165

Judul : Sistem Perkuatan Struktur Menggunakan *Carbon Fiber Reinforced Polymer* (CFRP) Pada Gedung 7 Lantai

dengan tahapan sebagai berikut :

No	Tahapan	Tanggal	Keterangan
1	Penunjukan dosen pembimbing	16/09/2022	ACC
2	Seminar Proposal	01/11/2022	ACC
3	Pengumpulan data	Oktober 2022	ACC
4	Analisis data	November 2022	ACC
5	Penyusunan laporan	November 2022	ACC
6	Selesai laporan	15/01/2023	ACC

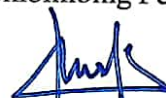
Demikian Berita Acara Bimbingan Tugas Akhir / Skripsi ini dibuat untuk diketahui dan dipergunakan seperlunya oleh pihak-pihak yang berkepentingan

Dosen Pembimbing Utama



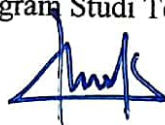
Prof. Dr. Ir. Antonius, MT.

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 dibawah ini :

NAMA : Nunik Rizkia

NIM : 30201900161

Dengan ini menyatakan bahwa Tugas Akhir yang berjudul :

“SISTEM PERKUATAN STRUKTUR MENGGUNAKAN *CARBON FIBER REINFORCED POLYMER* (CFRP) PADA GEDUNG 7 LANTAI”

Benar bebas 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.

Semarang, 12 Januari 2023

Yang membuat pernyataan



PERNYATAAN BEBAS PLAGIASI

Saya yang bertanda tangan dibawah ini :

NAMA : Olifah Putri

NIM : 30201900165

Dengan ini menyatakan bahwa Tugas Akhir yang berjudul :

“SISTEM PERKUATAN STRUKTUR MENGGUNAKAN *CARBON FIBER REINFORCED POLYMER* (CFRP) PADA GEDUNG 7 LANTAI”

Benar bebas 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.

Semarang, 12 Januari 2023

Yang membuat pernyataan



Olifah Putri

NIM : 30201900165

PERNYATAAN KEASLIAN

Saya yang bertanda tangan dibawah ini :

NAMA : Nunik Rizkia
NIM : 30201900161
JUDUL TUGAS AKHIR : Sistem Perkuatan Struktur Menggunakan *Carbon Fiber Reinforced Polymer* (CFRP) Pada Gedung 7 Lantai

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

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

Demikian pernyataan ini saya buat.

Semarang, 12 Januari 2022

Yang membuat pernyataan,



Nunik Rizkia

NIM : 30201900161



PERNYATAAN KEASLIAN

Saya yang bertanda tangan dibawah ini :

NAMA : Olifah Putri
NIM : 30201900165
JUDUL TUGAS AKHIR : Sistem Perkuatan Struktur Menggunakan *Carbon Fiber Reinforced Polymer* (CFRP) Pada Gedung 7 Lantai

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

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

Demikian pernyataan ini saya buat.

Semarang, 12 Januari 2023

Yang membuat pernyataan,



Olifah Putri

NIM : 30201900165

MOTO

“Kamu (umat Islam) adalah umat terbaik yang dilahirkan untuk manusia, (karena kamu) menyuruh (berbuat) 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-Imran: 110)

“Tidak ada satu pun perjuangan yang tidak melelahkan”

(Q.S. Al-Baqarah ayat 155)

“Allah tidak akan pernah membebani seseorang melainkan sesuai dengan kesanggupannya.”

(Q.S Al-Baqarah ayat 2)

"Teruslah berusaha dengan harapan apa yang kamu impikan. Dan janganlah lupa untuk mendampingi usaha tersebut dengan kesabaran serta keikhlasan"

(Anonim)

“Jika kamu tidak membangun mimpimu sendiri, maka seseorang akan membangun mimpi mereka”

(Bill Gates)

"Keikhlasan adalah rahasia antara Allah dengan hamba-Nya "

(Junayd Al-Baghdadi))

“Pendidikan adalah senjata paling mematikan didunia. Karena dengan pendidikan, anda dapat mengubah dunia"

(Nelson Mandela)

MOTO

“Kamu (umat Islam) adalah umat terbaik yang dilahirkan untuk manusia, (karena kamu) menyuruh (berbuat) 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-Imran: 110)

“Jangan kamu merasa lemah dan jangan bersedih, sebab kamu paling tinggi derajatnya jika kamu beriman.”

(Q.S Ali-Imran: 5-6)

“Tidak ada satu pun perjuangan yang tidak melelahkan”

(Q.S. Al-Baqarah ayat 155)

“Tidak ada kesulitan yang tidak ada ujungnya. Sesudah sulit pasti akan ada kebahagiaan.”

(Q.S Al-Insyirah: 5-6)

"Ambil resiko, kalau kamu berhasil pasti akan bangga, kalau kamu gagal, kamu akan bertambah bijak"

(Thomas Alva Edison)

"Jika kamu hanya bekerja karena uang, kamu takkan pernah mendapatkannya, namun jika kamu mencintai apa yang kamu kerjakan, maka sukses akan menjadi milikmu"

(Ray Kroc)

“Jika kamu tidak membangun mimpimu sendiri, maka seseorang akan membangun mimpi mereka”

(Bill Gates)

“Pendidikan adalah senjata paling mematikan didunia. Karena dengan pendidikan, anda dapat mengubah dunia"

(Nelson Mandela)

“Orang yang meraih kesuksesan tidak selalu orang yang pintar, tapi orang yang selalu meraih kesuksesan adalah orang yang gigih dan pantang menyerah"

(Susi Pudjiastuti)

PERSEMBAHAN

Puji syukur kehadiran Allah SWT, Tuhan pemilik jiwa dan alam semesta yang telah melimpahkan rahmat dan karunia-Nya. Sholawat serta salam selalu tercurahkan kepada Nabi Muhammad SAW, keluarganya, sahabatnya dan juga para pengikutnya. Tugas akhir ini saya persembahkan kepada:

1. Kedua orang tua saya, Bapak Sumarto dan Ibu Yustina Widya Ningsih, atas semua dukungan moral maupun material, kasih sayang, kesabaran dan do'a.
2. Bapak Prof. Dr. Ir. Antonius, MT. dan bapak Muhamad Rusli Ahyar, ST., M.Eng yang telah meluangkan waktu, tenaga dan pikirannya untuk memberikan bimbingan pada kami agar dapat menyelesaikan tugas akhir ini dengan baik.
3. Seluruh dosen Fakultas Teknik Program Studi Teknik Sipil UNISSULA, terimakasih atas semua ilmunya yang sangat bermanfaat.
4. Kakak saya Indri Aristiani, Arif Widy Artanto, dan Fitri Indah Lestari terima kasih atas semua dukungan moral maupun material, kasih sayang dan semangat yang telah diberikan sehingga dapat menyelesaikan tugas akhir ini.
5. Sahabat awal kuliah sekaligus partner laporan tugas akhir saya Olifah Putri, terimakasih atas waktu dan semangatnya sehingga dapat menyelesaikan tugas akhir ini.
6. Sahabat sekaligus teman laporan tugas akhir saya Nurul Cholifatul Huda, Naili Mala Fauzi, Yuni millati A, Alfian Nur Hidayat, Aldy Gilang Pradika, Anugrah Widya Pratama, Firmansyah dan Rizky Bayu Saputra terimakasih atas waktu dan semangatnya sehingga dapat menyelesaikan tugas akhir ini.
7. Semua teman-teman Fakultas Teknik Sipil UNISSULA angkatan 2019, terimakasih atas semua bantuan, perhatian dan semangatnya.

Nunik Rizkia

NIM : 30201900161

PERSEMBAHAN

Puji syukur kehadiran Allah SWT, Tuhan pemilik jiwa dan alam semesta yang telah melimpahkan rahmat dan karunia-Nya. Sholawat serta salam selalu tercurahkan kepada Nabi Muhammad SAW, keluarganya, sahabatnya dan juga para pengikutnya. Tugas akhir ini saya persembahkan kepada:

1. Kedua orang tua saya, Bapak R. Slamet dan Ibu Nurjannah, atas semua dukungan moral maupun material, kasih sayang, kesabaran dan do'a.
2. Bapak Prof. Dr. Ir. Antonius, MT. dan bapak Muhamad Rusli Ahyar, ST., M.Eng yang telah meluangkan waktu, tenaga dan pikirannya untuk memberikan bimbingan pada kami agar bisa menyelesaikan tugas akhir ini dengan baik.
3. Seluruh dosen Fakultas Teknik Program Studi Teknik Sipil UNISSULA, terimakasih atas semua ilmunya yang sangat bermanfaat.
4. Sahabat Rizky Bayu Saputra, terimakasih atas bantuan waktunya perhatian dan semangat yang telah diberikan sehingga dapat menyelesaikan tugas akhir ini.
5. Sahabat awal kuliah sekaligus partner laporan tugas akhir saya Nunik Rizkia, terimakasih atas waktu dan semangatnya sehingga dapat menyelesaikan tugas akhir ini.
6. Sahabat sekaligus teman laporan tugas akhir saya Alfian Nur Hidayat dan Aldy Gilang Pradika, terimakasih atas waktu dan semangatnya sehingga dapat menyelesaikan tugas akhir ini.
7. Untuk teman-temanku "Ukhty Uyy" terimakasih atas bantuan selama perkuliahan serta perhatiannya untuk selama ini.
8. Semua teman-teman Fakultas Teknik Sipil UNISSULA angkatan 2019, terimakasih atas semua bantuan, perhatian dan semangatnya.

Olifah Putri

NIM : 30201900165

KATA PENGANTAR

Syukur Alhamdulillah, segala puji bagi Allah SWT, karena hanya dengan rahmat dan karunia-Nya laporan Tugas Akhir ini dapat terselasaikan dengan baik tentang “Sistem Perkuatan Struktur Menggunakan CFRP Pada Gedung 7 Lantai” guna memenuhi persyaratan dalam menyelesaikan Program Sarjana Teknik Sipil di Universitas Islam Sultan Agung Semarang.

Pada kesempatan ini, penulis hendak menyampaikan ucapan terimakasih yang sebesar-besarnya kepada semua pihak yang telah mendukung dalam penyusunan tugas akhir ini, yaitu:

1. Bapak Ir. H. Rachmat Mudiyo, MT., Ph.D selaku Dekan Fakultas Teknik Universitas Islam Sultan Agung Semarang.
2. Bapak Muhamad Rusli Ahyar, ST., M.Eng selaku Ketua Program Studi Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Islam Sultan Agung Semarang yang telah memberikan kelancaran pelayanan dalam urusan Akademik.
3. Bapak Prof. Dr. Ir. Antonius, MT selaku Dosen Pembimbing I Tugas Akhir, yang telah meluangkan waktu, tenaga dan pikiran untuk memberikan bimbingan pada kami agar bisa menyelesaikan tugas akhir ini dengan baik.
4. Bapak M. Rusli Ahyar, ST., M.Eng selaku Dosen Pembimbing II Tugas Akhir, yang telah meluangkan waktu, tenaga dan pikiran untuk memberikan bimbingan pada kami agar bisa menyelesaikan tugas akhir ini dengan baik.
5. Seluruh Dosen Program Studi Teknik Sipil UNISSULA yang telah memberikan ilmunya kepada penulis
6. Semua pihak yang telah membantu dalam penyelesaian tugas akhir ini yang tidak dapat kami sebutkan satu persatu.

Penulis menyadari bahwa tugas akhir ini masih banyak kekurangan baik isi maupun susunannya, semoga tugas akhir ini bermanfaat tidak hanya bagi penulis juga bagi para pembacanya.

Semarang, Januari 2023

Penulis

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL.....	i
LEMBAR PENGESAHAN.....	ii
BERITA ACARA BIMBINGAN TUGAS AKHIR.....	iii
PERNYATAAN BEBAS PLAGIASI.....	iv
PERNYATAAN KEASLIAN.....	vi
MOTO.....	viii
PERSEMBAHAN.....	x
KATA PENGANTAR.....	xii
DAFTAR ISI.....	xiii
DAFTAR TABEL.....	xvii
DAFTAR GAMBAR.....	xix
DAFTAR NOTASI.....	xxi
DAFTAR LAMPIRAN.....	xxxii
ABSTRAK.....	xxxiii
BAB I PENDAHULUAN.....	i
1.1. Latar Belakang	1
1.2. Tinjauan Umum.....	3
1.3. Rumusan Masalah.....	3
1.4. Maksud dan Tujuan.....	3
1.5. Batasan Masalah	4
1.6. Manfaat Tugas Akhir	4
1.7. Sistematika Penulisan	4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	6
2.1. Tinjauan Umum	6
2.1.1 Material Beton.....	7
2.1.2. Material Baja	8
2.2. Perencanaan Elemen Struktur	9
2.2.1. Perencanaan Pelat.....	9

2.2.2. Desain Pelat.....	10
2.2.2.1. Pelat Satu Arah (<i>One Way Slab</i>).....	10
2.3. Pelat Dua Arah (<i>Two Way Slab</i>).....	11
2.3.1. Perancangan Balok Sistem Rangka Pemikul Momen Khusus (SRPMK)	11
2.3.2. Perancangan Kolom Sistem Rangka Pemikul Momen Khusus (SRPMK)	13
2.4. Massa Jenis Material FRP.....	14
2.5. Pengaruh Suhu Terhadap Material FRP	15
2.6. Perilaku Tarik.....	16
2.7. Perilaku Tekan Sistem FRP	17
2.7.1. Perilaku Berdasarkan Fungsi Waktu	17
2.7.2. Runtuh Rangkak.....	17
2.7.3. Fatik.....	17
2.7.4. Keruntuhan terhadap rangkak dan batasan tegangan fatik.....	17
2.8. Desain Perkuatan Menggunakan CFRP	18
2.9. Faktor Lingkungan Untuk Sistem FRP (<i>Fiber Reinforced Polymer</i>)	20
2.10. Perkuatan Lentur Dengan Menggunakan FRP	22
2.11. Pola Keruntuhan.....	23
2.12. Perkuatan Beton Bertulang Menggunakan FRP	24
2.12.1. Kekuatan Geser	24
2.12.2. Regangan	27
2.12.3. Tegangan Di Dalam Perkuatan FRP	29
2.13. Gaya Tekan Aksial Murni.....	29
2.13.1. Penampang Lingkaran.....	31
2.13.2. Penampang Non Lingkaran.....	32
2.14. Tulangan Minimum	33
2.15. Perilaku Tarik Material FRP.....	34
2.16. Prosedur Untuk Perkuatan Kolom Beton Penampang Bukan Lingkaran	35
2.16.1. Kurva Yang Disederhanakan Untuk Kolom Tanpa Perkuatan ($n = 0$ Lapis)	35
2.16.2. Kurva Yang Disederhanakan Untuk Kolom Yang Diperkuat.....	35
BAB III METODOLOGI PENELITIAN	37
3.1. Pendahuluan.....	37
3.2. Pengumpulan Data	37
3.3. Peraturan Standar Perencanaan.....	38

3.4. Pembebanan Struktur Gedung	38
3.4.1. Beban Mati (SNI 1727:2020).....	38
3.4.2. Beban Hidup (SNI 1727:2020)	39
3.4.3. Beban Gempa (SNI 1726:2019).....	39
3.4.4. Kombinasi pembebanan	40
3.5. Permodelan Pada Desain Struktur	41
3.6. Bagan Alir Sistematis Desain FRP	43
3.7. Bagan Alir Desain Perkuatan FRP Pada Kolom Akibat Kegagalan Aksial Dan Momen.....	44
BAB IV HASIL PEMBAHASAN DAN PERHITUNGAN FRP.....	46
4.1. Data Struktur Gedung	46
4.1.1. Deskripsi Umum Struktur	46
4.1.2. Permodelan Awal Dimensi Struktur	50
4.1.2.1. Permodelan Elemen Pelat	50
4.1.2.2. Permodelan Balok	50
4.1.2.3. Permodelan Kolom.....	51
4.2. Permodelan Struktur	52
4.2.1. Permodelan	52
4.3. Pembebanan Struktur	56
4.3.1. Pembebanan Gravitasi.....	56
4.3.2. Beban Hidup (<i>LL</i>).....	56
4.3.3. Pembebanan Gempa	57
4.3.4. Kombinasi Pembebanan Struktur.....	60
4.4. Pengecekan Perilaku Struktur Bangunan.....	62
4.4.1 Rasio Partisipasi Massa	62
4.4.2. Perhitungan Faktor Skala Gempa	63
4.4.2.1. Perhitungan Koefisien Respons Seismik (C_s)	63
4.4.2.2. Perhitungan Faktor Skala Gaya	64
4.4.2.3. Pengecekan Gaya Geser.....	67
4.4.2.4. Pengecekan Simpangan Antar Tingkat (<i>Story Drift</i>)	67
4.4.2.5. Pengecekan P-Delta	70
4.4.3. Pengecekan Eksentrisitas dan Torsi	72
4.4.3.1. Pengecekan Eksentrisitas	72
4.4.3.2. Perhitungan Ketidakteraturan Torsi	75
4.4.4. Pengecekan Ketidakteraturan Horizontal dan Vertikal	76
4.4.4.1. Ketidakteraturan Horizontal.....	77

4.4.4.2. Ketidakberaturan Vertikal.....	78
4.5. Perancangan Elemen Struktur Beton Bertulang	80
4.5.1. Perancangan Pelat	80
4.5.1.1. Properti Material dan Penampang.....	80
4.5.1.2. Gaya Dalam	81
4.5.1.3. Penulangan Lentur Pelat (analisis untuk per m')	81
4.5.1.4. Pengecekan Kapasitas Geser.....	92
4.5.1.5. Pengecekan Lendutan Pelat	93
4.5.1.6. Rekapitulasi Hasil Tulangan Pelat	98
4.5.2. Perancangan Balok	99
4.5.2.1. Properti Material dan Penampang.....	99
4.5.2.2. Perhitungan Tulangan Longitudinal Balok	100
4.5.2.3. Perhitungan Tulangan Transversal Balok	114
4.5.2.4. Perhitungan Tulangan Torsi Balok	121
4.5.2.5. Rekapitulasi Hasil Tulangan Balok.....	132
4.5.3. Perancangan Kolom	132
4.5.3.1. Properti Material dan Penampang	132
4.5.3.2. Perhitungan Tulangan Longitudinal Kolom	134
4.5.3.3. Perhitungan Tulangan Transversal Kolom	136
4.5.3.4. Rekapitulasi Hasil Tulangan Kolom	142
4.6. Perhitungan FRP	142
4.7. Analisis Kekuatan Kolom Beton Bertulang Menggunakan CFRP	143
4.7.1. Perkuatan Pada Kolom Menggunakan CFRP	145
4.7.1.1. Analisa Perkuatan Kolom K16.....	145
BAB V PENUTUP.....	160
5.1. Kesimpulan	160
5.2. Saran	161
DAFTAR PUSTAKA.....	xxxv
LAMPIRAN	

DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1. Spesifikasi Beton Berdasarkan Berat Volume	8
Tabel 2. 2. Tegangan Leleh dan Dasar Baja.....	9
Tabel 2. 3. Ketebalan Minimum Pelat.....	10
Tabel 2. 4. $A_{s \text{ min}}$ Untuk Pelat	10
Tabel 2. 5. Tinggi Balok Minimum (h).....	11
Tabel 2. 6. Massa Jenis Material FRP	15
Tabel 2. 7. Koefisien Umum Muai Untuk Material FRP	15
Tabel 2. 8. Batas Tegangan Menerus dan Siklik Tulangan FRP.....	18
Tabel 2. 9. Faktor Reduksi Lingkungan Untuk Sistem FRP dan Jenis Paparannya	21
Tabel 2. 10. Faktor Reduksi Tambahan Untuk Penulangan Geser FRP	26
Tabel 3. 1. Daftar Berat Bahan Bangunan dan Komponen Struktur Gedung	38
Tabel 3. 2. Daftar Beban Hidup pada Lantai.....	39
Tabel 3. 3. Kombinasi Beban	40
Tabel 3. 4. Tinggi Pada Tiap Lantai.....	41
Tabel 3. 5. Ukuran Balok, Kolom dan Pelat	41
Tabel 4. 1. Data Model Struktur Gedung.....	46
Tabel 4. 2. Tinggi Antar Lantai Bangunan.....	49
Tabel 4. 3. Mutu Baja Tulangan.....	49
Tabel 4. 4. Mutu Beton Balok dan Pelat	49
Tabel 4. 5. Mutu Beton Kolom	49
Tabel 4. 6. Dimensi Balok Setelah Pengecekan.....	51
Tabel 4. 7. Dimensi Kolom Setelah Pengecekan	51
Tabel 4. 8. Pengecekan <i>Story Drift</i> Arah X Pemodelan 1.....	54
Tabel 4. 9. Pengecekan <i>Story Drift</i> Arah Y Pemodelan 1.....	55
Tabel 4. 10. Beban Mati Tambahan pada Lantai	56
Tabel 4. 11. Data Parameter Respons Spektra Terpetakan	57
Tabel 4. 12. Parameter Respons Spektra.....	59
Tabel 4. 13. Kombinasi Pembebanan.....	60
Tabel 4. 14. Rekapitulasi Rasio Partisipasi Modal Massa	62
Tabel 4. 15. Koefisien Respons Seismik.....	64
Tabel 4. 16. Output Gaya Geser Dasar Statik (V).....	64
Tabel 4. 17. Output Gaya Geser Dasar Dinamik (V_I)	64
Tabel 4. 18. Rekapitulasi Hasil Pengecekan Faktor Skala	65
Tabel 4. 19. Output Gaya Geser Dinamik Terkoreksi.....	66
Tabel 4. 20. Gaya Geser Desain	66
Tabel 4. 21. Pengecekan <i>Story Drift</i> Arah X.....	68
Tabel 4. 22. Pengecekan <i>Story Drift</i> Arah Y.....	69
Tabel 4. 23. Pengecekan P-Delta Arah X.....	70
Tabel 4. 24. Pengecekan P-Delta Arah Y.....	71
Tabel 4. 25. Data Eksentrisitas Torsi Bawaan dari ETABS.....	72
Tabel 4. 26. Data Eksentrisitas Torsi Tidak Terduga.....	73
Tabel 4. 27. Nilai dari $\delta_{\max}$, $\delta_{\min}$, δ_{avg} dan A_x untuk Gempa Arah X.....	73
Tabel 4. 28. Nilai dari $\delta_{\max}$, $\delta_{\min}$, δ_{avg} dan A_y untuk Gempa Arah Y	74
Tabel 4. 29. Perhitungan Eksentrisitas Desain pada Arah Sumbu X	75
Tabel 4. 30. Perhitungan Eksentrisitas Desain pada Arah Sumbu Y	75

Tabel 4. 31. Pengecekan Ketidakberaturan Torsi pada Arah X	76
Tabel 4. 32. Pengecekan Ketidakberaturan Torsi pada Arah Y	76
Tabel 4. 33. Cek Ketidakberaturan Torsi 1a dan 1b Arah X	77
Tabel 4. 34. Cek Ketidakberaturan Torsi 1a dan 1b Arah Y	77
Tabel 4. 35. Cek Ketidakberaturan <i>Story Stiffness</i>	78
Tabel 4. 36. Cek Ketidakberaturan Berat (Massa)	79
Tabel 4. 37. Cek Ketidakberaturan <i>Story Forces</i>	79
Tabel 4. 38. Rekapitulasi Hasil Tulangan Pelat	98
Tabel 4. 39. Rekapitulasi Tulangan Balok	132
Tabel 4. 40. Rekapitulasi Tulangan Kolom	142
Tabel 4. 41. Input Data Kolom Pada Diagram Interaksi	144
Tabel 4. 42. Detail CFRP HM-60	144
Tabel 4. 43. Detail Penampang Kolom K16	146
Tabel 4. 44. Uraian Perhitungan	157



DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1. Lebar Efektif Maksimum pada Balok Lebar (<i>Wide Beam</i>) dan Persyaratan Tulangan Transversal (SNI 2847:2019).....	12
Gambar 2. 2. Geser Desain Untuk Balok dan Kolom (SNI 2847:2019).....	13
Gambar 2. 3. Contoh Penulangan Transversal pada Kolom (SNI 2847:2019) ...	14
Gambar 2. 4. Jenis Momen Yang Bekerja Untuk Memeriksa Batas Tegangan Pada Perkuatan FRP.....	18
Gambar 2. 5. Perilaku Batang Lentur Dengan Tulangan	23
Gambar 2. 6. Debonding Yang Di inisiasi Oleh Retak Lentur Atau Geser.....	23
Gambar 2. 7. Delaminasi Yang Diinisiasi Oleh Lekukan Tulangan FRP	24
Gambar 2. 8. Skema Lilitan Untuk Perkuatan Geser	25
Gambar 2. 9. Penjelasan Variabel Dimensi.....	26
Gambar 2. 10. Distribusi Tegangan dan Regangan Penampang Berbentuk Persegi Terhadap Lentur Pada Kondisi Batas Ultimit	27
Gambar 2. 11. Perilaku Tegangan – Regangan Untuk Beton Terkekang Menggunakan FRP	30
Gambar 2. 12. Model Tegangan-Regangan Untuk Beton Terkekang Menggunakan FRP.....	30
Gambar 2. 13. Luas Penampang Lingkaran Ekuivalen	32
Gambar 3. 1. Data Proyek	37
Gambar 3. 2. Permodelan ETABS	42
Gambar 3. 3. Bagan Alir Sistematis Desain FRP.....	43
Gambar 3. 4. Bagan Alir Desain Kolom	45
Gambar 4. 1. Denah Lantai Gedung Pasar yang terletak di Semarang.	47
Gambar 4. 2. Denah Awal ETABS Lantai 1-7	48
Gambar 4. 3. Denah Lantai 1 Permodelan 1.....	53
Gambar 4. 4. Model 3D Permodelan 1	53
Gambar 4. 5. Diagram <i>Story Drift</i> Arah X Permodelan 1	54
Gambar 4. 6. Diagram <i>Story Drift</i> Arah Y Permodelan 1	55
Gambar 4. 7. Spektrum Respons Desain Lokasi Perancangan.....	59
Gambar 4. 8. Diagram Gaya Geser Gempa Arah X.....	67
Gambar 4. 9. Diagram Gaya Geser Gempa Arah Y	67
Gambar 4. 10. Diagram P-Delta Arah X.....	71
Gambar 4. 11. Diagram P-Delta Arah Y	72
Gambar 4. 12. Tipe Pelat.....	80
Gambar 4. 13. Penulangan Pelat.....	98
Gambar 4. 14. Denah Balok G1 Sampel	99
Gambar 4. 15. Momen Ultimit Tumpuan Balok G1	101
Gambar 4. 16. Momen Ultimit Lapangan Balok G1	101
Gambar 4. 17. Gaya Geser Ultimit Tumpuan Balok B1	115
Gambar 4. 18. Gaya Geser Ultimit Lapangan Balok B1.....	115
Gambar 4. 19. Gaya Torsi Balok B1	123
Gambar 4. 20. Potongan Memanjang Balok	131
Gambar 4. 21. Tulangan Tumpuan Balok	131
Gambar 4. 22. Tulangan Lapangan Balok.....	132
Gambar 4. 23. Denah Kolom K1 Sampel.....	133
Gambar 4. 24. Tulangan Longitudinal Kolom K1	135

Gambar 4. 25. Diagram Interaksi P_n - M_{pr} SPColumn Kolom K1	135
Gambar 4. 26. Diagram Interaksi P_n - M SPColumn Kolom K1 dengan $1,25 f_y$	138
Gambar 4. 27. Potongan Memanjang Kolom K1	141
Gambar 4. 28. Tulangan Ujung Kolom K1	141
Gambar 4. 29. Tulangan Tengah Kolom K1	141
Gambar 4. 30. Identifikasi Kegagalan Kolom.....	142
Gambar 4. 31. Analisis Kolom Dengan Diagram Interaksi	143
Gambar 4. 32. Detail Kolom yang Digunakan	145
Gambar 4. 33. Kolom K16 Yang Mengalami Kegagalan.....	145
Gambar 4. 34. Diagram Kapasitas Nominal Aksial Dan Lentur.....	157
Gambar 4. 35. Diagram Interaksi Kolom Dengan FRP	158
Gambar 4. 36. Detail Penerapan Perkuatan CFRP Pada Kolom.....	159



DAFTAR NOTASI

a	= Tinggi blok tegangan persegi ekuivalen (mm)
A_b	= Luas setiap batang atau kawat individu (mm^2)
A_{ch}	= Luas penampang komponen struktur yang diukur sampai tepi luar tulangan transversal (mm^2)
A_{cp}	= Luas yang dibatasi oleh keliling luar penampang beton (mm^2)
A_{cv}	= Luas bruto penampang beton yang dibatasi oleh tebal badan dan panjang penampang dalam arah gaya geser yang ditinjau pada kasus dinding dan luas bruto penampang beton dalam kasus diafragma, tebalnya tidak melebihi lebar diafragma (mm^2)
A_{cw}	= Luas penampang beton pilar tunggal, segmen horizontal dinding, atau balok kopel yang menahan geser (mm^2)
A_c	= Luas penampang beton pada komponen tekan (mm^2)
A_e	= Luas penampang beton pada dinding vertical individu (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)
A_s	= Luas penampang dibawah garis netral
A_f	= Luas FRP
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)
$\phi 1$	= Parameter yang menentukan blok tegangan
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 paralel 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 vertikal
C_E	= Faktor reduksi lingkungan
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
D_F	= Faktor distribusi momen di bagian atas dan kolom yang didesain
d_f	= Tinggi penampang
d	= Tinggi efektif
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
E_2	= Kemiringan bagian lurus dari model tegangan regangan untuk beton tertekan (MPa)
E_f	= Modulus Elastisitas
f'_c	= Kekuatan tekan beton spesifik (MPa)

f'_{cc}	= Kekuatan tekan beton tertekan (MPa)
f_{fu}	= Nilai kekuatan tarik ultimit
f_r	= Modulus hancur (<i>rupture</i>) beton (MPa)
f_s	= Tegangan tarik dihitung dalam tulangan saat beban layan (MPa)
f'_s	= Tegangan dalam tulangan tekan terkena beban terfaktor (MPa)
f_y	= Kekuatan leleh tulangan (MPa)
f_{yt}	= Kekuatan leleh tulangan transversal yang disyaratkan f_y (MPa)
F_a	= Koefisien situs untuk periode pendek (pada periode 0,2 detik)
F_i, F_x	= Bagian dari gaya geser dasar, V , pada tingkat- i atau tingkat- x
F_p	= Gaya seismik yang bekerja pada elemen atau komponen dari struktur
F_v	= Koefisien situs untuk periode panjang (pada periode 1 detik)
F_x	= Gaya seismik lateral (kN) di level- x
h	= Tebal atau tinggi keseluruhan komponen struktur (mm)
h_n	= Batasan tinggi struktur (m)
h_{sx}	= Tinggi tingkat untuk tingkat- x (mm)
h_w	= Tinggi dinding keseluruhan dari dasar ke tepi atas atau tinggi bersih segmen dinding atau pilar dinding yang ditinjau (mm)
h_x	= Spasi horizontal ikat silang atau kaki sengkang pengekang (<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
K_a	= Faktor efisien tulangan FRP dalam menentukan f'_{cc}
K_b	= Faktor efisien tulangan FRP dalam menentukan ε_{ccu}
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 <i>joint</i> , 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 <i>joint</i> 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)
ϕM_n	= Momen nominal
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 <i>niralir</i>

$\bar{s}_u$	= 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
S_{DL}	= Faktor beban mati
S_{LL}	= Faktor beban hidup
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
V_n	= Kekuatan geser nominal
V_c	= Kekuatan geser beton
V_3	= Kekuatan geser baja

V_f	= Kekuatan geser FRP
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)
y_t	= Koordinat vertical pada zona tekan yang diukur pada sumbu netral (mm)
α	= Sudut yang menentukan orientasi tulangan
α_c	= Koefisien yang menentukan kontribusi relatif kekuatan beton terhadap kekuatan geser dinding nominal
β_1	= Faktor yang menghubungkan tinggi blok tegangan tekan persegi ekuivalen dengan tinggi sumbu netral
δ	= Faktor pembesaran momen untuk mencerminkan pengaruh kurvatur komponen struktur antara ujung-ujung komponen struktur tekan
δ_u	= Perpindahan desain
$\delta_{\max}$	= Perpindahan maksimum (mm) di tingkat-x
δ_{avg}	= Rata-rata perpindahan di titik-titik terjauh struktur di tingkat-x
δ_x	= Defleksi pusat massa di tingkat-x
δ_{xe}	= Defleksi pada lokasi ditentukan dengan analisis elastik

Δ	= Simpangan antar tingkat desain
Δ_a	= Simpangan antar tingkat yang diizinkan
ε_t	= Regangan tarik <i>netto</i> 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 <i>netto</i> pada lapisan terluar dari tulangan tarik longitudinal yang digunakan untuk menentukan penampang terkontrol tekan
ε_{sy}	= Regangan transisi pada kurva tegangan-regangan
ε_{ccu}	= Regangan tekan aksial ultimit beton terkekang
ε_{fe}	= Regangan efektif tulangan FRP saat runtuh
ε_{fd}	= Regangan debonding
ε_{fu}	= Regangan runtuh
ε_{fu}^*	= Desain regangan rangkai runtuh
θ	= Sudut antara sumbu <i>strut</i> , diagonal tekan, atau bidang tekan dan kord (<i>chord</i>) tarik komponen struktur; Koefisien stabilitas untuk pengaruh <i>P</i> -Delta
ρ	= Rasio A_s terhadap <i>bd</i> ; Faktor redundansi struktur
ϕ	= Faktor reduksi kekuatan
$\square R_n$	= Batasan perkuatan
Ψ_f	= Faktor reduksi tulangan FRP
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



SISTEM PERKUATAN STRUKTUR MENGGUNAKAN *CARBON FIBER REINFORCED POLYMER (CFRP)* PADA GEDUNG 7 LANTAI

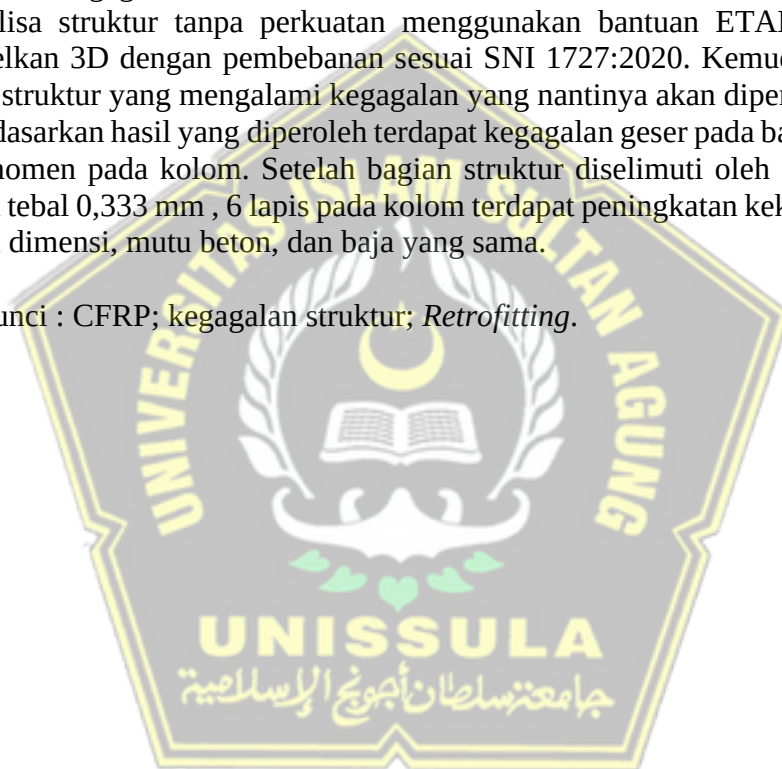
ABSTRAK

Dalam Tugas Akhir ini membahas kelayakan struktur bangunan gedung pasar dari beton bertulang dengan jumlah lantai yaitu 7 lantai, dimana komponen kolom pada beberapa bagian tertentu mempunyai kegagalan lentur dan geser. Salah satu cara untuk meningkatkan kapasitas struktur adalah dengan menggunakan CFRP (*Carbon Fiber Reinforced Polymer*). Material ini merupakan laminasi komposit berbahan dasar serat dan resin yang diterapkan dengan menyelimuti struktur yang mengalami kegagalan.

Analisa struktur tanpa perkuatan menggunakan bantuan ETABS V18 yang dimodelkan 3D dengan pembebanan sesuai SNI 1727:2020. Kemudian dianalisis bagian struktur yang mengalami kegagalan yang nantinya akan diperkuat.

Berdasarkan hasil yang diperoleh terdapat kegagalan geser pada balok dan aksial serta momen pada kolom. Setelah bagian struktur diselimuti oleh CFRP HM-60 dengan tebal 0,333 mm , 6 lapis pada kolom terdapat peningkatan kekuatan struktur dengan dimensi, mutu beton, dan baja yang sama.

Kata kunci : CFRP; kegagalan struktur; *Retrofitting*.



STRUCTURAL REINFORCEMENT SYSTEM USING CARBON FIBER REINFORCED POLYMER (CFRP) ON 7th FLOOR OF THE BUILDING

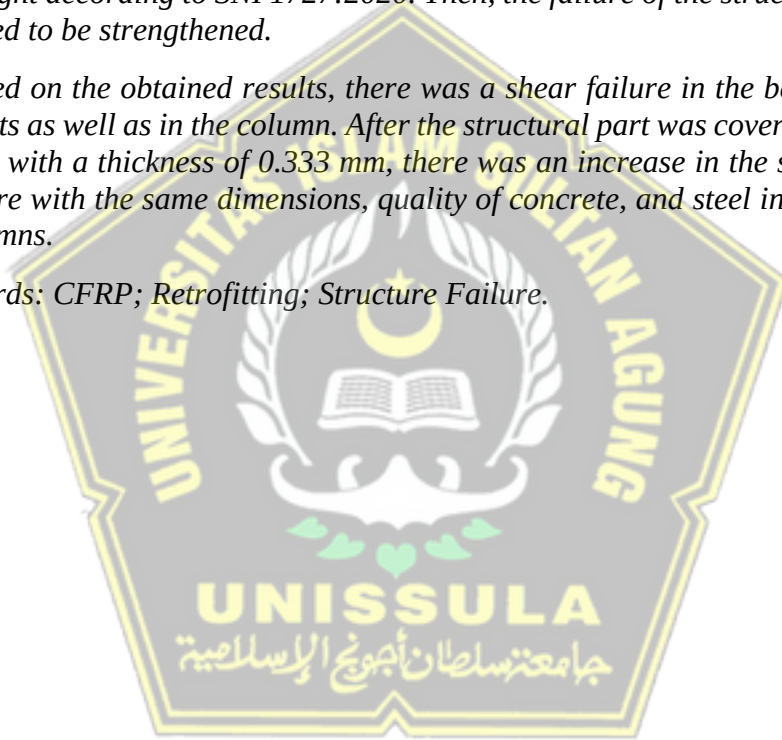
ABSTRACT

This final project discusses the structural feasibility of market buildings using reinforced concrete with bending and shear failure of the column component in several parts. One way to increase the capacity of the structure is by using CFRP (Carbon Fiber Reinforced Polymer). This material is a composite laminate based on fibers and resins applied to cover the failed structure.

Structural analysis without reinforcement used ETABS V18 modeled in 3D with the weight according to SNI 1727:2020. Then, the failure of the structural part was analyzed to be strengthened.

Based on the obtained results, there was a shear failure in the beam and axial moments as well as in the column. After the structural part was covered with CFRP HM-60 with a thickness of 0.333 mm, there was an increase in the strength of the structure with the same dimensions, quality of concrete, and steel in the six layers of columns.

Keywords: CFRP; Retrofitting; Structure Failure.



BAB I

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Beton Bertulang (*Reinforced Concrete*) ialah material yang dipergunakan untuk suatu bangunan, dalam struktur bangunan yang besar maupun yang kecil seperti bendungan, gedung, jembatan, perkerasan jalan dan konstruksi lainnya. Alasan dalam memilih menggunakan beton dikarenakan beton dengan mudah untuk dibentuk sesuai dengan keinginan saat pelaksanaan, selain itu bahan dasar pada cetakan beton mudah didapat dan keunggulan pada beton yang paling menonjol ialah beton dapat menahan beban tekan yang kuat. Beton juga lemah dalam menahan gaya tarik yang melebihi kapasitas struktur bangunan tersebut, sehingga beton harus diperkuat dengan baja tulangan untuk menahan gaya tarik yang bekerja. Beton dapat mengalami kerusakan akibat gempa, korosi, serangan asam, kebakaran, penyusutan dan peregangan yang berlebihan. Sehingga dapat menyebabkan kekuatan struktur beton menurun saat dalam memikul beban dan dapat menyebabkan keretakan.

Kolom dan balok merupakan komponen biasa menggunakan material beton bertulang sebagai bagian struktural atau sebagai penyusunnya, terkadang dalam membuat desain masih mengalami kesalahan ataupun kegagalan, sehingga hal ini dapat mengakibatkan kerusakan terhadap kolom dan balok, kerusakan yang telah terjadi biasanya ditandai dengan munculnya retakan, apabila tidak segera diatasi maka akan berdampak pada kerusakan struktur lainnya. Permasalahan ini menimbulkan konstruksi yang sudah berdiri umumnya langsung dibongkar tanpa mempertimbangkan adanya perkuatan serta perbaikan. Sementara itu dalam suatu elemen struktur beton bertulang masih dapat untuk diperbaiki.

Untuk mengembalikan daya tahan pada beton yang memikul beban dapat dilakukan dengan memperbaiki struktur yang bertujuan untuk meningkatkan kekuatan atau ketahanan elemen struktur terutama pada struktur kolom dan balok sehingga mampu menahan beban sesuai dengan rencana. Di beberapa negara sudah

ada yang menggunakan perkuatan struktur menggunakan teknologi *FRP (Fiber Reinforced Polymer)* metode FRP ini merupakan salah satu bahan yang dapat digunakan sebagai pilihan untuk pengganti material baja yang akan digunakan pada tulangan struktur beton bertulang atau yang digunakan sebagai bahan untuk memperkuat struktur yang mengalami perubahan serta dapat digunakan sebagai alternatif perbaikan dan perkuatan pada elemen struktural yang sudah rusak, material FRP ini memiliki kelebihan diantaranya material yang mempunyai bobot ringan dan kuat, tahanan besar terhadap korosi, mempunyai kuat tarik serta modulus elastis yang sangat tinggi, fleksibel (cukup mudah dibentuk dan diaplikasikan sesuai dengan bentuk struktur yang akan di pasangi FRP), sehingga bahan ini sangat banyak digunakan untuk memperkuat struktur. Manfaat penggunaan FRP ini dapat diterapkan pada struktur bangunan beton maupun baja. FRP sendiri terbuat dari *Carbon Fiber Reinforced Plastic (CFRP)* dan *Glass Fiber Reinforced Plastic (GFRP)*.

Pada *Fiber Reinforced Polymer (FRP)* bahan yang digunakan antara lain filler, polimer resin dan fiber. Pada bahan filler yang digunakan adalah *kaolin clay*, *alumina* dan juga *calcium carbonate*. Kemudian adalah polimer resin, bahan yang digunakan merupakan *vinylester* atau *epoxy*, dan *polyester*. Lalu selanjutnya fiber dan bahan yang digunakan adalah *carbon*, *aramide* dan *glass*.

Fiber Reinforced Polymer (FRP) dapat difungsikan untuk meningkatkan gaya gesek dan memberikan kapasitas lentur balok beton bertulang, lentur kolom dan lentur pelat. Pemasangan FRP dilakukan pada permukaan struktur dalam bentuk lembaran, batangan atau pelat. Pada FRP juga dapat digunakan menjadi salah satu alternatif yang lebih murah yang dapat meningkatkan atau memulihkan kinerja yang ada pada struktur bangunan. Perkuatan FRP pada struktur bangunan dilakukan dengan menempelkan pada permukaan struktur bangunan dengan menggunakan perekat *epoxy resin*. Pada sistem perkuatan struktur bangunan yang di lapisi lembaran FRP terbukti lebih efektif dan efisien dalam kekuatan struktur bangunan akibat terjadinya kerusakan atau penurunan pada kekuatan material.

1.2. Tinjauan Umum

Retrofit adalah salah satu perkuatan pada struktur yang digunakan untuk memikul suatu muatan seperti yang sudah dipersiapkan. *Retrofit* juga berbeda dengan konsep perbaikan struktur yang bertujuan untuk mengembalikan fungsi struktur seperti pada awal pembangunan setelah mengalami kerusakan. Setelah dilaksanakan *retrofit* maka akan terjadinya reaksi respon struktur terhadap lingkungan dan pembebanan, seperti: peningkatan kekuatan, kestabilan, kekakuan, korosi, tahanan terhadap kebakaran, dan agresivitas lingkungan lainnya.

Retrofit dilakukan dengan pertimbangan struktur terhadap beberapa efek gaya gempa, dan juga dapat dilakukan untuk berbagai pertimbangan, seperti pada penyimpangan antara pelaksanaan dan perencanaan, serta fungsi struktur dapat berubah.

1.3. Rumusan Masalah

- Bagaimana hasil kinerja seismik pada gedung pasar 7 lantai dengan SNI 1726:2019?
- Apakah kondisi pada penampang struktur aman atau tidak aman jika dilakukan pembebanan dengan SNI 1726:2019?
- Bagaimana metode perkuatan jika hasil evaluasi kondisi struktur tidak aman?

1.4. Maksud dan Tujuan

Maksud dan tujuan dari penulisan tugas akhir dengan judul “Sistem Perkuatan Struktur menggunakan CFRP pada gedung 7 lantai ini adalah:

- Menganalisa jenis kategori design seismik bangunan gedung pasar berdasarkan SNI 1726 2019.
- Menganalisa ketidak beraturan struktur horizontal dan vertikal pada bangunan gedung pasar.
- Mendesain struktur plat, balok dan kolom pada bangunan gedung pasar.
- Membandingkan efektifitas standar antara kolom beton bertulang dengan kolom perkuatan FRP.

1.5. Batasan Masalah

- a. Tidak menghitung beban daya dukung pondasi.
- b. Tidak memperhitungkan *mechanical electrical*.
- c. Tidak memperhitungkan biaya konstruksi serta waktu pelaksanaan proyek.
- d. Tidak meninjau metode pelaksanaan secara keseluruhan.

1.6. Manfaat Tugas Akhir

Manfaat pada Tugas Akhir ini diharapkan:

- a. Dapat menambah wawasan dalam perencanaan kolom dengan menggunakan tambahan perkuatan material FRP (*Fiber Reinforced Polymer*).
- b. Mampu memberikan rekomendasi perbaikan kolom dari aspek kekuatan menggunakan metode FRP.

1.7. Sistematika Penulisan

Penyusunan Pada Tugas Akhir ini terdiri dari 5 (lima) Bab dengan sistematika yang terdiri dari:

BAB I PENDAHULUAN

Pendahuluan berisi mengenai Latar Belakang, Tinjauan Umum, Maksud dan Tujuan, Batasan Masalah serta manfaat pada penelitian dan Sistematika Penulisan.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

Yang berisikan mengenai kajian teori yang terdapat dari berbagai sumber atau *literature* dan hasil analisa dari pendapat para ahli untuk kasus yang sama sehingga dijadikan untuk pedoman rumus atau perhitungan acuan dalam analisis perhitungan permasalahan terkait.

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

Berisi metode serta asumsi mengenai permasalahan yang terkait dengan materi analisis perhitungan, serta pengumpulan data dan metode analisis. Sumber data yang akan dipakai pada analisis perhitungan tugas akhir ini.

BAB IV HASIL PEMBAHASAN DAN PERHITUNGAN FRP

Berisi tentang analisa dari hasil perhitungan dan pembahasan permasalahan tersebut dan juga berisi mengenai perhitungan menggunakan perkuatan CFRP (*Carbon Fiber Reinforced Polymer*)

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

Berisi tentang kesimpulan dan saran dari hasil analisa data.



BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

Perkembangan teknologi beton di seluruh dunia pada saat ini sangat banyak digunakan dan tidak diragukan lagi. Material beton sampai saat ini masih jauh lebih murah dan lebih efisien dibandingkan dengan baja. Tidak hanya faktor biaya saja, faktor energi dalam juga dapat menjadi material beton yang lebih ramah lingkungan. Namun seperti yang telah diketahui kerusakan pada struktur bangunan beton bertulang dapat terjadi apabila perencanaan ataupun pelaksanaan tidak memperhatikan perhitungan pembebanan yang akan terjadi di masa yang akan datang. Lalu untuk mengatasi permasalahan pada kerusakan tersebut perlu dilakukan adanya perkuatan pada struktur beton bertulang atau yang disebut *retrofitting* pada bagian tertentu yang berguna untuk mengembalikan atau meningkatkan perkuatan elemen struktur. Sehingga pada saat ini telah banyak digunakan perkuatan struktur menggunakan bahan material FRP (*Fiber Reinforced Polymer*). Dimana material ini sangat banyak keuntungan yang dapat diperoleh yaitu diantaranya material sangat ringan, tidak korosif serta mempunyai kuat tarik tinggi.

2.1. Tinjauan Umum

FRP merupakan salah satu bahan yang dapat digunakan sebagai pilihan untuk pengganti material baja yang akan digunakan pada tulangan struktur beton bertulang atau yang digunakan sebagai bahan untuk memperkuat struktur yang mengalami perubahan serta dapat digunakan sebagai alternatif perbaikan dan perkuatan pada elemen struktural yang sudah rusak, material ini merupakan material yang ringan dan kuat, tahanan besar terhadap korosi, mempunyai kuat tarik yang sangat tinggi, fleksibel (cukup mudah dibentuk dan diaplikasikan sesuai dengan bentuk struktur yang akan di pasangi FRP), sehingga bahan FRP ini sering digunakan untuk memperkuat suatu struktur yang lemah. Kelebihan dari penggunaan FRP ini dapat diterapkan pada struktur bangunan beton ataupun baja.

FRP mempunyai beberapa jenis antara lain *Carbon Fiber Reinforced Plastic* (CFRP) maupun *Glass Fiber Reinforced Plastic* (GFRP).

2.1.1 Material Beton

Agregat beton adalah suatu agregat yang cukup banyak digunakan untuk pembangunan konstruksi di Indonesia. Beton pada dasarnya merupakan campuran air dan semen yang dicampur dengan agregat halus dan kasar serta dapat ditambahkan bahan tambahan aditif.

Material beton merupakan campuran antara agregat halus (pasir), semen, air, dan agregat kasar (kerikil). Penggunaan beton untuk saat ini tidak hanya sebagai bagian dari suatu struktur tetapi juga dapat digunakan untuk keperluan non struktural. Beberapa komponen non struktural terbuat dari beton, misalnya kolom, dinding, dekorasi rumah. Pada penggunaan beton komponen struktural tentunya berbeda dengan penggunaan beton yang komposisinya dirancang untuk menghasilkan beton yang lebih bernilai ekonomis dan estetik.

Dengan komponen yang berbeda dari setiap jenis campuran beton, maka akan memberikan hasil kualitas beton yang berbeda. Proses dan cara pembuatan material mutu beton akan cukup mempengaruhi kualitas beton yang akan dihasilkan. Komposisi yang baik pada beton antara lain pada agregat halus (pasir) yang harus digunakan harus memiliki kandungan lumpur <5%, kemudian pada agregat kasar mempunyai spesifikasi dengan mempunyai diameter ayakan 4,75 milimeter dan lolos ayakan 6,50 milimeter. Kualitas atau kuat tekan beton dipengaruhi beberapa faktor antara lain faktor air-semen, dengan jenis dan jumlah semen, umur beton, sifat agregat, perlakuan beton, dan metode pemadatan. Pada kuat beton sangat ditentukan oleh beberapa kekuatan dari agregat dan kekuatan matriks kohesif terkandung dalam campuran beton.

Menurut berat spesifikasinya, beton dapat dibagi menjadi : beton normal, beton normal dan beton berat. Spesifikasi dapat dilihat seperti tabel 2.1.

Tabel 2. 1. Spesifikasi Beton Berdasarkan Berat Volume

Jenis Beton	Berat Massa Jenis (ton/m ³)	Agregat yang Digunakan	Pemakaian
Beton Ringan	Sampai 2,0	Serbuk yang mengeras dari abu bakar, batu kapur, tanah liat yang di regangkan, limbah batu bara yang berkilau dan batu apung.	Digunakan untuk membuat bangunana yang memikul beban yang cukup ringan, pembuatan lapisan kedap suara dan dinding interior
Beton normal	2,0-2,9	Batu pecah Kerikil, pasir, serpihan-serpihan batu, dan koral	Sering digunakan untuk konstruksi perumahan.
Beton berat	Lebih dari 2,8	Barito, butir besi, dan magnetik	Digunakan untuk masa berat dan perlindungan pada sinar gama

2.1.2. Material Baja

Material baja adalah suatu material yang cukup banyak digunakan pada bidang kosntruksi. Baja merupakan suatu logam dan dengan dicampur besi untuk unsur suatu dasar dan karbon yang digunakan untuk elemen sebagai perpaduan utama. Kandungan pada material baja dari berkisar antara 0,2 % sampai 2,1 % berat tergantung pada tingkatannya. Kegunaan karbon dalam baja merupakan sebagai elemen penguat dengan mencegah dislokasi perubahan kisi kristal (*crystal lattice*) atom besi. Elemen paduan umum lainnya merupakan mangan (*manganese*), vanadium, krom (*chromium*), tungsten.

Semua jenis baja kurang lebih dapat ditempa dan dilapisi ke tingkat yang lebih besar ataupun kecil, sementara tegangan baja ringan jauh dibawah kekuatan tarik atau putus (σ_B), dan dibawah titik leleh atau tegangan leleh (σ_V), situasi terjadi apabila deformasi selalu berlanjut dan terus menerus selama beberapa waktu tanpa menambah beban yang ada.

Sifat – sifat baja sangat bergantung pada zat karbon, dengan peningkatan kadar zat karbon, maka peningkatan pada tegangan putus dan regangan menurut persentase yang sudah terjadi pada sebuah batang percobaan yang terbebani dengan tarikan, ialah apa yang dinamakan regangan putus menjadi kecil.

Persentase hanya sebagian kecil dari elemen lain yang secara signifikan dapat mempengaruhi sifat kekuatan baja. Cara membedakan *grade* baja maka dicantumkan angka yang sesuai dengan tegangan fraktur atau tegangan putus yang dijamin dan nilai minimum dalam uji tarik normal, tetapi $\sigma_{B_{maks}}$ diperoleh untuk setiap jenis baja. Tegangan leleh dan tegangan dasar dari berbagai jenis baja struktural seperti tabel 2.2 tegangan leleh dan dasar baja berikut:

Tabel 2. 2. Tegangan Leleh dan Dasar Baja

Jenis Baja	Tegangan putus minimum, f_u (MPa)	Tegangan leleh Peregangannya Minimum, f_y (MPa)	Peregangannya minimum (%)
BJ 34	340	210	22
BJ 37	370	240	20
BJ 41	410	250	18
BJ 50	500	290	16
BJ 55	550	410	13

Keterangan

MPa = 1kg/cm^2

MPa = mega pascal (satuan sistem internasional)

2.2. Perencanaan Elemen Struktur

2.2.1. Perencanaan Pelat

Pelat beton bertulang merupakan salah satu konstruksi beton bertulang tipis yang mempunyai suatu bidang horizontal atau beban yang bekerja secara tegak lurus terhadap bidang tersebut. Jika beban dihadapkan pada panjang dan lebar, maka ketebalan pelat terbilang tipis dan orientasi horizontal pelat beton bertulang membuatnya bekerja dengan struktur yang difungsikan sebagai diafragma atau elemen pengaku horizontal yang cukup membantu untuk memperkuat suatu kekakuan balok portal (Putra & Budiyo, 2022).

Perencanaan dimensi pelat yang terdapat pada suatu batasan untuk ketebalan minimum pelat yang sudah ditentukan dalam pasal 8, SNI 2847:2019, seperti pada tabel 2.3.

Tabel 2. 3. Ketebalan Minimum Pelat

f_y (MPa)	Tanpa Drop Panel			Dengan Drop Panel		
	Panel Exterior		Panel Interior	Panel Exterior		Panel Interior
	Tanpa Balok Tepi	Dengan Balok Tepi		Tanpa Balok Tepi	Dengan Balok Tepi	
280	$\ell_n/33$	$\ell_n/36$	$\ell_n/36$	$\ell_n/36$	$\ell_n/40$	$\ell_n/40$
420	$\ell_n/30$	$\ell_n/33$	$\ell_n/33$	$\ell_n/33$	$\ell_n/36$	$\ell_n/36$
520	$\ell_n/28$	$\ell_n/31$	$\ell_n/31$	$\ell_n/31$	$\ell_n/34$	$\ell_n/34$

Sumber : SNI 2847:2019

Kemudian untuk menahan suatu momen lentur pada struktur bangunan yang bekerja pada pelat dibutuhkan beberapa tulangan lentur. Luas pada minimum tulangan ($A_s \min$) dapat dilihat didalam SNI 2847:2019, pasal 8.6.1.1 dan bisa diketahui dari tabel 2.4.

Tabel 2. 4. $A_s \min$ Untuk Pelat

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

(Sumber : SNI 2847:2019)

2.2.2. Desain Pelat

Pelat pada struktur bangunan mempunyai 2 jenis bagian yaitu pelat yang hanya memiliki satu sisi dan ada juga plat yang memiliki dua sisi. Pelat yang menggunakan lapisan beton memiliki tulangan dan pemasangan dilakukan secara melintang.

2.2.2.1. Pelat Satu Arah (*One Way Slab*)

Pada pelat satu arah memiliki ciri-ciri sebagai berikut, yaitu pelat yang ditumpu pada salah satu sisi yang berhadapan dengan perbandingan antar sisi $\frac{L_y}{L_x} > 2$.

2.3. Pelat Dua Arah (*Two Way Slab*)

Pelat dua arah juga memiliki beberapa ciri-ciri, antara lain adalah pelat memiliki 4 sisi dan setiap sisinya diberikan suatu tumpuan dengan menggunakan balok serta benda lain yang memiliki berat yang mampu menumpu suatu pelat serta dapat diarahkan secara tegak lurus. Pelat sendiri dapat dikatakan memiliki 2 arah jika pada $\frac{L_y}{L_x} \leq 2$, dan tebal minimum pada pelat dua arah dapat ditentukan dengan berdasarkan SNI 2847:2019.

2.3.1. Perancangan Balok Sistem Rangka Pemikul Momen Khusus (SRPMK)

Balok pada sistem rangka pemikul momen khusus (SRPMK) adalah suatu jenis dari sistem pemikul dari gaya gempa dan pada umumnya dirancang sebagai penahan gaya lentur serta gaya geser. Setiap komponen rangka yang terkena suatu gaya tekan aksial terfaktor lebih dari ($A_g f_c' / 10$) yang diakibatkan oleh kombinasi beban wajib yang di proposionalkan dan di detailkan. Dalam merencanakan suatu dimensi pada balok terdapat beberapa batasan tinggi minimum yang telah diatur dalam SNI 2847-2019 pasal 9.3.1.1 (Putra & Budiyanto, 2022), dan dapat dilihat pada tabel 2.5.

Tabel 2. 5. Tinggi Balok Minimum (h)

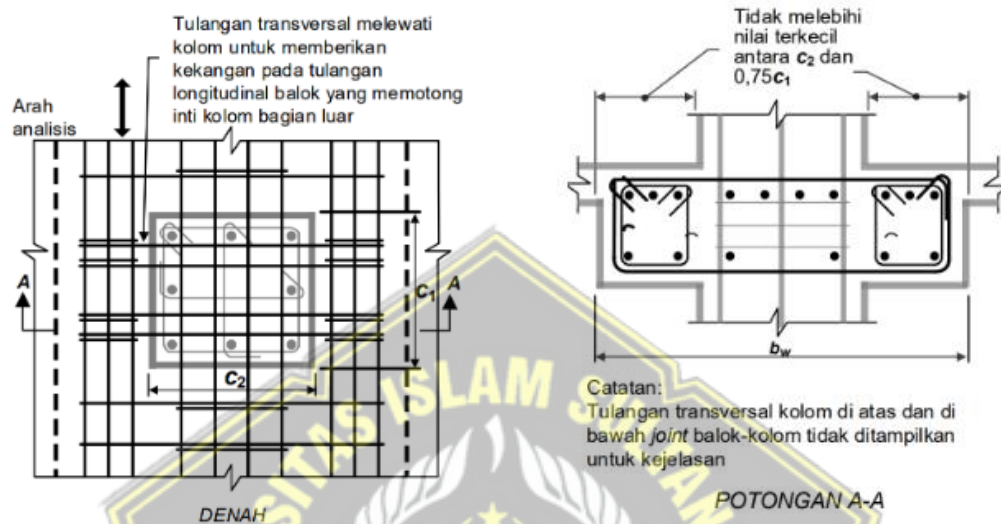
Kondisi Perlekatan	Minimum h
Perlekatan Sederhana	$\ell/16$
Menerus Satu Sisi	$\ell/18,5$
Menerus Dua Sisi	$\ell/21$
Kantilever	$\ell/8$

Sumber : SNI 2847:2019

Syarat untuk dimensi penampang pada struktur balok sistem rangka pemikul momen khusus (SRPMK) diatur pada pasal 18.6.2.1 dalam SNI 2847:2019. Berikut persyaratan yang wajib dipatuhi:

- Panjang pada bentang yang bersih (ℓ_n) wajib lebih besar dari 4 kali dari tinggi efektif.

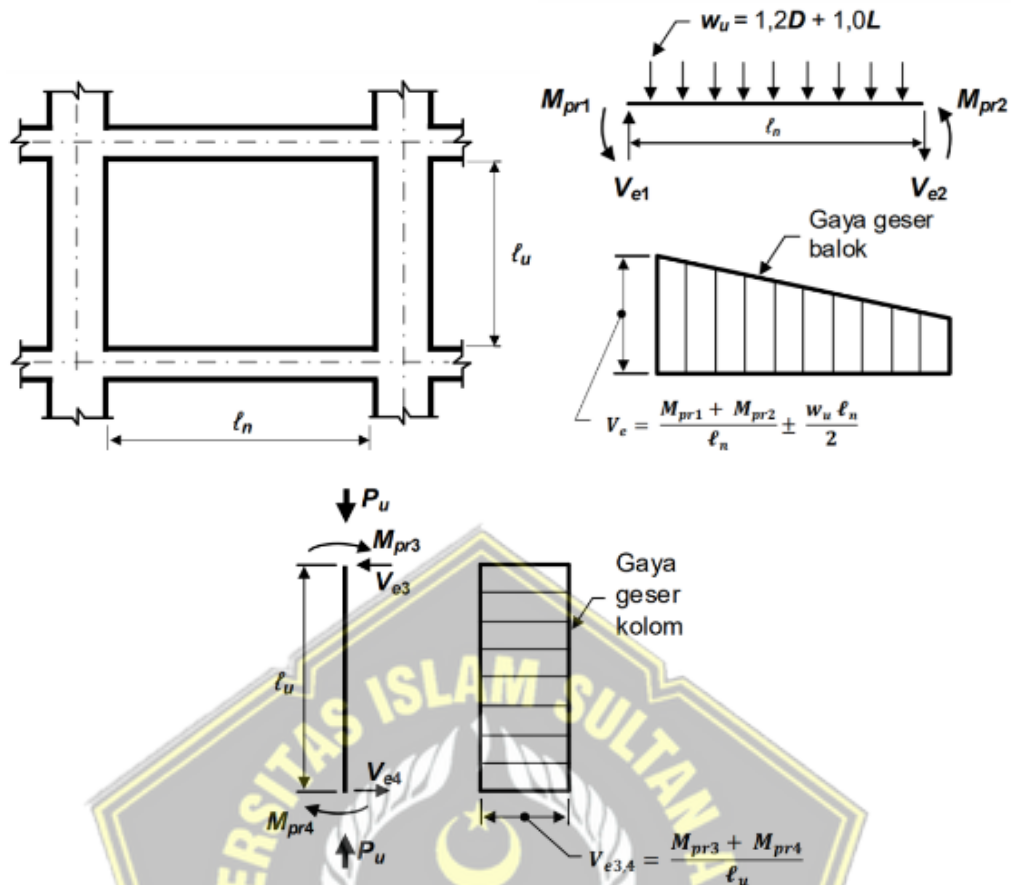
- b. Lebar pada penampang (b_w), diwajibkan sekurangnya nilai terkecil dari $0,3h$ dan 250mm .
- c. Proyeksi lebar balok yang melebihi lebar kolom penumpu tidak diperbolehkan melebihi nilai terkecil dari c_2 dan $0,75 c_1$ pada tiap sisi kolom



Gambar 2. 1. Lebar Efektif Maksimum pada Balok Lebar (Wide Beam) dan Persyaratan Tulangan Transversal (SNI 2847:2019)

Gaya-gaya di penampang balok antara dua ujung sambungan wajib ditinjau kembali untuk menghitung gaya geser rencana V_e . Ketika balok diberi beban dengan beban gravitasi terfaktor dengan panjang sama bentangnya, momen-momen dengan tanda yang bertolak belakang dari momen kuat momen lentur fisibel tertinggi, M_{pr} wajib diperkirakan bekerja pada ujung-ujung sambungan. Jika kriteria berikut terpenuhi, tulangan transversal di lokasi yang ditentukan harus dikonstruksi untuk menahan pergeseran dengan menganggap $V_c = 0$.

- a. Gaya geser akibat gempa yang dihitung mewakili setidaknya setengah kekuatan geser perlu maksimum pada bentang tersebut.
- b. Gaya geser akibat gempa yang dihitung mewakili setidaknya setengah kekuatan geser perlu maksimum pada bentang tersebut.



Gambar 2. 2. Geser Desain Untuk Balok dan Kolom (SNI 2847:2019)

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

1. Kolom wajib mempunyai syarat-syarat dibawah ini :
 - a. Ukuran penampang terendah, diukur sepanjang garis lurus melewati pusat geometri, harus paling sedikit 300 mm.
 - b. Harus ada rasio minimum 0,4 antara dimensi penampang terendah dan dimensi tegak lurus.

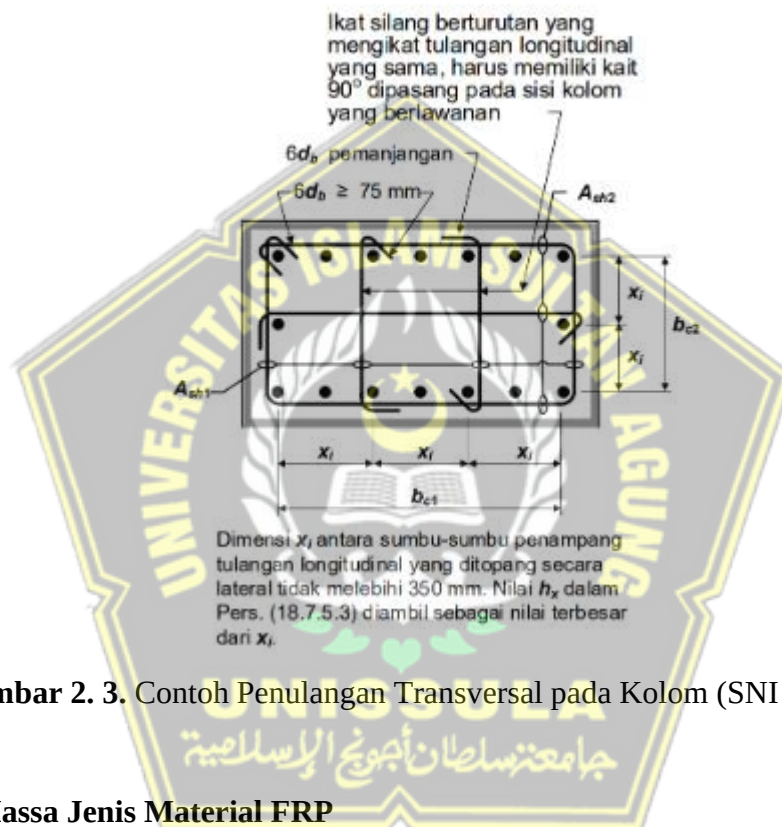
2. Kuat pada lentur kolom wajib memenuhi syarat dibawah ini :

$$\sum M_{nc} \geq 1,2 \sum M_{nb} \dots\dots\dots (2.3)$$

$\sum M_{nc}$: Total kuat lentur nominal pada kolom-kolom yang menyusun kedalam titik joint, yang dipertimbangkan pada muka-muka joint.

$\sum M_{nb}$: Total kuat lentur nominal pada balok yang menyusun ke dalam titik joint, yang dipertimbangkan pada muka-muka joint.

3. Luas pada tulangan longitudinal A_{st} , tidak diperbolehkan kurang dari $0,01A_g$ dan tidak melebihi $0,06A_g$.
4. Panjang ℓ_o tidak diizinkan kurang dari nilai terbesar antara persamaan berikut:
 - a. Tinggi pada kolom di muka joint atau di penampang dimana pelelehan lentur dimungkinkan timbul
 - b. $1/6$ tinggi dari bersih timbul
 - c. 450 mm



Gambar 2. 3. Contoh Penulangan Transversal pada Kolom (SNI 2847:2019)

2.4. Massa Jenis Material FRP

Perkuatan struktur menggunakan *FRP* telah berkembang di beberapa negara seperti Amerika Utara, Eropa, dan Jepang. Metode perkuatan ini dikenal sangat efisien, dan tidak mudah berkarat. Penggunaan metode *FRP* memiliki keuntungan yang didapat seperti mudah diaplikasikan dan ditangani, bobot bahan yang relatif ringan, biaya instalasi dan pemeliharaan yang murah. Keunggulan *FRP* ini dapat dilihat pada table 2.6.

Dari table 2.6. kita dapat mengetahui bahwa massa jenis material *FRP* berkisar antara 1,2 hingga 2,1 g/cm^3 , empat sampai enam kali lebih ringan dibandingkan

dengan material baja. Karena memiliki sifat yang lebih ringan dan kuat ini menjadikan salah satu alternatif dalam perkuatan beton.

Tabel 2. 6. Massa Jenis Material FRP

Baja (g/cm^3)	Kaca (GFRP) (g/cm^3)	Karbon (CFRP) (g/cm^3)	Aramid (AFRP) (g/cm^3)
7,9	1,2 s/d 2,1	1,5 s/d 1,6	1,2 s/d 1,5

(sumber : RSNI 3 Mengenai Pedoman Pada Perencanaan serta Pelaksanaan Sistem Serat Berperekat Polimer Eksternal Untuk Struktur Beton)

2.5. Pengaruh Suhu Terhadap Material FRP

Suhu merupakan salah satu faktor penting dalam sistem perkuatan FRP. Koefisien ekspansi termal material FRP searah berbeda dengan arah yang memanjang dan arah yang melintang, tergantung dari jenis-jenis resin, serat, dan fraksi volume serat. Suhu merupakan faktor penting dalam perkuatan, karena secara tidak langsung dapat mempengaruhi material atau bahan disekitar perkuatan. Oleh karena itu, dalam perhitungan perlu dimasukkan koefisien ekspansi termal agar tidak mengalami kegagalan dikemudian hari.

Berdasarkan tabel 2.7 koefisien negative ekspansi termal menunjukkan bahwa material berkonstrasi saat suhu meningkat dan mengambang ketika suhu menurun.

Tabel 2. 7. Koefisien Umum Muai Untuk Material FRP

Arah	Koefisien Pemuaian, $\times 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$				
	Beton	Baja	GFRP	CFRP	AFRP
Longitudinal, α_L	7,0 s/d 11,0	11,7	6 s/d 10	-1 s/d 0	-6 s/d -2
Tranversal, α_r	7,0 s/d 11,0	11,7	19 s/d 23	22 s/d 50	60 s/d 80

(sumber : RSNI 3 Mengenai Pedoman Pada Perencanaan serta Pelaksanaan Sistem Serat Berperekat Polimer Eksternal Untuk Struktur Beton)

Menurut penelitian yang dilakukan oleh Kumaha, el al (1993), diatas suhu transaksi kaca (T_g) modulus elastisitas polimer berkurang secara signifikan karena molekulnya berubah, nilai T_g tergantung dengan jenis resin yang dipakai, biasanya

nilainya berkisar antara 60 hingga 82°C. Dalam material komposit FRP, serat yang menunjukkan sifat termal yang lebih baik daripada resin untuk menahan beberapa beban longitudinal sampai ambang suhu serat tercapai. Ambang ini tercapai jika suhu melebihi 1000°C untuk serat karbon, 275°C untuk serat kaca dan 175°C untuk serat aramid.

2.6. Perilaku Tarik

Kuat tarik dan kekakuan material FRP tergantung dari beberapa alasan, karena material serat dalam FRP merupakan mahal utama pemikul beban. Jenis serat, orientasi serat, dan metode produksi serat orientasi serat, jumlah serat, dan metode produksi serat mempengaruhi kekuatan tarik sistem FRP. Ketika menerima gaya tarik, material FRP tidak akan menunjukkan perilaku plastis (leleh) sebelum runtuh.

Nilai kuat tarik dari sistem FRP tertentu harus diperoleh dari metode manufaktur atau menggunakan cara pengujian yang sesuai dengan ASTM D3039/D3039M, D7205/D7205M atau D7565/D7555M. untuk lebih jelasnya dapat diperiksa dari persamaan (2.1) serta persamaan (2.2).

a. Nilai Kekuatan Tarik Ultimit

$$f_{fu}^* = f_{fu} - 3\sigma \dots\dots\dots(2.1)$$

Keterangan :

f_{fu}^* = Nilai pada kuat tarik ultimit.

f_{fu} = Kuat tarik rata-rata.

σ = Standar pada Deviasi.

b. Regangan Ultimit

$$\varepsilon_{fu}^* = \varepsilon_{fu} - 3\sigma \dots\dots\dots(2.2)$$

Keterangan :

ε_{fu}^* = Nilai regangan pada gaya ultimit.

ε_{fu} = Regangan pada ultimit rata-rata.

σ = Standar pada Deviasi.

2.7. Perilaku Tekan Sistem FRP

Sistem FRP yang terlekat eksternal tidak digunakan sebagai perkuatan tekan karena belum diuji pada jumlah yang cukup dan validasi penggunaannya pada tipe ini. modus kegagalan untuk laminasi FRP yang mengalami gaya tekan longitudinal dapat mengalami runtuh tarik transversal, patah mikro pada serat, atau runtuh geser. Secara umum, kekuatan tekan lebih tinggi untuk dengan kekuatan tarik lebih tinggi, kecuali untuk material aramid FRP (AFRP), dimana serat menunjukkan perilaku nonlinier tekan pada saat tegangan yang relatif rendah (Wu, 1990).

2.7.1. Perilaku Berdasarkan Fungsi Waktu

Seperti material lainnya, FRP juga memiliki batas untuk daya tahan terhadap waktu. Beberapa faktor yang dapat mempengaruhi tingkat pengurangan sifat mekanik adalah faktor lingkungan, suhu tinggi, kelembaban, dan paparan kimia.

2.7.2. Runtuh Rangkak

Pembebanan yang dapat ditahan oleh material FRP dalam periode tertentu dapat mengalami kegagalan secara tiba-tiba. Perilaku ini disebut dengan runtuh rangkak. Hal ini disebabkan karena rasio tegangan tarik yang tinggi dari leminasi FRP meningkat sehingga menyebabkan daya tahan menurun.

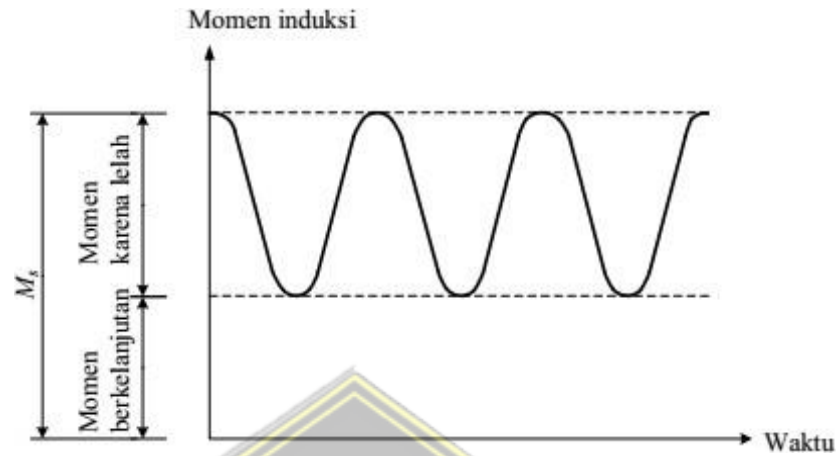
2.7.3. Fatik

Material yang mengalami beban bertulang yang terjadi dengan beban dibawah beban *ultimate* dapat menyebabkan kegagalan fatik. Menurut penelitian curtis (1989) dalam jurnalnya menjelaskan bahwa material FRP yang paling tidak rentang mengalami kegagalan fatik adalah CFRP (*Carbon Fiber Reinforced Polymers*). Daya tahan yang dimiliki material tersebut berkisar antara 60 sampai 70 persen dari kekuatan untimit awal.

2.7.4. Keruntuhan terhadap rangkak dan batasan tegangan fatik

Untuk menghindari keruntuhan rangkak dan fatik perlu adanya pengecekan kerruntuhan akibat tegangan siklik dan fatik pada perkuatan FRP. Tegangan pada

FRP diperhitungkan berdasarkan analisis elastis dan berdasarkan momem maksimum melalui siklus pembebanan fatik yang dapat diperiksa pada gambar 2.4.



Gambar 2. 4. Jenis Momen Yang Bekerja Untuk Memeriksa Batas Tegangan Pada Perkuatan FRP

(sumber : RSNI 3 Mengenai Pedoman Pada Perencanaan serta Pelaksanaan Sistem Serat Berperekat Polimer Eksternal Untuk Struktur Beton)

Tabel 2. 8. Batas Tegangan Menerus dan Siklik Tulangan FRP

Jenis Tegangan	Jenis Serat		
	GFRP	AFRP	CFRP
Batas Tegangan	$0,20 f_{fu}$	$0,30 f_{fu}$	$0,55 f_{fu}$
Siklik Menerus			

(sumber : RSNI 3 Mengenai Pedoman Pada Perencanaan serta Pelaksanaan Sistem Serat Berperekat Polimer Eksternal Untuk Struktur Beton)

2.8. Desain Perkuatan Menggunakan CFRP

Proses pembuatan desain perkuatan bangunan dengan menggunakan FRP jenis CFRP (*Carbon Fiber Reinforced Polymers*) harus direncanakan dengan teliti. Dalam pembuatan desain FRP, material tersebut harus diencanakan agar dapat menahan gaya tarik dan mempertahankan kompatibilitas antara FRP dan beton.

Untuk mencegah terjadinya keruntuhan pada bangunan maka perlu diadakannya batasan perkuatan, hal tersebut jika dimungkinkan terjadi kegagalan rekatan FRP atau kegagalan lain yang mengakibatkan kerusakan. Elemen struktur diperkuat

dengan FRP jenis CFRP harus dapat memikul beban yang telah direncanakan dengan persamaan (2.3). dari Persamaan (2.3) ini menjamin elemen

$$(\phi R_n)_{eksisting} \geq (1,1 S_{DL} + 0,75 S_{LL}) \dots\dots\dots (2.3)$$

Keterangan :

ϕR_n : Batasan Perkuatan

S_{DL} : Faktor Beban Mati

S_{LL} : Faktor Beban Hidup

Pada saat perencanaan juga perlu adanya perhitungan resistansi struktur terhadap api atau terhadap suhu yang tinggi. Karena sistem FRP yang digunakan untuk perkuatan akan mengalami penurunan sifat tekanan sehingga kekuatannya akan berkurang. Menurut peraturan SNI 216.1 untuk beton bertulang dengan perkuatan FRP maka dapat menggunakan persamaan (2.4) atau menggunakan peraturan SNI 562 yang terdapat pada persamaan (2.5).

$$R_{n\theta} \geq 1,0 S_{DL} + 1,0 S_{LL} \dots\dots\dots (2.4)$$

$$R_{n\theta} \geq 1,2 S_{DL} + 0,0 S_{LL} + 0,2 S_{SL} + 1,0 A_K \dots\dots\dots (2.5)$$

Keterangan :

$R_{n\theta}$: Kuat nominal sebuah elemen pada suhu tinggi

S_{DL} : Faktor Beban Mati

S_{LL} : Faktor Beban Hidup

S_{SL} : Faktor Beban Salju

A_K : Faktor beban akibat kebakaran

Apabila dalam sebuah bangunan yang dirancang untuk memikul beban tinggi maka perhitungan yang di ambil berdasarkan beban tertinggi. Hal tersebut dikarenakan agar dapat menanggulangi penurunan akibat penurunan kualitas.

2.9. Faktor Lingkungan Untuk Sistem FRP (*Fiber Reinforced Polymer*)

Faktor lingkungan berpengaruh secara khas pada resin dan serat FRP. Dalam perencanaan desain, faktor lingkungan atau pengaruhnya seringkali tidak diperhitungkan secara matang. Sifat mekanis sistem FRP (kekuatan tarik, regangan tarik ultimit, dan modulus elastisitas) dapat menurun jika terkena faktor lingkungan seperti, alkali, air garam, zat kimia, sinar ultraviolet, suhu, dan kelembaban tinggi, atau siklus beku-cair.

Penggunaan FRP pada bangunan untuk kategori lingkungan sudah diatur dalam peraturan RSNI 3 “*Pedoman pada perencanaan dan pelaksanaan Sistem pada Serat Berekat Polimer Eksternal Untuk Struktur Beton*”

Didalam peraturan RSNI 3 tersebut diatur agar menjaga kualitas kekuatan FRP ketika digunakan dalam bangunan. Jika tidak diatur dapat mengakibatkan penurunan gaya tarik, runtuh rangkai, dan kelelahan pada material FRP tersebut. Sistem perkuatan FRP harus diperhitungkan dan direncanakan secara maksimal agar perkuatan atau *retrofit* dapat secara maksimal pula dalam perkuatannya.

Dapat dilakukan perhitungan agar kualitas penggunaan sistem FRP sesuai dengan yang direncanakan. Sistem FRP yang baik untuk kekuatan tarik dalam desain dapat digunakan persamaan (2.6).

$$f_{fu} = C_E f_{fu}^* \dots\dots\dots (2.6)$$

Keterangan :

f_{fu} : Kekuatan tarik ultimit

C_E : Faktor reduksi lingkungan

f_{fu}^* : kekuatan tarik ultimit awal

untuk pengaruh jangka Panjang terhadap regangan rangkai runtuh maka dapat dihitung dengan persamaan (2.7) berikut

$$\epsilon_{fu} = C_E \epsilon_{fu}^* \dots\dots\dots (2.7)$$

keterangan :

ϵ_{fu} : Regangan rangkai runtuh

C_E : Faktor reduksi lingkungan

ϵ_{fu}^* : Desain regangan rangkai runtuh

Tabel 2. 9. Faktor Reduksi Lingkungan Untuk Sistem FRP dan Jenis Paparannya

Komdisi Lingkungan	Jenis Serat	Faktor Reduksi Lingkungan (C_E)
Lingkungan terlindung, di dalam ruangan	Karbon	0,95
	Kaca	0,75
	Aramid	0,85
Lingkungan tidak terlindung (jembatan, pilar, atau garasi terbuka)	Karbon	0,85
	Kaca	0,65
	Aramid	0,75
Lingkungan agresif (pabrik kimia dan pabrik penjernihan)	Karbon	0,85
	Kaca	0,50
	Aramid	0,70

(sumber : RSNI 3 Mengenai Pedoman Pada Perencanaan serta Pelaksanaan Sistem Serat Berperekat Polimer Eksternal Untuk Struktur Beton)

Material FRP yang elastisitas dapat ditentukan dengan hukum Hooke sesuai dengan persamaan (2.8) berikut :

$$E_f = f_{fu} / \epsilon_{fu} \dots\dots\dots (2.8)$$

Keterangan :

E_f : Modulus Elastisitas

F_{fu} : Kekuatan tarik ultimit

ϵ_{fu} : regangan rangkai runtuh

Setelah melihat tabel 2.9 dapat kita simpulkan bahwa penggunaan metode FRP pada lingkungan yang berbeda dapat mempengaruhi ketahanan dan keawetan material tersebut dikarenakan unsur-unsur material FRP yaitu serat dan resin. Kedua unsur tersebut jika terdapat pada lingkungan tertentu dapat mengakibatkan reaksi kimia yang melemahkan rekatannya.

2.10. Perkuatan Lentur Dengan Menggunakan FRP

Desain dalam perkuatan dengan menggunakan FRP harus berdasarkan falsafah perdesainan yaitu kekuatan lentur harus melebihi momen tefaktor sesuai persamaan (2.9) dan persamaan (2.10.)

$$Mu = \alpha_{DL}M_{DL} + \alpha_{LL}M_{LL} \dots\dots\dots (2.9)$$

$$\phi Mn \geq Mu \dots\dots\dots (2.10)$$

Keterangan

Mu : Momen Beban Terfaktor

ϕMn : Momen Nominal

Faktor reduksi untuk pembebanan menggunakan FRP hanya digunakan untuk peningkatan kehandalan penentuan kekuatan sehingga dapat memperhitungkan pola kehancuran yang akan terjadi. Kekuatan lentur nominal penampang dengan perkuatan FRP Eksternal dihitung dengan persamaan (2.11) dapat dilihat pada gambar 2.10.

$$M_n = A_s f_s \left(d - \frac{\beta_1 c}{2} \right) + \psi_f A_f f_{fe} \left(d_f - \frac{\beta_1 c}{2} \right) \dots\dots\dots (2.11)$$

Keterangan :

M_n : Momen nominal

A_s : Luas penampang dibawah garis netral

β_1 : Parameter yang menentukan blok tegangan

c : Tinggi garis netral

A_f : Luas FRP

d_f : Tinggi penampang

d : Tinggi efektif

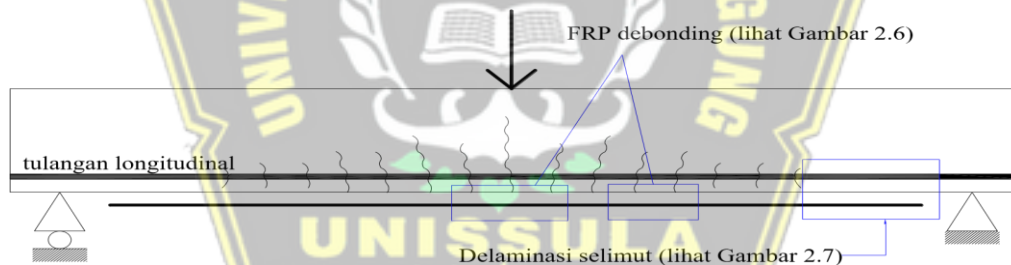
ψ_f : Faktor reduksi tambahan

2.11. Pola Keruntuhan

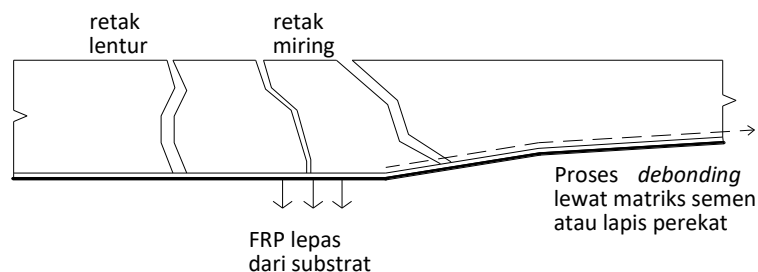
Keruntuhan pada penggunaan sistem FRP bisa saja terjadi hal ini dikarenakan prosedur pemasangan yang kurang baik Menurut GangaRao dan Vijay (1998) ada beberapa macam pola keruntuhan yang dapat terjadi pada elemen dengan penggunaan sistem FRP yaitu :

- Beton hancur di daerah tekan mendahului lelehnya tulangan tarik.
- Tulangan tarik meleleh diikuti oleh robek/ runtuhnya laminat FRP.
- Tulangan tarik meleleh diikuti oleh hancurnya beton di daerah tekan.
- Delaminasi geser / tarik dari selimut beton.
- Hilangnya lekatan antara FRP dengan beton (*FRP debonding*).

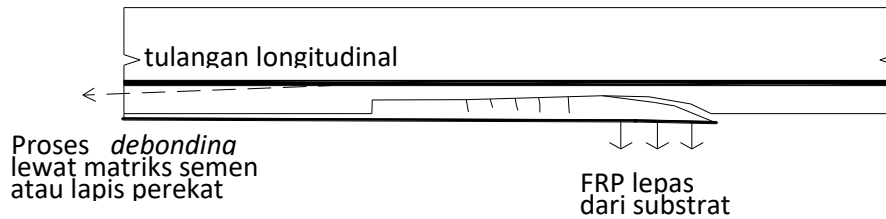
Peristiwa *debonding* atau terlepasnya ikatan jika gaya yang diterima oleh beton tidak dapat ditahan pada daerah lekatan FRP.



Gambar 2. 5. Perilaku Batang Lentur Dengan Tulangan



Gambar 2. 6. Debonding Yang Di inisiasi Oleh Retak Lentur Atau Geser



Gambar 2. 7. Delaminasi Yang Diinisiasi Oleh Lekukan Tulangan FRP

Daerah pada ujung pada Gambar 2.5 merupakan daerah yang dipengaruhi oleh debonding, sehingga untuk menghindari retak maka harus digunakan persamaan (2.11). Persamaan ini didapatkan dari penelitian pada saat pengujian yang menunjukkan retak debonding dengan menggunakan koefisien 0,41. Hal ini juga ditambahkan pada peraturan ACI 318 untuk beton struktural.

$$\epsilon_{fd} = 0,41 \sqrt{\frac{f_{tc}}{nE_{ftf}}} < 0,93 \epsilon_{fu} \dots\dots\dots(2.11)$$

keterangan :

ϵ_{fd} : Regangan debonding

ϵ_{fu} : Regangan runtuh

2.12. Perkuatan Beton Bertulang Menggunakan FRP

Perkuatan menggunakan FRP secara harfiah memang digunakan untuk meningkatkan perkuatan lentur. Namun, apabila terjadi deformasi geser di dalam lapisan yang terlekat dapat menyebabkan slip antara FRP dan substrat. Tetapi hal tersebut tidak akan berpengaruh pada perhitungan atau asumsi yang telah direncanakan secara signifikan pada komponen yang diperkuat FRP.

2.12.1. Kekuatan Geser

Ketika suatu penampang struktur telah direncanakan buat menaikkan kekuatan lentur maka komponen struktur pula diperhitungkan dapat menunda gaya geser yg terkait menggunakan peningkatan kekuatan lentur. Desain perkuatan geser wajib sesuai menggunakan persyaratan desain geser yang telah ditetapkan. buat skema lilitan bisa diliat di Gambar (2.8).



Gambar 2. 8. Skema Lilitan Untuk Perkuatan Geser

Skema lilitan memakai FRP bisa dipasang sepanjang rentang bentang atau hanya dilekatkan pada bagian yang ingin diperkuat saja. Bila penggunaan FRP sepanjang bentang maka harus diperhitungkan menggunakan cermat kemungkinan transmisi air keluar asal substrat agar tidak keluar.

Sesuai dengan peraturan ACI 318 , desain kekuatan geser beton yang diperkuat dengan FRP harus memenuhi syarat Persamaan (2.12) berikut :

$$\phi V_n \geq V_u \dots\dots\dots (2.12)$$

Keterangan :

ϕV_n : Kuat geser nominal

V_u : Kuat geser pada desain

Atau dapat ditentukan dengan menambahkan kontribusi penulangan geser eksternal FRP ke kontribusi baja tulangan dan beton dengan Persamaan (2.13) berikut :

$$\phi V_n = \phi (V_c + V_s + \phi_f V_f) \dots\dots\dots (2.13)$$

Keterangan :

ϕV_n : Kekuatan geser nominal

V_c : Kekuatan geser beton

V_s : Kekuatan geser baja

ϕ_f : Faktor reduksi tambahan

V_f : Kekuatan geser FRP

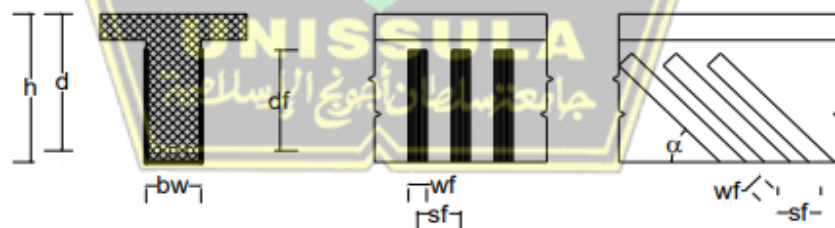
Faktor reduksi digunakan untuk memperhitungkan skema perukaan apabila kurangnya lekatan antara FRP dan substrat beton. Untuk faktor reduksi tambahan disesuaikan pada Tabel 2.10.

Tabel 2. 10. Faktor Reduksi Tambahan Untuk Penulangan Geser FRP

Faktor Reduksi Tambahan (ψ_f)	Keterangan
$\psi_f = 0,95$	Komponen – komponen yang terbungkus sepenuhnya
$\psi_f = 0,85$	Skema dua sisi berlawanan dan tiga sisi

(Sumber: RSNI 3 Pada Pedoman Pelaksanaan Dan Perencanaan Suatu Sistem Serat Berperekat Polimer Terlekat Eksternal Untuk Beton)

Berdasarkan Khalifa (1998) mengungkapkan bahwa kontribusi sistem FRP terhadap kekuatan geser suatu komponen didasarkan pada orientasi serat dan asumsi pola retak. Kontribusi geser dari penulangan FRP bisa diperoleh dengan Persamaan (2.14) serta keterangannya dapat diperiksa pada Gambar 2.9.



Gambar 2. 9. Penjelasan Variable Dimensi

$$V_f = \frac{A_{fv} f_{fc} (\sin \alpha + \cos \alpha) d_{fv}}{s_f} \dots \dots \dots (2.14)$$

Untuk penampang persegi Panjang

$$A_{fv} = 2n t_f w_f \dots \dots \dots (2.15)$$

Untuk penampang lingkaran, df_v diambil sebesar 0,8 kali diameter penampang

$$A_{fv} = (\pi / 2) n t_f w_f \dots\dots\dots (2.16)$$

Serta untuk tegangan tarik dalam perkuatan geser FRP pada kuat nominal proporsional dengan regangan yang dapat berkembang dalam perkuatan geser FRP pada kekuatan nominal.

$$F_{fc} = E_f \cdot \varepsilon_{fc} \dots\dots\dots (2.17)$$

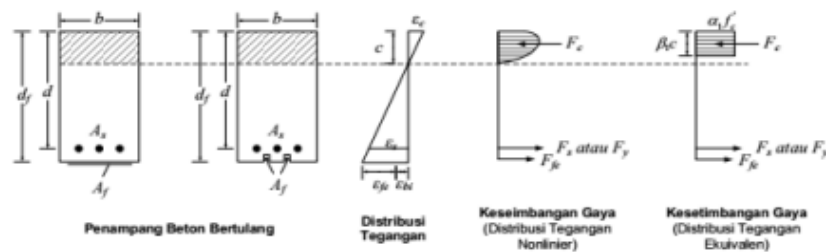
Dalam Peraturan ACI 38, jumlah dari kekuatan geser dari perkuatan geser harus dibatasi dengan Persamaan (2.18). Hal ini dilakukan untuk mengontrol jumlah kontribusi perkuatan geser dan penulangan geser baja.

$$V_s + V_f < 0,66 \sqrt{f_c b w d} \text{ (SI)} \dots\dots\dots (2.18)$$

2.12.2. Regangan

Beban yang bekerja di suatu komponen struktur harus dihilangkan sebelum pemasangan perkuatan memakai FRP sehingga substrat FRP yg diterapkan akan meregang, kecuali berat sendiri serta gaya – gaya prategang. Regangan awal di substrat bisa diperhitungkan memakai analisis elastik menggunakan memperhitungkan seluruh beban yang bekerja.

Pada kondisi ultimit regangan efektif desain perkuatan FRP buat keruntuhan dapat dikontrol dengan menggunakan Persamaan (2.19). Hal ini dilakukan karena dimungkinkan beton dapat musnah waktu dipasangkan menggunakan FRP.



Gambar 2. 10. Distribusi Tegangan dan Regangan Penampang Berbentuk Persegi Terhadap Lentur Pada Kondisi Batas Ultimit

(Sumber: RSNI 3 Pada Pedoman Pelaksanaan Dan Perencanaan Suatu Sistem Serat Berperekat Polimer Terlekat Eksternal Untuk Beton)

$$\varepsilon_{fe} = (\varepsilon_{pu} + \varepsilon_{pi}) \frac{df-c}{(dp-c)} - \varepsilon_{bi} < \varepsilon_{fd} \dots\dots\dots (2.19)$$

$$\varepsilon_{pi} = \frac{Pe}{ApEp} + \frac{Pe}{AcEc} \left(1 + \frac{e^2}{r^2} \right) \dots\dots\dots (2.20)$$

Regangan yang dapat dicapai sistem FRP pada kekuatan nominal dapat ditentukan oleh pola kegagalan sistem FRP dan komponen beton bertulang yang diperkuat. Untuk mencegah pola kegagalan ini jika dibungkus dengan penuh dengan FRP dapat digunakan Persamaan (2.21).

$$\varepsilon_{fe} = 0,004 < 0,75 \varepsilon_{fu} \dots\dots\dots (2.21)$$

Jika menggunakan *U-warp* maupun terbungkus 2 sisi maka perhitungan regangan efektif dapat menggunakan Persamaan (2.22)

$$\varepsilon_{fe} = K_v \varepsilon_{fu} < 0,004 \dots\dots\dots (2.22)$$

Sedangkan koefisien reduksi daya rekat dapat dihitung dengan menggunakan persamaan (2.23) sampai (2.27).

$$K_v = \frac{K_1 k_2 L_e}{11.900 \varepsilon_{fu}} < 0,75 \text{ (SI)} \dots\dots\dots (2.23)$$

$$L_e = \frac{23300}{(n_t f E_f)^{0,58}} \dots\dots\dots (2.24)$$

$$K_1 = \left(\frac{f_c}{27} \right)^{2/3} \dots\dots\dots (2.25)$$

Untuk pembungkusan tiga sisi

$$K_2 = \frac{df_v - L_e}{df_v} \dots\dots\dots (2.26)$$

Untuk pembungkusan dua sisi

$$K_2 = \frac{df_v - 2L_e}{df_v} \dots\dots\dots (2.27)$$

2.12.3. Tegangan Di Dalam Perkuatan FRP

Tegangan maksimum yang berkembang dalam perkuatan FRP sebelum mengalami keruntuhan lentur pada penampang dapat diperhitungkan dengan asumsi perilaku elastik sempurna sesuai dengan Persamaan (2.28).

$$F_{fe} = E_{fe} \varepsilon_{fe} \dots\dots\dots (2.28)$$

Dari Gambar 2.10 , tegangan efektif di dalam perkuatan FRP berdasarkan pada regangan perkuatan FRP sesuai dengan Persamaan (2.29). Sedangkan tegangan pada baja dalam keadaan elastik pada kurva tegangan-regangan dapat ditentukan dengan Persamaan (2.29). Kemudian dikontrol menggunakan Persamaan (2.31).

$$\varepsilon_s = (\varepsilon_{fe} + \varepsilon_{bi}) \frac{(d-c)}{(df-c)} \dots\dots\dots (2.29)$$

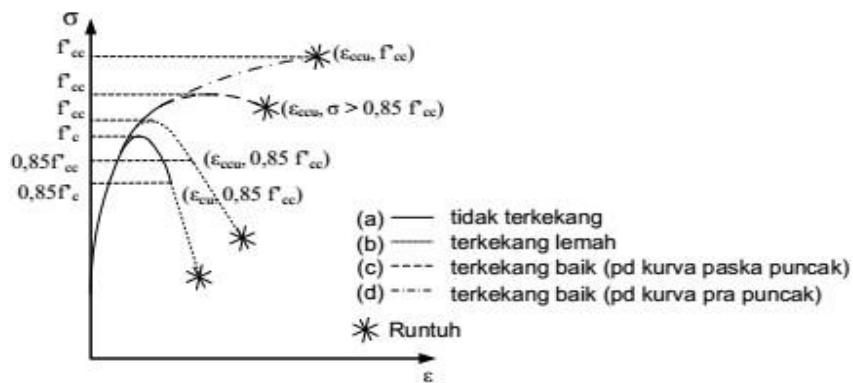
$$f_s = E_s \varepsilon_s < f_y \dots\dots\dots (2.30)$$

$$\alpha_1 f_c \beta_1 bc = A_s f_s + A_f f_{fe} \dots\dots\dots (2.31)$$

2.13. Gaya Tekan Aksial Murni

Sistem FRP dapat digunakan untuk meningkatkan kekuatan tekan aksial di suatu komponen beton menggunakan pengengkangan memakai selubung FRP (Nanni and Bradford 1995; Toutanji 1999). Pengengkangan yang dilakukan menggunakan FRP artinya dengan memasang serat arah melintang terhadap sumbu memanjang komponen. Kekekangan serat mirip ini seperti menggunakan penulangan spiral atau pengikat baja sehingga menjadi lebih kuat.

Kurva tegangan-regangan uniaxial asal beton bertulang mirip di Gambar 2.12 tergantung pada level pengengkangannya. Selubung FRP yang menyampaikan pengengkangan pasif di komponen tekan tidak menerima tegangan sampai terjadi pembesaran serta retak di komponen tekan yg dibungkus FRP. sang sebab itu, selubung FRP serta komponen beton wajib menyatu menggunakan baik.



Gambar 2. 11. Perilaku Tegangan – Regangan Untuk Beton Terkekang Menggunakan FRP

(sumber : RSNI 3 Mengenai Pedoman Pada Perencanaan serta Pelaksanaan Sistem Serat Berperekat Polimer Eksternal Untuk Struktur Beton)



Gambar 2. 12. Model Tegangan-Regangan Untuk Beton Terkekang Menggunakan FRP

(sumber : RSNI 3 Mengenai Pedoman Pada Perencanaan serta Pelaksanaan Sistem Serat Berperekat Polimer Eksternal Untuk Struktur Beton)

Untuk komponen nonprategang dengan penulangan spiral baja eksisting

$$\phi P_n = 0,85\phi [0,85 f_{cc} (A_g - A_{st}) + f_y A_{st}] \dots\dots\dots(2.32)$$

Menurut Lam dan Teng (2003), model tegangan-regangan untuk beton yang dikekang oleh FRP diilustrasikan pada Gambar 2.3 dengan persayratan sesuai dengan Persamaan 2.33.

$$f_{cc} \left\{ \frac{E_c \epsilon_c - \frac{(E_c - E_2)^2}{4 f_c}}{f_c + E_2 \epsilon_c} \right\} \quad (0 \leq \epsilon_c \leq \epsilon_t) \dots\dots\dots(2.33)$$

$$\epsilon_{c \max} < \epsilon_{ccu} < 0,001 \dots\dots\dots(2.34)$$

$$E_2 = \frac{f_{cc} - f_c}{\epsilon_{ccu}} \dots\dots\dots(2.35)$$

$$\epsilon_t = \frac{2 f_c}{E_c - E_2} \dots\dots\dots(2.36)$$

Kekuatan tekan beton terkekang maksimum (f_{cc}) dan tekanan pengekan maksimum (f_i) dihitung dengan Persamaan (2.37) serta Persamaan (2.38) dengan menyertakan faktor reduksi tambahan sebesar 0,95.

$$f_{cc} = f_c + \psi_f 3,3 k_a f_f \dots\dots\dots(2.37)$$

$$f_i = \frac{2 E_f n t f_e f_e}{D} \dots\dots\dots(2.38)$$

Serta kegagalan dalam regangan efektif penggunaan FRP dapat dihitung menggunakan Persamaan (2.39).

$$\epsilon_{fe} = K \epsilon_{fu} \dots\dots\dots(2.39)$$

Regangan tekan maksimum beton di dalam beton yang dikekang dengan FRP dapat dicari dengan Persamaan (2.40). Sedangkan regangan beton maksimum harus dibatasi nilainya sebesar 0,01 untuk mencegah retak berlebihan dan menyebabkan hilangnya integritas beton (Concrete Society, 2004).

$$\epsilon_{ccu} = \epsilon_e (1,50 + 12 k_b \frac{f_l}{f_c} (\frac{\epsilon_{fe}}{\epsilon_c}) 0,45) \dots\dots\dots(2.40)$$

Peningkatan kekuatan untuk komponen tekan dengan f_c 70 MPa atau lebih tinggi belum diverifikasi secara eksperimental juga peningkatan beton dengan kekuatan tekan f_c lebih dari 70 MPa harus didasarkan uji ekperimental.

2.13.1. Penampang Lingkaran

Menurut Rocca et al. (2006) mengungkapkan bahwa selubung FRP paling efektif Bila dipergunakan buat komponen berpenampang bulat. Bila arah serat melintang terhadap sumbu memanjang komponen, sistem FRP akan menunda tekanan pengekan secara merata. Buat penampang lingkaran bisa menggunakan Persamaan (2.37) dan (2.40).

2.13.2. Penampang Non Lingkaran

Menurut pengujian yang sudah dilaksanakan oleh Rocca et. Al (2008) menunjukan jika penampang bujur sangkar dan persegi panjang dengan selubung FRP hanya meningkatkan kekuatan tekan aksial maksimum secara marginal. Ketentuan ini tidak disarankan jika rasio dimensi h/b lebih besar dari 2,0 atau dimensi muka (b) atau h melebihi 900 mm, kecuali jika ada pengujian keefektivasannya. Untuk penampang non lingkaran tekanan maksimum dari penampang lingkaran ekuivalen dengan diameter (D) yang sama dengan panjang diagonal penampang persegi panjang. Untuk lebih jelasnya dapat diperiksa pada Gambar 2.13.



Gambar 2. 13. Luas Penampang Lingkaran Ekuivalen

(Sumber: RSNI 3 Pada Pedoman Pelaksanaan Dan Perencanaan Suatu Sistem Serat Berperekat Polimer Terlekat Eksternal Untuk Beton)

$$D = \sqrt{b^2 + h^2} \dots\dots\dots(2.41)$$

$$K_a = \frac{Ae}{Ac} \left(\frac{b}{h}\right)^2 \dots\dots\dots(2.42)$$

$$K_b = \frac{Ae}{Ac} \left(\frac{b}{h}\right)^{0,5} \dots\dots\dots(2.43)$$

$$\frac{Ae}{Ac} = \frac{1 - \left[\frac{\left(\frac{b}{h}\right)(h-2r_c)}{3Ag} + \frac{\left(\frac{b}{h}\right)(b-2r_c)^2}{3Ag} \right]}{1 - P_g} - P_g \dots\dots\dots(2.44)$$

Berikut adalah persamaan yang diambil pada peraturan RSNI 3 3 Pada Pedoman Pelaksanaan Dan Perencanaan Suatu Sistem Serat Berperekat Polimer Terlekat

Eksternal Untuk Beton, dalam menentukan diagram interaksi kolom yang dapat diperiksa pada rumus di Persamaan 2.45 sampai dengan Persamaan 2.53

$$A = \frac{-b(E_c - E_2)^2}{12f'_c} \left(\frac{\varepsilon_{ccu}}{c}\right)^2 \dots\dots\dots(2.45)$$

$$B = \frac{b(E_c - E_2)^2}{2} \left(\frac{\varepsilon_{ccu}}{c}\right) \dots\dots\dots(2.46)$$

$$C = -bf'_c \dots\dots\dots(2.47)$$

$$D = bcf'_c + \frac{bcE_2}{2} (\varepsilon_{ccu}) \dots\dots\dots(2.48)$$

$$E = \frac{-b(E_c - E_2)^2}{16f'_c} \left(\frac{\varepsilon_{ccu}}{c}\right)^2 \dots\dots\dots(2.49)$$

$$F = b \left(c - \frac{h}{2}\right) \frac{(E_c - E_2)^2}{12f'_c} \left(\frac{\varepsilon_{ccu}}{c}\right)^2 + b \frac{E_c - E_2}{3} \left(\frac{\varepsilon_{ccu}}{c}\right) \dots\dots\dots(2.50)$$

$$G = -\left(\frac{b}{2}f'_c + b\left(c - \frac{h}{2}\right) \frac{E_c - E_2}{2} \left(\frac{\varepsilon_{ccu}}{c}\right)\right) \dots\dots\dots(2.51)$$

$$H = bf'_c \left(c - \frac{h}{2}\right) \dots\dots\dots(2.52)$$

$$I = \frac{bc^2}{2}f'_c - bcf'_c \left(c - \frac{h}{2}\right) \frac{cb^2 - E_2}{3} (\varepsilon_{ccu}) \left(c - \frac{h}{2}\right) (\varepsilon_{ccu}) \dots\dots\dots(2.53)$$

2.14. Tulangan Minimum

Syarat minimum pada tulangan antara lain :

1. Syarat minimum pada rasio luas tulangan vertikal tentang luas bruto penampang pada beton ρ_l , harus :
 - a. Jika rasio 0,0012 pada batang kawat las maka batang tulangan tidak boleh lebih besar dari Ø-16 atau D-16
 - b. Jika rasio 0,0012 pada tulangan ulir maka tulangan tidak boleh lebih besar dari D-16 serta f_y tidak boleh kurang dari 420 Mpa, atau
 - c. Jika rasio 0,0015 pada suatu batang tulangan ulir lainnya.
2. Syarat minimum pada rasio luas tulangan horizontal tentang luas bruto penampang pada beton ρ_t , harus:
 - a. Jika rasio 0,0020 pada tulangan kawat las maka tulangan tidak boleh lebih besar dari Ø-16 atau D-16

- b. Jika rasio 0,0020 pada tulangan ulir maka tulangan tidak boleh lebih besar dari D-16 serta f_y tidak kurang dari 420 Mpa, atau
- c. Jika rasio 0,0025 pada suatu batang tulangan ulir lainnya.

2.15. Perilaku Tarik Material FRP

Material mempunyai karakteristik kekuatan tarik dan kekakuan tergantung dari beberapa faktor, yang dikarenakan material serat dalam FRP adalah bahan utama pemikul beban. Yang mempengaruhi kekuatan tarik pada sistem FRP adalah orientasi serat, jenis serat, metode produksi serat dan jumlah serat.

Material FRP ketika menerima gaya tarik yang searah akan menunjukkan perilaku leleh sebelum terjadinya runtuh. Pada kekuatan tarik FRP nilai harus di dapat dari suatu proses manufaktur atau dengan menggunakan suatu metode pengujian yang sesuai dari ASTM D3039/D3039M, D7565/D7565M atau D7205/D7205M (Arifudzaky & Andhika, 2020).

Berikut dibawah ini akan dijelaskan mengenai persamaan pada (2.1) kekuatan tarik FRP.

- a. Nilai Kekuatan Tarik Ultimit

$$f_{fu}^* = f_{fu} - 3\sigma \dots\dots\dots (2.1)$$

Keterangan :

f_{fu}^* = Nilai kekuatan tarik ultimit

f_{fu} = Kekuatan tarik rata-rata

σ = Standar Deviasi

- c. Regangan Ultimit

$$\varepsilon_{fu}^* = \varepsilon_{fu} - 3\sigma$$

Keterangan :

ε_{fu}^* = Regangan ultimit

ε_{fu} = Regangan ultimit rata-rata

σ = Standar Deviasi

2.16. Prosedur Untuk Perkuatan Kolom Beton Penampang Bukan Lingkaran

2.16.1. Kurva Yang Disederhanakan Untuk Kolom Tanpa Perkuatan (n = 0 Lapis)

Pada titik A, B, dan C dapat diperoleh dengan menggunakan sebuah prosedur yang sudah diketahui secara umum, dan juga dapat menggunakan Persamaan (D-1) sampai (D-5) dengan mempertimbangkan $\Psi f = 1$, $f'_{cc} = f'_c$, $E_2 = 0$, dan $\varepsilon_{ccu} = \varepsilon_{cu} = 0,003$.

2.16.2. Kurva Yang Disederhanakan Untuk Kolom Yang Diperkuat

Pada suatu sistem yang terdiri dari enam jenis lapisan yang akan menjadi titik awal untuk pembuatan kurva bilinear A-B-C dan setelah itu dibandingkan dengan posisi P_u dan M_u yang diketahui.

Sebelumnya titik A, B, C pada kurva dihitung dengan menggunakan persamaan (12-1), (D-1), (D-2):

$$\phi P_{n(A)} = \phi 0,08(0,85 f'_{cc} (A_g - A_{st}) + f_y A_{st})$$

$$\phi P_{n(B,C)} = \phi [(A(y_t)^3 + B(y_t)^2 + C(y_t) + D) + \sum A_{si} f_{si}]$$

$$\phi M_{n(B,C)} = \phi [(E(y_t)^4 + F(y_t)^3 + G(y_t)^2 + H(y_t) + I) + \sum A_{si} f_{si} d_i]$$

Koefisien A, B, C, D, E, F, G, H, dan I dari pernyataan sebelumnya berasal dari Persamaan (D-3):

$$A = \frac{-b(E_C - E_2)^2}{12f'_c} \left(\frac{\varepsilon_{ccu}}{C}\right)^2$$

$$B = \frac{b(E_C - E_2)}{2} \left(\frac{\varepsilon_{ccu}}{C}\right)$$

$$C = bcf'_c$$

$$D = bcf'_c + \frac{(bcE_2)}{2} (\varepsilon_{ccu})$$

$$E = \frac{-b(E_C - E_2)^2}{16f'_c} \left(\frac{\varepsilon_{ccu}}{C}\right)^2$$

$$F = b \left(c - \frac{h}{2} \right) \frac{(E_C - E_2)^2}{12f'_c} \left(\frac{\epsilon_{ccu}}{c} \right)^2 + b \frac{(E_C - E_2)}{3} \left(\frac{\epsilon_{ccu}}{c} \right)$$

$$G = - \left(\frac{b}{2} f'_c + b \left(c - \frac{h}{2} \right) \frac{(E_C - E_2)}{2} \left(\frac{\epsilon_{ccu}}{c} \right) \right)$$

$$H = b f'_c \left(c - \frac{h}{2} \right)$$

$$I = \frac{bc^2}{2} f'_c + b c f'_c \left(c - \frac{h}{2} \right) + \frac{(bc^2 E_2)}{3} (\epsilon_{ccu}) - \frac{(bc E_2)}{2} \left(c - \frac{h}{2} \right) (\epsilon_{ccu})$$



BAB III METODOLOGI PENELITIAN

3.1. Pendahuluan

Penulisan dalam pengerjaan ini bertujuan untuk memperbaiki konstruksi bangunan yang telah mengalami kehilangan pada kekuatan yang diakibatkan kerusakan serta memperbaiki desain atau kelemahan pelaksanaan yang rendah dan jauh dari persyaratan. Dengan menggunakan sumber data yang diperoleh dari pihak terkait langsung dengan proyek tersebut. Serta data yang diperoleh dipergunakan untuk perhitungan dalam pembuatan Tugas Akhir ini yang berguna untuk kepentingan dalam penyusunan laporan tugas akhir yaitu dapat digunakan untuk menghitung serta menganalisa pembebanan yang bekerja pada suatu struktur bangunan yang akan diperbaiki menggunakan FRP (*Fiber Reinforced Polymer*).

Sebelum memperbaiki kita perlu analisis terlebih dahulu menggunakan program ETABS 18.0.0 serta memasukkan beban kerja pada struktur bangunan. Dari hasil ini maka kita dapat mengetahui bagian mana saja yang mengalami lendutan, retak atau geser untuk perlu diperbaiki.

3.2. Pengumpulan Data

Sumber data yang diperoleh dalam perencanaan perbaikan struktur menggunakan data teknis dapat diperiksa pada tabel 3.1.

Gambar 3. 1. Data Proyek

Lokasi Proyek	:	Kota Semarang
Total Tingkat Lantai	:	(7 Lantai)
Tinggi Setiap Lantai	:	4,2 meter
Tinggi Setiap Bangunan	:	36,2 meter
Fungsi Bangunan	:	Gedung Pasar
Mutu Baja (F_y)	:	420 MPa
Mutu Beton (F_c')	:	17 MPa = K-200 MPa

3.3. Peraturan Standar Perencanaan

Beberapa adalah peraturan yang digunakan sebagai standar dalam perencanaan pembebanan serta analisis dalam suatu perhitungan antara lain:

1. SNI 1726:2019 (Tata cara ketahanan gempa untuk struktur bangunan gedung dan non gedung)
2. SNI 1727:2020 (Peraturan beban minimum untuk perancangan bangunan gedung dan struktur lainnya)
3. SNI 440.2R-17 (Tata cara perancangan dan pelaksanaan sistem serat berpekerat polimer terlekat elasternal untuk perkuatan struktur beton)

3.4. Pembebanan Struktur Gedung

Pembebanan merupakan suatu faktor yang cukup berpengaruh dalam mendesain suatu struktur bangunan. Karena itu dalam mendesain suatu struktur diperlukan adanya identifikasi pada beban yang bekerja pada sistem struktur tersebut. Beban yang bekerja pada suatu struktur bangunan secara langsung disebabkan oleh gaya alamiah dan buatan manusia. Secara umum, struktur bangunan dikatakan stabil dan aman jika struktur bangunan mampu menahan suatu beban gempa dan beban gravitasi yang bekerja pada struktur bangunan tersebut.

3.4.1. Beban Mati (SNI 1727:2020)

Beban mati adalah berat dari suatu agregat konstruksi bangunan gedung yang terpasang, contohnya lantai, atap, plafon, tangga, kelongsongan bangunan, dan komponen arsitektural dinding partisi tetap serta peralatan yang terpasang lainnya termasuk alat berat (SNI 1727, 2020).

Berikut dibawah akan dijelaskan pada tabel 3.1 mengenai berat bahan bangunan dan komponen pada struktur gedung beban mati.

Tabel 3. 1. Daftar Berat Bahan Bangunan dan Komponen Struktur Gedung

No	Jenis pembebanan pada beban mati	Beban (t/m ²)
1	Beban Pada Pasir (1 cm)	0,016

2	Beban Pada Spesi (3 cm)	0,066
3	Beban Pada Keramik (1 cm)	0,022
4	Beban Plafond	0,02
5	Beban Mekanikal dan Elektrikal	0,025

Sumber : SNI 1727:2020

3.4.2. Beban Hidup (SNI 1727:2020)

Beban hidup ialah suatu beban yang disebabkan oleh penggunaan serta pengguna suatu bangunan pada gedung atau pada struktur bangunan lain dan tidak termasuk pada beban konstruksi serta beban pada lingkungan, seperti diantaranya nya beban angin, beban gempa, beban banjir, ataupun beban mati (SNI 1727, 2020).

Menerut SNI 1727:2020 tentang beban hidup struktur bangunan pada beban desain minimum dan kriteria terkait untuk suatu struktur bangunan gedung dan pada struktur lainnya, seperti yang akan dijelaskan pada tabel 3.2.

Tabel 3. 2. Daftar Beban Hidup pada Lantai

No	Jenis Ruang Pada Struktur	Beban (t/m ²)
1	Ruang Kelas	0,192
2	Laboratorium	0,287
3	Ruang Penyimpanan	0,718
4	Kantor	0,240
5	Atap	0,096

Sumber : SNI 1727:2020

3.4.3. Beban Gempa (SNI 1726:2019)

Perkuatan struktur berfungsi untuk meningkatkan dan mengembalikan suatu kekuatan elemen pada struktur supaya dapat menahan beban struktur sesuai dengan rencana. Secara umum, perkuatan struktur terjadi ketika suatu perubahan kegunaan bangunan atau bagian pada struktur yang telah direncanakan sesuai dengan metode yang dimana beban gempa nominalnya lebih rendah dari yang ditetapkan. Kemungkinan yang lain bahwa struktur tersebut sejauh ini hanya didesain untuk dapat menahan suatu beban gravitasi tanpa mempertimbangkan beban gempa yang kemungkinan akan terjadi. Hal ini akan menyebabkan kerusakan bahkan kegagalan pada struktur bangunan (Tavio, 2009).

Berdasarkan SNI 1726:2019 tegangan yang internal yang akan diberikan untuk setiap struktur selama terjadinya gempa besar mungkin akan lebih besar dari yang sudah di perkirakan. Gempa rencana merupakan suatu gempa yang memiliki peluang 2% dan terjadi pada bangunan yang memiliki umur bangunan 50 tahun dan magnitudo gempa lebih besar dari biasanya.

3.4.4. Kombinasi pembebanan

Pasal 5.3.1 SNI 2847:2019 mencantumkan bahwa kombinasi beban dasar pada desain kekuatan struktur, pondasi, dan komponen wajib dipersiapkan dengan sebaik-baiknya hingga powes desainnya yang sama atau bahkan bisa lebih dari efek beban yang terfaktor pada kombinasi seperti tabel 3.3.

Tabel 3. 3. Kombinasi Beban

Kombinasi Beban	Beban Utama
$U = 1,4D$	D
$U = 1,2D + 1,6L + 0,5(L_r \text{ atau } R)$	L
$U = 1,2D + 1,6L(L_r \text{ atau } R) + (1,0L \text{ atau } 0,5W)$	$L_r \text{ atau } R$
$U = 1,2D + 1,0W + 1,0L + 0,5(L_r \text{ atau } R)$	W
$U = 1,2D + 1,0E + 1,0L$	E
$U = 0,8D + 1,0W$	W
$U = 0,8D + 1,0E$	E

Keterangan

D = Beban mati yang disebabkan dari berat suatu konstruksi permanen.

L = Beban hidup

L_r = Beban hidup dari atap.

E = Beban yang terjadi akibat gempa.

W = Beban yang terjadi akibat angin.

R = Beban yang terjadi akibat hujan.

3.5. Permodelan Pada Desain Struktur

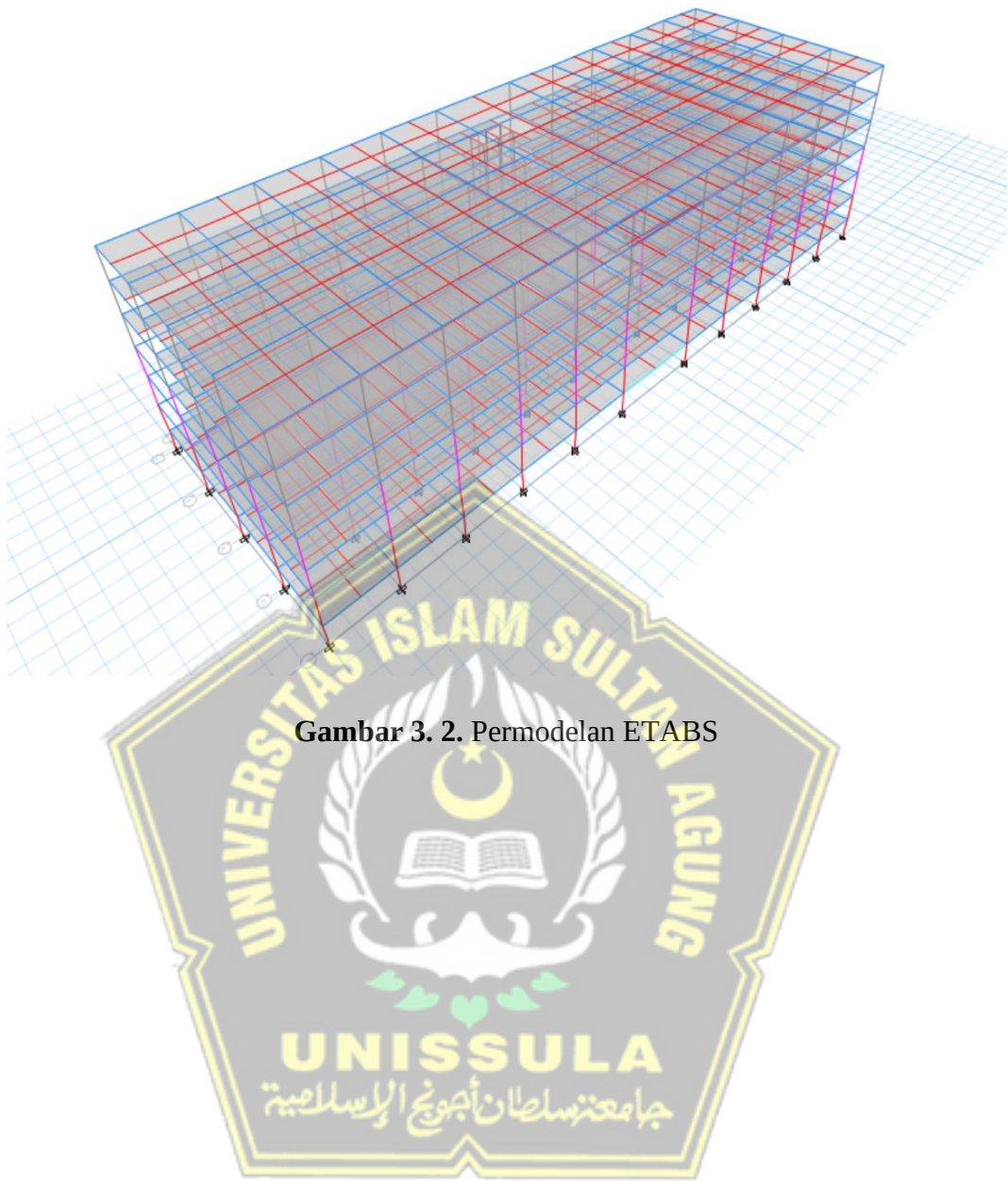
Rekomendasi yang ditinjau pada kolom yang paling kritis yaitu dengan membuat permodelan terlebih dahulu kemudian bisa mengetahui dimana letak kolom yang telah mengalami kerusakan. Ukuran pada tiap komponen dapat dilihat pada tabel 3.4, 3.5 dibawah ini:

Tabel 3. 4. Tinggi Pada Tiap Lantai

Keterangan	Tinggi	Elevasi
Atap	3500 mm	2940 mm
Lantai 6	4200 mm	2520 mm
Lantai 5	4200 mm	2100 mm
Lantai 4	4200 mm	1680 mm
Lantai 3	4200 mm	1260 mm
Lantai 2	4200 mm	8400 mm
Lantai 1	4200 mm	4200 mm
Basement	2000 mm	3000 mm

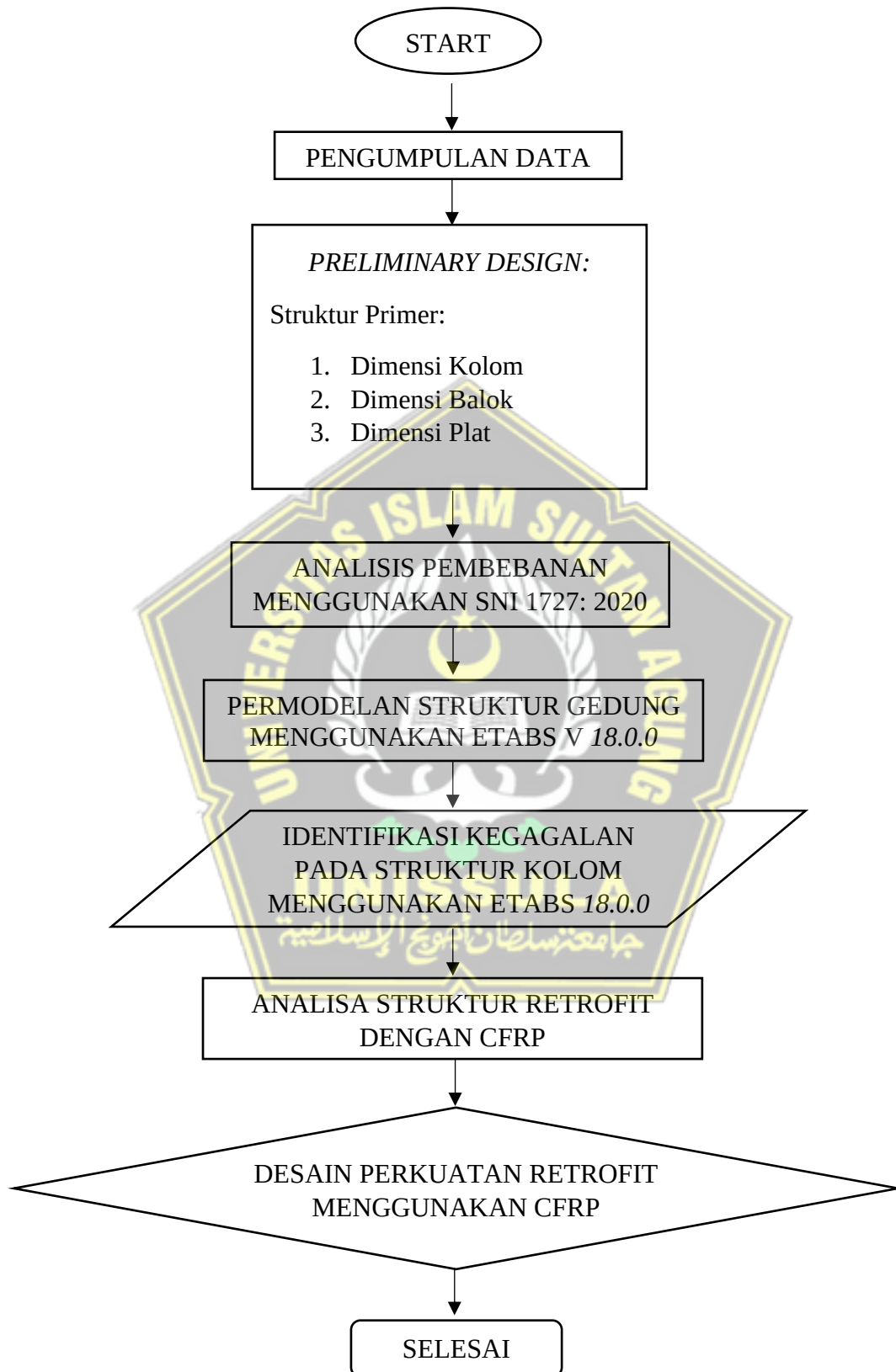
Tabel 3. 5. Ukuran Balok, Kolom dan Pelat

Tipe Struktur	Tinggi dan Dimensi	Keterangan/Tebal
Kolom	a. Tinggi	
	Lantai Basement	
	Lantai 1	3.000 mm
	Lantai 2	4.200 mm
	Lantai 3	4.200 mm
	Lantai 4	4.200 mm
	Lantai 5	4.200 mm
	Lantai 6	4.200 mm
	b. Dimensi	4.200 mm
	Lantai Basement – 1	K-1 (600 x 600) mm
Balok	Lantai 2 – 3	K-2 (500 x 500) mm
	Lantai 4 – 6	K-3 (500 x 500) mm
	a. Balok Induk	400 x 700 mm
	b. Balok Anak	300 x 600 mm
Pelat	c. Balok Konsol	400 x 700 mm
	Pelat lantai menggunakan tebal yang tipikal atau sejenis mulai dari <i>basement</i> hingga lantai 6	130 mm



Gambar 3. 2. Permodelan ETABS

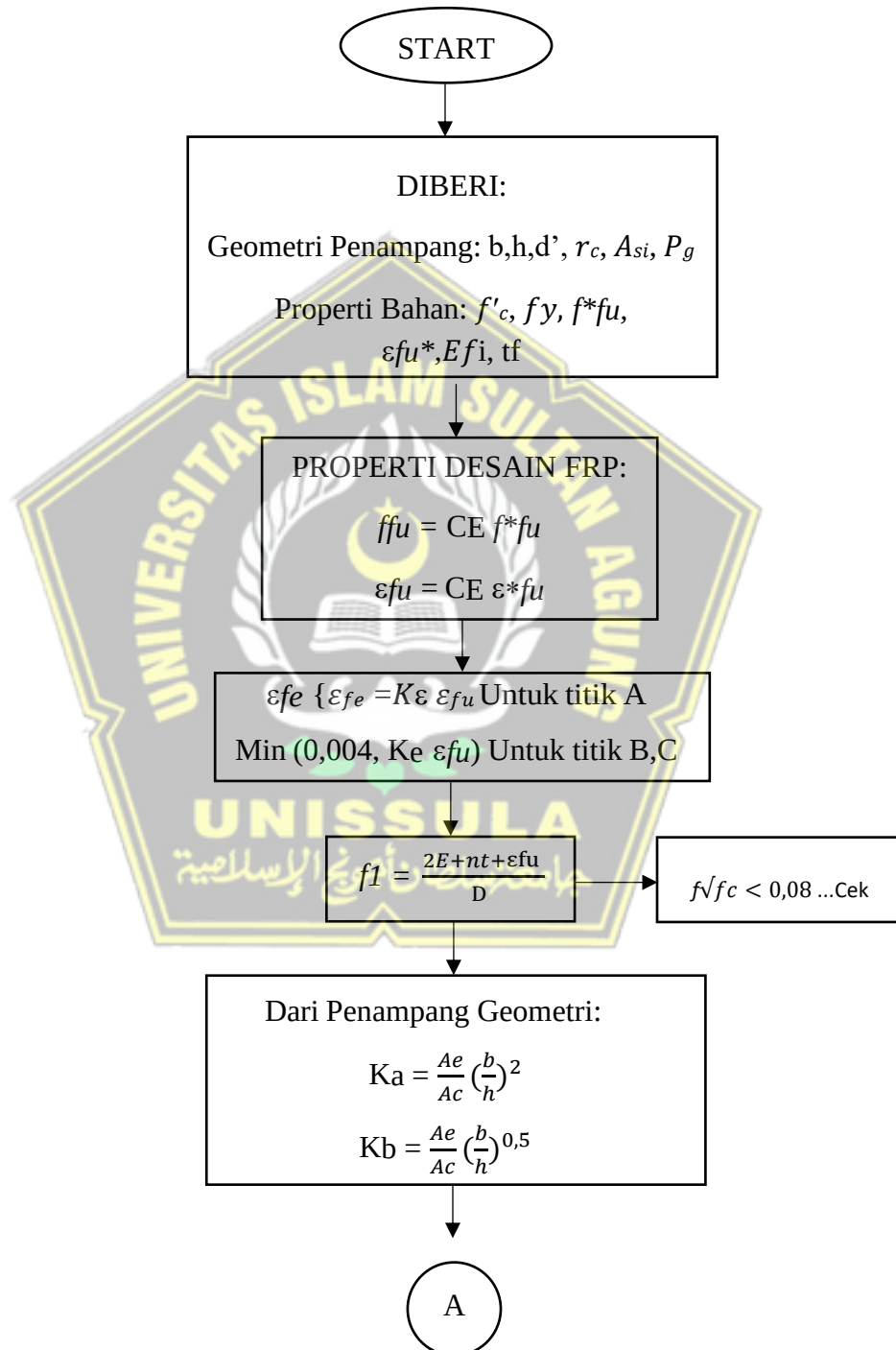
3.6. Bagan Alir Sistematika Desain FRP

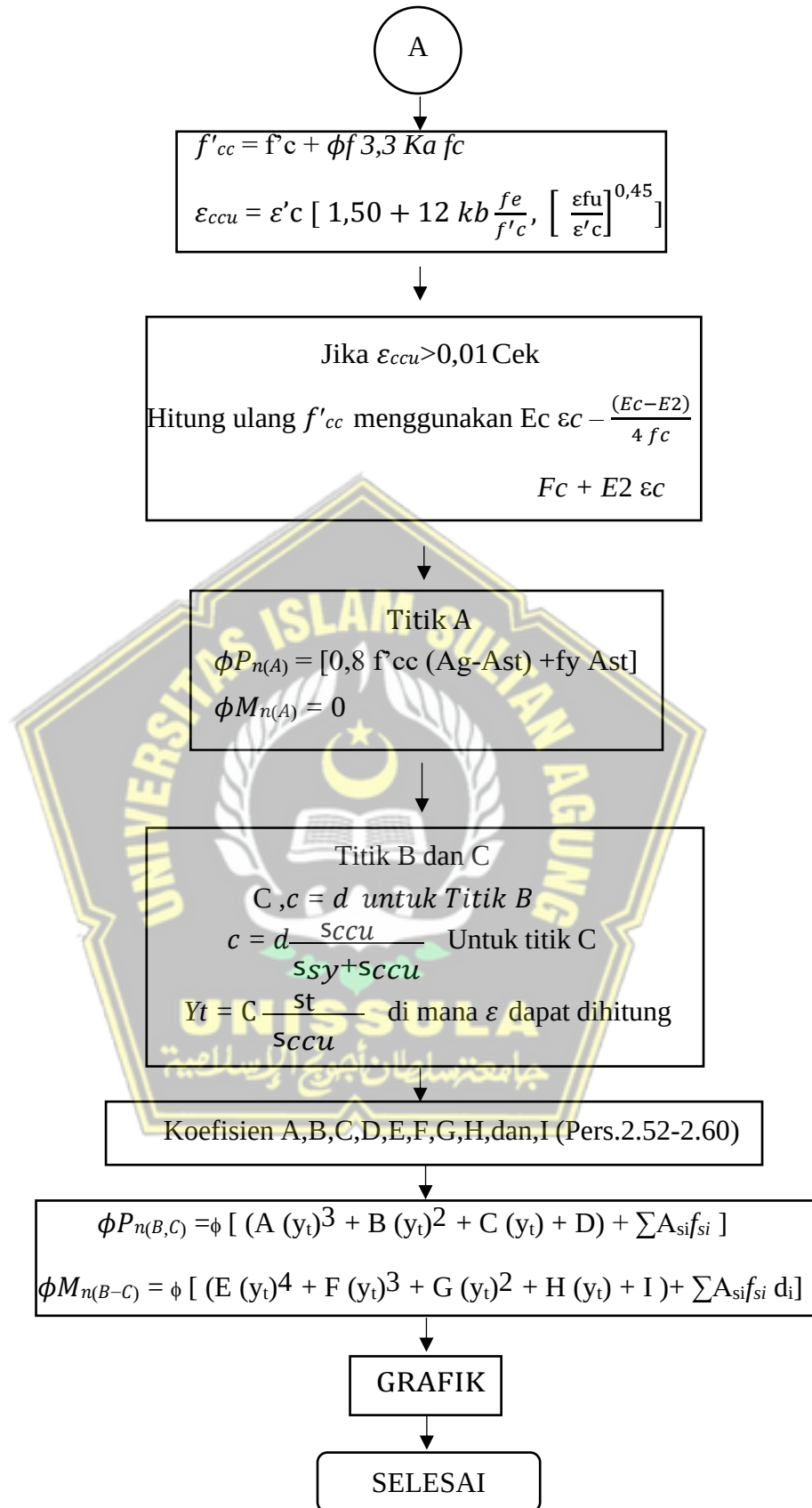


Gambar 3. 3. Bagan Alir Sistematika Desain FRP

3.7. Bagan Alir Desain Perkuatan FRP Pada Kolom Akibat Kegagalan Aksial Dan Momen

Untuk mendesain yang terjadi akibat kegagalan struktur pada kolom yang diakibatkan oleh gaya aksial dan momen maka untuk metode yang dilakukan seperti gambar dibawah ini 3.7





Gambar 3. 4. Bagan Alir Desain Kolom

BAB IV

HASIL PEMBAHASAN DAN PERHITUNGAN FRP

4.1. Data Struktur Gedung

4.1.1. Deskripsi Umum Struktur

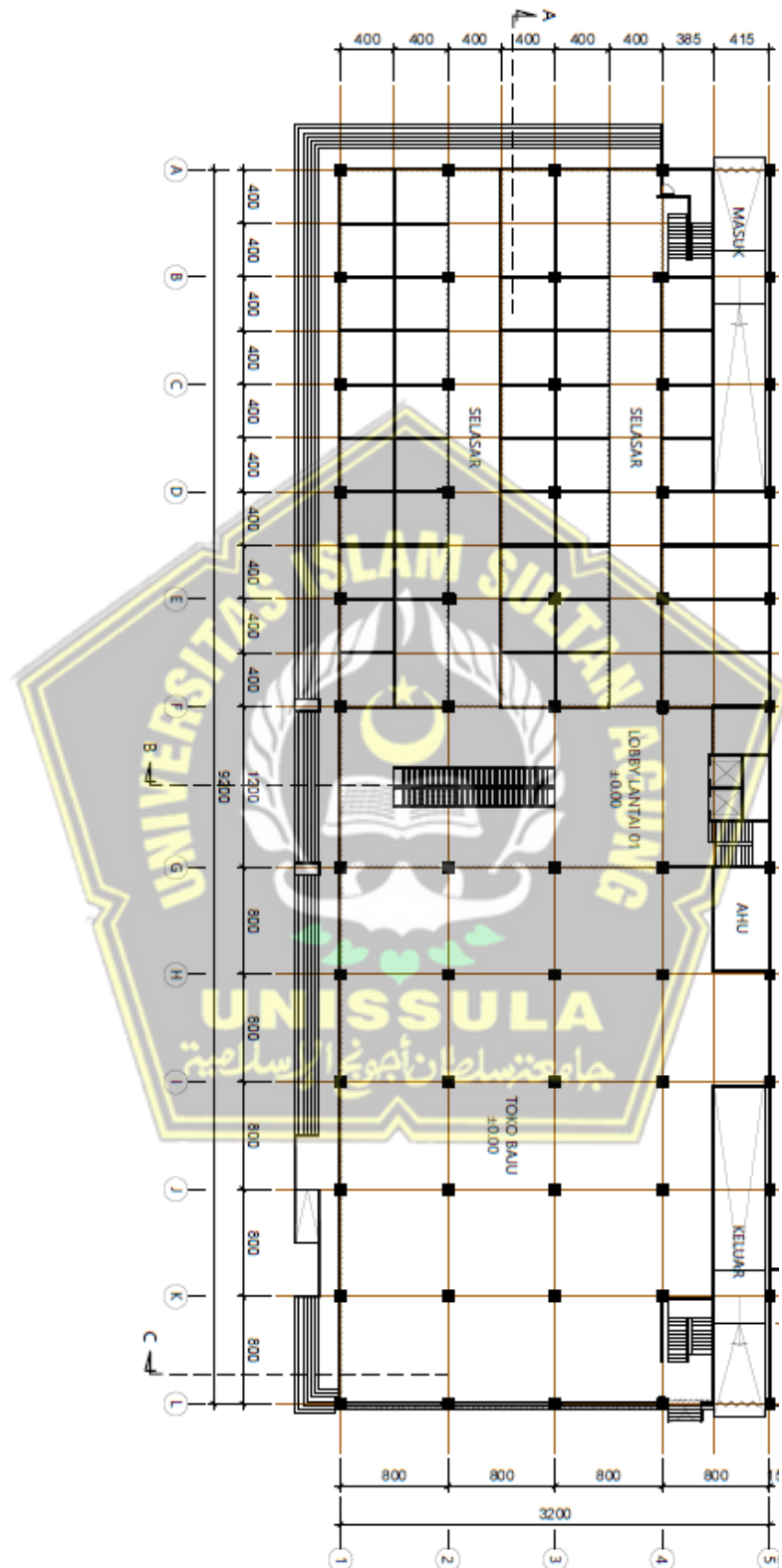
Gedung bertingkat yang terdiri dari 7 lantai yang akan dimodelkan dengan 1 jenis pemodelan. Yang akan dimodelkan sebagai Sistem Rangka Pemikul Momen Khusus (SRPMK). SRPMK merupakan suatu sistem rangka yang dimana komponen struktur dan jointnya menahan gaya yang akan bekerja melalui gaya aksial, gaya lentur, dan gaya geser. Pemodelan pada tugas akhir ini dilakukan sesuai dengan standar SNI 1726:2019.

Bangunan ini berfungsi sebagai gedung pasar yang berlokasi di Kota Semarang, Jawa Tengah. Bangunan ini terdiri dari 1 basement, 6 lantai yang berfungsi sebagai pasar dan 1 lantai paling atas sebagai atap bangunan. Secara umum, bangunan ini dirancang dengan material beton bertulang. Bangunan ini berbentuk persegi panjang dengan tinggi total 28,2 m. Data model struktur gedung dapat diperiksa pada Tabel 4.1.

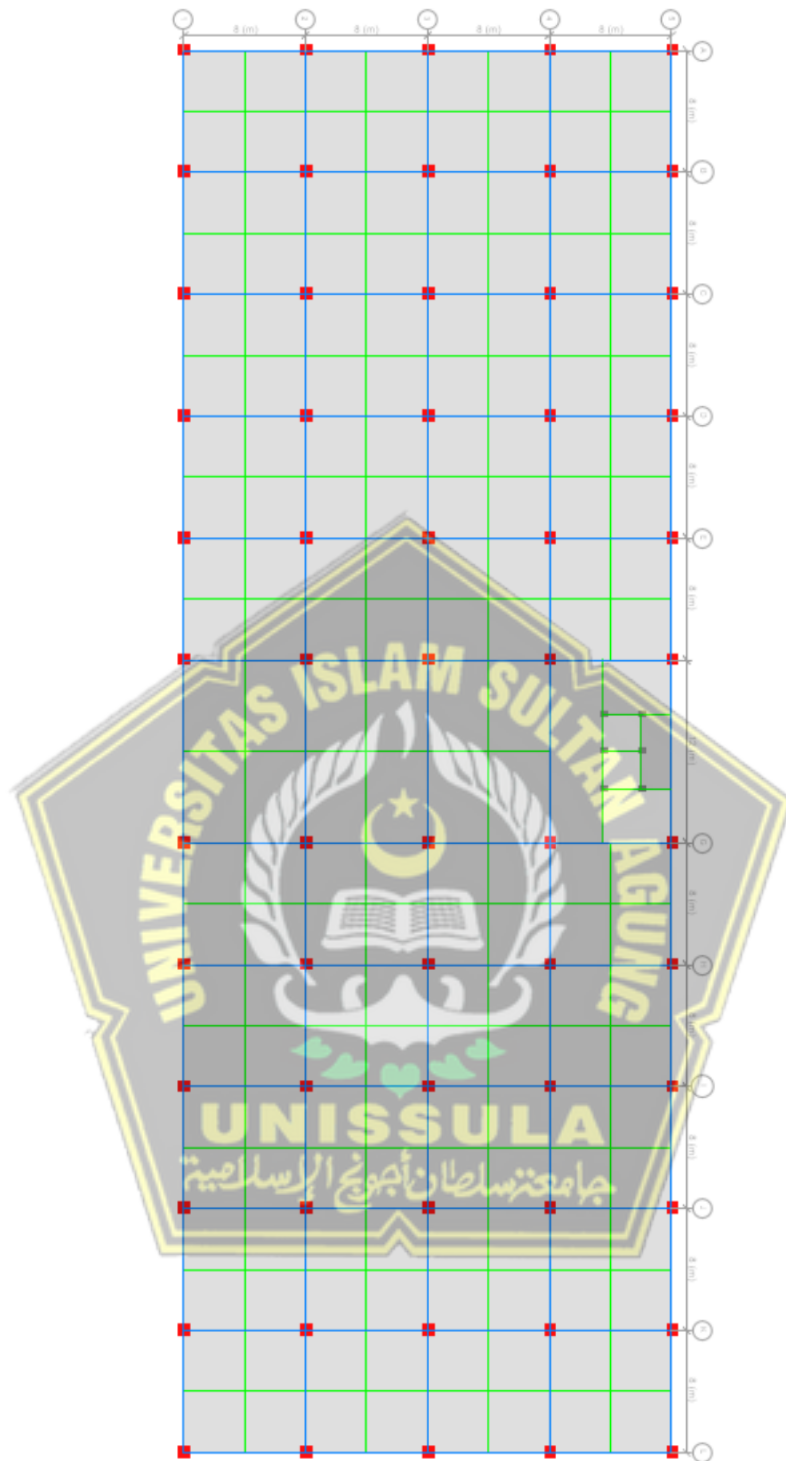
Tabel 4. 1. Data Model Struktur Gedung

Fungsi Bangunan	: Gedung Pasar
Jumlah Pada Lantai	: Tujuh Lantai (7 Lantai)
Tinggi Keseluruhan	: 28,2 m
Sistem Struktur	: Sistem Rangka Pemikul Momen Khusus (SRPMK)

Berikut denah arsitektur dari gedung yang didesain dapat dilihat pada Gambar 4.1 dan Gambar 4.2 sebagai berikut:



Gambar 4. 1. Denah Lantai Gedung Pasar yang terletak di Semarang.



Gambar 4. 2. Denah Awal ETABS Lantai 1-7

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)
Basement	3
Lantai 1	4,2
Lantai 2	4,2
Lantai 3	4,2
Lantai 4	4,2
Lantai 5	4,2
Lantai 6	4,2

- Spesifikasi material yang digunakan :
1) Mutu Baja Tulangan yang digunakan 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	483	603,75

- 2) Mutu Beton, sesuai Tabel 4.4 dan Tabel 4.5

- a) Balok dan Pelat

Tabel 4. 4. Mutu Beton Balok dan Pelat

f'_c	17	MPa
E	19378,596	MPa

- b) Kolom, sesuai Tabel 4.5

Tabel 4. 5. Mutu Beton Kolom

f'_c	17	MPa
E	19378,596	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. Permodelan Awal Dimensi Struktur

Permodelan awal struktur merupakan suatu tahap awal untuk merencanakan bangunan struktur tahan gempa berupa penggambaran permodelan dari beberapa jenis struktur berlandaskan pada standar SNI 2847:2019, adalah Persyaratan Beton Struktural pada sebuah Gedung.

4.1.2.1. Permodelan Elemen Pelat

Permodelan awal pada dimensi pelat mengacu panjang bentang rencana. Permodelan awal pelat menggunakan ETABS dengan tebal 120mm. Pembebanan kombinasi di ETABS yang dipakai adalah 120%, sedangkan untuk beban mati ditambah 160% beban hidup. Kemudian untuk menghitung keretakan sebuah beton ketika terjadinya momen inersia penampang plat, gempa, torsi reduksi yaitu sebesar 25%. Elemen pelat yang akan dimodelkan pada *semi-rigid* pada program ETABS yang di fungsikan untuk menghitung gaya yang bekerja pada pelat.

4.1.2.2. Permodelan Balok

Permodelan pada balok menggunakan 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 akan digunakan kedalam desain dapat diperiksa pada Tabel 4.6 sebagai berikut:

Tabel 4. 6. Dimensi Balok Setelah Pengecekan

Nama	Status Balok	Tipe Balok	L (mm)	H_{dipakai}	B_{min}	B_{dipakai}
B1	Induk	Persegi panjang	12000	700	400	400
B2	Induk	Persegi panjang	8000	700	400	400
BA1	Anak	Persegi panjang	12000	600	300	300
BA2	Anak	Persegi panjang	8000	600	300	300

Untuk perhitungan pengaruh pada keretakan suatu beton ketika gempa terjadi, momen inersia dari penampang balok dan torsi dikurangi 25% pada menyeimbangan nilai yang dikurangi pada inersia elemen struktur.

4.1.2.3. Pemodelan Kolom

Permodelan gedung ini menggunakan dua jenis dimensi pada kolom yang berbeda di beberapa lantai. Kolom dimodelkan sebagai *frame* dan ujung-ujung kolom didesain jepit-jepit. Momen inersia efektif kolom dikurangi sampai 70 persen dari suatu momen inersia awal untuk memperhitungkan retak pada beton akibat gempa. Torsi juga dikurangi sampai 25 persen untuk mengkompensasikan nilai suatu reduksi pada gaya inersia elemen struktur. Dimensi pada kolom yang akan digunakan dalam desain dapat diperiksa pada Tabel 4.7.

Tabel 4. 7. Dimensi Kolom Setelah Pengecekan

Lantai	Dimensi Kolom Sisi Horizontal (mm)	Dimensi Kolom Sisi Vertikal (mm)
Lantai Basement	600	600
Lantai 1	600	600
Lantai 2	500	500
Lantai 3	500	500

Lantai 4	500	500
Lantai 5	500	500
Lantai 6	500	500
Lantai 7	500	500

4.2. Permodelan Struktur

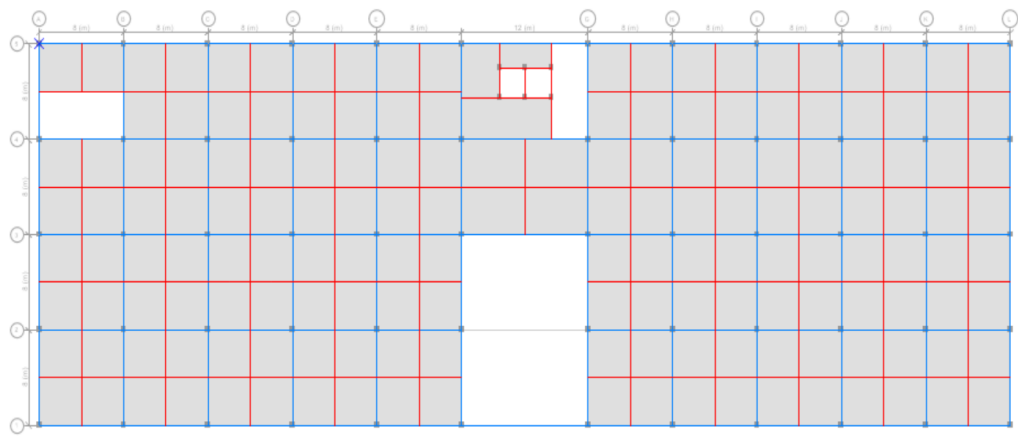
Pemodelan struktur pada gedung pada akhirnya direncanakan sebagai sistem ganda pada struktur. Pemodelan struktur tahap awal akan dilakukan dengan beberapa bantuan program ETABS dan dimodelkan sebuah sistem *grid*, dengan *grid* sebagai garis titik berat dan elemen struktur yang dimodelkan.

4.2.1. Pemodelan

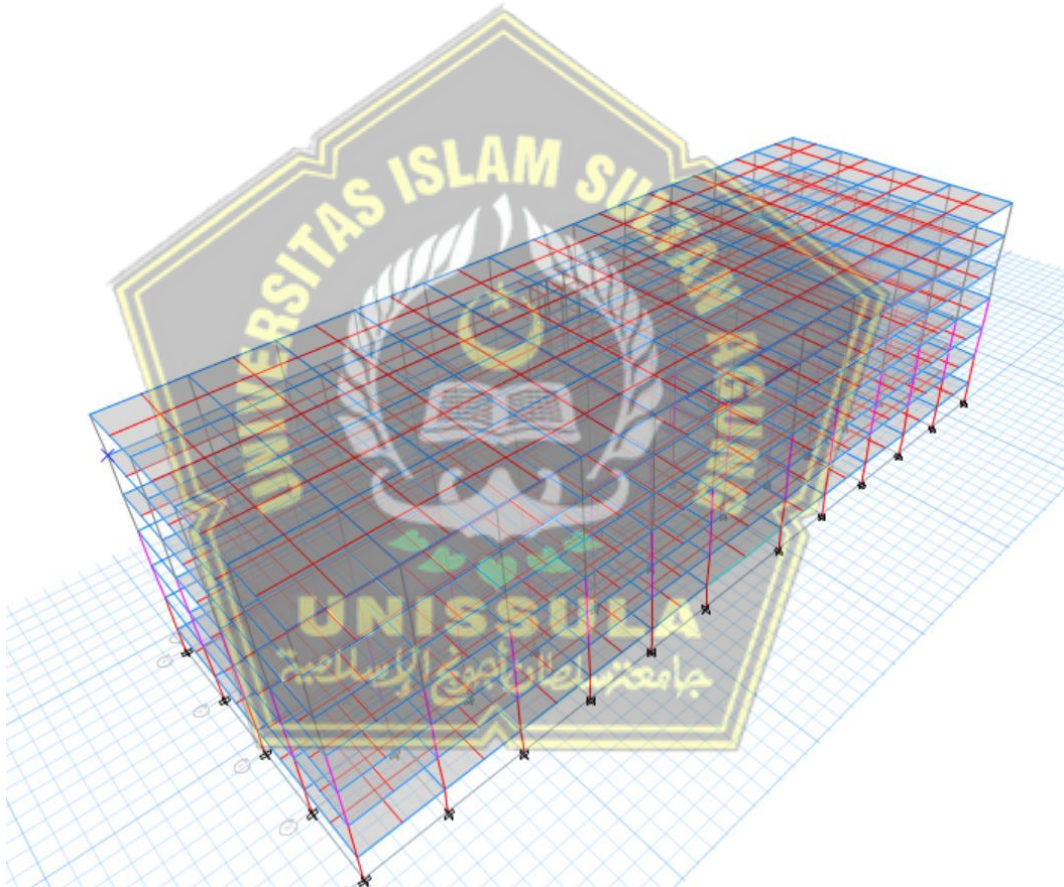
Bangunan gedung tinggi 7 lantai yang dimodelkan yang didasarkan SRPMK. Data Spesifikasi sebagai Berikut:

- Mutu Beton 17 MPa
- Kolom 600 x 600 (kolom basement - lantai 1)
- Kolom 500 x 500 (kolom lantai 2- lantai 6)
- Balok Induk 400 x 700 (kolom lantai 1 - lantai 7)
- Balok Anak 300x600 (kolom lantai 1 - lantai 7)
- Tebal pelat lantai 12 mm
- Tebal pelat atap dak 12 mm

Berikut denah dan gambar 3D dari model gedung yang didesain dapat diperiksa pada Gambar 4.3 dan Gambar 4.4.



Gambar 4. 3. Denah Lantai 1 Pemodelan 1



Gambar 4. 4. Model 3D Pemodelan 1

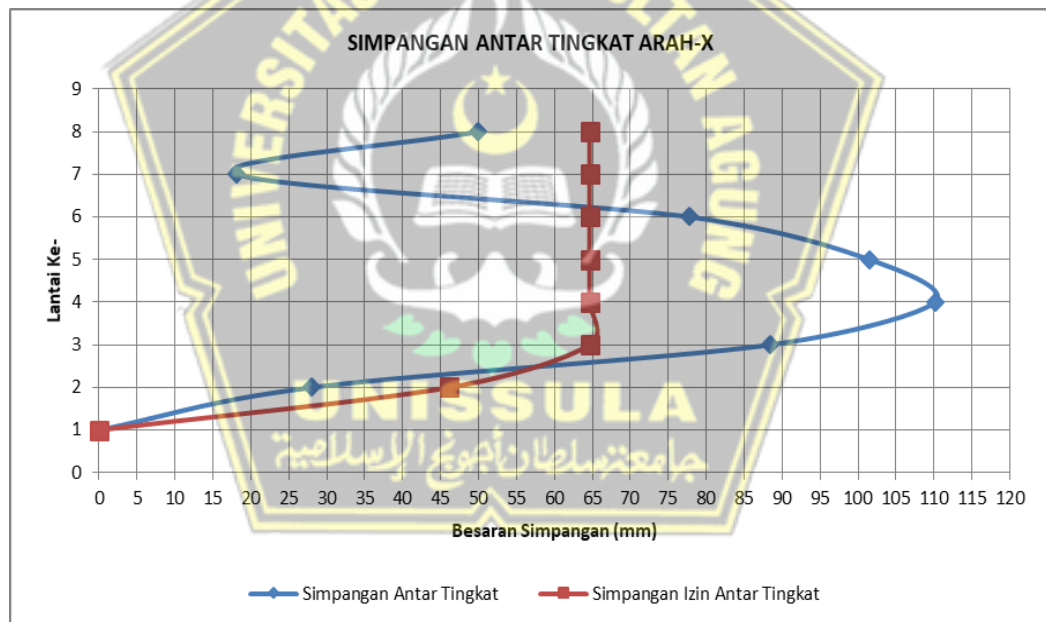
Pada model pertama, bangunan mengalami:

- Mode 1 : Translasi Arah X (1,9398 Detik)
- Mode 2 : Translasi Arah Y (1,8744 Detik)
- Mode 3 : Rotasi (1,7989 Detik)

Dan hasil analisis simpangan antar tingkat (*story drift*) arah X ditunjukkan pada Tabel 4.8 dan Gambar 1.5, sedangkan hasil analisis simpangan antar tingkat arah Y ditunjukkan pada Tabel 4.9 dan Gambar 4.6.

Tabel 4. 8. Pengecekan *Story Drift* Arah X Pemodelan 1

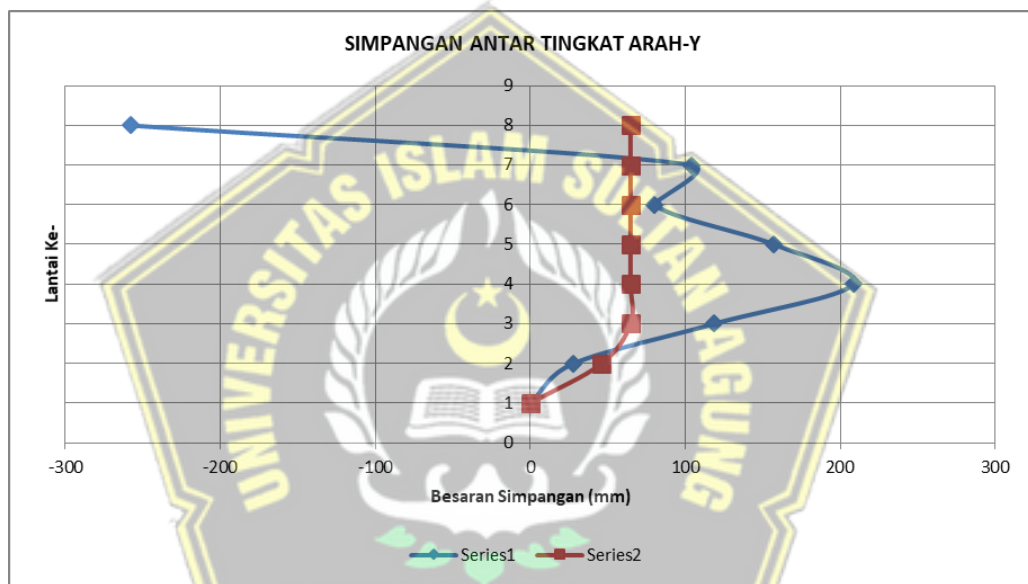
Story	hsx	δe	Δ	Δ_i	Δ_{izin}	Ket
	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	
8	4200	86,17	473,95	49,99	64,62	OK
7	4200	77,08	423,96	18,12	64,62	OK
6	4200	73,79	405,84	77,74	64,62	NOT
5	4200	59,65	328,10	101,49	64,62	NOT
4	4200	41,20	226,61	110,12	64,62	NOT
3	4200	21,18	116,49	88,43	64,62	NOT
2	3000	5,10	28,06	28,06	46,15	OK
1	0	0,00	0,00	0,00	0,00	OK



Gambar 4. 5. Diagram Story Drift Arah X Pemodelan 1

Tabel 4. 9. Pengecekan *Story Drift* Arah Y Pemodelan 1

Story	hsx	δe	Δ	Δi	$\Delta izin$	Ket
	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	
8	4200	79,85	439,15	-257,67	64,62	OK
7	4200	126,69	696,82	104,18	64,62	NOT
6	4200	107,75	592,64	80,39	64,62	NOT
5	4200	93,14	512,25	157,15	64,62	NOT
4	4200	64,56	355,10	208,31	64,62	NOT
3	4200	26,69	146,80	118,85	64,62	NOT
2	3000	5,08	27,95	27,95	46,15	OK
1	0	0,00	0,00	0,00	0,00	OK



Gambar 4. 6. Diagram *Story Drift* Arah Y Pemodelan 1

Berdasarkan kontrol simpangan antar tingkat di atas, Semua simpangan melebihi batas izinnya. Untuk mengatasi masalah tersebut, penulis mencoba melakukan perkuatan struktur dengan memperbesar ukuran kolom dan mutu beton yang digunakan pada Pemodelan 2 diharapkan agar struktur menjadi lebih kuat dan efisien.

4.3. Pembebanan Struktur

4.3.1. 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 7 lantai ini meliputi: beban mati berat sendiri (*dead load*), beban mati tambahan (*super imposed dead load*), dan beban hidup (*live load*).

a. Beban Mati Berat Sendiri (*DL*)

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

b. Beban Mati Tambahan (*SIDL*)

Beban mati tambahan atau *super imposed dead load* adalah berat komponen nonstruktural (arsitektural dan MEP) yang terdapat pada struktur bangunan. Beban *SIDL* yang digunakan dalam desain ini dapat dilihat pada Tabel 4.10

Tabel 4. 10. Beban Mati Tambahan pada Lantai

No	Jenis Beban Mati	Berat Jenis (kN/m^3)	Beban Merata (kN/m^2)
1	Pasir setebal 1 cm	16	0,16
2	Spesi setebal 3 cm	22	0,66
3	Keramik setebal 1 cm	22	0,22
4	Plafond & Penggantung		0,2
5	ME (Mekanikal & Elektrikal)		0,25
TOTAL			1,49

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

4.3.2. Beban Hidup (*LL*)

Beban hidup (*live load*) merupakan beban yang ditimbulkan oleh penggunaan serta penghunian suatu bangunan oleh orang atau barang yang bisa berpindah tempat sehingga dapat mengubah beban pada atap dan lantai.

4.3.3. Pembebanan Gempa

Pembebanan seismik dalam perancangan bangunan gedung tersebut menggunakan analisis respons spektra (*Response Spectrum Analysis*). Dengan bantuan analisis tersebut, maka struktur bangunan yang digunakan untuk mendesain gedung dengan kebutuhan tulangan dari elemen struktur sesuai dengan prinsip desain kapasitas.

a) Analisis Beban Gempa

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

1. Kategori Risiko dan Faktor Keutamaan Gempa

Gedung ini dirancang untuk gedung pasar. Sesuai dengan SNI 1726:2019 Tabel 4, gedung tersebut dikategorikan pada kategori risiko II dengan nilai faktor keutamaan gempa (I_e) yaitu 1,0.

2. 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 Gunungpati Semarang dapat dilihat pada Tabel 4.11.

Tabel 4. 11. Data Parameter Respons Spektra Terpetakan

Variabel	Nilai
F_{PGA} .	0,36
$S_s(g)$.	0,81
$S_1(g)$.	0,36
TL (detik).	6

3. Parameter Respons Spektra Percepatan Gempa Tertarget

Nilai parameter respons spektra percepatan gempa tertarget pada periode pendek (SMS) dan periode 1 detik ($SM1$) 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:

$$F_a = 0,91$$

$$F_v = 0,8$$

$$S_{MS} = F_a \times S_s = 0,91 \times 0,81 = 0,74$$

$$S_{M1} = F_v \times S_1 = 0,80 \times 0,36 = 0,29$$

4. Parameter Respons Spektra Percepatan Gempa Desain

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

$$S_{DS} = \frac{2}{3} \times S_{MS} = \frac{2}{3} \times 0,74 = 0,49$$

$$S_{D1} = \frac{2}{3} \times S_{M1} = \frac{2}{3} \times 0,29 = 0,19$$

5. Kategori Desain Seismik

Berdasarkan SNI 1726:2019, tiap bangunan diharuskan mempunyai Kategori Desain Gempa atau Seismik. Gedung dirancang tergolong pada Kategori Risiko II 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.

6. 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 dihasilkan koefisien modifikasi respon (R) = 8, faktor kuat lebih sistem (Ω_0) = 3, dan faktor pembesaran defleksi (C_d) = 5,5. Nilai faktor R , Ω_0 , C_d untuk Sistem Ganda menggunakan standar SNI 1726:2019 Tabel 12 dihasilkan koefisien modifikasi respon (R) = 7, faktor kuat lebih sistem (Ω_0) = 2,5, dan faktor pembesaran defleksi (C_d) = 5,5.

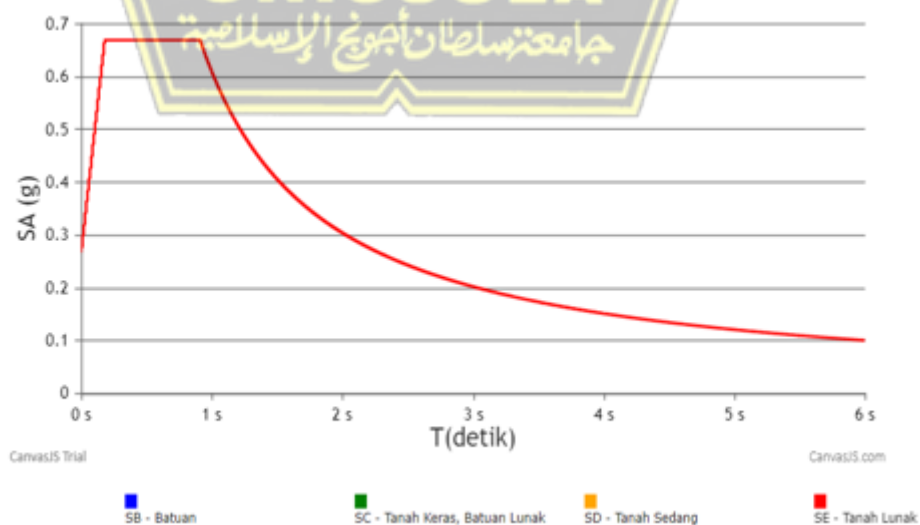
b) Rekap Analisis Beban Gempa

Berdasarkan SNI 1726:2019, pembebanan gempa untuk bangunan Sistem Rangka Pemikul Momen Khusus (SRPMK) yang terletak di Semarang memiliki parameter seperti pada Tabel 4.12.

Tabel 4. 12. Parameter Respons Spektra

Parameter Respons Spektra		
Kategori Risiko		II
Faktor Keutamaan	I_e	1,0
Klasifikasi Situs		SE (Tanah Lunak)
Percepatan gempa MCE_R terpetakan untuk periode pendek	S_s	0,81
Percepatan gempa MCE_R terpetakan untuk periode 1 detik	S_1	0,36
Faktor amplifikasi periode pendek	F_a	0,91
Faktor amplifikasi periode 1 detik	F_v	0,80
Percepatan pada periode pendek	S_{MS}	0,74
Percepatan pada periode 1 detik	S_{M1}	0,29
Percepatan desain pada periode pendek	S_{Ds}	0,49
Percepatan desain pada periode 1 detik	S_{D1}	0,19
Parameter periode	T_0	0,08
	T_s	0,39
Parameter Sistem Rangka Pemikul Momen Khusus (SRPMK)		
Faktor koefisien modifikasi	R	8
Faktor kuat lebih sistem	Q_0	3
Faktor pembesaran defleksi	C_d	5,5

Dari parameter respons spektra di atas, spektrum respons desain dapat diperiksa pada Gambar 4.7.



Gambar 4. 7. Spektrum Respons Desain Lokasi Perancangan

4.3.4. Kombinasi Pembebanan Struktur

Beban kombinasi untuk metode ultimit struktur, komponen struktur, serta elemen pondasi harus direncanakan dengan sedemikian rupa hingga dapat menjadi lebih kuat atau dapat lebih berpengaruh terhadap 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 yang termasuk beban gempa menurut SNI 1726:2019 dengan Pasal 7.4, faktor beban dan kombinasi untuk beban mati nominal, beban hidup nominal, dan beban gempa nominal, yaitu sebagai berikut:

1. $(1,2 + 0,2 SDS) D + 1 L \pm 0,3 \rho Ex \pm 1 \rho Ey$.
2. $(1,2 + 0,2 SDS) D + 1 L \pm 1 \rho Ex \pm 0,3 \rho Ey$.
3. $(0,9 - 0,2 SDS) D \pm 0,3 \rho Ex \pm 1 \rho Ey$.
4. $(0,9 - 0,2 SDS) D \pm 1 \rho Ex \pm 0,3 \rho Ey$.

$S_{Ds} (g)$ = 0,49 (Semarang; Tanah Lunak)

ρ = 1,3 (SNI 1726:2019 Pasal 7.3.4.2)

Berikut kombinasi pembebanan yang digunakan dapat dilihat pada Tabel 4.13.

Tabel 4. 13. Kombinasi Pembebanan

KOMBINASI		DL	SIDL	LL	L _r	R	W _x	W _y	E _x	E _y
COMB	1,1	1,40	1,40							
COMB	2,1	1,20	1,20	1,60	0,50					
	2,2	1,20	1,20	1,60		0,50				
COMB	3,1	1,20	1,20	1,00	1,60					
	3,2	1,20	1,20		1,60		0,50			
	3,3	1,20	1,20		1,60			0,50		
	3,4	1,20	1,20		1,60		0,38	0,38		
	3,5	1,20	1,20	1,00		1,60				

	3,6	1,20	1,20			1,60	0,50			
	3,7	1,20	1,20			1,60		0,50		
	3,8	1,20	1,20			1,60	0,38	0,38		
COMB	4,1	1,20	1,20	1,00	0,50		1,00			
	4,2	1,20	1,20	1,00	0,50			1,00		
	4,5	1,20	1,20	1,00	0,50		0,75	0,75		
	4,3	1,20	1,20	1,00		0,50	1,00			
	4,4	1,20	1,20	1,00		0,50		1,00		
	4,6	1,20	1,20	1,00		0,50	0,75	0,75		
COMB	5,1	0,90	0,90				1,00			
	5,2	0,90	0,90					1,00		
	5,3	0,90	0,90				0,75	0,75		
COMB	6,1	1,34	1,34	1,00					1,50	0,45
	6,2	1,34	1,34	1,00					1,50	- 0,45
	6,3	1,34	1,34	1,00					- 1,50	0,45
	6,4	1,34	1,34	1,00					- 1,50	- 0,45
	6,5	1,34	1,34	1,00					0,45	1,50
	6,6	1,34	1,34	1,00					- 0,45	1,50
	6,7	1,34	1,34	1,00					0,45	- 1,50
	6,8	1,34	1,34	1,00					- 0,45	- 1,50
COMB	7,1	0,76	0,76						1,50	0,45
	7,2	0,76	0,76						1,50	- 0,45
	7,3	0,76	0,76						- 1,50	0,45
	7,4	0,76	0,76						- 1,50	- 0,45
	7,5	0,76	0,76						0,45	1,50
	7,6	0,76	0,76						- 0,45	1,50
	7,7	0,76	0,76						0,45	- 1,50
	7,8	0,76	0,76						- 0,45	- 1,50

4.4. Pengecekan Perilaku Struktur Bangunan

4.4.1 Rasio Partisipasi Massa

Berdasarkan hasil ETABS, ringkasan dan partisipasi modal massa yang diperoleh bisa dilihat pada Tabel 4.14.

Tabel 4. 14. Rekapitulasi Rasio Partisipasi Modal Massa

Case	Mode	Periode	UX	UY	RZ
		(sec)			
Modal	1	1,94	0,007	0,677	0,054
Modal	2	1,874	0,663	0,022	0,051
Modal	3	1,799	0,067	0,037	0,635
Modal	4	0,64	0,001	0,103	0,004
Modal	5	0,625	0,097	0,003	0,007
Modal	6	0,594	0,009	0,003	0,092
Modal	7	0,383	0,002	0,047	0,002
Modal	8	0,377	0,048	0,002	0,002
Modal	9	0,353	0,002	0,002	0,046
Modal	10	0,277	0,001	0,027	0,001
Modal	11	0,273	0,028	0,001	0,001
Modal	12	0,256	0,001	0,001	0,030
Modal	13	0,22	0,001	0,013	0,001
Modal	14	0,218	0,014	0,001	0,000
Modal	15	0,204	0,000	0,001	0,016
Modal	16	0,188	0,002	0,003	0,001
Modal	17	0,187	0,003	0,002	0,000
Modal	18	0,175	0,000	0,001	0,005
Modal	19	0,14	0,054	0,000	0,001
Modal	20	0,139	0,000	0,054	0,000
Modal	21	0,129	0,001	0,000	0,052
Modal	22	0,087	0,000	0,000	0,000

4.4.2. Perhitungan Faktor Skala Gempa

4.4.2.1. Perhitungan Koefisien Respons Seismik (C_s)

Nilai C_s dapat dihitung dengan berdasarkan pada Pasal 7.8.1.1 SNI 1726:2019, yakni terletak pada 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

$$T_{\min} = C_t \times h_n^x = 0,0466 \times (28,2)^{0,9} = 0,941 \text{ detik}$$

- Periode Maksimum

$$T_{\max} = C_u \times T_{\min} = 1,4 \times 0,941 = 0,317 \text{ detik}$$

- Periode arah X dan Y pada ETABS

$$- T_a \text{ dari ETABS arah X } (T_{cx}) = 1,94 \text{ detik}$$

$$- T_a \text{ dari ETABS arah Y } (T_{cy}) = 1,874 \text{ detik}$$

- 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:

$$- T \text{ arah X } (T_x) = 1,317 \text{ detik}$$

$$- T \text{ arah Y } (T_y) = 1,317 \text{ detik}$$

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

$$\bullet C_s \text{ arah X} = \frac{0,19}{1,317 \times \left(\frac{8}{1,5} \right)} = 0,0271$$

$$\bullet C_s \text{ arah Y} = \frac{0,19}{1,317 \times \left(\frac{8}{1,5} \right)} = 0,0271$$

$$\bullet C_{s \min} = 0,044 \times 0,49 \times 1,5 = 0,0323$$

$$C_{s \max} = \frac{0,49}{1,317 \times \left(\frac{8}{1,5}\right)} = 0,0698$$

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 4.15.

Tabel 4. 15. Koefisien Respons Seismik

C_s arah X	0,0271	C_s arah Y	0,0271
C_s minimum	0,0323	C_s minimum	0,0323
C_s maksimum	0,0698	C_s maksimum	0,0698
C_s yang dipakai	0,0698	C_s yang dipakai	0,0698

4.4.2.2. Perhitungan Faktor Skala Gaya

Dari hasil ETABS diperoleh nilai gaya geser dasar seismik statik (V) untuk arah X dan Y ditunjukkan pada Tabel 4.16.

Tabel 4. 16. Output Gaya Geser Dasar Statik (V)

Story	Elevation m	STATIK	
		Vx	Vy
		kN	kN
Story7	28,2	2552,56	2552,56
Story6	24	5630,93	5630,93
Story5	19,8	7900,29	7900,29
Story4	15,6	9491,25	9491,25
Story3	11,4	10490,48	10490,48
Story2	7,2	11028,13	11028,13
Story1	3	11187,67	11187,67

Sedangkan perhitungan pada gaya geser dinamik yang dihasilkan oleh ETABS ditunjukkan pada Tabel 4.17.

Tabel 4. 17. Output Gaya Geser Dasar Dinamik (V_i)

Story	Elevation m	DINAMIK	
		Vx	Vy
		kN	kN
Story7	28,2	2552,56	2561,11
Story6	24	5630,93	5630,93

Story5	19,8	7900,29	7900,29
Story4	15,6	9491,25	9491,25
Story3	11,4	10490,48	10490,48
Story2	7,2	11028,13	11028,13
Story1	3	11187,67	11187,99

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

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

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

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

$$\eta_x = \frac{V_X}{V_{IX}} = \frac{11287,51}{11287,78} = 0,9999$$

$$\eta_y = \frac{V_Y}{V_{IY}} = \frac{11287,51}{11287,21} = 1$$

Maka, diperoleh rekapitulasi hasil pengecekan faktor skala pada Tabel 4.18 sebagai berikut:

Tabel 4. 18. Rekapitulasi Hasil Pengecekan Faktor Skala

W_t (berat total bangunan)	36726,8275	kN
V_X	11187,6732	kN
V_Y	11187,673	kN
V_{IX}	6863,5752	kN
V_{IY}	6622,0725	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	1,6398	
Faktor skala arah Y	1,6966	

Selanjutnya gempa dibesarkan dari kedua arahnya maka didapatkan nilai gaya geser dasar dinamik terkoreksi dapat dilihat pada Tabel 4.19.

Tabel 4. 19. Output Gaya Geser Dinamik Terkoreksi

Story	Elevation m	DINAMIK CORRECT	
		VSPEC-x	VSPEC-y
		kN	kN
Story7	28,2	2508,97	2561,11
Story6	24	5141,14	5194,48
Story5	19,8	7023,78	7032,37
Story4	15,6	8506,21	8467,48
Story3	11,4	9742,07	9694,96
Story2	7,2	10696,42	10676,81
Story1	3	11187,61	11187,99

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 4.20.

Tabel 4. 20. Gaya Geser Desain

Story	Elevation m	STATIK		DINAMIK CORRECT		GAYA GESER DESAIN	
		V _x	V _y	VSPEC-x	VSPEC-y	V _x	V _y
		kN	kN	kN	kN	kN	kN
Story7	28,2	2552,56	2552,56	2508,97	2561,11	2552,56	2561,11
Story6	24	5630,93	5630,93	5141,14	5194,48	5630,93	5630,93
Story5	19,8	7900,29	7900,29	7023,78	7032,37	7900,29	7900,29
Story4	15,6	9491,25	9491,25	8506,21	8467,48	9491,25	9491,25
Story3	11,4	10490,48	10490,48	9742,07	9694,96	10490,48	10490,48
Story2	7,2	11028,13	11028,13	10696,42	10676,81	11028,13	11028,13
Story1	3	11187,67	11187,67	11187,61	11187,99	11187,67	11187,99

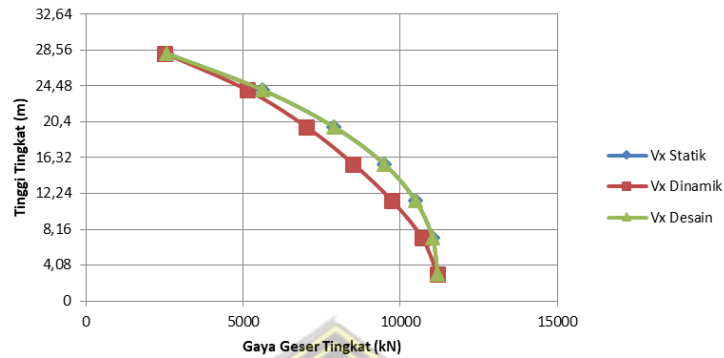
Keterangan :

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

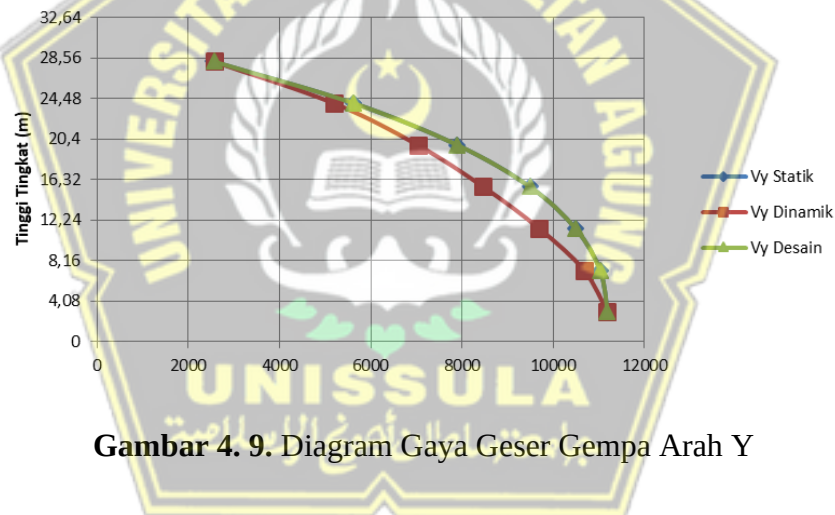
V_{Spec-y} = Gaya geser dinamik arah Y

4.4.2.3. Pengecekan Gaya Geser

Gaya geser pada bangunan dapat didapatkan langsung dari ETABS. Berikut adalah diagram geser pada struktur pada ketinggian di bangunan arah X dan arah Y ditunjukkan pada Gambar 4.8. dan Gambar 4.9.



Gambar 4. 8. Diagram Gaya Geser Gempa Arah X



Gambar 4. 9. Diagram Gaya Geser Gempa Arah Y

4.4.2.4. Pengecekan Simpangan Antar Tingkat (*Story Drift*)

Berdasarkan SNI 1726:2019, faktor-faktor dalam kriteria persyaratan simpangan adalah antara lain:

- Faktor defleksi atau lendutan (C_d) pada Sistem Ganda = 5,5 (Tabel 8 SNI 1726:2019),
- Faktor Keutamaan seismik (I_e) = 1,5 (Tabel 2 SNI 1726:2019),
- Faktor redundansi pada gedung dengan KDS D adalah $\rho = 1,3$ (Pasal 7.3.4.2 1726:2019),

- Simpangan antar lantai pada desain (Δ) tidak diperbolehkan lebih dari simpangan antar lantai izin. Berdasarkan dari SNI 1726:2019 Pasal 7.12.1, simpangan antar lantai izin untuk sebuah gedung dengan kategori risiko IV adalah $= (0,010) \times h$, dimana h adalah tinggi tingkat.

Simpangan antar tingkat adalah suatu perpindahan gaya horizontal di bagian atas tingkat relatif terhadap bagian bawahnya. Berdasarkan analisis program ETABS, didapat bahwa simpangan arah X dan Y yang ditampilkan pada Tabel 4.21 dan Tabel 4.22.

Tabel 4. 21. Pengecekan *Story Drift* Arah X

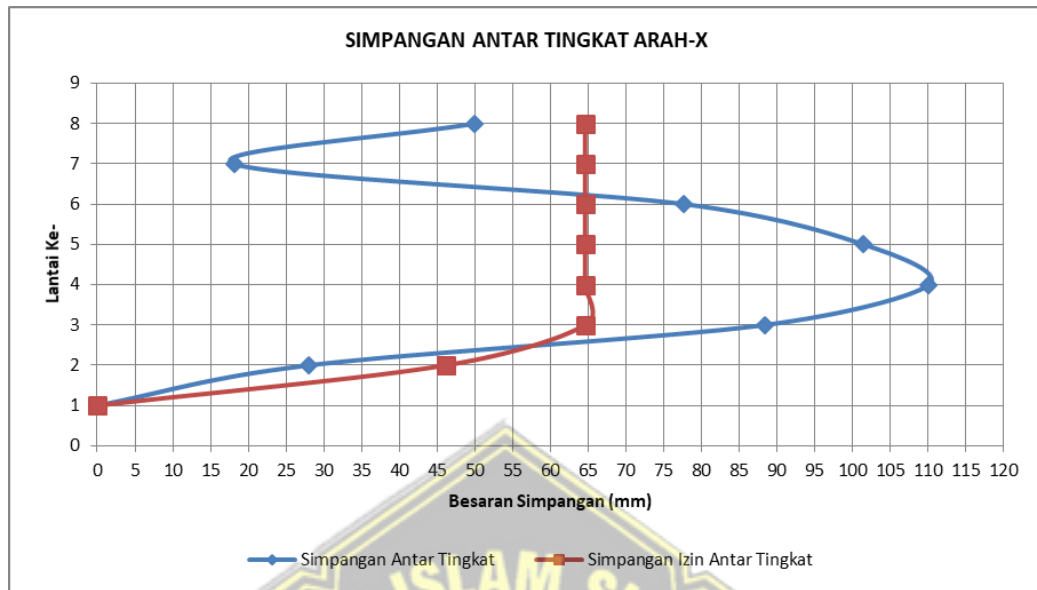
Lantai	h (mm)	Simpangan Elastis (δ) (mm)	Perpindahan yang diperbesar (mm)	Simpangan antar tingkat (mm)	Simpangan yang diizinkan (mm)	Ket
Dak Atap	4200	86,17	473,95	49,99	64,62	OK
Lantai 6	4200	77,08	423,96	18,12	64,62	OK
Lantai 5	4200	73,79	405,84	77,74	64,62	NOT
Lantai 4	4200	59,65	328,10	101,49	64,62	NOT
Lantai 3	4200	41,20	226,61	110,12	64,62	NOT
Lantai 2	4200	21,18	116,49	88,43	64,62	NOT
Lantai 1	3000	5,10	28,06	28,06	46,15	OK
basement	0	0,00	0,00	0,00	0,00	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 4.10.



Gambar 4. 10. Diagram *Story Drift* Arah X

Tabel 4. 22. Pengecekan *Story Drift* Arah Y

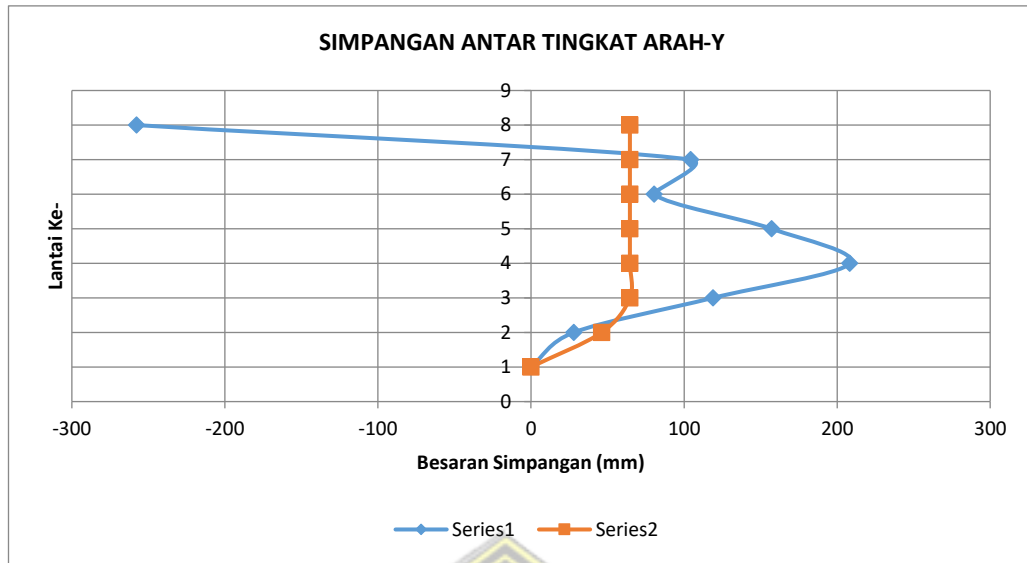
Lantai	<i>h</i> (mm)	Simpangan Elastis (δ) (mm)	Perpindahan yang diperbesar (mm)	Simpangan antar tingkat (mm)	Simpangan yang diizinkan (mm)	Ket
Atap Dak Beton	4200	79,85	439,15	-257,67	64,62	OK
Lantai 6	4200	126,69	696,82	104,18	64,62	NOT
Lantai 5	4200	107,75	592,64	80,39	64,62	NOT
Lantai 4	4200	93,14	512,25	157,15	64,62	NOT
Lantai 3	4200	64,56	355,10	208,31	64,62	NOT
Lantai 2	4200	26,69	146,80	118,85	64,62	NOT
Lantai 1	3000	5,08	27,95	27,95	46,15	OK
basement	0	0,00	0,00	0,00	0,00	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 4.11.



Gambar 4. 11. Diagram *Story Drift* Arah Y

4.4.2.5. Pengecekan P-Delta

Pengecekan P-Delta ditentukan berlandaskan pada nilai dari koefisien stabilitas (θ). Apabila nilai θ lebih kecil dari nilai θ maksimum, maka pengaruh P-Delta dapat diabaikan. Nilai θ maksimum dihitung dengan rumus berikut:

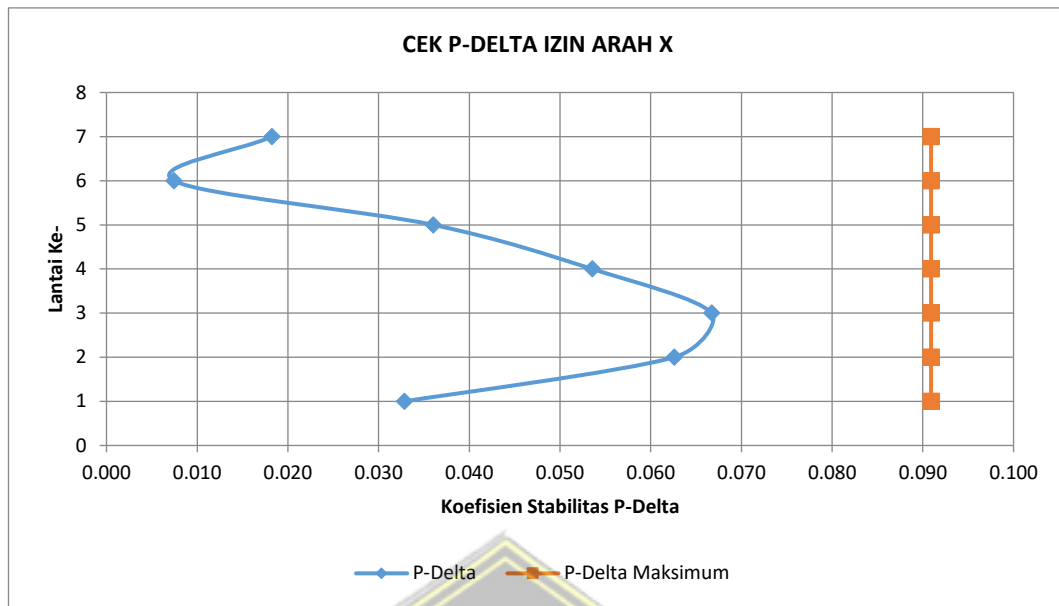
$$\theta_{\max} = \frac{0,5}{c_d \times \beta} = \frac{0,5}{5,5 \times 1} = 0,0909$$

Hasil dari pengecekan P-Delta arah X dapat dilihat pada Tabel 4.43.

Tabel 4. 23. Pengecekan P-Delta Arah X

Lantai	h_{sx} (mm)	Δ_i (mm)	P (kN)	V_x (kN)	θ	$\theta_{\max}$	Cek
7	4200	49,99	21501,26	2552,56	0,0182	0,0909	STABIL
6	4200	18,12	53374,00	5630,93	0,0074	0,0909	STABIL
5	4200	77,74	84555,21	7900,29	0,0360	0,0909	STABIL
4	4200	101,49	115692,66	9491,25	0,0536	0,0909	STABIL
3	4200	110,12	146834,03	10490,48	0,0667	0,0909	STABIL
2	4200	88,43	180287,07	11028,13	0,0626	0,0909	STABIL
1	3000	28,06	215979,69	11187,67	0,0328	0,0909	STABIL

Dari pengecekan P-Delta arah X menghasilkan diagram stabilitas P-Delta arah X dapat dilihat di Gambar 4.20.



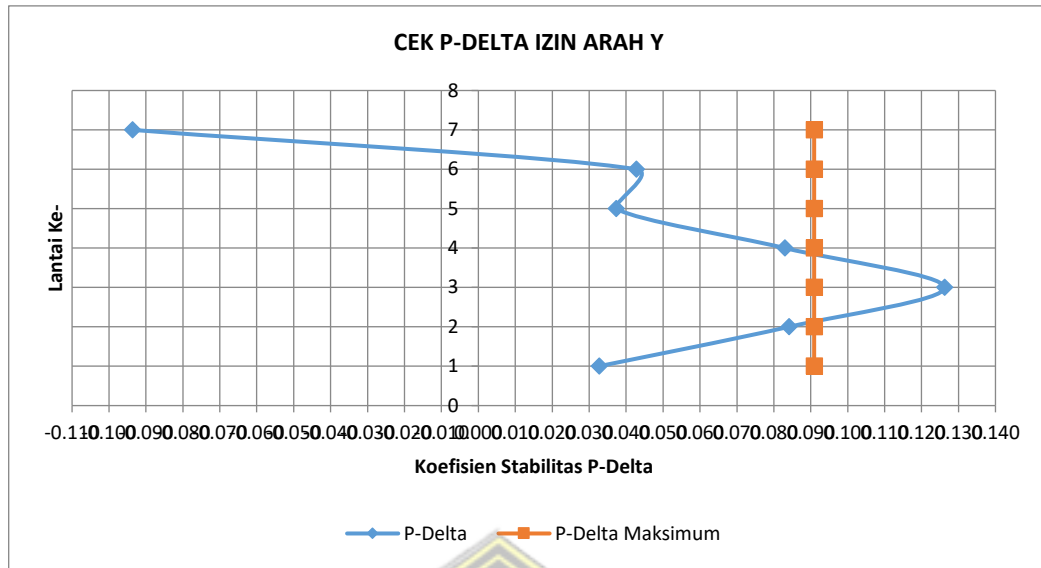
Gambar 4. 10. Diagram P-Delta Arah X

Sedangkan untuk hasil dari pengecekan P-Delta arah Y dapat dilihat pada Tabel 4.24 sebagai berikut:

Tabel 4. 24. Pengecekan P-Delta Arah Y

Lantai	h_{sx} (mm)	Δ_i (mm)	P (kN)	V_y (kN)	θ	θ_{max}	Cek
7	4200	-257,67	21501,26	2561,11	-0,0936	0,0909	STABIL
6	4200	104,18	53374,00	5630,93	0,0427	0,0909	STABIL
5	4200	80,39	84555,21	7900,29	0,0372	0,0909	STABIL
4	4200	157,15	115692,66	9491,25	0,0829	0,0909	STABIL
3	4200	208,31	146834,03	10490,48	0,1262	0,0909	TIDAK STABIL
2	4200	118,85	180287,07	11028,13	0,0841	0,0909	STABIL
1	3000	27,95	215979,69	11187,99	0,0327	0,0909	STABIL

Kemudian dari pengecekan P-Delta arah Y menghasilkan diagram stabilitas P-Delta arah Y dapat dilihat pada Gambar 4.11.



Gambar 4. 11. Diagram P-Delta Arah Y

4.4.3. Pengecekan Eksentrisitas dan Torsi

4.4.3.1. 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 4.25.

Tabel 4. 25. Data Eksentrisitas Torsi Bawaan dari ETABS

Lantai	XCM	YCM	XCR	YCR	e_{ox}	e_{oy}
	m	m	m	m	m	m
Lantai 1	45.8661	15.9555	46.0016	16.5576	29.9106	29.444
Lantai 2	46.9135	15.464	46.003	16.6288	31.4495	29.3742
Lantai 3	47.5196	15.8029	46.0104	16.7889	31.7167	29.2215
Lantai 4	47.5234	15.8012	46.0087	16.8478	31.7222	29.1609
Lantai 5	47.2672	15.8486	46.0068	16.8653	31.4186	29.1415
Lantai 6	47.3644	16.3533	46.0138	16.8649	31.0111	29.1489
Lantai 7	46	16	46.0144	16.7714	30	29.243

Eksentrisitas dari torsi tidak terduga merupakan eksentrisitas tambahan sebesar 5% dari dimensi arah vertikal pada panjang bentang struktur bangunan dimana tempat gaya gempa tersebut bekerja. Perhitungan eksentrisitas tidak terduga dapat dilihat pada Tabel 4.26.

Tabel 4. 26. 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)
Lantai 6	92	24	4.6	1.2
Lantai 5	92	24	4.6	1.2
Lantai 4	92	24	4.6	1.2
Lantai 3	92	24	4.6	1.2
Lantai 2	92	24	4.6	1.2
Lantai 1	92	24	4.6	1.2
Basement	92	24	4.6	1.2

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 4.27 dan Tabel 4.28.

Tabel 4. 27. Nilai dari $\delta_{\max}$, $\delta_{\min}$, δ_{avg} dan A_x untuk Gempa Arah X

Lantai	max	min	avg	1,2 avg	$A_x = \frac{(\delta_{\max}/1,2\delta_{\text{avg}})^2}{1,2\delta_{\text{avg}}}$	Kontrol Torsi
	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)		
7	476864.105	2116918.14	-2556.52	-3067.823	0.475	Ada ketidakberaturan torsi
6	536049.478	3242879.16	-5672.44	-6806.923	0.407	Ada ketidakberaturan torsi
5	538713.881	3180030.22	-7968.03	-9561.637	0.412	Ada ketidakberaturan torsi
4	532731.364	3175136.58	-9573.11	-11487.733	0.410	Ada ketidakberaturan torsi
3	547096.098	3175536.09	-10580.8	-12696.970	0.415	Ada ketidakberaturan torsi

2	819439.719	3377996.24	-11125.8	-13351.011	0.493	Ada ketidakberaturan torsi
1	2421020.83	3672682.75	-11287.5	-13545.018	0.812	Ada ketidakberaturan torsi

Tabel 4. 28. Nilai dari $\delta_{\max}$, $\delta_{\min}$, δ_{avg} dan A_y untuk Gempa Arah Y

Lantai	max	min	avg	1,2 avg	$A_y = \frac{(\delta_{\max})}{1,2\delta_{\text{avg}}}$	Kontrol Torsi
	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)		
7	430859.841	2116918.14	-2556.52	-3067.823	0.451	Ada ketidakberaturan torsi
6	491551.424	3242879.16	-5672.44	-6806.923	0.389	Ada ketidakberaturan torsi
5	500602.972	3180030.22	-7968.03	-9561.637	0.397	Ada ketidakberaturan torsi
4	495074.669	3175136.58	-9573.11	-11487.733	0.395	Ada ketidakberaturan torsi
3	516352.713	3175536.09	-10580.8	-12696.970	0.403	Ada ketidakberaturan torsi
2	766113.488	3377996.24	-11125.8	-13351.011	0.476	Ada ketidakberaturan torsi
1	2294240.31	3672682.75	-11287.5	-13545.018	0.790	Ada ketidakberaturan torsi

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 4.29 dan 4.30.

Tabel 4. 29. Perhitungan Eksentrisitas Desain pada Arah Sumbu X

Lantai	eox	0,05 Lx	Ay	edx	Eksentrisitas, x
	(m)	(m)			(m)
7	29.911	4.600	1.000	25.311	0.275
6	31.450	4.600	1.000	26.850	0.292
5	31.717	4.600	1.000	27.117	0.295
4	31.722	4.600	1.000	27.122	0.295
3	31.419	4.600	1.000	26.819	0.292
2	31.011	4.600	1.000	26.411	0.287
1	30.000	4.600	1.000	25.400	0.276

Tabel 4. 30. Perhitungan Eksentrisitas Desain pada Arah Sumbu Y

Lantai	eoy	0,05 Ly	Ax	edy	Eksentrisitas, y
	(m)	(m)			(m)
7	29.444	1.200	1.000	30.644	1.277
6	29.374	1.200	1.000	30.574	1.274
5	29.222	1.200	1.000	30.422	1.268
4	29.161	1.200	1.000	30.361	1.265
3	29.142	1.200	1.000	30.342	1.264
2	29.149	1.200	1.000	30.349	1.265
1	29.243	1.200	1.000	30.443	1.268

4.4.3.2. Perhitungan Ketidakberaturan Torsi

Berdasarkan SNI 1726:2019, tipe dari ketidakberaturan torsi yang ditentukan berdasarkan defleksi maksimum ($\delta_{\max}$), defleksi minimum ($\delta_{\min}$), dan defleksi rata-rata (δ_{avg}). Pengecekan ketidakberaturan torsi arah X dan arah Y dapat dilihat pada Tabel 4.31 dan Tabel 4.32.

Tabel 4. 31. Pengecekan Ketidakberaturan Torsi pada Arah X

Lantai	$\delta_{\max}$	<i>max story drift</i>	<i>max story drift</i> x C_d	$\delta_{\min}$	<i>min story drift</i>	<i>min story drift</i> x C_d	δ_{avg}	1,2 δ_{avg}	1,4 δ_{avg}	Cek x
	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	
7	47,68	5.99	32.93	21,16	4.72	25.96	29.44	35.33	41.22	Tanpa Torsi
6	53,60	11.86	65.23	32,42	9.15	50.33	57.78	69.33	80.89	Tanpa Torsi
5	53,87	16.54	90.94	31,80	13.24	72.83	81.88	98.26	114.64	Tanpa Torsi
4	53,27	19.71	108.40	31,75	15.50	85.25	96.82	116.19	135.55	Tanpa Torsi
3	54,70	21.35	117.42	31,75	17.00	93.51	105.46	126.56	147.65	Tanpa Torsi
2	81,94	15.11	83.17	33,77	11.80	64.92	74.02	88.82	103.63	Tanpa Torsi
1	24,21	5.17	28.14	36,72	4.13	22.69	25.47	30.5	35.58	Tanpa Torsi

Tabel 4. 32. Pengecekan Ketidakberaturan Torsi pada Arah Y

lantai	$\delta_{\max}$	<i>max story drift</i>	<i>max story drift</i> x C_d	$\delta_{\min}$	<i>min story drift</i>	<i>min story drift</i> x C_d	δ_{avg}	1,2 δ_{avg}	1,4 δ_{avg}	Cek y
	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	
7	43,08	5,99	32,93	21,16	5,86	32,24	32,58	39,10	45,61	Tanpa torsi
6	49,15	11,86	65,22	32,42	11,05	60,78	63,00	75,60	88,20	Tanpa Torsi
5	50,06	16,54	90,94	31,80	15,03	82,80	86,80	104,16	121,52	Tanpa Torsi
4	49,50	19,71	108,40	31,75	17,84	98,09	103,25	123,90	144,54	Tanpa Torsi
3	51,63	21,35	117,42	31,75	19,29	106,07	111,74	134,09	156,44	Tanpa Torsi
2	76,61	15,11	83,12	33,77	13,68	75,23	79,17	95,01	110,84	Tanpa Torsi
1	22,94	5,12	28,14	36,72	4,64	25,50	26,82	32,18	37,55	Tanpa Torsi

4.4.4. Pengecekan Ketidakberaturan Horizontal dan Vertikal

Berdasarkan pada Tabel 13 serta tabel 14 pada SNI 1726:2019, ketidakberaturan vertikal dan ketidakberaturan horizontal pada struktur harus dicek. Adapun hasil dari pengecekan ketidakberaturan horizontal dan vertikal adalah sebagai berikut:

4.4.4.1. Ketidakberaturan Horizontal

a) Ketidakberaturan torsi 1a dan 1b

Hasil pengecekan ketidakberaturan torsi 1a dan 1b arah X dan arah Y dapat dilihat pada Tabel 4.33 dan Tabel 4.34.

Tabel 4. 33. 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
Lantai 6	EX	5,386	5,353	1,006	< 1,2	OK	< 1,4	OK
Lantai 5	EX	10,637	10,505	1,013	< 1,2	OK	< 1,4	OK
Lantai 4	EX	14,888	14,677	1,014	< 1,2	OK	< 1,4	OK
Lantai 3	EX	17,865	17,604	1,015	< 1,2	OK	< 1,4	OK
Lantai 2	EX	19,471	19,175	1,015	< 1,2	OK	< 1,4	OK
Lantai 1	EX	13,601	13,458	1,011	< 1,2	OK	< 1,4	OK
Basement	EX	4,669	4,621	1,01	< 1,2	OK	< 1,4	OK

Tabel 4. 34. 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
Lantai 6	EY	5,987	5,924	1,011	< 1,2	OK	< 1,4	OK
Lantai 5	EY	11,859	11,455	1,035	< 1,2	OK	< 1,4	OK
Lantai 4	EY	16,535	15,782	1,048	< 1,2	OK	< 1,4	OK
Lantai 3	EY	19,709	18,772	1,05	< 1,2	OK	< 1,4	OK
Lantai 2	EY	21,349	20,317	1,051	< 1,2	OK	< 1,4	OK
Lantai 1	EY	15,112	14,395	1,05	< 1,2	OK	< 1,4	OK
Basement	EY	5,116	4,876	1,049	< 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 bentuk denah yang tidak beraturan yaitu berbentuk siku. Ketidakberaturan sudut dalam terjadi apabila kedua dimensi proyeksi denah struktur dari lokasi sudut dalam lebih besar dari 15% dimensi denah struktur.

c) Ketidakberaturan diskontinuitas diafragma

Luas bukaan total adalah 4598,75 m² dan luas bruto 9184 m² maka persentasenya adalah 0,5% 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 dinding geser didesain menerus dari lantai 1 sampai lantai 5.

e) Ketidakberaturan sistem non paralel

Struktur tidak mengalami ketidakberaturan sistem non paralel dikarenakan dinding geser didesain tegak lurus satu sama lain terhadap sumbu x maupun terhadap sumbu y.

4.4.4.2. Ketidakberaturan Vertikal

a) Ketidakberaturan kekakuan tingkat lunak 1a dan 1b

Ketidakberaturan kekakuan pada lapisan tingkat lunak 1a terjadi ketika tingkat kekakuan lateral kurang dari 70% kekakuan lateral lapisan di atasnya atau 80% dari kekakuan rata-rata ketiga lapisan di atasnya. Hasil pengecekan ketidakberaturan pada kekakuan tingkat lunak 1a arah X dan arah Y dapat dilihat pada Tabel 4.35 dan Tabel 4.36.

Tabel 4. 35. Cek Ketidakberaturan *Story Stiffness*

Lantai	Arah X		Arah Y	
	Kekakuan	Cek	Kekakuan	Cek
	kN/m		kN/m	
7	476864,105		430859,841	
6	536049,478	OK	491551,424	OK
5	538713,881	OK	500602,972	OK
4	532731,364	OK	495074,669	OK
3	547096,098	OK	516352,713	OK
2	819439,719	OK	766113,488	OK
1	2421020,83	OK	2294240,31	OK

Tabel 4. 36. Cek Ketidakberaturan Berat (Massa)

Lantai	Massa	Cek
	kg	
7	2116918,14	OK
6	3242879,16	OK
5	3180030,22	OK
4	3175136,58	OK
3	3175536,09	OK
2	3377996,24	OK
1	3672682,75	NOT

Tabel 4. 37. Cek Ketidakberaturan *Story Forces*

Lantai	Arah X		Arah Y	
	Kekuatan	Cek	Kekuatan	Cek
	kN		kN	
7	2552,5641		2552,5641	
6	5630,9334	OK	5630,9334	OK
5	7900,2901	OK	7900,2901	OK
4	9491,2486	OK	9491,2486	OK
3	10490,483	OK	10490,483	OK
2	11028,13	OK	11028,13	OK
1	11187,673	OK	11187,673	OK

b) Ketidakberaturan Geometri Vertikal

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

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

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

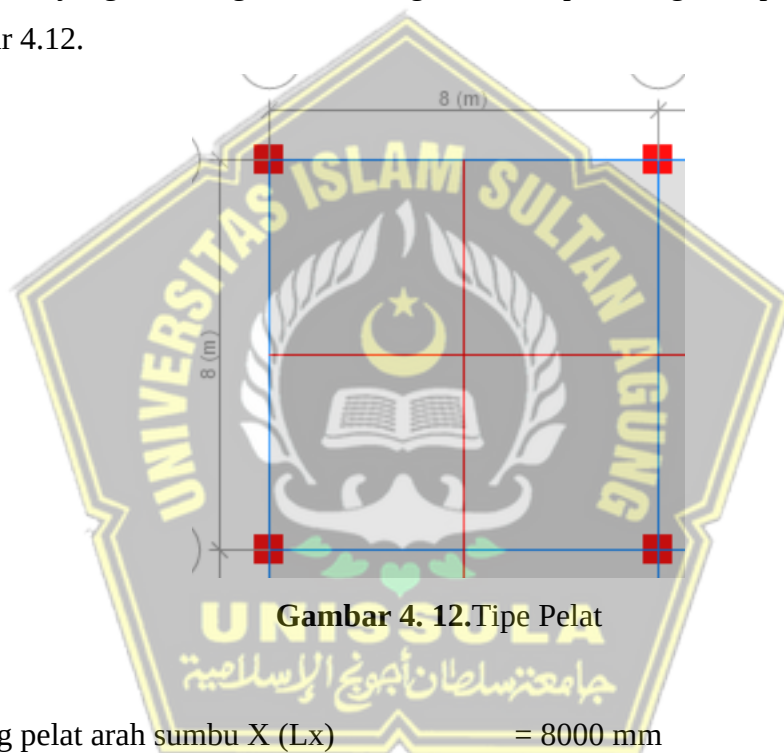
4.5. Perancangan Elemen Struktur Beton Bertulang

4.5.1. 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:

4.5.1.1. Properti Material dan Penampang

Tipe pelat yang akan digunakan sebagai contoh perhitungan dapat dilihat pada Gambar 4.12.



Gambar 4. 12. Tipe Pelat

Panjang pelat arah sumbu X (L_x)	= 8000 mm
Panjang pelat arah sumbu Y (L_y)	= 8000 mm
Perbandingan panjang pelat (L_y/L_x)	= $8/8 = 1$
Jenis pelat	= 2 arah, karena $L_y / L_x \leq 2$
Tebal pelat (h)	= 120 mm
Diamater tulangan (db)	= 19 mm
Tebal selimut bersih (cc)	= 20 mm (SNI 2847:2019 Tabel 20.6.1.3.1)
Tebal efektif penampang (d)	= $h - cc - ds - db/2$ = $120 - 20 - 19 - 19/2$ = 71,5
Kuat tekan beton (f'_c)	= 17 MPa

$$\begin{aligned}\text{Kuat leleh tulangan } (f_y) &= 420 \text{ MPa} \\ \text{Modulus elastisitas beton } (E_c) &= 4700 \times \sqrt{f'_c} \\ &= 4700 \times \sqrt{17} \\ &= 19379 \text{ MPa}\end{aligned}$$

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

$$\begin{aligned}\beta_1 &= 0,85 - 0,05 \times \frac{(f'_c - 28)}{7} \\ &= 0,85 - 0,05 \times \frac{(17 - 28)}{7} \\ &= 0,85\end{aligned}$$

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

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

4.5.1.2. Gaya Dalam

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

- $M_{\max}$ akibat $M_{11 \max}$ = 17,841 kN-m
- $M_{\min}$ akibat $M_{11 \min}$ = -21,356 kN-m
- $M_{\max}$ akibat $M_{22 \max}$ = 9,982 kN-m
- $M_{\min}$ akibat $M_{22 \min}$ = -9,719 kN-m
- V_u = 37,586 kN

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

a) Momen Positif M_{11}

(Tulangan Lapangan Bawah Arah Sumbu X)

- Spasi tulangan (s)

$$s = 240 \text{ mm}$$

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

(SNI 2847:2019 Pasal 8.7.2.2)

$$s_{\max} = 2 \times h = 2 \times 120 = 240 \text{ mm}$$

- Cek spasi :

$$s < s_{\max} = 240 < 250 \rightarrow \text{OK}$$

- Jumlah tulangan negatif tumpuan (n)

$$n = \frac{b}{s} = \frac{1000}{s} = \frac{1000}{240} = 4$$

- Diameter tulangan (d_b)

$$d_b = 19 \text{ mm}$$

- Jarak bersih antar tulangan

$$s - d_b = 240 - 19 = 221 \text{ mm}$$

- Cek jarak bersih

(SNI 2847:2019 Pasal 25.2.1)

$$\text{Syarat} = \text{Jarak bersih} \geq d_b = 221 \geq 19 \rightarrow \text{OK}$$

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

$$\begin{aligned} A_s \text{ pasang} &= n \times \frac{1}{4} \times \pi \times d_b^2 \\ &= 4,1667 \times \frac{1}{4} \times 3,14 \times 19^2 \\ &= 1181,370 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

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

(SNI 2847:2019 Pasal 7.6.1.1 dan Pasal 8.6.1.1)

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

$$\begin{aligned} A_{s \min} &= 0,2\% \times b \times h \\ &= 0,2\% \times 1000 \times 120 \\ &= 240 \text{ mm}^2 \text{ (tidak dipakai karena } f_y = 420 \text{ MPa)} \end{aligned}$$

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

$$\begin{aligned} A_{s \min} &= \left(0,18\% \times \frac{420}{f_y}\right) \times b \times h \\ &= \left(0,18\% \times \frac{420}{420}\right) \times 1000 \times 120 \\ &= 216 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

- Cek $A_{s \min}$:

$$\text{Syarat} = A_s \text{ pasang} \geq A_{s \min} = 1181,370 \geq 240 \rightarrow \text{OK}$$

- Tinggi blok beton (a)

(SNI 2847:2019 Pasal 22.2.2.4.1)

$$a = A_s \times \frac{f_y}{0,85 \times f'_c \times b} = 1181,370 \times \frac{420}{0,85 \times 17 \times 1000} = 34,337 \text{ mm}$$

- Kapasitas lentur (M_n)

(SNI 2847:2019 Pasal 22.2.2.4.1)

$$\begin{aligned} M_n &= A_s \times f_y \times \left(d - \frac{a}{2}\right) \times 10^{-6} \\ &= 1181,370 \times 420 \times \left(71,5 - \frac{34,337}{2}\right) \times 10^{-6} \\ &= 26,958 \text{ kN-m} \end{aligned}$$

- Lokasi garis netral (c)

(SNI 2847:2019 Pasal 22.2.2.4.1)

$$c = \frac{a}{\beta_1} = \frac{34,337}{0,85} = 40,397 \text{ mm}$$

- Regangan tulangan tarik (ϵ_t)

(SNI 2847:2019 Pasal 22.2.1.2 dan Pasal 22.2.2.1)

$$\epsilon_s = \frac{(d-c)}{c} \times 0,003 = \frac{(71,5-40,397)}{40,397} \times 0,003 = 0,0023$$

- Batas tulangan regangan tarik

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

- Faktor reduksi (ϕ)

(SNI 2847:2019 Tabel 21.2.2)

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

$$\phi = 0,65$$

$$\begin{aligned} \phi &= 0,65 + 0,25 \times \frac{(\epsilon_s - \epsilon_{ty})}{(0,005 - \epsilon_{ty})} \\ &= 0,65 + 0,25 \times \frac{(0,0023 - 0,002)}{(0,005 - 0,002)} \\ &= 0,676 \end{aligned}$$

- Untuk $\epsilon_s \geq 0,005$

$$\phi = 0,90$$

$$\phi_{\text{dipakai}} = 0,90 \text{ (karena } \epsilon_s \geq 0,005 = 0,676 \geq 0,005)$$

- Kapasitas lentur tereduksi (ϕM_n)

$$\begin{aligned} \phi M_n &= \phi \times M_n \\ &= 0,90 \times 26,958 \\ &= 18,219 \text{ kN-m} \end{aligned}$$

- Momen ultimit (M_u)

$$\begin{aligned} M_u &= |M_{\text{max}} \text{ akibat } M_{11 \text{ max}}| \\ &= |17,841| \end{aligned}$$

$$= 17,841 \text{ kN-m}$$

- Cek kapasitas :

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

$$= 18,219 > 17,841 \rightarrow \text{OK}$$

- Kesimpulan :

Digunakan Tulangan D 19 - 240

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)

$$s_{\max} = 2 \times h = 2 \times 120 = 240 \text{ mm}$$

- Cek spasi :

$$s < s_{\max} = 150 < 240 \rightarrow \text{OK}$$

- Jumlah tulangan negatif tumpuan (n)

$$n = \frac{b}{s} = \frac{1000}{s} = \frac{1000}{150} = 7$$

- Diameter tulangan (d_b)

$$d_b = 19 \text{ mm}$$

- Jarak bersih antar tulangan

$$s - d_b = 150 - 19 = 131 \text{ mm}$$

- Cek jarak bersih

(SNI 2847:2019 Pasal 25.2.1)

$$\text{Syarat} = \text{Jarak bersih} \geq d_b = 131 \geq 19 \rightarrow \text{OK}$$

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

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

$$= 7 \times \frac{1}{4} \times 3,14 \times 19^2$$

$$= 1890,192 \text{ mm}^2$$

- Luas tulangan minimum ($A_{s \min}$)
(SNI 2847:2019 Pasal 7.6.1.1 dan Pasal 8.6.1.1)
 - Untuk $f_y < 420$ MPa

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

$$= 0,2\% \times 1000 \times 120$$

$$= 240 \text{ mm}^2 \text{ (tidak dipakai karena } f_y = 420 \text{ MPa)}$$
 - Untuk $f_y \geq 420$ MPa

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

$$= \left(0,18\% \times \frac{420}{420}\right) \times 1000 \times 120$$

$$= 216 \text{ mm}^2$$
- Cek $A_{s \min}$:
Syarat $= A_{s \text{ pasang}} \geq A_{s \min} = 1181,370 \geq 240 \rightarrow \text{OK}$
- Tinggi blok beton (a)
(SNI 2847:2019 Pasal 22.2.2.4.1)

$$a = A_s \times \frac{f_y}{0,85 \times f'_c \times b} = 1890,192 \times \frac{420}{0,85 \times 17 \times 1000} = 54,940 \text{ mm}$$
- Kapasitas lentur (M_n)
(SNI 2847:2019 Pasal 22.2.2.4.1)

$$M_n = A_s \times f_y \times \left(d - \frac{a}{2}\right) \times 10^{-6}$$

$$= 1890,192 \times 420 \times \left(71,5 - \frac{34,955}{2}\right) \times 10^{-6}$$

$$= 34,955 \text{ kN-m}$$
- Lokasi garis netral (c)
(SNI 2847:2019 Pasal 22.2.2.4.1)

$$c = \frac{a}{\beta_1} = \frac{54,940}{0,85} = 64,635 \text{ mm}$$
- Regangan tulangan tarik (ϵ_t)
(SNI 2847:2019 Pasal 22.2.1.2 dan Pasal 22.2.2.1)

$$\epsilon_s = \frac{(d-c)}{c} \times 0,003 = \frac{(71,5-64,635)}{64,635} \times 0,003 = 0,00031$$
- Batas tulangan regangan tarik
Batas $= 0,005$
- Faktor reduksi (ϕ)
(SNI 2847:2019 Tabel 21.2.2)

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

$$\phi = 0,65$$

$$\begin{aligned}\phi &= 0,65 + 0,25 \times \frac{(\varepsilon_s - \varepsilon_{ty})}{(0,005 - \varepsilon_{ty})} \\ &= 0,65 + 0,25 \times \frac{(0,00031 - 0,002)}{(0,005 - 0,002)} \\ &= 0,65\end{aligned}$$

- Untuk $\varepsilon_s \geq 0,005$

$$\phi = 0,90$$

$$\phi_{\text{dipakai}} = 0,90 \text{ (karena } \varepsilon_s \geq 0,005 = 0,65 \geq 0,005)$$

- Kapasitas lentur tereduksi (ϕM_n)

$$\begin{aligned}\phi M_n &= \phi \times M_n \\ &= 0,90 \times 34,955 \\ &= 22,721 \text{ kN-m}\end{aligned}$$

- Momen ultimit (M_u)

$$\begin{aligned}M_u &= |M_{\min} \text{ akibat } M_{11 \min}| \\ &= |-21,356| \\ &= 21,356 \text{ kN-m}\end{aligned}$$

- Cek kapasitas :

$$\begin{aligned}\text{Syarat} &= \phi M_n > M_u \\ &= 22,721 > 21,356 \rightarrow \text{OK}\end{aligned}$$

- Kesimpulan :

Digunakan Tulangan D 10 - 150

c) Momen Positif M_{22}

(Tulangan Lapangan Bawah Arah Sumbu Y)

- Spasi tulangan (s)

$$s = 240 \text{ mm}$$

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

(SNI 2847:2019 Pasal 8.7.2.2)

$$s_{\max} = 2 \times h = 2 \times 120 = 240 \text{ mm}$$

- Cek spasi :

$$s < s_{\max} = 240 < 250 \rightarrow \text{OK}$$

- Jumlah tulangan negatif tumpuan (n)

$$n = \frac{b}{s} = \frac{1000}{s} = \frac{1000}{240} = 4$$

- Diameter tulangan (d_b)

$$d_b = 19 \text{ mm}$$

- Jarak bersih antar tulangan

$$s - d_b = 240 - 19 = 221 \text{ mm}$$

- Cek jarak bersih

(SNI 2847:2019 Pasal 25.2.1)

$$\text{Syarat} = \text{Jarak bersih} \geq d_b = 221 \geq 19 \rightarrow \text{OK}$$

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

$$\begin{aligned} A_s \text{ pasang} &= n \times \frac{1}{4} \times \pi \times d_b^2 \\ &= 4,1667 \times \frac{1}{4} \times 3,14 \times 19^2 \\ &= 1181,370 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

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

(SNI 2847:2019 Pasal 7.6.1.1 dan Pasal 8.6.1.1)

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

$$\begin{aligned} A_s \text{ min} &= 0,2\% \times b \times h \\ &= 0,2\% \times 1000 \times 120 \\ &= 240 \text{ mm}^2 \text{ (tidak dipakai karena } f_y = 420 \text{ MPa)} \end{aligned}$$

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

$$\begin{aligned} A_s \text{ min} &= \left(0,18\% \times \frac{420}{f_y}\right) \times b \times h \\ &= \left(0,18\% \times \frac{420}{420}\right) \times 1000 \times 120 \\ &= 216 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

- Cek $A_s \text{ min}$:

$$\text{Syarat} = A_s \text{ pasang} \geq A_s \text{ min} = 1181,370 \geq 240 \rightarrow \text{OK}$$

- Tinggi blok beton (a)

(SNI 2847:2019 Pasal 22.2.2.4.1)

$$a = A_s \times \frac{f_y}{0,85 \times f'_c \times b} = 523,599 \times \frac{420}{0,85 \times 17 \times 1000} = 34,337 \text{ mm}$$

- Kapasitas lentur (M_n)

(SNI 2847:2019 Pasal 22.2.2.4.1)

$$M_n = A_s \times f_y \times \left(d - d_b - \frac{a}{2}\right) \times 10^{-6}$$

$$= 1181,370 \times 420 \times \left(71,5 - 19 - \frac{34,337}{2} \right) \times 10^{-6}$$

$$= 17,531 \text{ kN-m}$$

- Lokasi garis netral (c)

(SNI 2847:2019 Pasal 22.2.2.4.1)

$$c = \frac{a}{\beta_1} = \frac{34,337}{0,85} = 40,397 \text{ mm}$$

- Regangan tulangan tarik (ϵ_t)

(SNI 2847:2019 Pasal 22.2.1.2 dan Pasal 22.2.2.1)

$$\epsilon_s = \frac{(d-c)}{c} \times 0,003 = \frac{(71,5-40,397)}{40,397} \times 0,003 = 0,002$$

- Batas tulangan regangan tarik

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

- Faktor reduksi (ϕ)

(SNI 2847:2019 Tabel 21.2.2)

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

$$\phi = 0,65$$

$$\phi = 0,65 + 0,25 \times \frac{(\epsilon_s - \epsilon_{ty})}{(0,005 - \epsilon_{ty})}$$

$$= 0,65 + 0,25 \times \frac{(0,0023 - 0,002)}{(0,005 - 0,002)}$$

$$= 0,676$$

- Untuk $\epsilon_s \geq 0,005$

$$\phi = 0,90$$

$$\phi_{\text{dipakai}} = 0,90 \text{ (karena } \epsilon_s \geq 0,005 = 0,676 \geq 0,005)$$

- Kapasitas lentur tereduksi (ϕM_n)

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

$$= 0,90 \times 17,531$$

$$= 11,847 \text{ kN-m}$$

- Momen ultimit (M_u)

$$M_u = |M_{\text{max}} \text{ akibat } M_{22 \text{ max}}|$$

$$= |9,982|$$

$$= 9,982 \text{ kN-m}$$

- Cek kapasitas :

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

$$= 11,847 > 9,982 \rightarrow \text{OK}$$

- Kesimpulan :

Digunakan Tulangan D 19 - 240

d) Momen Negatif M_{22}

(Tulangan Tumpuan Atas Arah Sumbu Y)

- Spasi tulangan (s)

$$s = 240 \text{ mm}$$

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

(SNI 2847:2019 Pasal 8.7.2.2)

$$s_{\max} = 2 \times h = 2 \times 120 = 240 \text{ mm}$$

- Cek spasi :

$$s < s_{\max} = 240 < 250 \rightarrow \text{OK}$$

- Jumlah tulangan negatif tumpuan (n)

$$n = \frac{b}{s} = \frac{1000}{s} = \frac{1000}{240} = 4,1667$$

- Diameter tulangan (d_b)

$$d_b = 19 \text{ mm}$$

- Jarak bersih antar tulangan

$$s - d_b = 240 - 19 = 221 \text{ mm}$$

- Cek jarak bersih

(SNI 2847:2019 Pasal 25.2.1)

$$\text{Syarat} = \text{Jarak bersih} \geq d_b = 221 \geq 19 \rightarrow \text{OK}$$

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

$$\begin{aligned} A_{s \text{ pasang}} &= n \times \frac{1}{4} \times \pi \times d_b^2 \\ &= 4,1667 \times \frac{1}{4} \times 3,14 \times 19^2 \\ &= 1181,370 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

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

(SNI 2847:2019 Pasal 7.6.1.1 dan Pasal 8.6.1.1)

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

$$\begin{aligned} A_{s \text{ min}} &= 0,2\% \times b \times h \\ &= 0,2\% \times 1000 \times 120 \end{aligned}$$

$$= 240 \text{ mm}^2 \text{ (tidak dipakai karena } f_y = 420 \text{ MPa)}$$

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

$$\begin{aligned} A_{s \min} &= \left(0,18\% \times \frac{420}{f_y}\right) \times b \times h \\ &= \left(0,18\% \times \frac{420}{420}\right) \times 1000 \times 120 \\ &= 216 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

- Cek $A_{s \min}$:

$$\text{Syarat } = A_{s \text{ pasang}} \geq A_{s \min} = 1181,370 \geq 240 \rightarrow \text{OK}$$

- Tinggi blok beton (a)

(SNI 2847:2019 Pasal 22.2.2.4.1)

$$a = A_s \times \frac{f_y}{0,85 \times f'_c \times b} = 523,599 \times \frac{420}{0,85 \times 17 \times 1000} = 34,337 \text{ mm}$$

- Kapasitas lentur (M_n)

(SNI 2847:2019 Pasal 22.2.2.4.1)

$$\begin{aligned} M_n &= A_s \times f_y \times \left(d - d_b - \frac{a}{2}\right) \times 10^{-6} \\ &= 1181,370 \times 420 \times \left(71,5 - 19 - \frac{34,337}{2}\right) \times 10^{-6} \\ &= 17,531 \text{ kN-m} \end{aligned}$$

- Lokasi garis netral (c)

(SNI 2847:2019 Pasal 22.2.2.4.1)

$$c = \frac{a}{\beta_1} = \frac{34,337}{0,85} = 40,397 \text{ mm}$$

- Regangan tulangan tarik (ϵ_t)

(SNI 2847:2019 Pasal 22.2.1.2 dan Pasal 22.2.2.1)

$$\epsilon_s = \frac{(d-c)}{c} \times 0,003 = \frac{(71,5-40,397)}{40,397} \times 0,003 = 0,0023$$

- Batas tulangan regangan tarik

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

- Faktor reduksi (ϕ)

(SNI 2847:2019 Tabel 21.2.2)

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

$$\phi = 0,65$$

$$\phi = 0,65 + 0,25 \times \frac{(\epsilon_s - \epsilon_{ty})}{(0,005 - \epsilon_{ty})}$$

$$= 0,65 + 0,25 \times \frac{(0,0023-0,002)}{(0,005-0,002)}$$

$$= 0,676$$

- Untuk $\varepsilon_s \geq 0,005$

$$\phi = 0,90$$

$$\phi_{\text{dipakai}} = 0,90 \text{ (karena } \varepsilon_s \geq 0,005 = 0,676 \geq 0,005)$$

- Kapasitas lentur tereduksi (ϕM_n)

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

$$= 0,90 \times 17,531$$

$$= 11,847 \text{ kN-m}$$

- Momen ultimit (M_u)

$$M_u = |M_{\min} \text{ akibat } M_{22 \min}|$$

$$= |9,719|$$

$$= 9,719 \text{ kN-m}$$

- Cek kapasitas :

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

$$= 11,847 > 9,719 \rightarrow \text{OK}$$

- Kesimpulan :

Digunakan Tulangan D 19 - 240

e) Tulangan Minimum

(untuk Tumpuan Bawah dan Lapangan Atas, Arah X dan Y)

- Spasi tulangan (s)

$$s = 240 \text{ mm}$$

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

(SNI 2847:2019 Pasal 8.7.2.2)

$$s_{\max} = 2 \times h = 2 \times 120 = 240 \text{ mm}$$

- Cek spasi :

$$s < s_{\max} = 240 < 250 \rightarrow \text{OK}$$

- Jumlah tulangan negatif tumpuan (n)

$$n = \frac{b}{s} = \frac{1000}{s} = \frac{1000}{240} = 4,1667$$

- Diameter tulangan (d_b)

$$d_b = 19 \text{ mm}$$

- Jarak bersih antar tulangan

$$s - d_b = 240 - 19 = 221 \text{ mm}$$

- Cek jarak bersih

(SNI 2847:2019 Pasal 25.2.1)

$$\text{Syarat} = \text{Jarak bersih} \geq d_b = 221 \geq 19 \rightarrow \text{OK}$$

- Luas tulangan yang dipasang (A_s pasang)

$$\begin{aligned} A_{s \text{ pasang}} &= n \times \frac{1}{4} \times \pi \times d_b^2 \\ &= 4,1667 \times \frac{1}{4} \times 3,14 \times 19^2 \\ &= 1181,370 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

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

(SNI 2847:2019 Pasal 7.6.1.1 dan Pasal 8.6.1.1)

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

$$\begin{aligned} A_{s \text{ min}} &= 0,2\% \times b \times h \\ &= 0,2\% \times 1000 \times 120 \\ &= 240 \text{ mm}^2 \text{ (tidak dipakai karena } f_y = 420 \text{ MPa)} \end{aligned}$$

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

$$\begin{aligned} A_{s \text{ min}} &= \left(0,18\% \times \frac{420}{f_y}\right) \times b \times h \\ &= \left(0,18\% \times \frac{420}{420}\right) \times 1000 \times 120 \\ &= 216 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

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

$$\text{Syarat} = A_{s \text{ pasang}} \geq A_{s \text{ min}} = 1181,370 \geq 240 \rightarrow \text{OK}$$

4.5.1.4. Pengecekan Kapasitas Geser

- Kapasitas geser beton (V_c)

$$\begin{aligned} V_c &= 0,17 \times \sqrt{f'_c} \times b \times d / 1000 \\ &= 0,17 \times \sqrt{17} \times 1000 \times 71,5 / 1000 \\ &= 50,116 \text{ kN} \end{aligned}$$

- Faktor reduksi (ϕ)

(SNI 2847:2019 Tabel 21.2.2)

$$\phi = 0,75$$

- Ambang batas geser pelat
(SNI 2847:2019 Pasal 7.6.3.1)

$$\begin{aligned}\text{Batas} &= 0,5 \times \phi \times V_c \\ &= 0,5 \times 0,75 \times 50,116 \\ &= 18,794 \text{ kN}\end{aligned}$$
- Cek keperluan tulangan geser pelat

$$\begin{aligned}\text{Syarat} &= V_u > 0,5 \times \phi \times V_c \\ &= 37,586 < 18,794 \rightarrow \text{perlu tulangan geser}\end{aligned}$$

4.5.1.5. Pengecekan Lendutan Pelat

a) Kapasitas Retak Lentur

- Momen inersia pelat (I_g)

$$I_g = \frac{1}{12} \times b \times h^3 = \frac{1}{12} \times 1000 \times 120^3 = 144000000 \text{ mm}^4$$

- Tegangan retak (f_r)

$$f_r = 0,62 \times \sqrt{f'_c} = 0,62 \times \sqrt{17} = 2,556 \text{ MPa}$$

- Garis netral (y)

$$y = \frac{h}{2} = \frac{120}{2} = 60 \text{ mm}$$

- Kapasitas retak lentur (M_{cr})

$$M_{cr} = f_r \times \frac{I_g}{y} \times 10^{-6} = 2,556 \times \frac{144000000}{60} \times 10^{-6} = 6,135 \text{ kNm}$$

- Momen inersia retak (I_{cr})

$$I_{cr} = 0,25 \times I_g = 0,25 \times 144000000 = 36000000 \text{ mm}^4$$

b) Lendutan Arah Sumbu X

- Gaya dalam yang diperoleh dalam ETABS :

- $M_{11 \text{ max}}$ akibat DL = 1,847 kN-m
- $M_{11 \text{ min}}$ akibat DL = -3,331 kN-m
- $M_{11 \text{ max}}$ akibat $SIDL$ = 0,99 kN-m
- $M_{11 \text{ min}}$ akibat $SIDL$ = -1,741 kN-m
- $M_{11 \text{ max}}$ akibat LL = 3,162 kN-m
- $M_{11 \text{ min}}$ akibat LL = -5,538 kN-m

- Data hasil olah gaya dalam :

- $M_a \text{ lapangan (+)}$

$$= \sum M_{11 \text{ max}}$$

$$= 1,847 + 0,99 + 3,162$$

$$= 5,999 \text{ kN-m}$$
- $M_a \text{ tumpuan (-)}$

$$= \sum M_{11 \text{ min}}$$

$$= -3,331 + (-1,741) + (-5,538)$$

$$= -10,61 \text{ kN-m}$$
- $M_{cr} / M_a \text{ lapangan}$

$$= 6,135 / 5,999$$

$$= 1,023 \text{ kN-m}$$
- $M_{cr} / M_a \text{ tumpuan}$

$$= 6,135 / -10,61$$

$$= 0,578 \text{ kN-m}$$
- $I_e \text{ lapangan}$

$$= I_g = 144000000 \text{ mm}^4 \text{ (karena } I_e \text{ lapangan} > I_g \text{)}$$
- $I_e \text{ tumpuan}$

$$= \left(\frac{M_{cr}}{M_a} \right)^3 \times I_g + \left[1 - \left(\frac{M_{cr}}{M_a} \right)^3 \right] \times I_{cr}$$

$$= (1,023)^3 \times 1,44 \times 10^8 + [1 - (1,023)^3] \times 3,6 \times 10^7$$

$$= 56881408 \text{ mm}^4$$
- $I_e \text{ rata-rata}$

$$= 0,5 \times I_e \text{ lapangan} + 0,5 \times I_e \text{ tumpuan}$$

$$= 0,5 \times 144000000 + 0,5 \times 56881408$$

$$= 100440704 \text{ mm}^4$$
- Lendutan seketika akibat DL (δ_{DL})
$$\delta_{DL} = \frac{\frac{5}{48} \times L^2 \times (M_{lap} + 0,2 \times M_{tum})}{E_c \times I_e \text{ rata-rata}} \times 10^6$$

$$= \frac{\frac{5}{48} \times 8000 \times (1,847 + 0,2 \times 3,331)}{27081 \times 100440704} \times 10^6$$

$$= 8,608 \text{ mm}$$
- Lendutan seketika akibat $SIDL$ (δ_{SIDL})
$$\delta_{SIDL} = \frac{\frac{5}{48} \times L^2 \times (M_{lap} + 0,2 \times M_{tum})}{E_c \times I_e \text{ rata-rata}} \times 10^6$$

$$= \frac{\frac{5}{48} \times 8000 \times (0,99 + 0,2 \times 1,741)}{27081 \times 100440704} \times 10^6$$

$$= 4,584 \text{ mm}$$
- Lendutan seketika akibat LL (δ_{LL})
$$\delta_{LL} = \frac{\frac{5}{48} \times L^2 \times (M_{lap} + 0,2 \times M_{tum})}{E_c \times I_e \text{ rata-rata}} \times 10^6$$

$$= \frac{\frac{5}{48} \times 8000 \times (3,162 + 0,2 \times 5,538)}{27081 \times 100440704} \times 10^6$$

$$= 14,624 \text{ mm}$$

- Syarat lendutan seketika akibat LL (δ_{LL})
(SNI 2847:2019 Tabel 24.2.2)

$$\text{Syarat} = \frac{L}{360} = \frac{8000}{360} = 22,222 \text{ mm}$$

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

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

$$= 14,624 < 22,222 \rightarrow \text{OK}$$

- Rasio tulangan pelat (ρ)

$$\rho = \frac{A_s \text{ pakai}}{b \times d} = \frac{1181,370}{1000 \times 71,5} = 0,0165$$

- Faktor jangka panjang (λ)

$$\lambda = \frac{2}{1 + 50 \times \rho} = \frac{2}{1 + 50 \times 0,0165} = 1,095$$

- Lendutan jangka panjang (δ_{LT})

(SNI 2847:2019 Tabel 24.2.2)

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

$$= 1,095 \times (8.608 + 4,584) + 14,624$$

$$= 29,071 \text{ mm}$$

- Syarat lendutan jangka panjang (δ_{LT})

(SNI 2847:2019 Tabel 24.2.2)

$$\text{Syarat} = \frac{L}{240} = \frac{8000}{240} = 33,333 \text{ mm}$$

- Cek lendutan jangka panjang (δ_{LT})

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

$$= 29,071 < 33,333 \rightarrow \text{OK}$$

c) Lendutan Arah Sumbu Y

- Gaya dalam yang diperoleh dalam ETABS :

- $M_{22 \text{ max}}$ akibat DL = 1.49 kN-m
- $M_{22 \text{ min}}$ akibat DL = -2.725 kN-m
- $M_{22 \text{ max}}$ akibat $SIDL$ = 0.76 kN-m
- $M_{22 \text{ min}}$ akibat $SIDL$ = -1.373 kN-m

- $M_{22 \text{ max akibat } LL} = 2.427 \text{ kN-m}$
- $M_{22 \text{ min akibat } LL} = -4.368 \text{ kN-m}$

▪ Data hasil olah gaya dalam :

- $M_a \text{ lapangan (+)} = \sum M_{22 \text{ max}}$
 $= 1.495,143 + 0.76 + 2.427$
 $= 4.677 \text{ kN-m}$
- $M_a \text{ tumpuan (-)} = \sum M_{22 \text{ min}}$
 $= -2.725 + (-1.373) + (-4.368)$
 $= -8.466 \text{ kN-m}$

- $M_{cr} / M_a \text{ lapangan} = 6.135 / 4.677$
 $= 1.312 \text{ kN-m}$

- $M_{cr} / M_a \text{ tumpuan} = 6.135 / -8.466$
 $= 0.725 \text{ kN-m}$

- $I_e \text{ lapangan} = \left(\frac{M_{cr}}{M_a} \right)^3 \times I_g + \left[1 - \left(\frac{M_{cr}}{M_a} \right)^3 \right] \times I_{cr}$
 $= (1.312)^3 \times 1,44 \times 10^8 + [1 - (1.312)^3] \times 3,6 \times 10^7$
 $= 144000000 \text{ mm}^4$

$I_e \text{ lapangan dipakai} = 144000000 \text{ mm}^4 \text{ (karena } I_e \text{ lapangan} < I_g \text{)}$

- $I_e \text{ tumpuan} = \left(\frac{M_{cr}}{M_a} \right)^3 \times I_g + \left[1 - \left(\frac{M_{cr}}{M_a} \right)^3 \right] \times I_{cr}$
 $= (0.725)^3 \times 1,44 \times 10^8 + [1 - (0.725)^3] \times 3,6 \times 10^7$
 $= 77102775 \text{ mm}^4$

$I_e \text{ tumpuan dipakai} = I_g = 77102775 \text{ mm}^4 \text{ (karena } I_e \text{ tumpuan} > I_g \text{)}$

- $I_e \text{ rata-rata} = 0,5 \times I_e \text{ lapangan} + 0,5 \times I_e \text{ tumpuan}$
 $= 0,5 \times 144000000 + 0,5 \times 77102775$
 $= 110551387 \text{ mm}^4$

▪ Lendutan seketika akibat DL (δ_{DL})

$$\delta_{DL} = \frac{\frac{5}{48} \times L^2 \times (M_{lap} + 0,2 \times M_{tum})}{E_c \times I_e \text{ rata-rata}} \times 10^6$$

$$= \frac{\frac{5}{48} \times 8000 \times (1,49 + 0,2 \times 2,725)}{27081 \times 110551387} \times 10^6$$

$$= 6.333 \text{ mm}$$

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

$$\begin{aligned}\delta_{SIDL} &= \frac{\frac{5}{48} \times L^2 \times (M_{lap} + 0,2 \times M_{tum})}{E_c \times I_e \text{ rata-rata}} \times 10^6 \\ &= \frac{\frac{5}{48} \times 8000 \times (0,76 + 0,2 \times 1,373)}{27081 \times 110551387} \times 10^6 \\ &= 3,220 \text{ mm}\end{aligned}$$

- Lendutan seketika akibat LL (δ_{LL})

$$\begin{aligned}\delta_{LL} &= \frac{\frac{5}{48} \times L^2 \times (M_{lap} + 0,2 \times M_{tum})}{E_c \times I_e \text{ rata-rata}} \times 10^6 \\ &= \frac{\frac{5}{48} \times 8000 \times (2,427 + 0,2 \times 4,368)}{27081 \times 110551387} \times 10^6 \\ &= 10,271 \text{ mm}\end{aligned}$$

- Syarat lendutan seketika akibat LL (δ_{LL})
(SNI 2847:2019 Tabel 24.2.2)

$$\text{Syarat} = \frac{L}{360} = \frac{8000}{360} = 22,222 \text{ mm}$$

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

$$\begin{aligned}\text{Cek} &= \delta_{LL} < \frac{L}{360} \\ &= 10,271 < 22,222 \rightarrow \text{OK}\end{aligned}$$

- Rasio tulangan pelat (ρ)

$$\rho = \frac{A_s \text{ pakai}}{b \times d} = \frac{1181,370}{1000 \times 71,5} = 0,0165$$

- Faktor jangka panjang (λ)

$$\lambda = \frac{2}{1 + 50 \times \rho} = \frac{2}{1 + 50 \times 0,0165} = 1,095$$

- Lendutan jangka panjang (δ_{LT})

(SNI 2847:2019 Tabel 24.2.2)

$$\begin{aligned}\delta_{LT} &= \lambda \times (\delta_{DL} + \delta_{SIDL}) + \delta_{LL} \\ &= 1,095 \times (6.333 + 3,220) + 10,271 \\ &= 20,733 \text{ mm}\end{aligned}$$

- Syarat lendutan jangka panjang (δ_{LT})

(SNI 2847:2019 Tabel 24.2.2)

$$\text{Syarat} = \frac{L}{240} = \frac{8000}{240} = 33,333 \text{ mm}$$

- Cek lendutan jangka panjang (δ_{LT})

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

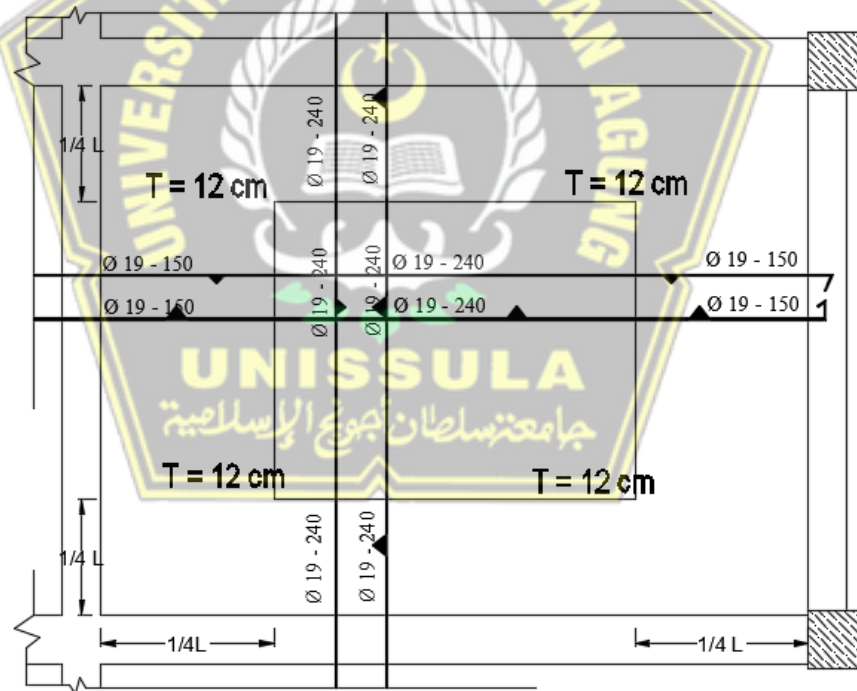
$$= 20,733 < 33,333 \rightarrow \text{OK}$$

4.5.1.6. Rekapitulasi Hasil Tulangan Pelat

Rekapitulasi hasil tulangan pelat dan gambar penulangan pelat beton pada perancangan ditunjukkan pada Tabel 4.38 dan Gambar 4.13.

Tabel 4. 38. Rekapitulasi Hasil Tulangan Pelat

Pelat	L_x (m)	L_y (m)	Arah	Tumpuan		Lapangan	
				Atas	Bawah	Atas	Bawah
S1	8	8	X	D19-150	D19-150	D19-240	D19-240
			Y	D19-240	D19-240	D19-240	D19-240



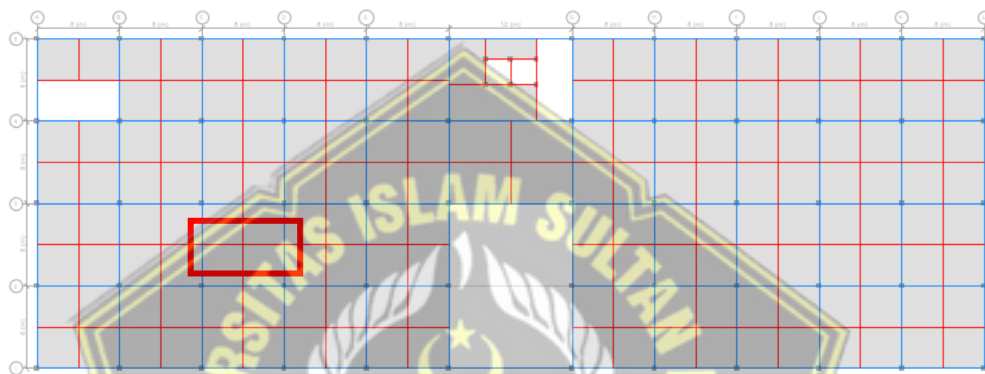
Gambar 4. 13. Penulangan Pelat

4.5.2. 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.

4.5.2.1. Properti Material dan Penampang

Tipe balok yang akan digunakan sebagai contoh perhitungan adalah balok G1 pada tingkat kelima yang ditunjukkan Gambar 4.24.



Gambar 4. 14. Denah Balok G1 Sampel

Panjang pada balok (L) = 8000 mm.

Lebar pada balok (b) = 400 mm.

Tinggi pada balok (h) = 700 mm.

Panjang tumpuan = $2 \times h = 2 \times 700 = 1400$ mm.

Diamater tulangan longitudinal (d_b) = 22 mm.

Diamater tulangan pinggang (d_{bt}) = 10 mm.

Diamater tulangan sengkang (d_s) = 10 mm.

Tebal selimut bersih (c_c) = 40 mm.

Tebal efektif balok (d)
 $= h - c_c - d_s - d_b/2$
 $= 700 - 40 - 10 - 22/2$
 $= 639$ mm.

Kuat tekan beton (f'_c) = 17 MPa.

Kuat leleh tulangan longitudinal (f_y) = 420 MPa.

Kuat leleh tulangan transversal (f_y) = 420 MPa.

$$\begin{aligned}\text{Faktor distribusi tegangan } (\beta_1) &= 0,85 - 0,05 \times \frac{(f_c' - 28)}{7} \\ &= 0,85 - 0,05 \times \frac{(17 - 28)}{7} \\ &= 0,85\end{aligned}$$

Panjang Kolom (c_1) = 600 mm.

Lebar Kolom (c_2) = 600 mm.

Panjang bersih balok (L_n) = $L - c_1 = 8000 - 600 = 7400$ mm.

Faktor modifikasi (λ) = 1 (beton normal)

4.5.2.2. Perhitungan Tulangan Longitudinal Balok

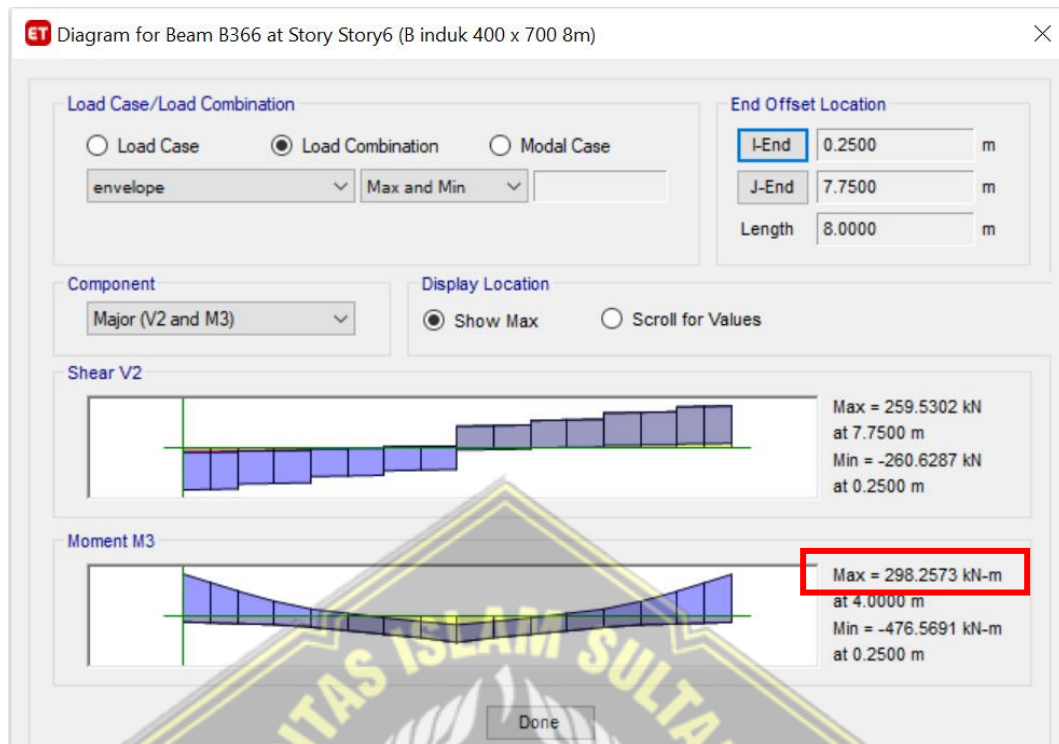
Tahapan-tahapan perhitungan tulangan longitudinal balok yang dilakukan, antara lain:

1. Gaya Dalam

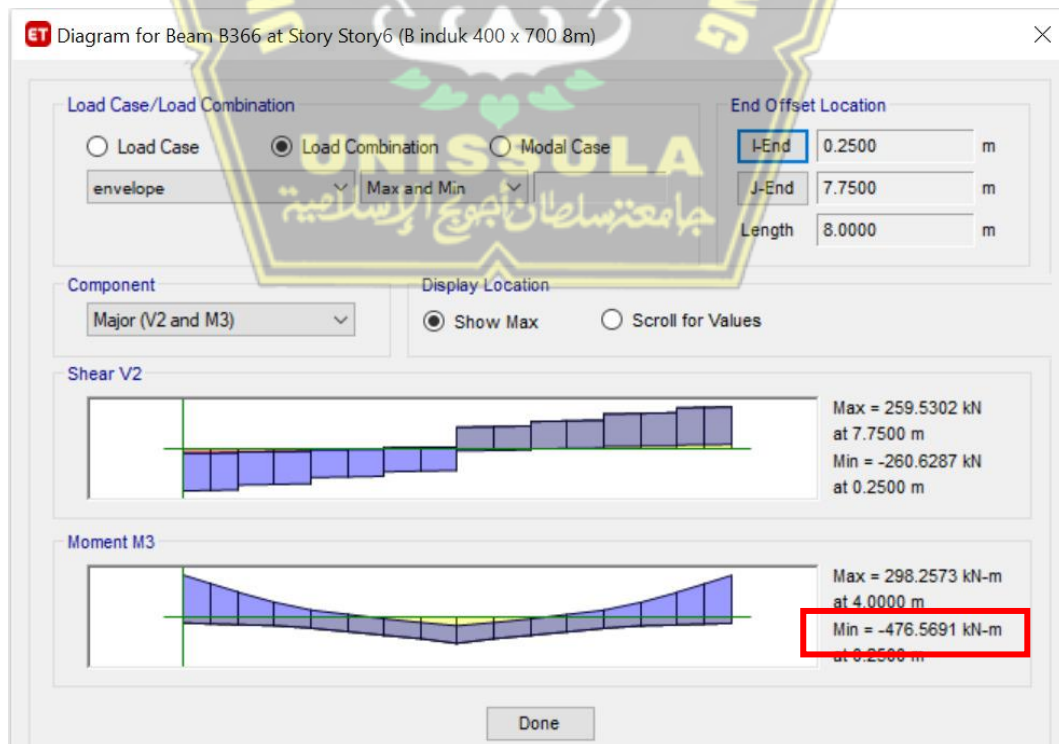
Gaya dalam berupa momen ultimit tumpuan dan lapangan pada balok B1 yang didapat dari ETABS yang digunakan untuk mendesain tulangan longitudinal balok sebagai berikut:

- M_u tumpuan (-) = -476,569 kN-m.
- M_u tumpuan (+) = 107,3112 kN-m.
- M_u lapangan (-) = -131,5874 kN-m.
- M_u lapangan (+) = 298,2573 kN-m.
- P_u = 0 kN.

Tampilan momen ultimit tumpuan dan lapangan pada balok B1 yang didapat dari ETABS dapat dilihat pada Gambar 4.25 dan Gambar 4.26.



Gambar 4. 15. Momen Ultimit Tumpuan Balok G1



Gambar 4. 16. Momen Ultimit Lapangan Balok G1

2. Syarat Gaya dan Geometri

a) Syarat Gaya Aksial

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

$$\begin{aligned}\text{Syarat} &= P_u \leq 0,1 A_g \times f'_c \\ &= 0 \leq 0,1 \times 400 \times 700 \times 17 \\ &= 0 \leq 4760000 \rightarrow \text{OK}\end{aligned}$$

b) Syarat Tinggi Efektif

(SNI 2847:2019 pada Pasal 18.6.2.1)

$$\begin{aligned}\text{Syarat} &= L_n \geq 4 d \\ &= 11400 \geq 4 \times 639 \\ &= 11400 \geq 2556 \rightarrow \text{OK}\end{aligned}$$

c) Syarat Lebar 1

(SNI 2847:2019 pada Pasal 18.6.2.1)

$$\begin{aligned}\text{Syarat} &= b \geq \text{minimal } (0,3 h \text{ atau } 250 \text{ mm}) \rightarrow \text{ambil nilai terkecil} \\ &= 400 \geq \text{minimal } (0,3 \times 700 \text{ atau } 250 \text{ mm}) \\ &= 400 \geq \text{minimal } (210 \text{ atau } 250 \text{ mm}) \\ &= 400 \geq 210 \rightarrow \text{OK}\end{aligned}$$

d) Syarat Lebar 2

(SNI 2847:2019 pada Pasal 18.6.2.1)

$$\begin{aligned}\text{Syarat} &= b \leq c_2 + 2 \times \text{minimal } (c_2 \text{ atau } 0,75 c_1) \rightarrow \text{ambil terkecil} \\ &= 400 \leq 700 + 2 \times \text{minimal } (600 \text{ atau } 0,75 \times 600) \\ &= 400 \leq 700 + 2 \times \text{minimal } (600 \text{ atau } 450) \\ &= 400 \leq 700 + 2 \times 450 \\ &= 400 \leq 1600 \rightarrow \text{OK}\end{aligned}$$

3. Tulangan Tumpuan Atas

- Jumlah tulangan tumpuan atas (n)

$$n = 6$$

- Diamater tulangan longitudinal (d_b)

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

- Jarak bersih antar tulangan

$$\begin{aligned}\text{Jarak bersih} &= \frac{b - 2 c_c - 2 d_s - n \times d_b}{n - 1} \\ &= \frac{400 - 2 \times 40 - 2 \times 10 - 6 \times 22}{5 - 1} \\ &= 33,6 \text{ mm}\end{aligned}$$

- Cek jarak bersih

(SNI 2847:2019 pada Pasal 25.2.1)

$$\begin{aligned}\text{Syarat} &= \text{Jarak Bersih} \geq \text{maksimal } (d_b \text{ dan } 25 \text{ mm}) \\ &= 33,6 \geq \text{maksimal } (19 \text{ dan } 25) \rightarrow \text{ambil nilai terbesar} \\ &= 33,6 \geq 25 \rightarrow \text{OK}\end{aligned}$$

- Luas tulangan yang dipasang (A_s pasang)

$$\begin{aligned}A_s \text{ pasang} &= n \times \frac{1}{4} \times \pi \times d_b^2 \\ &= 6 \times \frac{1}{4} \times 3,14 \times 22^2 \\ &= 2280,796 \text{ mm}^2\end{aligned}$$

- Luas tulangan minimum (A_s min)
(SNI 2847:2019 pada Pasal 9.6.1.2)

$$\begin{aligned}A_{s \text{ min } 1} &= \frac{0,25 \times \sqrt{f_c}}{f_y} \times b \times d \\ &= \frac{0,25 \times \sqrt{17}}{420} \times 400 \times 639 \\ &= 627,301 \text{ mm}^2\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}A_{s \text{ min } 2} &= \frac{1,4}{f_y} \times b \times d \\ &= \frac{1,4}{420} \times 400 \times 639 \\ &= 852 \text{ mm}^2\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}A_{s \text{ min}} &= \text{maksimum } (A_{s \text{ min } 1} \text{ atau } A_{s \text{ min } 2}) \\ &= 852 \text{ mm}^2\end{aligned}$$

- Cek $A_s \text{ min}$:

$$\begin{aligned}\text{Syarat} &= A_s \text{ pasang} \geq A_s \text{ min} \\ &= 2279,640 \geq 854 \rightarrow \text{OK}\end{aligned}$$

- Rasio tulangan (ρ)

$$\rho = \frac{A_s \text{ pasang}}{b \times d} = \frac{2279,640}{400 \times 639} = 0,0089$$

- Rasio tulangan maksimum (ρ_{max})

$$\begin{aligned}\rho_{\text{max}1} &= 0,75 \times \beta_1 \times 0,85 \times \frac{f_c'}{f_y} \times \frac{600}{600+f_y} \\ &= 0,75 \times 0,85 \times 0,85 \times \frac{17}{420} \times \frac{600}{600+420} \\ &= 0,0129\end{aligned}$$

$$\rho_{\text{max}2} = 0,025 \text{ (SNI 2847:2019 pada Pasal 18.6.3.1)}$$

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

- Cek $A_s \text{ max}$:

$$\begin{aligned}\text{Syarat} &= \rho \leq \rho_{\text{max}} \\ &= 0,0089 \leq 0,025 \rightarrow \text{OK}\end{aligned}$$

- Tinggi blok beton (a)

(SNI 2847:2019 pada Pasal 22.2.2.4.1)

$$\begin{aligned}a &= A_s \times \frac{f_y}{0,85 \times f_c' \times b} \\ &= 2279,640 \times \frac{420}{0,85 \times 17 \times 400} \\ &= 165,649 \text{ mm}\end{aligned}$$

- Kapasitas lentur (M_n)

(SNI 2847:2019 pada Pasal 22.2.2.4.1)

$$\begin{aligned}M_n &= A_s \times f_y \times \left(d - \frac{a}{2}\right) \times 10^{-6} \\ &= 2279,640 \times 420 \times \left(639 - \frac{165,649}{2}\right) \times 10^{-6} \\ &= 532,510 \text{ kN-m}\end{aligned}$$

- Lokasi garis netral (c)

(SNI 2847:2019 pada Pasal 22.2.2.4.1)

$$c = \frac{a}{\beta_1} = \frac{165,649}{0,85} = 194,881 \text{ mm}$$

- Regangan tulangan tarik (ε_t)

(SNI 2847:2019 pada Pasal 22.2.1.2 dan 22.2.2.1)

$$\begin{aligned}\varepsilon_t &= \frac{(d-c)}{c} \times 0,003 \\ &= \frac{(639-194,881)}{194,881} \times 0,003 \\ &= 0,007\end{aligned}$$

- Faktor reduksi (ϕ)

(SNI 2847:2019 pada Pasal 22.2.1.2 dan 22.2.2.1)

$$\phi = 0,90 \text{ (karena } \varepsilon_t \geq 0,005 = 0,017 \geq 0,005)$$

- Kapasitas lentur tereduksi (ϕM_n)

$$\begin{aligned}\phi M_n &= \phi \times M_n \\ &= 0,90 \times 350,531 \\ &= 479,259 \text{ kN-m}\end{aligned}$$

- Momen ultimit (M_u)

$$\begin{aligned}M_u &= |M_{u \text{ tumpuan}} (-)| \\ &= |-476,569| \\ &= 476,569 \text{ kN-m}\end{aligned}$$

- Cek kapasitas :

$$\begin{aligned}\text{Syarat} &= \phi M_n > M_u \\ &= 479,259 > 476,569 \rightarrow \text{OKE}\end{aligned}$$

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

$$\begin{aligned}A_s \text{ perlu} &= \frac{M_u}{f_y \times (d - \frac{a}{2})} \times 349,442 \times 10^6 \\ &= \frac{262,761}{420 \times (640,5 - \frac{102,960}{2})} \times 10^6 \\ &= 2040,162 \text{ mm}^2\end{aligned}$$

4. Tulangan Tumpuan Bawah

- Jumlah tulangan tumpuan atas (n)

$$n = 6$$

- Diameter tulangan longitudinal (d_b)

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

- Jarak bersih antar tulangan

$$\begin{aligned} \text{Jarak bersih} &= \frac{b - 2 c_c - 2 d_s - n \times d_b}{n - 1} \\ &= \frac{400 - 2 \times 40 - 2 \times 10 - 6 \times 22}{5 - 1} \\ &= 33,6 \text{ mm} \end{aligned}$$

- Cek jarak bersih

(SNI 2847:2019 pada Pasal 25.2.1)

$$\begin{aligned} \text{Syarat} &= \text{Jarak Bersih} \geq \text{maksimal } (d_b \text{ dan } 25 \text{ mm}) \\ &= 33,6 \geq \text{maksimal } (19 \text{ dan } 25) \rightarrow \text{ambil nilai terbesar} \\ &= 33,6 \geq 25 \rightarrow \text{OK} \end{aligned}$$

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

$$\begin{aligned} A_s \text{ pasang} &= n \times \frac{1}{4} \times \pi \times d_b^2 \\ &= 6 \times \frac{1}{4} \times 3,14 \times 22^2 \\ &= 2280,796 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

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

(SNI 2847:2019 pada Pasal 9.6.1.2)

$$\begin{aligned} A_{s \text{ min } 1} &= \frac{0,25 \times \sqrt{f_c}}{f_y} \times b \times d \\ &= \frac{0,25 \times \sqrt{17}}{420} \times 400 \times 639 \\ &= 627,301 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} A_{s \text{ min } 2} &= \frac{1,4}{f_y} \times b \times d \\ &= \frac{1,4}{420} \times 400 \times 639 \\ &= 852 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} A_{s \text{ min } 3} &= 0,5 \times A_s \text{ tumpuan } (-) \\ &= 0,5 \times 2280,796 \\ &= 1139,820 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} A_{s \text{ min}} &= \text{maksimum } (A_{s \text{ min } 1} ; A_{s \text{ min } 2} ; \text{ atau } A_{s \text{ min } 3}) \\ &= 1139,820 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

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

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

$$= 2280,796 \geq 1139,820 \rightarrow \text{OK}$$

- Rasio tulangan (ρ)

$$\rho = \frac{A_s \text{ pasang}}{b \times d} = \frac{2279,640}{400 \times 639} = 0,0089$$

- Rasio tulangan maksimum ($\rho_{\max}$)

$$\begin{aligned} \rho_{\max 1} &= 0,75 \times \beta_1 \times 0,85 \times \frac{f_c'}{f_y} \times \frac{600}{600 + f_y} \\ &= 0,75 \times 0,85 \times 0,85 \times \frac{17}{420} \times \frac{600}{600 + 420} \\ &= 0,0129 \end{aligned}$$

$$\rho_{\max 2} = 0,025 \text{ (SNI 2847:2019 pada Pasal 18.6.3.1)}$$

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

- Cek $A_s \text{ max}$:

$$\begin{aligned} \text{Syarat} &= \rho \leq \rho_{\max} \\ &= 0,0089 \leq 0,025 \rightarrow \text{OK} \end{aligned}$$

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

$$\begin{aligned} a &= A_s \times \frac{f_y}{0,85 \times f_c' \times b} \\ &= 2279,640 \times \frac{420}{0,85 \times 17 \times 400} \\ &= 165,733 \text{ mm} \end{aligned}$$

- Kapasitas lentur (M_n)
(SNI 2847:2019 pada Pasal 22.2.2.4.1)

$$\begin{aligned} M_n &= A_s \times f_y \times \left(d - \frac{a}{2}\right) \times 10^{-6} \\ &= 2279,640 \times 420 \times \left(639 - \frac{165,649}{2}\right) \times 10^{-6} \\ &= 532,740 \text{ kN-m} \end{aligned}$$

- Lokasi garis netral (c)
(SNI 2847:2019 pada Pasal 22.2.2.4.1)

$$c = \frac{a}{\beta_1} = \frac{165,649}{0,85} = 194,980 \text{ mm}$$

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

$$\begin{aligned}\varepsilon_t &= \frac{(d-c)}{c} \times 0,003 \\ &= \frac{(639-194,881)}{194,881} \times 0,003 \\ &= 0,007\end{aligned}$$

- Faktor reduksi (ϕ)

(SNI 2847:2019 pada Pasal 22.2.1.2 dan 22.2.2.1)

$$\phi = 0,90 \text{ (karena } \varepsilon_t \geq 0,005 = 0,017 \geq 0,005)$$

- Kapasitas lentur tereduksi (ϕM_n)

$$\begin{aligned}\phi M_n &= \phi \times M_n \\ &= 0,90 \times 350,531 \\ &= 479,466 \text{ kN-m}\end{aligned}$$

- Momen ultimit (M_u)

$$\begin{aligned}M_u &= |M_{u \text{ tumpuan } (-)}| \\ &= |-107,311| \\ &= 107,311 \text{ kN-m}\end{aligned}$$

- Cek kapasitas :

$$\begin{aligned}\text{Syarat} &= \phi M_n > M_u \\ &= 479,259 > 107,311 \rightarrow \text{OKE}\end{aligned}$$

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

$$\begin{aligned}A_s \text{ perlu} &= \frac{M_u}{f_y \times (d - \frac{a}{2})} \times 349,442 \times 10^6 \\ &= \frac{262,761}{420 \times (640,5 - \frac{102,960}{2})} \times 10^6 \\ &= 459,427 \text{ mm}^2\end{aligned}$$

5. Tulangan Lapangan Atas

- Jumlah tulangan tumpuan atas (n)

$$n = 6$$

- Diameter tulangan longitudinal (d_b)

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

- Jarak bersih antar tulangan

$$\text{Jarak bersih} = \frac{b - 2 c_c - 2 d_s - n \times d_b}{n - 1}$$

$$= \frac{400 - 2 \times 40 - 2 \times 10 - 6 \times 22}{5 - 1}$$

$$= 33,6 \text{ mm}$$

- Cek jarak bersih
(SNI 2847:2019 pada Pasal 25.2.1)

Syarat = Jarak Bersih $\geq$ maksimal (d_b dan 25 mm)

$$= 33,6 \geq \text{maksimal (19 dan 25)} \rightarrow \text{ambil nilai terbesar}$$

$$= 33,6 \geq 25 \rightarrow \text{OK}$$

- Luas tulangan yang dipasang (A_s pasang)

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

$$= 6 \times \frac{1}{4} \times 3,14 \times 22^2$$

$$= 2280,796 \text{ mm}^2$$

- Luas tulangan minimum (A_s min)
(SNI 2847:2019 pada Pasal 9.6.1.2)

$$A_{s \text{ min } 1} = \frac{0,25 \times \sqrt{f_c}}{f_y} \times b \times d$$

$$= \frac{0,25 \times \sqrt{17}}{420} \times 400 \times 639$$

$$= 627,301 \text{ mm}^2$$

$$A_{s \text{ min } 2} = \frac{1,4}{f_y} \times b \times d$$

$$= \frac{1,4}{420} \times 400 \times 639$$

$$= 852 \text{ mm}^2$$

$$A_{s \text{ min } 3} = 0,5 \times A_s \text{ tumpuan (-)}$$

$$= 0,5 \times 2280,796$$

$$= 569,910 \text{ mm}^2$$

$$A_{s \text{ min}} = \text{maksimum } (A_{s \text{ min } 1} ; A_{s \text{ min } 2} ; \text{ atau } A_{s \text{ min } 3})$$

$$= 852 \text{ mm}^2$$

- Cek A_s min :

Syarat = $A_s \text{ pasang} \geq A_s \text{ min}$

$$= 2280,796 \geq 852 \rightarrow \text{OK}$$

- Rasio tulangan (ρ)

$$\rho = \frac{A_s \text{ pasang}}{b \times d} = \frac{2279,640}{400 \times 639} = 0,0089$$

- Rasio tulangan maksimum ($\rho_{\max}$)

$$\begin{aligned}\rho_{\max 1} &= 0,75 \times \beta_1 \times 0,85 \times \frac{f_c'}{f_y} \times \frac{600}{600 + f_y} \\ &= 0,75 \times 0,85 \times 0,85 \times \frac{17}{420} \times \frac{600}{600 + 420} \\ &= 0,0129\end{aligned}$$

$$\rho_{\max 2} = 0,025 \text{ (SNI 2847:2019 pada Pasal 18.6.3.1)}$$

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

- Cek $A_{s \max}$:

$$\begin{aligned}\text{Syarat} &= \rho \leq \rho_{\max} \\ &= 0,0089 \leq 0,025 \rightarrow \text{OK}\end{aligned}$$

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

$$\begin{aligned}a &= A_s \times \frac{f_y}{0,85 \times f_c' \times b} \\ &= 2279,640 \times \frac{420}{0,85 \times 17 \times 400} \\ &= 165,733 \text{ mm}\end{aligned}$$

- Kapasitas lentur (M_n)
(SNI 2847:2019 pada Pasal 22.2.2.4.1)

$$\begin{aligned}M_n &= A_s \times f_y \times \left(d - \frac{a}{2}\right) \times 10^{-6} \\ &= 2279,640 \times 420 \times \left(639 - \frac{165,649}{2}\right) \times 10^{-6} \\ &= 532,740 \text{ kN-m}\end{aligned}$$

- Lokasi garis netral (c)
(SNI 2847:2019 pada Pasal 22.2.2.4.1)

$$c = \frac{a}{\beta_1} = \frac{165,649}{0,85} = 194,980 \text{ mm}$$

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

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

$$= \frac{(639-194,881)}{194,881} \times 0,003$$

$$= 0,007$$

- Faktor reduksi (ϕ)

(SNI 2847:2019 pada Pasal 22.2.1.2 dan 22.2.2.1)

$$\phi = 0,90 \text{ (karena } \varepsilon_t \geq 0,005 = 0,017 \geq 0,005)$$

- Kapasitas lentur tereduksi (ϕM_n)

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

$$= 0,90 \times 350,531$$

$$= 479,466 \text{ kN-m}$$

- Momen ultimit (M_u)

$$M_u = |M_{u \text{ tumpuan}} (-)|$$

$$= |-131,587|$$

$$= 131,587 \text{ kN-m}$$

- Cek kapasitas :

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

$$= 479,259 > 131,587 \rightarrow \text{OKE}$$

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

$$A_s \text{ perlu} = \frac{M_u}{f_y \times (d - \frac{a}{2})} \times 349,442 \times 10^6$$

$$= \frac{262,761}{420 \times (640,5 - \frac{102,960}{2})} \times 10^6$$

$$= 563,360 \text{ mm}^2$$

6. Tulangan Lapangan Bawah

- Jumlah tulangan tumpuan atas (n)

$$n = 6$$

- Diameter tulangan longitudinal (d_b)

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

- Jarak bersih antar tulangan

$$\text{Jarak bersih} = \frac{b - 2 c_c - 2 d_s - n \times d_b}{n - 1}$$

$$= \frac{400 - 2 \times 40 - 2 \times 10 - 6 \times 22}{5 - 1}$$

$$= 33,6 \text{ mm}$$

- Cek jarak bersih

(SNI 2847:2019 pada Pasal 25.2.1)

$$\text{Syarat} = \text{Jarak Bersih} \geq \text{maksimal } (d_b \text{ dan } 25 \text{ mm})$$

$$= 33,6 \geq \text{maksimal } (19 \text{ dan } 25) \rightarrow \text{ambil nilai terbesar}$$

$$= 33,6 \geq 25 \rightarrow \text{OK}$$

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

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

$$= 6 \times \frac{1}{4} \times 3,14 \times 22^2$$

$$= 2280,796 \text{ mm}^2$$

- Luas tulangan minimum ($A_{s \text{ min}}$)
(SNI 2847:2019 pada Pasal 9.6.1.2)

$$A_{s \text{ min } 1} = \frac{0,25 \times \sqrt{f_c'}}{f_y} \times b \times d$$

$$= \frac{0,25 \times \sqrt{17}}{420} \times 400 \times 639$$

$$= 627,301 \text{ mm}^2$$

$$A_{s \text{ min } 2} = \frac{1,4}{f_y} \times b \times d$$

$$= \frac{1,4}{420} \times 400 \times 639$$

$$= 852 \text{ mm}^2$$

$$A_{s \text{ min } 3} = 0,5 \times A_{s \text{ tumpuan (-)}}$$

$$= 0,5 \times 2280,796$$

$$= 569,910 \text{ mm}^2$$

$$A_{s \text{ min}} = \text{maksimum } (A_{s \text{ min } 1} ; A_{s \text{ min } 2} ; \text{ atau } A_{s \text{ min } 3})$$

$$= 852 \text{ mm}^2$$

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

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

$$= 2280,796 \geq 852 \rightarrow \text{OK}$$

- Rasio tulangan (ρ)

$$\rho = \frac{A_s \text{ pasang}}{b \times d} = \frac{2279,640}{400 \times 639} = 0,0089$$

- Rasio tulangan maksimum ($\rho_{\max}$)

$$\begin{aligned}\rho_{\max 1} &= 0,75 \times \beta_1 \times 0,85 \times \frac{f_c'}{f_y} \times \frac{600}{600+f_y} \\ &= 0,75 \times 0,85 \times 0,85 \times \frac{17}{420} \times \frac{600}{600+420} \\ &= 0,0129\end{aligned}$$

$$\rho_{\max 2} = 0,025 \text{ (SNI 2847:2019 pada Pasal 18.6.3.1)}$$

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

- Cek $A_{s \max}$:

$$\begin{aligned}\text{Syarat} &= \rho \leq \rho_{\max} \\ &= 0,0089 \leq 0,025 \rightarrow \text{OK}\end{aligned}$$

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

$$\begin{aligned}a &= A_s \times \frac{f_y}{0,85 \times f_c' \times b} \\ &= 2279,640 \times \frac{420}{0,85 \times 17 \times 400} \\ &= 165,733 \text{ mm}\end{aligned}$$

- Kapasitas lentur (M_n)
(SNI 2847:2019 pada Pasal 22.2.2.4.1)

$$\begin{aligned}M_n &= A_s \times f_y \times \left(d - \frac{a}{2}\right) \times 10^{-6} \\ &= 2279,640 \times 420 \times \left(639 - \frac{165,649}{2}\right) \times 10^{-6} \\ &= 532,740 \text{ kN-m}\end{aligned}$$

- Lokasi garis netral (c)
(SNI 2847:2019 pada Pasal 22.2.2.4.1)

$$c = \frac{a}{\beta_1} = \frac{165,649}{0,85} = 194,980 \text{ mm}$$

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

$$\begin{aligned}\epsilon_t &= \frac{(d-c)}{c} \times 0,003 \\ &= \frac{(639-194,881)}{194,881} \times 0,003\end{aligned}$$

$$= 0,007$$

- Faktor reduksi (ϕ)

(SNI 2847:2019 pada Pasal 22.2.1.2 dan 22.2.2.1)

$$\phi = 0,90 \text{ (karena } \varepsilon_t \geq 0,005 = 0,017 \geq 0,005)$$

- Kapasitas lentur tereduksi (ϕM_n)

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

$$= 0,90 \times 350,531$$

$$= 479,466 \text{ kN-m}$$

- Momen ultimit (M_u)

$$M_u = |M_{u \text{ tumpuan}} (-)|$$

$$= |-298,257|$$

$$= 298,257 \text{ kN-m}$$

- Cek kapasitas :

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

$$= 479,259 > 298,257 \rightarrow \text{OKE}$$

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

$$A_s \text{ perlu} = \frac{M_u}{f_y \times (d - \frac{a}{2})} \times 349,442 \times 10^6$$

$$= \frac{298,257}{420 \times (640,5 - \frac{102,960}{2})} \times 10^6$$

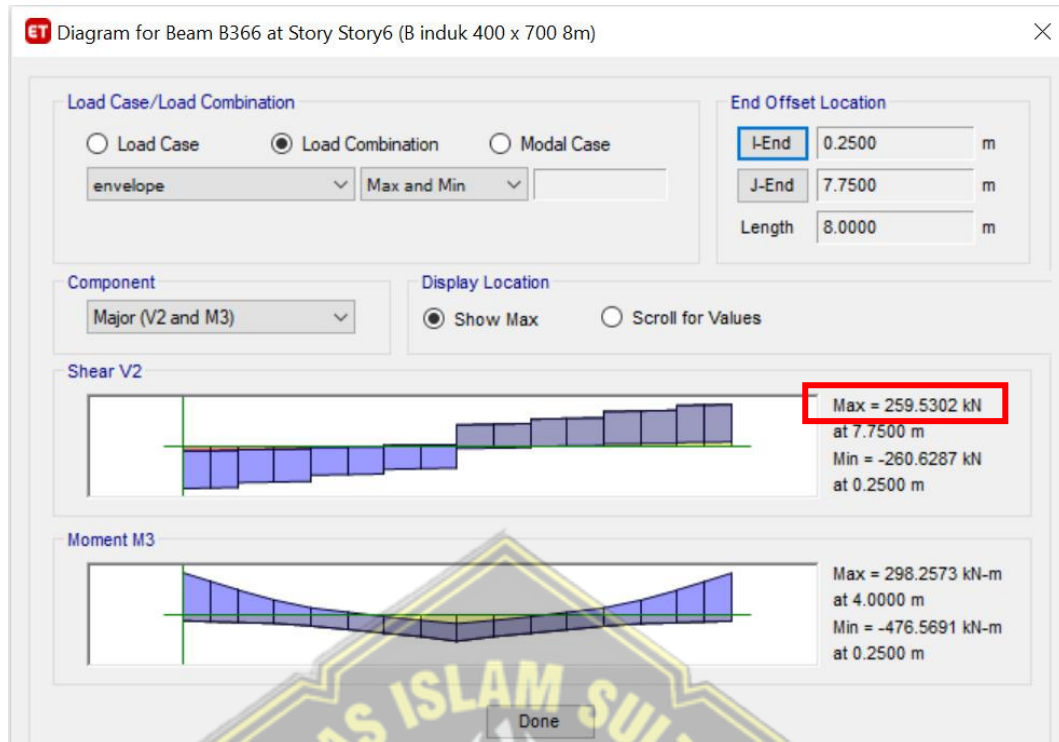
$$= 1276,917 \text{ mm}^2$$

4.5.2.3. Perhitungan Tulangan Transversal Balok

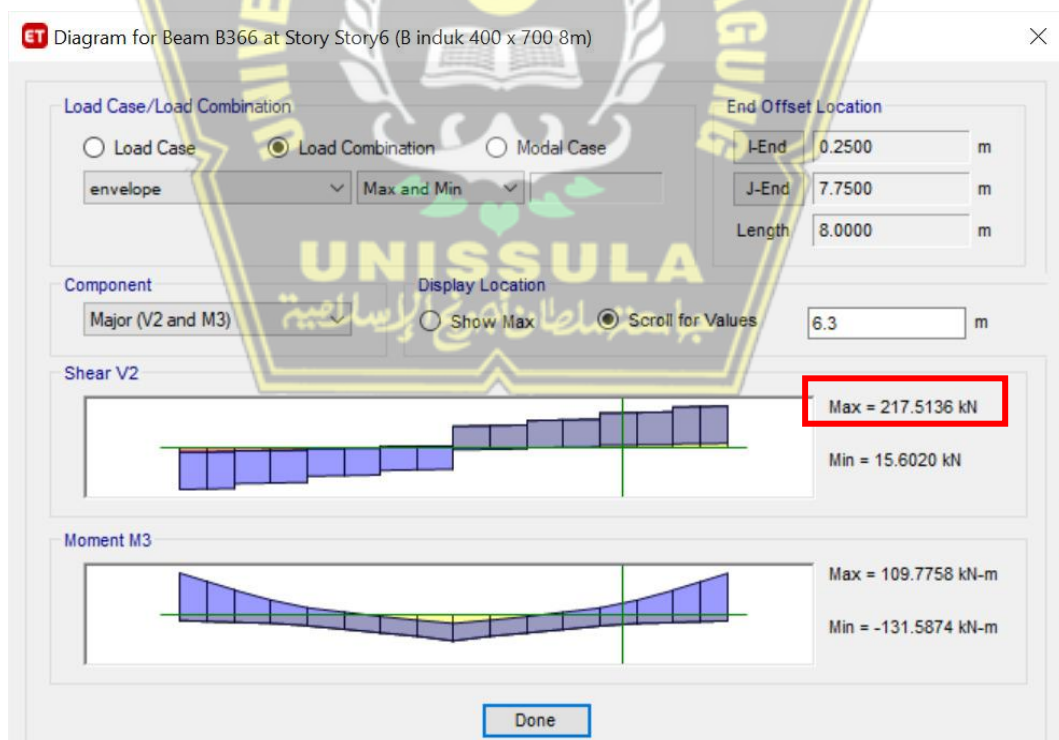
Tulangan transversal pada balok merupakan tulangan yang berguna untuk menahan gaya geser ultimit yang diterima balok. Tahapan-tahapan perhitungan tulangan transversal balok yang dilakukan, antara lain:

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 4.27 dan Gambar 4.28.



Gambar 4. 17. Gaya Geser Ultimit Tumpuan Balok B1



Gambar 4. 18. Gaya Geser Ultimit Lapangan Balok B1

Gaya dalam berupa gaya geser ultimit tumpuan dan lapangan pada balok B1 yang didapat dari ETABS yang digunakan untuk mendesain tulangan transversal balok sebagai berikut:

- V_u tumpuan = 259,5302 kN
- V_u lapangan = 217,5136 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:

$$V_g \text{ tumpuan} = -196,8069 \text{ kN}$$

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

$$A_s^+ \text{ tumpuan} = 2280,796 \text{ mm}^2$$

$$A_s^- \text{ tumpuan} = -2279,640 \text{ mm}^2$$

• Probable Moment Capacities (M_{pr})

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

$$= 1,25 \times 165,733$$

$$= 207,166 \text{ mm}^2$$

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

$$= 1,25 \times 165,733$$

$$= 207,166 \text{ mm}^2$$

$$\begin{aligned} M_{pr}^+ &= A_s^+ \times 1,25 f_y \times \left(d - \frac{a_{pr}^+}{2}\right) \\ &= 2280,796 \times 1,25 \times 420 \times \left(639 - \frac{207,166}{2}\right) \end{aligned}$$

$$= 641118124 \text{ Nmm}$$

$$\begin{aligned} M_{pr}^- &= A_s^- \times 1,25 f_y \times \left(d - \frac{a_{pr}^-}{2}\right) \\ &= 2279,640 \times 1,25 \times 420 \times \left(639 - \frac{207,166}{2}\right) \end{aligned}$$

$$= 640855951 \text{ Nmm}$$

- Gaya Geser Akibat Goyangan (V_{sway})
(SNI 2847:2019 pada Pasal 18.6.5.1)

Gaya geser akibat goyangan dihitung dengan rumus berikut:

$$\begin{aligned} V_{\text{sway}} \text{ atau } V_{\text{pr}} &= \frac{M_{\text{pr}}^{+} + M_{\text{pr}}^{-}}{L_n} \\ &= \frac{641118124 + 640855951}{7400} \\ &= 173240 \text{ N} \end{aligned}$$

- 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:

$$\begin{aligned} V_e &= V_g + V_{\text{pr}} \\ &= -196,8069 \times 10^3 + 173240 \\ &= -23567 \text{ N} \end{aligned}$$

b) Tahanan Geser Beton

- Gaya Geser Akibat Goyangan (V_{sway})

$$V_{\text{sway}} \text{ atau } V_{\text{pr}} = 173240 \text{ N}$$

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

$$\frac{1}{2} V_e = \frac{1}{2} \times -23567 = -11784 \text{ N}$$

- Gaya Aksial Terfaktor (P_u)

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

- Menghitung $A_g f_c' / 20$:

$$\begin{aligned} \frac{A_g f_c'}{20} &= \frac{400 \times 700 \times 17}{20} \\ &= 238000 \text{ N} \end{aligned}$$

- Kuat Geser Nominal Beton (V_c)
(SNI 2847:2019 pada Pasal 18.6.5.2)

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

$$V_{\text{pr}} \geq \frac{1}{2} V_e = 173240 \geq -23567 \rightarrow \text{OK}$$

$$P_u < \frac{A_g f_c'}{20} = 0 < 238000 \rightarrow \text{OK}$$

$$V_c = 0$$

c) Penulangan Geser

- Jumlah kaki (n)

$$n = 4$$

- Luas tulangan geser (A_v)

$$\begin{aligned} A_v &= n \times \frac{1}{4} \times \pi \times d_s^2 \\ &= 4 \times \frac{1}{4} \times 3,14 \times 10^2 \\ &= 314,159 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

- Spasi tulangan (s)

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

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

(SNI 2847:2019 pada Pasal 18.6.4.4)

$$s_{\max 1} = \frac{1}{4} \times d = \frac{1}{4} \times 639 = 159,75 \text{ mm}$$

$$s_{\max 2} = 6 \times d_b = 6 \times 19 = 132 \text{ mm}$$

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

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

- Cek spasi :

$$s < s_{\max} = 100 < 132 \rightarrow \text{OK}$$

- Kuat geser nominal akibat penulangan geser (V_s)

(SNI 2847:2019 pada Pasal 22.5.10.5.3)

$$\begin{aligned} V_s &= \frac{A_v \times f_y \times d}{s} \\ &= \frac{314,159 \times 420 \times 639}{100} \\ &= 843141 \text{ N} \end{aligned}$$

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

(SNI 2847:2019 pada Pasal 22.5.1.2)

$$\begin{aligned} \text{Batas } V_s &= 0,66 \times \sqrt{f_c'} \times b \times d \\ &= 0,66 \times \sqrt{17} \times 400 \times 639 \\ &= 695551 \text{ N} \end{aligned}$$

- Faktor reduksi kuat geser (ϕ)

(SNI 2847:2019 pada Pasal 12.5.3.2 dan 21.2.4)

$$\phi = 0,75$$

- Kuat geser nominal (V_n)

$$\begin{aligned} V_n &= V_c + V_s \\ &= 0 + 421570 \\ &= 421570 \text{ N} \end{aligned}$$

- Kapasitas geser tereduksi (ϕV_n)

$$\begin{aligned} \phi V_n &= \phi \times V_n \\ &= 0,75 \times 843141 \\ &= 695551 \text{ N} \end{aligned}$$

- Gaya geser ultimit (V_u)

$$\begin{aligned} V_u &= V_{u \text{ tumpuan}} \times 10^3 \\ &= 259,5302 \times 10^3 \\ &= 259530 \text{ N} \end{aligned}$$

- Cek kapasitas :

$$\begin{aligned} \text{Syarat} \quad &= \frac{\phi V_n}{V_u} \geq 1 \\ &= \frac{695551}{259530} \geq 1 \\ &= 2,010 \geq 1 \rightarrow \text{OK} \end{aligned}$$

3. Tulangan Transversal Lapangan

a) Gaya Dalam

$$V_{u \text{ lapangan}} = 217,5136 \text{ kN}$$

b) Penulangan Geser

- Jumlah kaki (n)

$$n = 4$$

- Luas tulangan geser (A_v)

$$\begin{aligned} A_v &= n \times \frac{1}{4} \times \pi \times d_s^2 \\ &= 4 \times \frac{1}{4} \times 3,14 \times 10^2 \\ &= 314,159 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

- Spasi tulangan (s)

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

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

(SNI 2847:2019 pada Pasal 18.6.4.6)

$$s_{\max} = \frac{1}{2} \times d = \frac{1}{2} \times 639 = 319,5 \text{ mm}$$

- Cek spasi :

$$s < s_{\max} = 100 < 319,5 \rightarrow \text{OK}$$

- Kuat geser nominal akibat penulangan geser (V_s)

(SNI 2847:2019 pada Pasal 22.5.10.5.3)

$$\begin{aligned} V_s &= \frac{A_v \times f_y \times d}{s} \\ &= \frac{314,159 \times 420 \times 639}{100} \\ &= 843141 \text{ N} \end{aligned}$$

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

(SNI 2847:2019 pada Pasal 22.5.1.2)

$$\begin{aligned} \text{Batas } V_s &= 0,66 \times \sqrt{f_c} \times b \times d \\ &= 0,66 \times \sqrt{17} \times 400 \times 639 \\ &= 695551 \text{ N} \end{aligned}$$

- Kuat geser nominal beton (V_c)

(SNI 2847:2019 pada Pasal 22.5.5.1)

$$\begin{aligned} V_c &= 0,17 \times \sqrt{f_c} \times b \times d \\ &= 0,17 \times \sqrt{17} \times 350 \times 639 \\ &= 179157 \text{ N} \end{aligned}$$

- 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)

$$\begin{aligned} V_n &= V_c + V_s \\ &= 179157 + 843141 \\ &= 874709 \text{ N} \end{aligned}$$

- Kapasitas geser tereduksi (ϕV_n)

$$\begin{aligned} \phi V_n &= \phi \times V_n \\ &= 0,75 \times 874709 \end{aligned}$$

$$= 656031,75 \text{ N}$$

- Gaya geser ultimit (V_u)

$$\begin{aligned} V_u &= V_{u \text{ lapangan}} \times 10^3 \\ &= 217,5136 \times 10^3 \\ &= 217513,6 \text{ N} \end{aligned}$$

- Cek kapasitas :

$$\begin{aligned} \text{Syarat} &= \frac{\phi V_n}{V_u} \geq 1 \\ &= \frac{656031,75}{217513,6} \geq 1 \\ &= 3,016 \geq 1 \rightarrow \text{OK} \end{aligned}$$

4.5.2.4. 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})

$$A_{cp} = b \times h = 400 \times 700 = 280000 \text{ mm}^2$$

- Keliling luar penampang beton (p_{cp})

$$\begin{aligned} p_{cp} &= 2 \times (b + h) \\ &= 2 \times (400 + 700) \\ &= 2200 \text{ mm} \end{aligned}$$

- x_0

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

- y_0

$$\begin{aligned} &= h - 2c_c - d_s \\ &= 700 - 2 \times 40 - 10 \\ &= 610 \text{ mm} \end{aligned}$$

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

$$A_{oh} = x_0 \times y_0$$

$$= 310 \times 610$$

$$= 189100 \text{ mm}^2$$

- Luas bruto lingkup lintasan alir geser (A_o)
(SNI 2847:2019 pada Pasal 22.7.6.1.1)

$$A_o = 0,85 \times A_{oh}$$

$$= 0,85 \times 189100$$

$$= 160735 \text{ mm}^2$$

- Keliling garis pusat tulangan torsi (p_h)
(SNI 2847:2019 pada Pasal 22.7.6.1)

$$p_h = 2 \times (x_0 + y_0)$$

$$= 2 \times (310 + 610)$$

$$= 1840 \text{ mm}$$

- 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

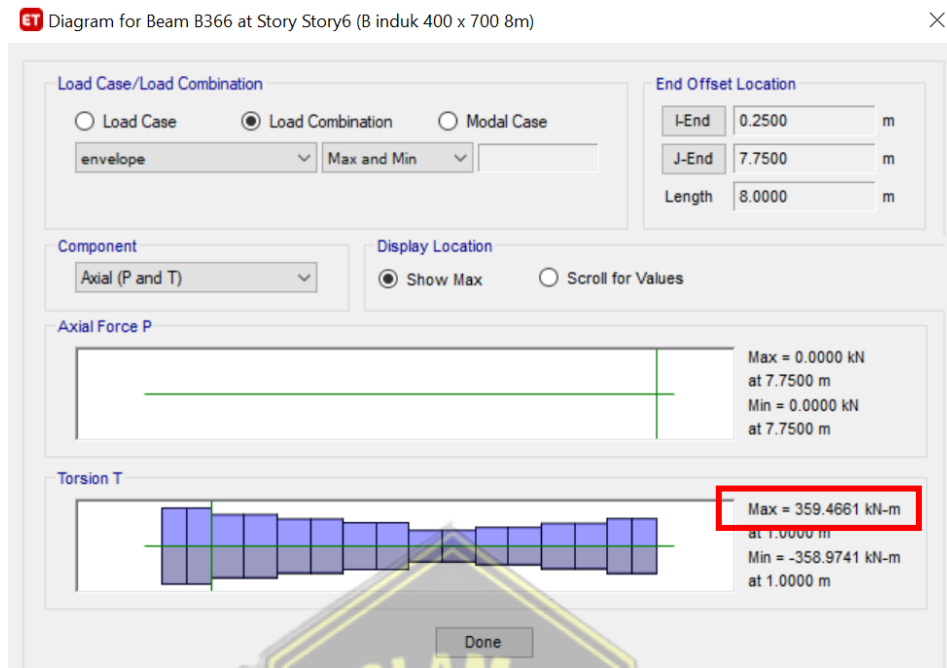
Gaya dalam berupa gaya torsi pada balok B1 yang didapat dari ETABS yang digunakan untuk mendesain tulangan torsi balok sebagai berikut:

$$T_u = 359,4661 \text{ kN-m}$$

$$= 359,4661 \times 10^6$$

$$= 359466100 \text{ N-mm}$$

Tampilan gaya torsi pada balok B1 yang didapat dari ETABS dapat dilihat pada Gambar 4.29.



Gambar 4. 19. Gaya Torsi Balok B1

3. Pengecekan Kebutuhan Tulangan Torsi

- Momen retak torsi (T_{cr})

$$\begin{aligned}
 T_{cr} &= 0,33 \times \sqrt{f_c} \times \frac{A_{cp}^2}{p_{cp}} \\
 &= 0,33 \times \sqrt{17} \times \frac{280000^2}{2200} \\
 &= 48487722 \text{ N-mm}
 \end{aligned}$$

- Faktor reduksi kuat torsi (ϕ)
(SNI 2847:2019 pada Tabel 21.2.1)

$$\phi = 0,75$$

- Kapasitas torsi tereduksi (ϕT_{cr})

$$\begin{aligned}
 \phi T_{cr} &= \phi \times T_{cr} \\
 &= 0,75 \times 48487722 \\
 &= 36365791,5 \text{ N-mm}
 \end{aligned}$$

- Cek perlu tulangan torsi :

(SNI 2847:2019 pada Tabel 22.7.4.1)

$$\text{Syarat} = T_u > \frac{1}{4} \phi T_{cr}$$

$$= 359466100 > \frac{1}{4} \times 363657912$$

$$= 359466100 > 9091448 \rightarrow \text{Perlu}$$

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)

$$T_{u \text{ pakai}} = \text{minimal } (\phi T_{cr} \text{ atau } T_u)$$

$$= \text{minimal } (36365792 \text{ atau } 359466100)$$

$$= 36365792 \text{ N-mm}$$

- Gaya geser ultimit (V_u)

$$V_u = V_{u \text{ tumpuan}}$$

$$= 259530 \text{ N}$$

- Kuat geser nominal beton (V_c)

(SNI 2847:2019 pada Pasal 22.5.5.1)

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

$$= 0,17 \times \sqrt{17} \times 400 \times 639$$

$$= 179157 \text{ N}$$

- Tegangan ultimit geser + torsi

(SNI 2847:2019 pada Tabel 22.7.7.1)

$$\text{Tegangan ultimit geser + torsi} = \sqrt{\left(\frac{V_u}{b \times d}\right)^2 + \left(\frac{T_u \times p_h}{1,7 \times A_{oh}^2}\right)^2}$$

$$= \sqrt{\left(\frac{259530}{400 \times 639}\right)^2 + \left(\frac{36365792 \times 1840}{1,7 \times 189100^2}\right)^2}$$

$$= 1,498 \text{ MPa}$$

- Kapasitas tegangan beton

(SNI 2847:2019 pada Tabel 22.7.7.1)

$$\text{Kapasitas tegangan beton} = \phi \times \left(\frac{V_c}{b \times d} + 0,66 \times \sqrt{f'_c}\right)$$

$$= \phi \times \left(\frac{179157}{400 \times 639} + 0,66 \times \sqrt{17}\right)$$

$$= 2,567 \text{ MPa}$$

- Cek dimensi penampang :

$$\sqrt{\left(\frac{V_u}{b \times d}\right)^2 + \left(\frac{T_u \times p_h}{1,7 \times A_{oh}^2}\right)^2} \leq \phi \times \left(\frac{V_c}{b \times d} + 0,66 \times \sqrt{f_c}\right)$$

$$2,567 \leq 2,498 \rightarrow \text{OK}$$

5. Penulangan Transversal Torsi

- Jumlah kaki (n)

$$n_{\text{tumpuan}} = 4$$

$$n_{\text{lapangan}} = 4$$

- Spasi tulangan (s)

$$s_{\text{tumpuan}} = 100 \text{ mm}$$

$$s_{\text{lapangan}} = 100 \text{ mm}$$

- Spasi maksimum (s_{max})

(SNI 2847:2019 pada Pasal 9.7.6.3.3)

$$s_{\text{max } 1} = \frac{1}{8} \times p_h = \frac{1}{8} \times 1840 = 230 \text{ mm}$$

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

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

$$= 230 \text{ mm}$$

- Cek spasi :

$$s_{\text{tumpuan}} < s_{\text{max}} = 100 < 230 \rightarrow \text{OK}$$

$$s_{\text{lapangan}} < s_{\text{max}} = 100 < 230 \rightarrow \text{OK}$$

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

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

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

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

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

$$= 4 \times \frac{1}{4} \times 3,14 \times 100$$

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

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

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

$$= \frac{314}{100}$$

$$= 3,14 \text{ mm}^2/\text{mm}$$

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

$$= (314) / 100$$

$$= 3,14 \text{ mm}^2/\text{mm}$$

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

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

$$= \frac{36365792}{2 \times 0,75 \times 160735 \times 420}$$

$$= 0,359 \text{ mm}^2/\text{mm}$$

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

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

$$= \left(\frac{259530}{0,75} - 0 \right) / (420 \times 639)$$

$$= 1,216 \text{ mm}^2/\text{mm}$$

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

$$= \left(\frac{218841}{0,75} - 179157 \right) / (420 \times 640,5)$$

$$= 0,413 \text{ mm}^2/\text{mm}$$

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

$$A_{v+t} / S \text{ tumpuan perlu} = 2 \times (A_t / s) + (A_v / S \text{ tumpuan perlu})$$

$$= 2 \times 0,359 + 1,216$$

$$= 2,008 \text{ mm}^2/\text{mm}$$

$$A_{v+t} / S \text{ lapangan perlu} = 2 \times (A_t / s) + (A_v / S \text{ lapangan perlu})$$

$$= 2 \times 0,359 + 0,413$$

$$= 1,131 \text{ mm}^2/\text{mm}$$

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

$$\begin{aligned}
 A_{v+t} / s_{\min 1} &= 0,062 \times \sqrt{f_c'} \times \frac{b}{f_y} \\
 &= 0,062 \times \sqrt{17} \times \frac{400}{420} \\
 &= 0,243 \text{ mm}^2/\text{mm}
 \end{aligned}$$

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

$$\begin{aligned}
 A_{v+t} / s_{\min} &= \text{maksimum } (A_{v+t} / s_{\min 1} \text{ atau } A_{v+t} / s_{\min 2}) \\
 &= 0,333 \text{ mm}^2/\text{mm}
 \end{aligned}$$

- Cek geser + torsi :

$$\begin{aligned}
 A_{v+t} / s_{\text{tumpuan pasang}} &\geq \text{maksimum } (A_{v+t} / s_{\text{perlu}} \text{ atau } A_{v+t} / s_{\min}) \\
 2,008 &\geq \text{maksimum } (0,243 \text{ atau } 0,333) \\
 2,008 &\geq 0,333 \rightarrow \text{OK}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 A_{v+t} / s_{\text{lapangan pasang}} &\geq \text{maksimum } (A_{v+t} / s_{\text{perlu}} \text{ atau } A_{v+t} / s_{\min}) \\
 1,131 &\geq \text{maksimum } (0,243 \text{ atau } 0,333) \\
 1,131 &\geq 0,333 \rightarrow \text{OK}
 \end{aligned}$$

6. Penulangan Longitudinal Torsi

- Diameter tulangan pinggang (d_b)

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

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

(SNI 2847:2019 pada Pasal 9.7.5.2)

$$\begin{aligned}
 d_{b \min} &= 0,042 s \\
 &= 0,042 \times \text{maksimum } (s_{\text{tumpuan}} \text{ atau } s_{\text{lapangan}}) \\
 &= 0,042 \times 100 \\
 &= 4,2 \text{ mm}
 \end{aligned}$$

- Cek d_b :

$$\begin{aligned}
 \text{Syarat} &= d_b \geq d_{b \min} \\
 &= 10 \geq 4,2 \rightarrow \text{OK}
 \end{aligned}$$

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

$$A_s \text{ perlu tumpuan atas} = 2040,162 \text{ mm}^2$$

$$A_s \text{ perlu tumpuan bawah} = 459,427 \text{ mm}^2$$

$$A_s \text{ perlu lapangan atas} = 563,360 \text{ mm}^2$$

$$A_s \text{ perlu lapangan bawah} = 1276,917 \text{ mm}^2$$

- Luas tulangan longitudinal torsi (A_l)

(SNI 2847:2019 pada Pasal 22.7.6.1)

$$\begin{aligned} A_l &= (A_t / s) \times p_h \\ &= 0,359 \times 1840 \\ &= 660.785 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

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

(SNI 2847:2019 pada Pasal 9.6.4.3)

$$\begin{aligned} A_{l \text{ min}} &= 0,42 \times \sqrt{f_c} \times \frac{A_{cp}}{f_y} - \left(\frac{A_t}{s}\right) \times p_h \\ &= 0,42 \times \sqrt{17} \times \frac{280000}{420} - 0,359 \times 1840 \\ &= 493,685 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

- Luas tulangan longitudinal (A_s)

$$\begin{aligned} A_s &= \text{maksimum } (A_l \text{ atau } A_{l \text{ min}}) \\ &= \text{maksimum } (660.785 \text{ atau } 493,685) \\ &= 660,785 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

- Luas tulangan longitudinal torsi perlu ($A_l \text{ perlu}$)

$$\begin{aligned} A_l \text{ perlu tumpuan} &= A_s \text{ perlu tumpuan atas} + A_s \text{ perlu tumpuan bawah} \\ &+ A_s \\ &= 2040,162 + 459,427 + 660,785 \\ &= 3160,373 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} A_l \text{ perlu lapangan} &= A_s \text{ perlu lapangan atas} + A_s \text{ perlu lapangan bawah} \\ &+ A_s \\ &= 563,360 + 1276,917 + 660,785 \\ &= 2501,061 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

- Jumlah tulangan negatif (n)

$$n \text{ tumpuan atas} = 6$$

$$n \text{ tumpuan tengah} = 4 \text{ (angka kelipatan 2)}$$

$$n \text{ tumpuan bawah} = 6$$

$$n \text{ tumpuan vertikal} = 2 + n \text{ tumpuan tengah} / 2$$

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

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

$$\begin{aligned}
 \text{Minimal } n_{\text{tumpuan}} &= \text{minimal } (n_{\text{tumpuan atas}} \text{ atau } n_{\text{tumpuan bawah}}) \\
 &= \text{minimal } (6 \text{ atau } 4) \\
 &= 4
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Minimal } n_{\text{lapangan}} &= \text{minimal } (n_{\text{lapangan atas}} \text{ atau } n_{\text{lapangan bawah}}) \\
 &= \text{minimal } (6 \text{ atau } 4) \\
 &= 4
 \end{aligned}$$

- Spasi tumpuan (s_{tumpuan})

$$\begin{aligned}
 S_{\text{horizontal tumpuan}} &= \frac{b - 2c_c - 2d_s - d_b}{\min(n_{\text{atas}} \text{ atau } n_{\text{bawah}}) - 1} \\
 &= \frac{400 - 2 \times 40 - 2 \times 10 - 22}{4 - 1} \\
 &= 56 \text{ mm}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 S_{\text{vertikal tumpuan}} &= \frac{h - 2c_c - 2d_s - d_b}{n_{\text{vertikal}} - 1} \\
 &= \frac{700 - 2 \times 40 - 2 \times 10 - 22}{4 - 1} \\
 &= 193
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 S_{\text{tumpuan}} &= \text{maksimum } (s_{\text{horizontal}} \text{ atau } s_{\text{vertikal}}) \\
 &= \text{maksimum } (56 \text{ atau } 193) \\
 &= 193
 \end{aligned}$$

- Spasi lapangan (s_{lapangan})

$$\begin{aligned}
 S_{\text{horizontal lapangan}} &= \frac{b - 2c_c - 2d_s - d_b}{\min(n_{\text{atas}} \text{ atau } n_{\text{bawah}}) - 1} \\
 &= \frac{400 - 2 \times 40 - 2 \times 10 - 22}{4 - 1} \\
 &= 56 \text{ mm}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 S_{\text{vertikal lapangan}} &= \frac{h - 2c_c - 2d_s - d_b}{n_{\text{vertikal}} - 1}
 \end{aligned}$$

$$= \frac{700 - 2 \times 40 - 2 \times 10 - 22}{4 - 1}$$

$$= 193$$

S lapangan = maksimum (s horizontal atau s vertikal)

= maksimum (56 atau 193)

$$= 193$$

- Cek spasi tulangan longitudinal :

$$S_{\text{tumpuan}} \leq 300 \quad = 193 \leq 300 \rightarrow \text{OK}$$

$$S_{\text{lapangan}} \leq 300 \quad = 193 \leq 300 \rightarrow \text{OK}$$

- Luas tulangan longitudinal (A_s)

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

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

$$= 4875,752 \text{ mm}^2$$

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

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

$$= 4875,752 \text{ mm}^2$$

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

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

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

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

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

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

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

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

$$A_s \text{ tumpuan} + A_{l \text{ pasang}} \text{ tumpuan} = 4875,752 + 314$$

$$= 5189,751 \text{ mm}^2$$

$$A_s \text{ lapangan} + A_{l \text{ pasang}} \text{ lapangan} = 4875,752 + 314$$

$$= 5189,751 \text{ mm}^2$$

- Cek lentur + torsi :

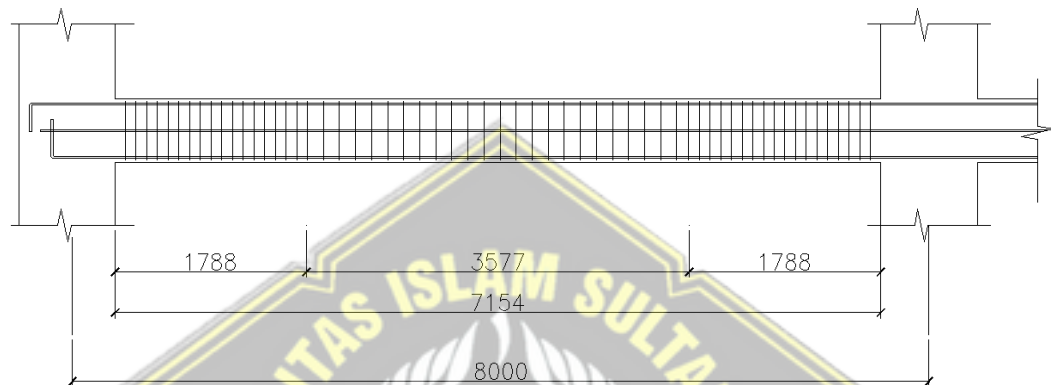
$$A_s \text{ tumpuan} + A_l \text{ pasang tumpuan} \geq A_s + A_l \text{ perlu tumpuan}$$

$$5189,751 \geq 3821,158 \rightarrow \text{OK}$$

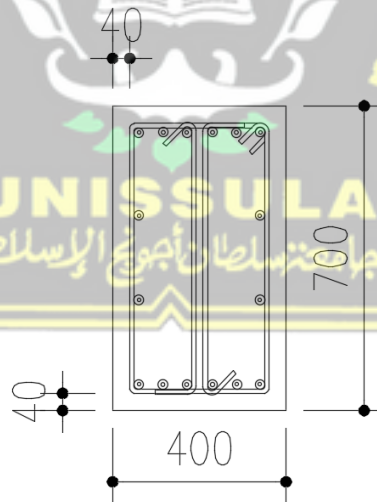
$$A_s \text{ lapangan} + A_l \text{ pasang lapangan} \geq A_s + A_l \text{ perlu lapangan}$$

$$5189,751 \geq 3161,846 \rightarrow \text{OK}$$

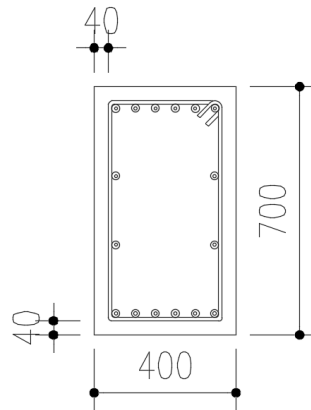
Gambar tulangan balok B1 yang didapat berdasarkan perhitungan di atas dapat dilihat pada Gambar 4.20 sampai Gambar 4.21.



Gambar 4. 20. Potongan Memanjang Balok



Gambar 4. 21. Tulangan Tumpuan Balok



Gambar 4. 22. Tulangan Lapangan Balok

4.5.2.5.Rekapitulasi Hasil Tulangan Balok

Dari hasil perhitungan terdapat rekapitulasi tulangan balok yang dapat dilihat pada Tabel 4.39 di bawah ini.

Tabel 4. 39. Rekapitulasi Tulangan Balok

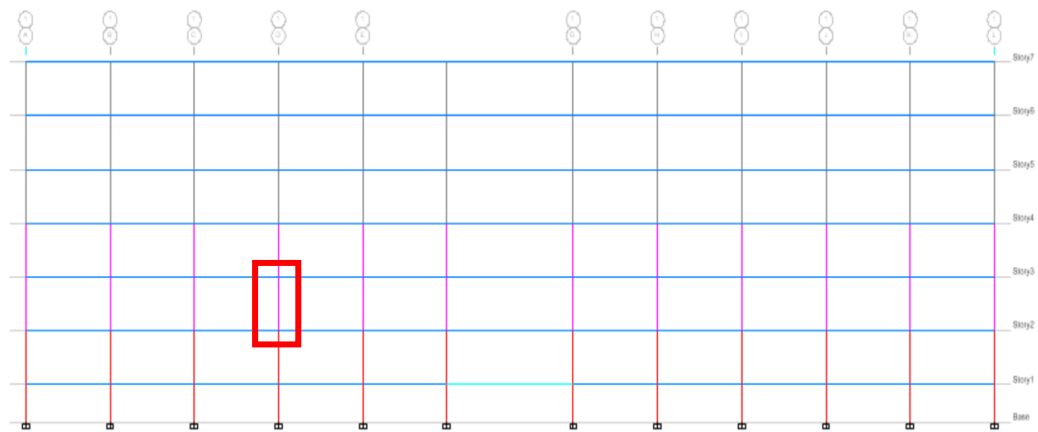
Balok Kode	Dimensi (cm)	Lokasi	Tulangan Longitudinal		Tulangan Transversal		Tul. Torsi
			Tumpuan	Lapangan	Tumpuan	Lapangan	
G1	400 × 70	Atas	6 D22	6 D22	4D10-100	4D10-100	2 D10
		Tengah	4 D22	4 D22			
		bawah	6 D22	6 D22	4D10-100	4D10-100	

4.5.3. Perancangan Kolom

Desain dimensi penampang kolom harus mampu menahan gaya momen dan gaya geser sehingga diperlukan analisis kapasitas desain kolom. Diagram interaksi Pn-M kolom juga disertakan dalam analisis kapasitas desain kolom untuk mengetahui kapasitas kolom terhadap gaya aksial yang menumpunya.

4.5.3.1. Properti Material dan Penampang

Tipe kolom yang akan digunakan sebagai contoh perhitungan adalah kolom K1 pada tingkat pertama yang ditunjukkan Gambar 4.33.



Gambar 4. 23. Denah Kolom K1 Sampel

Tinggi kolom (L)	= 4200 mm
Dimensi ($b \times h$)	= 500 x 500 mm
Luas penampang (A_g)	= 250000 mm ²
Tebal selimut bersih (c_c)	= 40 mm
Diameter tulangan longitudinal (d_b)	= 22 mm
Diameter tulangan sengkang (d_s)	= 16 mm
Tinggi efektif kolom (d)	= $b - c_c - d_s - d_b/2$ = $600 - 40 - 16 - 22/2$ = 533 mm
Kuat tekan beton (f'_c)	= 17 MPa
Kuat leleh baja tulangan (f_y)	= 420 MPa
Faktor reduksi kekuatan (ϕ)	= 0,65 (SNI 2847:2019 Tabel 21.2.1)
Momen kapasitas balok (M_{nb+})	= 532,510 kNm
Momen kapasitas balok (M_{nb-})	= 532,740 kNm

4.5.3.2. 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 = 1863,0534 kN
- P_u kolom desain = 5043,6292 kN
- V_u kolom desain = 2090,3125 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

$$\text{Syarat} \quad = b \geq 300 = 500 \geq 300 \rightarrow \text{OK}$$

- b) Rasio dimensi penampang tidak kurang dari 0,4

$$\text{Syarat} \quad = \frac{b}{h} \geq 0,4 = \frac{500}{500} \geq 0,4 = 1 \geq 0,4 \rightarrow \text{OK}$$

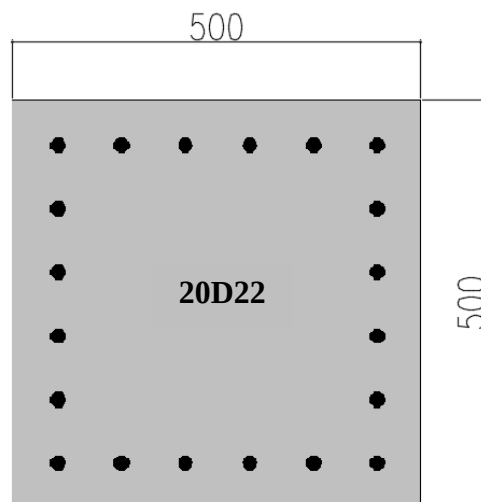
3. Cek syarat komponen struktur tahan gempa

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

$$\begin{aligned} \text{Syarat} \quad &= P_u \leq 0,3 A_g \times f_c' \\ &= 5043,6292 \leq 0,3 \times 250000 \times 17 \times 10^{-3} \\ &= 5043,6292 \leq 1275 \rightarrow \text{OK} \end{aligned}$$

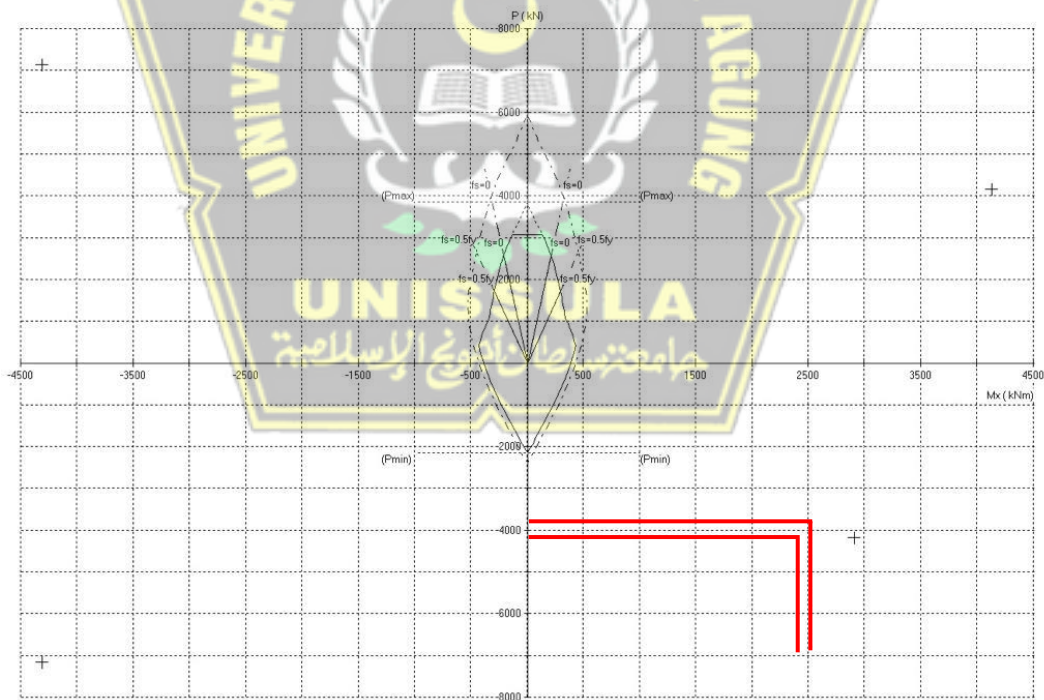
4. Menentukan tulangan longitudinal penahan lentur

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 4.24.



Gambar 4. 24. 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 4.25 dan Tabel 4.38.



Gambar 4. 25. Diagram Interaksi P_n-M_{pr} *SPColumn* Kolom K1

$$\begin{aligned}
 0,01 A_g &= 0,01 \times 250000 \\
 &= 2500 \text{ mm}^2
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
0,06 A_g &= 0,06 \times 250000 \\
&= 15000 \text{ mm}^2 \\
A_{st} &= n \times 1/4 \times \pi \times D^2 \\
&= 20 \times 1/4 \times 3,14 \times 22^2 \\
&= 7598,8 \text{ mm}^2 \\
\text{Syarat} &= 0,01 A_g < A_{st} < 0,06 A_g \\
&= 2500 < 7598,8 < 15000 \rightarrow \text{OK}
\end{aligned}$$

4.5.3.3. 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 $= 4000 / 6 = 666,67 \text{ mm}$
- b. Dimensi maksimum kolom $= 500 \text{ mm}$
- c. 450 mm

Jadi, jarak ℓ_o digunakan 500 mm

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

- a. $1/4$ dimensi komponen struktur minimum $= 500 / 4 = 125 \text{ mm}$
- b. $6D = 6 \times 22 = 132 \text{ mm}$
- c. s_o , tidak melebihi 150 mm dan tidak kurang dari 100 mm

$$s_o = 100 + \frac{350 - 0,33 (500 - 2 \times 40 - 2(16) - 2)}{3} = 174,206 \text{ mm}$$

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})

$$b_{c1} = h - (2 \times c_c) = 500 - (2 \times 40) = 420 \text{ mm}$$

- Lebar penampang inti beton yang tertekan (b_{c2})

$$b_{c2} = b - (2 \times c_c) = 500 - (2 \times 40) = 420 \text{ mm}$$

- Luas penampang inti beton (A_{ch})

$$A_{ch} = b_{c1} \times b_{c2} = 420 \times 420 = 176400 \text{ mm}^2$$

- Faktor kekuatan beton (k_f)

$$k_f = \frac{f'_c}{175} + 0,6 = \frac{17}{175} + 0,6 = 0,697 \rightarrow \text{minimal } 1$$

- Faktor efektivitas pengeangan (k_n)

$$k_n = \frac{n_i}{n_i - 2} = \frac{22}{22 - 2} = 1,1$$

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

$$\begin{aligned} A_{sh1} &= 0,3 \times \left(\frac{A_g}{A_{ch}} - 1 \right) \times \frac{f'_c}{f_{yt}} \\ &= 0,3 \times \left(\frac{250000}{176400} - 1 \right) \times \frac{17}{420} \\ &= 0,00507 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} A_{sh2} &= 0,09 \times \frac{f'_c}{f_{yt}} \\ &= 0,09 \times \frac{17}{420} \\ &= 0,0036 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} A_{sh3} &= 0,2 \times k_f \times k_n \times \frac{P_u}{f_{yt} \times A_{ch}} \\ &= 0,2 \times 1 \times 1,1 \times \frac{5043,6292 \times 10^3}{420 \times 176400} \\ &= 0,015 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{A_{sh}}{s} &= b_c \times A_{sh \text{ max}} \\ &= 420 \times 0,015 \\ &= 6,3 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} A_{sh} &= s \times \frac{A_{sh}}{s} \\ &= 100 \times 6,3 \\ &= 630 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

Maka dapat digunakan Sengkang (*hoop*) 6D16-100

$$A_s \text{ pasang} = 6 \text{ kaki} \times 1/4 \times 3,14 \times 16^2 = 1205,76 \text{ mm}^2$$

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

$$= 1205,76 > 630 \text{ mm}^2 \rightarrow \text{OK}$$

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:

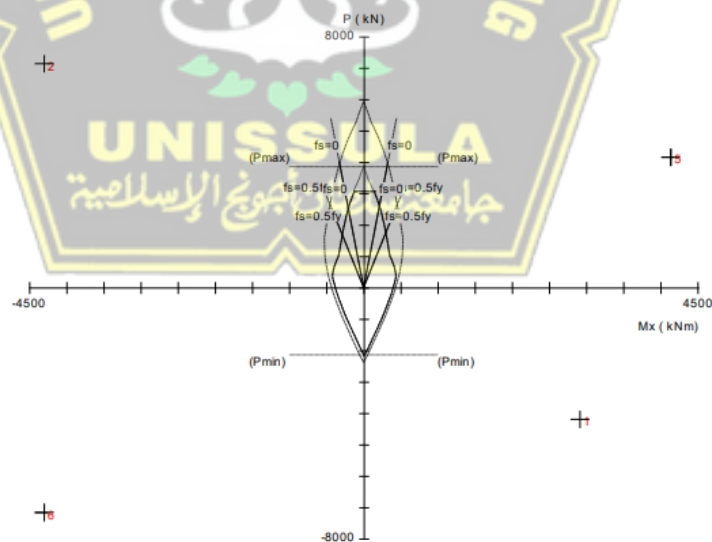
a. $6D = 6 \times 22 = 132 \text{ mm}$

b. 150 mm

Maka $s_{\max} = 100 \text{ mm}$ dan dapat digunakan spasi (s) = 100 mm sepanjang sisa kolom bersih.

2. Analisis Gaya Geser Desain Tulangan Sengkang Kolom

Analisi 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 4.26 dan Tabel 4.40.



Gambar 4. 26. Diagram Interaksi P_n - M SPColumn Kolom K1 dengan $1,25 f_y$

- Probable Moment of Column (M_{prc})

$$M_{prc} = 4306 \text{ kNm}$$

- Tinggi bersih kolom (L_n)

$$\begin{aligned} L_n &= \text{Tinggi Kolom} - \text{Tinggi Balok} \\ &= 4200 - 700 \\ &= 3500 \text{ mm} \\ &= 3,5 \text{ m} \end{aligned}$$

- Probable Moment of Beam ($M_{pr b}$)

$$M_{pr b \text{ atas}} = 2090313 \text{ Nmm} = 2,090 \text{ kNm}$$

$$M_{pr b \text{ bawah}} = 1965969 \text{ Nmm} = 1,966 \text{ kNm}$$

$$\begin{aligned} \Sigma M_{pr b} &= 2,090 + 1,966 \\ &= 4,056 \text{ kNm} \end{aligned}$$

- Faktor distribusi kolom (D_f)

$$D_f = 0,5 \text{ (atas dan bawah dianggap sama)}$$

- Faktor reduksi geser (ϕ)

$$\phi = 0,75$$

- Gaya geser desain (V_e)

$$\begin{aligned} V_{e1} &= \frac{M_{pr c \text{ atas}} + M_{pr c \text{ bawah}}}{L_n} \\ &= \frac{2,090 + 1,966}{3,5} \\ &= 1,17 \text{ kN} \end{aligned}$$

V_e tidak perlu melebihi dari:

$$\begin{aligned} V_{e2} &= \frac{\Sigma M_{pr b} \times D_{f \text{ atas}} + \Sigma M_{pr b} \times D_{f \text{ bawah}}}{L_n} \\ &= \frac{4,056 \times 0,5 + 4,056 \times 0,5}{3,5} \\ &= 1,16 \text{ kN} \end{aligned}$$

- 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:

$$V_s = \frac{V_u}{\phi} = \frac{1,16}{0,75} = 1,547 \text{ kN}$$

$$\frac{A_v}{s} = \frac{1,547}{f_y \times d} = \frac{1,547}{420 \times 533} = 6,91 \text{ mm}^2/\text{mm}$$

- Untuk $s = 100 \text{ mm}$, maka:

$$A_v = \frac{A_v}{s} \times 100 = 6,91 \times 100 = 691,06 \text{ mm}^2/\text{mm}$$

- Cek $A_{sh} > A_v$

$$\begin{aligned}\text{Syarat} &= A_{sh} > A_v \\ &= 630 > 691,06 \rightarrow \text{TIDAK OKE}\end{aligned}$$

Digunakan 6 D16-100 untuk sengkang tertutup dan ikat silang dengan $A_{sh} = 630 \text{ mm}^2$.

3. Menghitung nilai V_c daerah di luar ℓ_0

(SNI 2847:2019 Pasal 22.5.6.1)

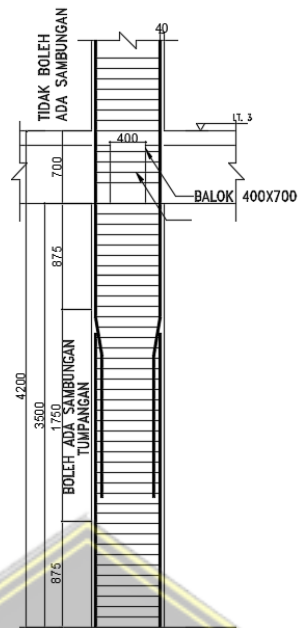
$$\begin{aligned}V_c &= 0,17 \times \left(1 + \frac{P_u}{14A_g}\right) \times \lambda \times \sqrt{f'_c} \times b_w \times d \\ &= 0,17 \times \left(1 + \frac{5043,6292 \times 10^3}{14 \times 250000}\right) \times 1 \times \sqrt{17} \times 500 \times 533 \\ &= 455,979 \text{ kN}\end{aligned}$$

Karena $V_c > V_u$ ($V_u = 105,08 \text{ kN}$) maka daerah di luar ℓ_0 dipasang tulangan sengkang dengan jarak:

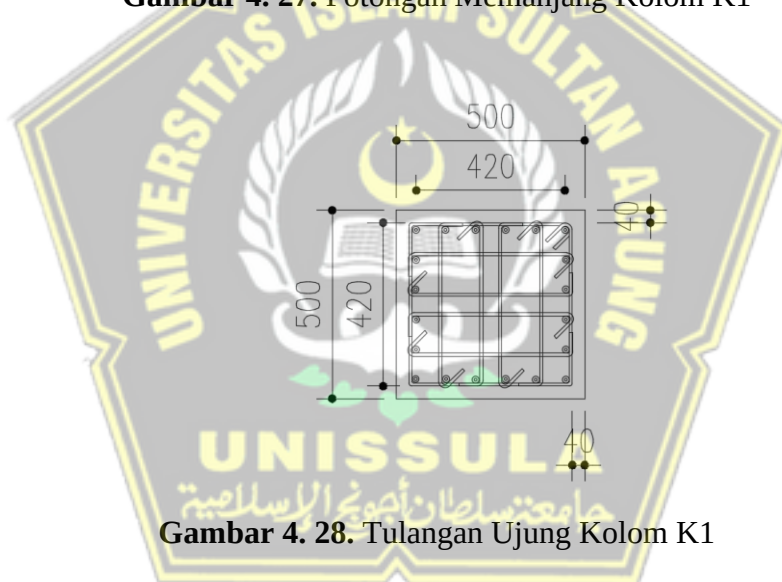
$$s = \frac{d}{2} = \frac{533}{2} = 266,5 \text{ mm}$$

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.

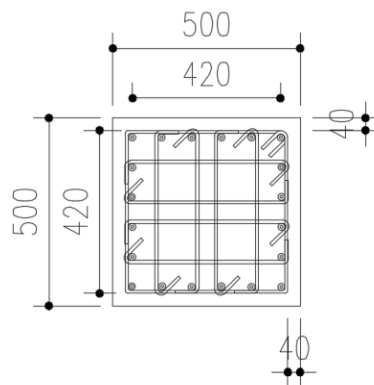
Berikut adalah gambar dari hasil perhitungan ditunjukkan pada Gambar 4.27 sampai Gambar 4.29.



Gambar 4. 27. Potongan Memanjang Kolom K1



Gambar 4. 28. Tulangan Ujung Kolom K1



Gambar 4. 29. Tulangan Tengah Kolom K1

4.5.3.4.Rekapitulasi Hasil Tulangan Kolom

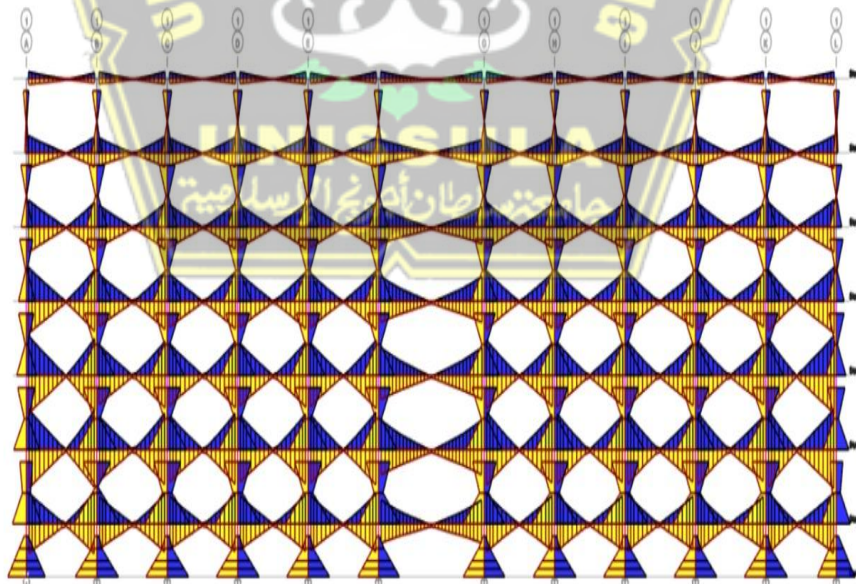
Dari hasil perhitungan tulangan pada semua tipe kolom yang telah dilakukan, berikut adalah rekapitulasi hasil tulangan kolom ditunjukkan pada Tabel 4.41.

Tabel 4. 40. Rekapitulasi Tulangan Kolom

No	Tipe Kolom	Dimensi Kolom	Tulangan Pokok	Tulangan Geser	
				Tumpuan	Lapangan
1	K2	500 × 500	20 D22	6 D16-100	6 D16-100

4.6. Perhitungan FRP

Hasil dari output yang telah didapatkan secara otomatis dari software ETABS V.18 dapat diketahui gaya-gaya yang bekerja pada setiap struktur kolom dan balok. Namun untuk mengetahui kolom dan balok yang kita desain tersebut aman atau tidak perlu dihitung tiap batang apakah struktur yang dibuat aman ketika menerima beban. Karena *frame* atau batang terlalu banyak dan membutuhkan waktu untuk memperhitungkannya maka perlu analisis kembali menggunakan *software* ETABS V.18 sehingga hasilnya dapat dilihat sesuai pada Gambar 5.1.

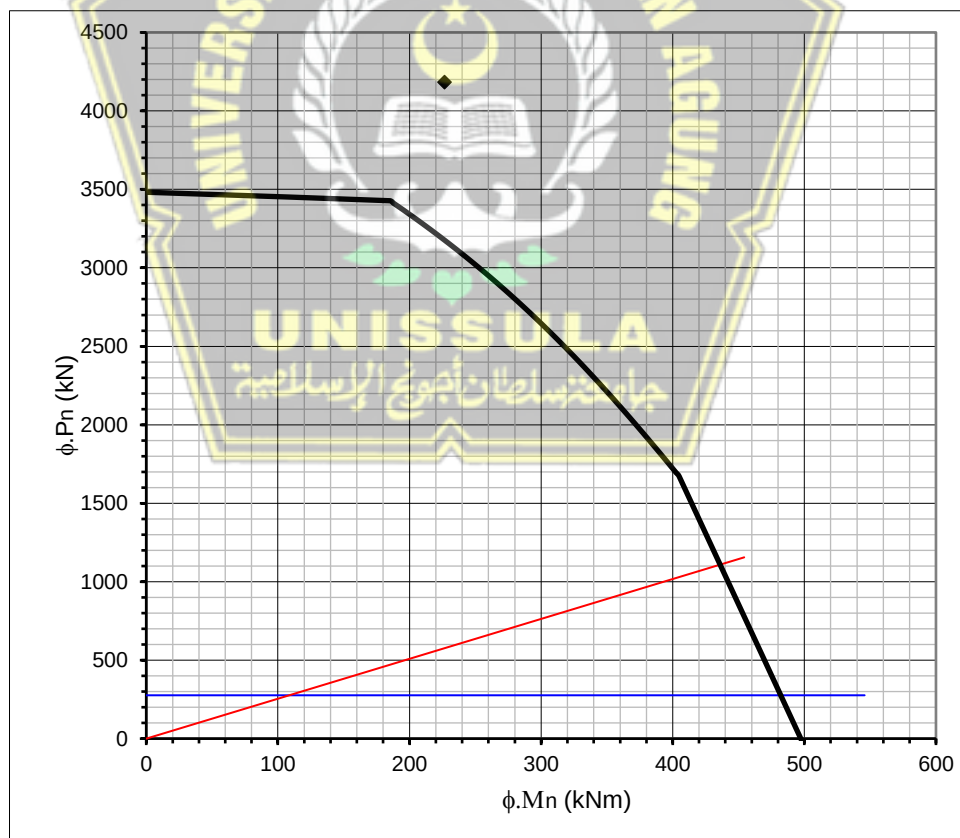


Gambar 4. 30. Identifikasi Kegagalan Kolom

setelah diketahui bagian struktur yang perlu diperkuat dengan menggunakan sistem FRP jenis CFRP maka perlu analisis kembali apabila sudah diperkuat. Untuk menganalisisnya dimodelkan secara 2D guna memudahkan dalam proses analisis dan perhitungan. Proses analisis ini mengacu pada Peraturan RSNI 3 *Pedoman Perancangan dan Pelaksanaan Sistem Serat Berperekat Polimer Terlekat Eksternal Untuk Struktur Beton*.

4.7. Analisis Kekuatan Kolom Beton Bertulang Menggunakan CFRP

Sebelum menganalisa sebuah perkuatan bangunan yang menggunakan perkuatan jenis CFRP, perlu adanya analisis kembali tentang penyebab kegagalan pada suatu struktur tersebut. Kegagalan struktur tersebut gagal ketika menerima gaya geser, momen, atau normal (*aksial*). Karena penanganan untuk tiap kegagalan yang terjadi berbeda dan analisis yang digunakan juga berbeda satu sama lain. Berikut Gambar 4.31 Hasil Analisis Kolom Dengan Diagram Interaksi



Gambar 4. 31. Analisis Kolom Dengan Diagram Interaksi

Berikut data input kolom pada diagram interaksi dapat dilihat pada Tabel 4.41 dibawah ini.

Tabel 4. 41. Input Data Kolom Pada Diagram Interaksi

Kuat tekan beton	$f_c' = 17 \text{ MPa}$
Tegangan leleh baja	$f_y = 420 \text{ MPa}$
Lebar kolom	$b = 500 \text{ mm}$
Tinggi kolom	$h = 500 \text{ mm}$
Tebal brutto selimut beton	$d_s = 40 \text{ mm}$
Jumlah tulangan dan diameter tulangan	Tulangan 20 D 22 mm
Beban aksial	$P_u = 4183,508 \text{ kN}$
Momen	$M_u = 226,600 \text{ kNm}$

Jenis CFRP yang digunakan dalam analisis ini berasal dari produk Shanghai Horse Construction tipe HM-60 dengan karakteristik yang dapat dilihat pada Tabel 4.42 berikut.

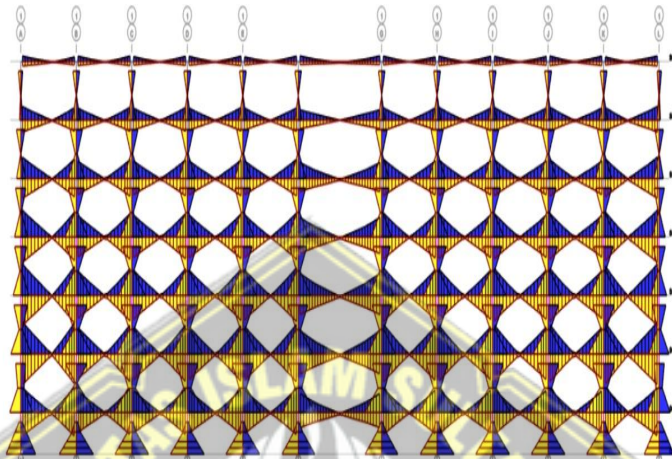
Tabel 4. 42. Detail CFRP HM-60

Kekuatan Tegangan Tarik Ultimate (f_{tu})	4100 MPa
Modulus Elastisitas (E)	$2,4 \times 10^5 \text{ MPa}$
Regangan (ASTM D3039)	0,016
Kekuatan Lentur (ASTM D7264)	1000 MPa
Kekuatan Geser (ASTM D2344)	80 MPa
Daya Lekat Beton Dengan FRP	$\geq 2,5$,kohesi dengan beton
Massa Jenis	$1,8 \text{ g/cm}^3$
Tebal CFRP (t_f)	0,333 mm

Sumber: www.horsen.com

4.7.1. Perkuatan Pada Kolom Menggunakan CFRP

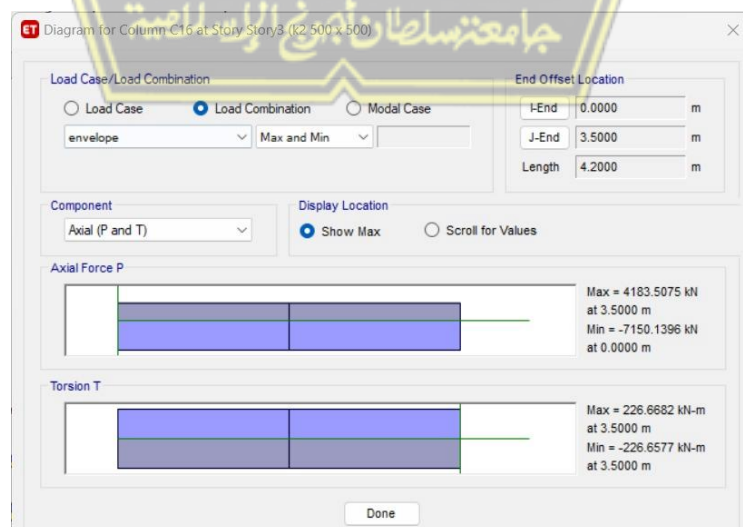
Perencanaan desain pada gedung ini menggunakan kolom segi empat. Namun, hasil *output* dari *software* ETABS V18 ternyata terjadi kegagalan struktur pada geser kolom yang menggunakan segi empat tepatnya pada kolom K11. Detail pada kolom dapat dilihat pada Gambar 5.4.



Gambar 4. 32. Detail Kolom yang Digunakan

4.7.1.1. Analisa Perkuatan Kolom K16

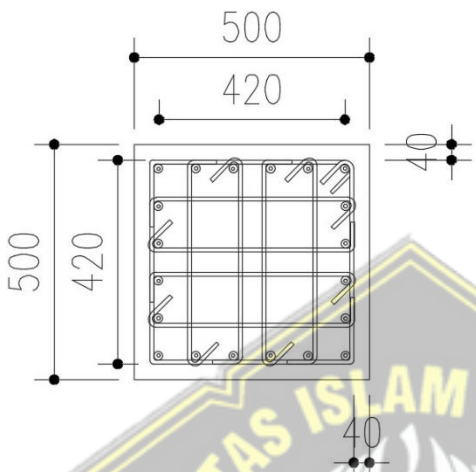
Setelah diketahui bagian struktur yang perlu perkuatan maka dilakukan perhitungan untuk mengetahui berapa lapis CFRP yang nantinya digunakan dalam perkuatan. Letak kolom yang membutuhkan perkuatan dapat dilihat pada Gambar 5.4.



Gambar 4. 33. Kolom K16 Yang Mengalami Kegagalan

Bagian yang akan dianalisis untuk contoh perhitungan perkuatan FRP jenis CFRP pada Gambar 5.5 adalah kolom C16 yang terletak pada base dikarenakan pada bagian tersebut memiliki gaya terbesar.

Tabel 4. 43. Detail Penampang Kolom K16

	$f_c = 17 \text{ MPa}$
	$f_y = 420 \text{ MPa}$
	Tulangan 20 D 22
	$A_g = 250000 \text{ mm}^2$
	$A_{st} = 7598,80 \text{ mm}^2$
	$T_f = 0,33$
	$E_c = 19378,596$
	$E_f = 227527$
	$\phi = 0,95$
	$n_f = 6$

Contoh Perhitungan Perkuatan Aksial dan Lentur Kolom Base C16

- a. Langkah 1 Menghitung Sifat Material Desain Sistem FRP
CFRP yang digunakan berdasarkan Tabel 5.1

$$\begin{aligned}
 f_{fu} &= C_E \times f_{fu}^* \\
 &= 0,95 \times 3792 \\
 &= 3602,4 \text{ Mpa}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \varepsilon_{fu} &= C_E \varepsilon_{fu}^* \\
 &= 0,95 \times 0,0167 \\
 &= 0,0159 \text{ Mpa}
 \end{aligned}$$

- b. Tekanan Tegangan Pengengkang karena selubung FRP f_l

$$\begin{aligned}
 \frac{A_e}{A_c} &= \frac{1 - \frac{[\left(\frac{b}{h}\right)(h-2r_c)^2 + \left(\frac{b}{h}\right)(b-2r_c)^2]}{3 A_g} - P_g}{1 - P_g} \\
 &= \frac{1 - \frac{[\left(\frac{500}{500}\right)(500-2.25)^2 + \left(\frac{500}{500}\right)(500-2.25)^2]}{3.250000}}{1 - 0,0265} - 0,0265 \\
 &= 0,45
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 K_a &= \frac{A_e}{A_c} \left(\frac{b}{h}\right)^2 \\
 &= 0,45 \left(\frac{500}{500}\right)^2 \\
 &= 0,45
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \varepsilon_{fe} &= K_a \varepsilon_{fu} \\
 &= 0,45 \cdot 0,0167 \\
 &= 0,008
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 D &= \sqrt{500^2 + 500^2} \\
 &= 707,107 \text{ mm}^2
 \end{aligned}$$

c. Langkah Menghitung Variabel Model Kekangan Beton

$$\begin{aligned}
 f_l &= \frac{2 \cdot E_f \cdot n \cdot t_f \cdot \varepsilon_{fe}}{D} \\
 &= \frac{2 \times 227527 \times 6 \times 0,33 \times 0,008}{707,107} \\
 &= 9,576 \text{ Mpa}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 f'_{cc} &= f_c + \Psi_f 3,3 \times K_a \times f_l \\
 &= 17 + 0,95 \times 3,3 \times 0,45 \times 9,576 \\
 &= 30,51 \text{ Mpa}
 \end{aligned}$$

$$\frac{f_l}{f_c} \geq 0,08$$

$$\frac{9,576}{17} \geq 0,08$$

$$0,56 \geq 0,08 \text{ (Ok)}$$

d. Verifikasi Regangan Aksial Ultimit Beton $\varepsilon_{ccu} \leq 0,01$

$$\begin{aligned}
 K_b &= \frac{A_e}{A_c} \left(\frac{b}{h}\right)^2 \\
 &= 0,45 \left(\frac{500}{500}\right)^2 \\
 &= 0,45
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \varepsilon_{ccu} &= \varepsilon_c [1,5 + 12 K_b \frac{f_l}{f_c} \left(\frac{\varepsilon_{fe}}{\varepsilon_c}\right)^{0,45}] \\
 &= 0,002 [1,5 + 12 \times 0,45 \cdot 0,56 \left(\frac{0,008}{0,002}\right)^{0,45}] \\
 &= 0,00413 \leq 0,01 \text{ (OKE)}
 \end{aligned}$$

e. Penentuan Kurva yang diperkuat

- Kapasitas Nominal Aksial di Titik A

$$\phi P_{n(A)} = \phi 0,80 (0,85 f_{cc} (A_g - A_{st}) + f_y A_{st})$$

$$\begin{aligned}
&= 0,95 \cdot 0,80 (0,85 \cdot 30,51 \cdot (250000 - 7598,80) + (420 \cdot 7598,80)) \\
&= 7202972,09 \text{ MPa} \\
&= 7202,97 \text{ kN}
\end{aligned}$$

- Kapasitas Nominal Aksial di Titik B

$$\begin{aligned}
E_c &= 4700 \sqrt{f_c} \\
&= 4700 \sqrt{17} \\
&= 19378,6 \text{ Mpa}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
c &= b - s - \frac{1}{2} \times d \\
&= 500 - 40 - \frac{1}{2} \times 22 \\
&= 449
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
E_2 &= \frac{f'_c - f'_{cc}}{\epsilon_{ccu}} \\
&= \frac{17 - 30,51}{0,00413} \\
&= 3270,94
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
A &= \frac{-b(E_c - E_2)^2}{12f'_c} \left(\frac{\epsilon_{ccu}}{c} \right)^2 \\
&= \frac{-500 \cdot (19378,5964 - 3270,94)^2}{12 \cdot 17} \left(\frac{0,004}{449} \right)^2 \\
&= -0,054 \text{ N/mm}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
B &= \frac{b(E_c - E_2)}{2} \left(\frac{\epsilon_{ccu}}{c} \right) \\
&= \frac{500(19378,5964 - 3270,94)}{2} \left(\frac{0,004}{449} \right)
\end{aligned}$$

$$= 37,040 \text{ kN/mm}$$

$$\begin{aligned}
C &= -bcf'_c \\
&= -500 \cdot 17 \\
&= -8500 \text{ kN/mm}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
D &= bcf'_c + \frac{(bcE_2)}{2} (\epsilon_{ccu}) \\
&= 500 \cdot 449 \cdot 17 + \frac{(500 \cdot 449 \cdot 3270,94)}{2} (0,004)
\end{aligned}$$

$$= 5332881,641 \text{ N/mm}$$

$$\begin{aligned} E &= \frac{-b(E_c - E_2)^2}{16f'_c} \left(\frac{\epsilon_{ccu}}{c} \right)^2 \\ &= \frac{-500 \cdot (19378,5964 - 3270,94)^2}{16 \cdot 17} \left(\frac{0,004}{449} \right)^2 \\ &= -0,040 \text{ N/mm} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} F &= b \left(c - \frac{h}{2} \right) \frac{(E_c - E_2)^2}{12f'_c} \left(\frac{\epsilon_{ccu}}{c} \right)^2 + b \frac{(E_c - E_2)}{3} \left(\frac{\epsilon_{ccu}}{c} \right) \\ &= 500 \left(449 - \frac{500}{2} \right) \frac{(19378,5964 - 3270,94)^2}{12 \cdot 17} \left(\frac{0,004}{449} \right)^2 + 500 \frac{(19378,5964 - 3270,94)}{3} \left(\frac{0,004}{449} \right) \\ &= 35,401 \text{ N/mm} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} G &= -\left(\frac{b}{2} f'_c + b \left(c - \frac{h}{2} \right) \frac{(E_c - E_2)}{2} \left(\frac{\epsilon_{ccu}}{c} \right) \right) \\ &= -\left(\frac{500}{2} 17 + 500 \left(449 - \frac{500}{2} \right) \frac{(19378,5964 - 3270,94)}{2} \left(\frac{0,004}{449} \right) \right) \\ &= -11621,048 \text{ N/mm} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} H &= b f'_c \left(c - \frac{h}{2} \right) \\ &= 500 \cdot 17 \left(449 - \frac{500}{2} \right) \\ &= 1691500 \text{ N/mm} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} I &= \frac{bc^2}{2} f'_c + bc f'_c \left(c - \frac{h}{2} \right) + \frac{(bc^2 E_2)}{3} (\epsilon_{ccu}) - \frac{(bc E_2)}{2} \left(c - \frac{h}{2} \right) (\epsilon_{ccu}) \\ &= \frac{500 \cdot 449^2}{2} 17 + 500 \cdot 449 \cdot 17 \left(449 - \frac{500}{2} \right) + \\ &\quad \frac{(500 \cdot 449^2 \cdot 3270,94)}{3} (0,004) - \frac{(500 \cdot 449 \cdot 3270,94)}{2} \left(449 - \frac{500}{2} \right) (0,004) \\ &= 301021350,5 \text{ N/mm} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \epsilon'_t &= \frac{2f'_c}{E_c - E_2} \\ &= \frac{2 \cdot 17}{19378,5964 - 3270,94} \\ &= 0,002 \text{ mm} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 y_t &= c \frac{\varepsilon'_t}{\varepsilon_{ccu}} \\
 &= 449 \frac{0,002}{0,004} \\
 &= 229,479 \text{ mm}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 A_{S1} &= \text{jumlah tulangan} \times A_s \\
 &= 6 \cdot 379,94 \\
 &= 2279,64 \text{ mm}^2
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 A_{S2} &= \text{jumlah tulangan} \times A_s \\
 &= 4 \cdot 379,94 \\
 &= 1519,76 \text{ mm}^2
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 A_{S3} &= \text{jumlah tulangan} \times A_s \\
 &= 4 \cdot 379,94 \\
 &= 1519,76 \text{ mm}^2
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 A_{S4} &= \text{jumlah tulangan} \times A_s \\
 &= 6 \cdot 379,94 \\
 &= 2279,64 \text{ mm}^2
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \Sigma A_s &= A_{S1} + A_{S2} + A_{S3} + A_{S4} \\
 &= 2279,64 + 1519,76 + 1519,76 + 2279,64 \\
 &= 7598,8 \text{ mm}^2
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 d_{\text{tulangan}} &= \frac{h-2s}{3} \\
 &= \frac{500-2 \cdot 4}{3} \\
 &= 165,867 \text{ mm}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 d_1 &= s + \frac{1}{2} \phi \\
 &= 40 + \frac{1}{2} 22 \\
 &= 51 \text{ mm}
 \end{aligned}$$

$$d_2 = d_{\text{tulangan}} + s$$

$$= 165,867 + 40$$

$$= 205,867 \text{ mm}$$

$$d_3 = 2d_{\text{tulangan}} + s$$

$$= 2 \cdot 165,867 + 40$$

$$= 371,733 \text{ mm}$$

$$d_4 = h - s - \frac{1}{2} \emptyset$$

$$= 500 - 40 - \frac{1}{2} 22$$

$$= 449 \text{ mm}$$

$$\epsilon_{s1} = \epsilon_{ccu} \frac{h-d1}{h}$$

$$= 0,004 \frac{500-51}{500}$$

$$= 0,004 \text{ mm}$$

$$\epsilon_{s2} = \epsilon_{ccu} \frac{h-d2}{h}$$

$$= 0,004 \frac{500-205,867}{500}$$

$$= 0,002 \text{ mm}$$

$$\epsilon_{s3} = \epsilon_{ccu} \frac{h-d3}{h}$$

$$= 0,004 \frac{500-371,733}{500}$$

$$= 0,001 \text{ Nmm}$$

$$\epsilon_{s4} = 0$$

$$f_{s1} = E_s \cdot \epsilon_{s1}$$

$$= 200000 \cdot 0,004$$

$$= 741,748 \text{ MPa}$$

$$f_{s2} = E_s \cdot \epsilon_{s2}$$

$$= 200000 \cdot 0,002$$

$$= 485,908 \text{ MPa}$$

$$f_{s3} = E_s \cdot \epsilon_{s3}$$

$$= 200000 \cdot 0,001$$

$$= 0,000 \text{ MPa}$$

$$A_{s1} \cdot f_{s1} = 2279,64 \cdot 420$$

$$= 957448,800 \text{ N}$$

$$A_{s2} \cdot f_{s2} = 1519,76 \cdot 420$$

$$= 638299,200 \text{ N}$$

$$A_{s3} \cdot f_{s3} = 1519,76 \cdot 2111,897$$

$$= 322031,875 \text{ N}$$

$$A_{s4} \cdot f_{s4} = 449 \cdot 0,000$$

$$= 322031,8750,000 \text{ N}$$

$$\Sigma A_{si} \cdot f_{si} \cdot d_i = A_{s1} f_{s1} d_1 + A_{s2} f_{s2} d_2 + A_{s3} f_{s3} d_3 + A_{s4} f_{s4} d_4$$

$$= 957448,800 + 638299,200 + 322031,875 + 0,000$$

$$= 1917779,875 \text{ N}$$

$$\phi M_{n(B)} = \phi [(E(y_t)^4 + F(y_t)^3 + G(y_t)^2 + H(y_t) + I) + \Sigma A_{si} f_{si} d_i]$$

$$= 0,95 [(-0,054(229,479)^4 + 3740(229,479)^3 +$$

$$-8500(229,479)^2 + 500(229,479) + 5332881,641) +$$

$$1917779,875]$$

$$= 6270447,742 \text{ Nmm}$$

$$= 6270,447742 \text{ Kn}$$

- Kapasitas Nominal Aksial di Titik C

$$\epsilon_{sy} = \frac{1,7 \cdot f_c}{E_c}$$

$$= \frac{1,7 \cdot 17}{19378,5964}$$

$$= 0,0015 \text{ mm}$$

$$c = d \frac{\epsilon_{ccu}}{\epsilon_{sy} + \epsilon_{ccu}}$$

$$= 449 \frac{0,004}{0,0015 + 0,004}$$

$$= 329,881 \text{ mm}$$

$$\begin{aligned} y_t &= c \frac{\varepsilon'_t}{\varepsilon_{ccu}} \\ &= 329,881 \frac{0,002}{0,004} \\ &= 168,598 \text{ mm} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} A &= \frac{-b(E_C - E_2)^2}{12f'_c} \left(\frac{\varepsilon_{ccu}}{c} \right)^2 \\ &= \frac{-500(19378,59644 - 3270,937)^2}{12.17} \left(\frac{0,004}{449} \right)^2 \\ &= -0,100 \text{ N/mm} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} B &= \frac{b(E_C - E_2)}{2} \left(\frac{\varepsilon_{ccu}}{c} \right) \\ &= \frac{500(19378,59644 - 3270,937)^2}{12.17} \left(\frac{0,004}{449} \right)^2 \\ &= 50,416 \text{ kN/mm} \\ C &= -bcf'_c \\ &= -500 \cdot 17 \\ &= -8500 \text{ kN/mm} \\ D &= bcf'_c + \frac{(bcE_2)}{2} (\varepsilon_{ccu}) \\ &= 500.329,881.17 + \frac{(500.329,881.3270,937)}{2} (0,004) \\ &= 3918072,301 \text{ N/mm} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} E &= \frac{-b(E_C - E_2)^2}{16f'_c} \left(\frac{\varepsilon_{ccu}}{c} \right)^2 \\ &= \frac{-500(19378,59644 - 3270,937)^2}{16.17} \left(\frac{0,004}{449} \right)^2 \\ &= -0,075 \text{ N/mm} \end{aligned}$$

$$F = b \left(c - \frac{h}{2} \right) \frac{(E_C - E_2)^2}{12f'_c} \left(\frac{\varepsilon_{ccu}}{c} \right)^2 + b \frac{(E_C - E_2)}{3} \left(\frac{\varepsilon_{ccu}}{c} \right)$$

$$= 500 \left(329,881 - \frac{500}{2} \right) \frac{(19378,59644 - 3270,937)^2}{12.17} \left(\frac{0,004}{449} \right)^2 +$$

$$b \frac{(19378,59644 - 3270,937)}{3} \left(\frac{0,004}{449} \right)$$

$$= 41,573 \text{ N/mm}$$

$$G = -\left(\frac{b}{2} f'_c + b \left(c - \frac{h}{2} \right) \frac{(E_c - E_2)}{2} \left(\frac{\epsilon_{ccu}}{c} \right) \right)$$

$$= -\left(\frac{500}{2} 17 + 500 \left(329,881 - \frac{500}{2} \right) \frac{(19378,59644 - 3270,937)^2}{12.17} \left(\frac{0,004}{449} \right)^2 \right)$$

$$= -8277,238 \text{ N/mm}$$

$$H = b f'_c \left(c - \frac{h}{2} \right)$$

$$= 500.17 \left(329,881 - \frac{500}{2} \right)$$

$$= 678985,526 \text{ N/mm}$$

$$I = \frac{b c^2}{2} f'_c + b c f'_c \left(c - \frac{h}{2} \right) + \frac{(b c^2 E_2)}{3} (\epsilon_{ccu}) - \frac{(b c E_2)}{2} \left(c - \frac{h}{2} \right) (\epsilon_{ccu})$$

$$= \frac{500.329,881^2}{2} 17 + 500 \cdot 329,881 \cdot 17 \left(329,881 - \frac{500}{2} \right) +$$

$$\frac{(500.329,881^2.3270,937)}{3} (0,004) - \frac{(500.329,881.3270,937)}{2} \left(329,881 - \frac{500}{2} \right) (0,004)$$

$$= 5220874379,7 \text{ N/mm}$$

$$\epsilon_{s1} = \epsilon_{ccu} \frac{h-d1}{h}$$

$$= 0,004 \frac{500-51}{500}$$

$$= 0,004 \text{ N/mm}$$

$$\epsilon_{s2} = \epsilon_{ccu} \frac{h-d2}{h}$$

$$= 0,004 \frac{500-205,867}{500}$$

$$= 0,002 \text{ N/mm}$$

$$\epsilon_{s3} = \epsilon_{ccu} \frac{h-d3}{h}$$

$$= 0,004 \frac{500-371,733}{500}$$

$$= 0,001 \text{ N/mm}$$

$$\epsilon_{s4} = \epsilon_{sy}$$

$$= 0,0015 \text{ N/mm}$$

$$f_{s1} = E_s \cdot \epsilon_{s1}$$

$$= 200000 \cdot 0,004$$

$$= 741,748 \text{ MPa}$$

$$f_{s2} = E_s \cdot \epsilon_{s2}$$

$$= 200000 \cdot 0,002$$

$$= 485,908 \text{ MPa}$$

$$f_{s3} = E_s \cdot \epsilon_{s3}$$

$$= 200000 \cdot 0,001$$

$$= 211,897 \text{ MPa}$$

$$f_{s4} = E_s \cdot \epsilon_{s4}$$

$$= 200000 \cdot -0,0015$$

$$= -298,267 \text{ MPa}$$

$$A_{s1} \cdot f_{s1} = 2279,64 \cdot 420$$

$$= 957448,800 \text{ N}$$

$$A_{s2} \cdot f_{s2} = 1519,76 \cdot 420$$

$$= 638299,200 \text{ N}$$

$$A_{s3} \cdot f_{s3} = 1519,76 \cdot 211,897$$

$$= -679941,875 \text{ N}$$

$$A_{s4} \cdot f_{s4} = 2279,64 \cdot -298,267$$

$$= -679941,875 \text{ N}$$

$$\Sigma A_{si} \cdot f_{si} \cdot d_i = A_{s1} f_{s1} d_1 + A_{s2} f_{s2} d_2 + A_{s3} f_{s3} d_3 + A_{s4} f_{s4} d_4$$

$$= 957448,800 + 638299,200 + -679941,875 + -679941,875$$

$$= 1237838,000 \text{ N}$$

$$P_n(C) = \phi[(A(y_t)^3 + B(y_t)^2 + C(y_t) + D) + \Sigma A_{si} f_{si} d_i]$$

$$= 0,95[(-0,100(168,598)^3 + 50,416(168,598)^2 + \\ -8500(168,598) + 3918072,3 + 520874379,7) + \\ 1237838,000]$$

$$= 4444304,295 \text{ kN}$$

$$= 444,304 \text{ kN}$$

$$\begin{aligned} A_{si} \cdot f_{si} \cdot d_i &= 957448,800 \cdot 51 \\ &= 48829888,8 \text{ Nmm} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} A_{si} \cdot f_{si} \cdot d_2 &= 638299,200 \cdot 205,867 \\ &= 131404529 \text{ Nmm} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} A_{si} \cdot f_{si} \cdot d_3 &= 322031,875 \cdot 371,733 \\ &= 119709983 \text{ Nmm} \end{aligned}$$

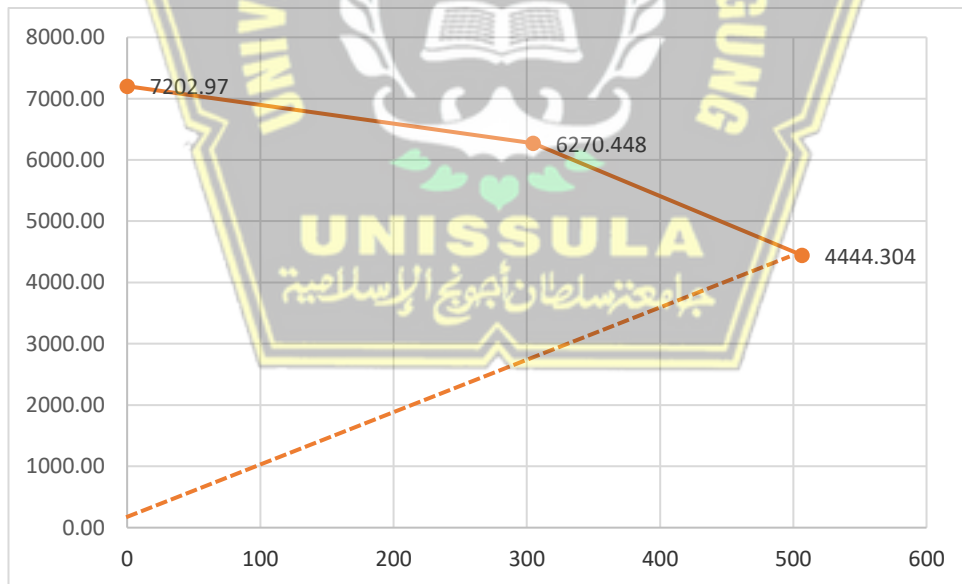
$$\begin{aligned} A_{si} \cdot f_{si} \cdot d_4 &= 1237838,000 \cdot 449 \\ &= -305293902 \text{ Nmm} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Sigma A_{si} \cdot f_{si} \cdot d_i &= A_{S1} f_{s1} d_1 + A_{S2} f_{s2} d_2 + A_{S3} f_{s3} d_3 + A_{S4} f_{s4} d_4 \\ &= 48829888,8 + 131404529 + 119709983 + -305293902 \\ &= -5349501,95 \text{ Nmm} \end{aligned}$$

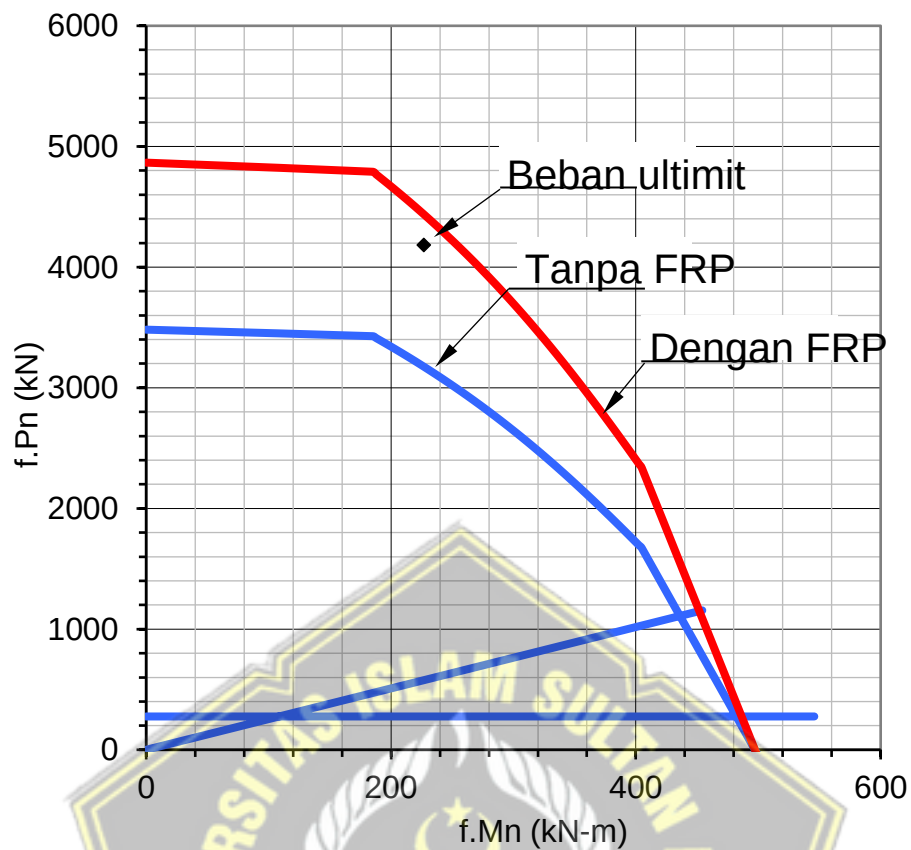
$$\begin{aligned} \phi M_{n(C)} &= \phi [(E(y_t)^4 + F(y_t)^3 + G(y_t)^2 + H(y_t) + I) + \Sigma A_{si} f_{si} d_i] \\ &= 0,95 [(-0,075(168,598)^4 + 41,573(168,598)^3 + \\ &\quad -8277,238(168,598)^2 + 678985,526(168,598) + \\ &\quad 520874379,7) + -5349501,95] \\ &= 506603913,6 \text{ N.mm} \\ &= 506,604 \text{ kN.m} \end{aligned}$$

Tabel 4. 44. Uraian Perhitungan

URAIAN PERHITUNGAN	PERSAMAAN	UNIT
Gaya-gaya internal pada masing - masing baja tulangan :	$F_{si} = A_{si} * f_{si} * 10^{-3}$	kN
Resultan gaya internal baja tulangan :	$C_s = [F_{si}] * 10^{-3}$	kN
Momen akibat gaya internal masing-masing baja tulangan :	$M_{si} = F_{si} * (h/2 - d_i)$	kNmm
	$M_s = M_{si}$	kNmm
Tinggi blok tegangan tekan beton,	$a = \beta_1 * c$	mm
Gaya internal pada beton tekan :	$C_c = 0.85 * f'_c * b * a * 10^{-3}$	kN
Momen akibat gaya internal tekan beton :	$M_c = C_c * (h - a) / 2$	kNmm
Gaya aksial nominal :	$P_n = C_s + C_c$	kN
Momen nominal :	$M_n = (M_c + M_s) * 10^{-3}$	kNm
Gaya aksial rencana :	$P_u = M_n * P_n$	kN
Momen rencana :	$M_u = P_u * M_n$	kNm

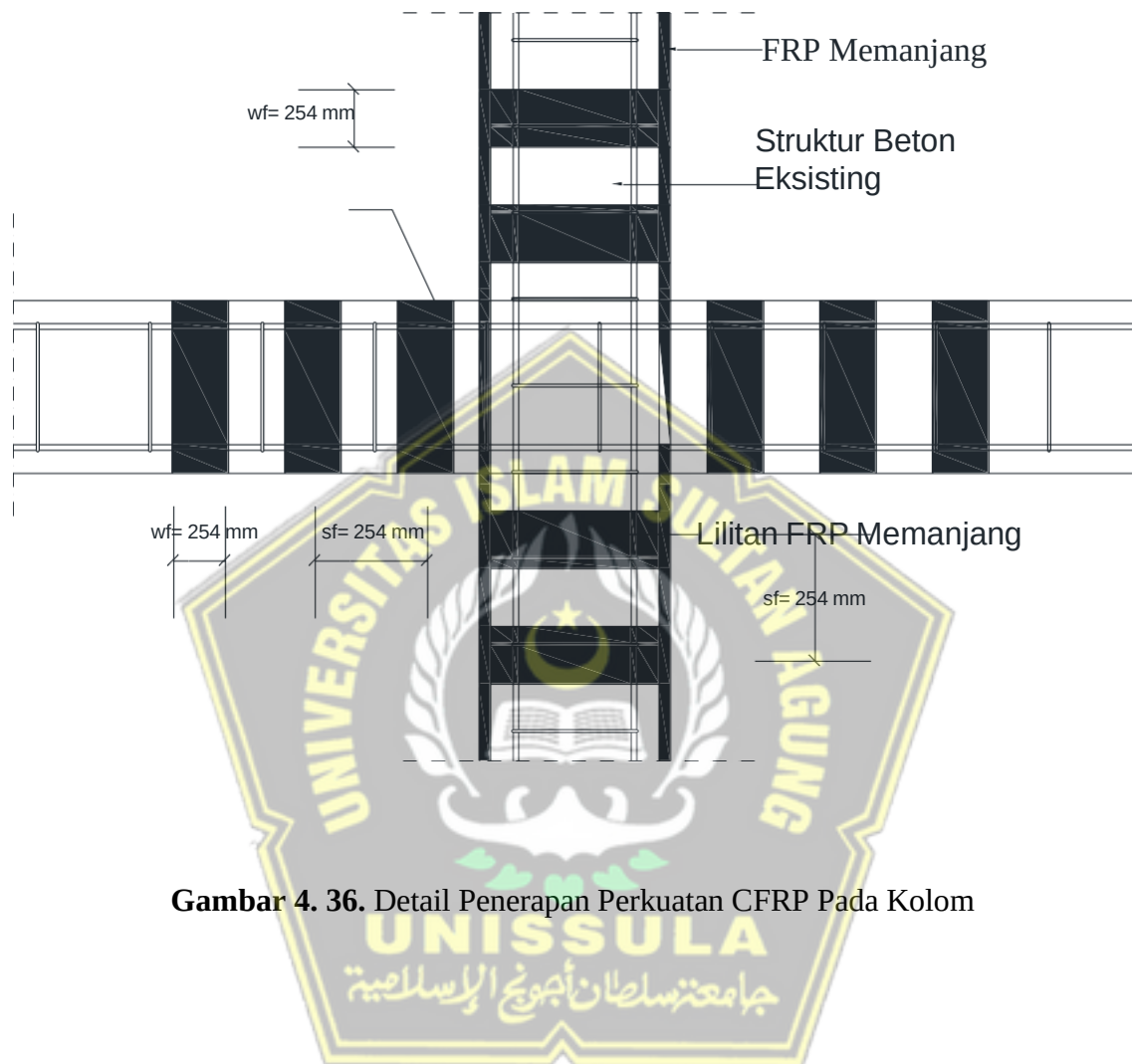


Gambar 4. 34. Diagram Kapasitas Nominal Aksial Dan Lentur



Gambar 4. 35. Diagram Interaksi Kolom Dengan FRP

Dari hasil analisa perhitungan diatas yang didapat dapat disimpulkan bahwa penggunaan *Carbon Fiber Reinforced Polymer* (CFRP) pada perencanaan desain untuk perkuatan struktur apabila terjadi kegagalan geser, aksial dan momen dengan lapis CFRP menjadikan bagian struktur tersebut akan menjadi lebih kuat sehingga aman dalam menerima gaya dengan dimensi serta mutu yang sama.



Gambar 4. 36. Detail Penerapan Perkuatan CFRP Pada Kolom

BAB V PENUTUP

Dalam penyusunan laporan Tugas Akhir, kesimpulan dan saran mengenai hasil perhitungan dari analisis perkuatan gedung ini akan diuraikan secara singkat dan jelas. Data yang diperlukan pada kesimpulan dan saran dapat dilihat pada lampiran – lampiran.

5.1. Kesimpulan

Melalui proses analisa dan perhitungan, yang telah dibahas pada laporan Tugas Akhir ini yang berjudul “SISTEM PERKUATAN STRUKTUR MENGGUNAKAN *CARBON FIBER REINFORCED POLYMER* (CFRP) PADA GEDUNG 7 LANTAI” dapat disimpulkan sebagai berikut:

1. Menggunakan Struktur Sistem Ganda Sistem Rangka Pemikul Momen Khusus (SRPMK).
2. Analisa ketidakberaturan struktur:
 - Tidak terjadi ketidakberaturan horizontal pada gedung yang di desain.
 - Tidak terjadi ketidakberaturan vertikal pada gedung yang di desain.
3. Hasil perancangan struktur atas:
 - Dari hasil analisis desain struktur gedung yang dibuat dengan bantuan ETABS V 18 terdapat bagian struktur yang mengalami kegagalan pada struktur kolom.
 - Untuk kegagalan kolom terjadi kegagalan pada gaya aksial dan gaya momen yang terlalu besar sehingga mengalami kehancuran.
 - Pada struktur kolom setelah dilapisi menggunakan CFRP kapasitas gaya yang dimiliki untuk kapasitas gaya aksial kolom sebesar $P_n \text{ kN}_{(A)} = 4183,508 \text{ kN}$, serta untuk kapasitas gaya momen sebesar $M_n \text{ kN.m}_{(A)} = 226,660 \text{ kN.m}$.
 - Lapisan yang diperlukan untuk kolom membutuhkan sebanyak 6 lapis CFRP.
 - Analisa struktur terhadap beban dinamik (gempa) terhitung masih aman karena sudah memenuhi syarat sesuai acuan SNI 1726 2019 dan SNI 2847 2019.

5.2. Saran

Berdasarkan proses pengerjaan yang dilakukan penulis pada saat melakukan analisis desain ini, ada beberapa saran agar pengembangan dalam laporan Tugas Akhir Sistem Perkuatan Struktur Kolom Menggunakan (*Carbon Fiber Reinforced Polymer*) CFRP yaitu :

- a. Peraturan yang dipakai pada analisis perkuatan ini mengacu pada RSNI 3 “Pedoman Perancangan dan Pelaksanaan Sistem Serat Berperekat Polimer Terlekat Eksternal Untuk Struktur Beton”. Oleh karena itu, diharapkan dapat menggunakan acuan perhitungan yang *up to date*.
- b. Dalam pendesainan dengan menggunakan *software* ETABS perlu dilakukan secara teliti agar hasil yang didapat sesuai.
- c. Alangkah baiknya dalam pengerjaan Tugas Akhir ini penulis lebih banyak belajar mengenai sistem perkuatan untuk struktur beton bertulang.



DAFTAR PUSTAKA

- Arifudzaky, S., & Andhika, T. (2020). *Tugas Akhir Desain Perkuatan Struktur Menggunakan CFRP (Carbon Fiber Reinforced Polymer)*. Universitas Sultan Agung Semarang
- Budiono, Bambang dkk. (2017). *Contoh Desain Bangunan Tahan Gempa*. Bandung: ITB Press.
- Fadli, M. H. (2015). *Aplikasi ETABS pada Perancangan Gedung 15 Lantai dengan Struktur Beton Bertulang Menggunakan Sistem Ganda (Dual System) Sebagai Penahan Beban Gempa Sesuai Standard Code SNI 1726:2012*. Jakarta, Indonesia.
- 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, Rozy 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).
- 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)*. (Vol. 2019).
- Reza, Alif Muhammad. (2021, 13 Januari). *Penulangan Balok*. 8 Minutes Learn, <https://youtu.be/iWj6L-jefoU>
- Reza, Alif Muhammad. (2021, 27 Januari). *Penulangan Dinding Geser*. 8 Minutes Learn, <https://youtu.be/OvmMcXg0hVU>
- Reza, Alif Muhammad. (2022, 1 September). *Desain Penulangan Lentur Pelat*. 8 Minutes Learn, <https://youtu.be/q7AhrEsfZOE>
- Setiawan, Agus. (2020, 16 Juli). *Desain Kolom SRPMK #1 Sesuai SNI Beton Terbaru*. Agus Setiawan, https://youtu.be/Uyu_sS2Ixpw
- Setiawan, Agus. (2020, 29 Juli). *Bagaimana Cara Mendesain Kolom SRPMK ? #2 Contoh Soal*. Agus Setiawan, <https://youtu.be/GEF6-xvf3Ks>
- Sofian, A., & Arrosyid, A. (2019). *Analisis Perbandingan Sistem Ganda dan Sistem Rangka Pemikul Khusus pada Desain Struktur Gedung Asrama Mahasiswa Unimus di Semarang*.