

TUGAS AKHIR

SISTEM PERKUATAN STRUKTUR MENGGUNAKAN *CARBON FIBER REINFORCED POLYMER (CFRP)* PADA GEDUNG 4 LANTAI

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



Disusun Oleh :

Rizky Bayu Saputra

NIM : 30201900188

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

TUGAS AKHIR

SISTEM PERKUATAN STRUKTUR MENGGUNAKAN CARBON FIBER REINFORCED POLYMER (CFRP) PADA GEDUNG 4 LANTAI

Diajukan untuk Memenuhi Persyaratan dalam Menyelesaikan

Program Sarjana Program Studi Teknik Sipil

Fakultas Teknik Universitas Islam Sultan Agung



Disusun Oleh :

Rizky Bayu Saputra

NIM : 30201900188

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

2023

**SISTEM PERKUATAN STRUKTUR MENGGUNAKAN
CARBON FIBER REINFORCED POLYMER (CFRP) PADA
GEDUNG 4 LANTAI**



Rizky Bayu Saputra

NIM : 30201900188

Telah disetujui dan disahkan di Semarang 20 Januari 2023

Tim Penguji

Tanda Tangan

1. **Prof. Dr. Ir. Antonius, M.T**

NIDN : 060546703

2. **Muhamad Rusli Ahyar, S.T., M.Eng**

NIDN : 0625059102

3. **Ir. H. Prabowo Setiyawan, M.T., Ph.D.**

NIDN : 0607046802

Ketua Program Studi Teknik Sipil

Fakultas Teknik

Universitas Islam Sultan Agung

Muhamad Rusli Ahyar, S.T., 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:

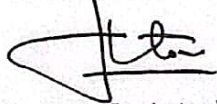
Rizky Bayu Saputra
NIM : 30201900188

Judul : Sistem Perkuatan Struktur Menggunakan *Carbon Fiber Reinforced Polymer* (CFRP) Pada Gedung 4 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 : Rizky Bayu Saputra

NIM : 30201900188

Dengan ini menyatakan bahwa Tugas Akhir yang berjudul :

“Sistem Perkuatan Struktur Menggunakan *Carbon Fiber Reinforced Polymer* (CFRP) Pada Gedung 4 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, 23 Januari 2023

Yang membuat pernyataan

Rizky Bayu Saputra

NIM : 30201900188

PERNYATAAN KEASLIAN

Saya yang bertanda tangan dibawah ini :

NAMA : Rizky Bayu Saputra
NIM : 30201900188
JUDUL TUGAS AKHIR : Sistem Perkuatan Struktur Menggunakan *Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP)* Pada Gedung 4 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, 23 Januari 2023

Yang membuat pernyataan,







METERA
TEMPEL
AA24EAKX205840453

Rizky Bayu Saputra

NIM : 30201900188

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)

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

(Bill Gates)

“Allah akan meninggikan orang-orang yang beriman diantaramu dan orang-orang yang diberi ilmu pengetahuan beberapa derajat”

(Q.S. Al-Mujadalah ayat 11)

“Dan Dia bersama kamu di mana saja kamu berada. Dan Allah Maha Melihat apa yang kamu kerjakan.”

(Q.S Al-Hadid: 4)

"Tanpa tindakan, pengetahuan tidak ada gunanya dan pengetahuan tanpa tindakan itu sia-sia"

(Abu Bakar Ash-Shiddiq)

"Aku tidak menganggapmu berhasil dalam suatu pencapaian tertentu hingga Allah mengujimu dengan cobaan terakhirnya"

(Utsman bin Affan)

“Lakukan yang terbaik, sehingga aku tak akan menyalahkan diriku sendiri atas segalanya”

(Magdalena Neuner)

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 saya Suyamto dan Ibu saya Suhartini, 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. Kedua kakak saya, Tri Lestari dan Sugeng Riyadi, S.P, atas semua dukungan yang telah diberikan.
5. Sahabat sekaligus teman mengerjakan laporan tugas akhir saya Alfian Nur Hidayat dan Aldy Gilang Pradika, terimakasih atas waktu dan semangatnya sehingga dapat menyelesaikan tugas akhir ini.
6. Olifah Putri, terimakasih atas semangat yang telah diberikan.
7. Semua teman-teman Fakultas Teknik Sipil UNISSULA angkatan 2019, terimakasih atas semua bantuan, perhatian dan semangatnya.

Rizky Bayu Saputra

NIM : 30201900188

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 *Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP)* Pada Gedung 4 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 M. Rusli Ahyar, ST., M.Eng selaku Ketua Program Studi Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Islam Sultan Agung Semarang.
2. 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.
3. 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.
4. Seluruh Dosen Program Studi Teknik Sipil UNISSULA yang telah memberikan ilmunya kepada penulis
5. 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, Desember 2022

Penulis

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL.....	i
HALAMAN PENGESAHAN.....	ii
DAFTAR ISI.....	ix
DAFTAR TABEL.....	xiv
DAFTAR GAMBAR.....	xvii
DAFTAR NOTASI.....	xix
DAFTAR LAMPIRAN.....	xxx
ABSTRAK.....	xxxi
 BAB I PENDAHULUAN.....	 1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	3
1.3 Tujuan.....	3
1.4 Batasan Masalah.....	3
1.5 Manfaat Penelitian.....	3
1.6 Sistematika Tugas Akhir	3
 BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	 5
2.1 Tinjauan Umum.....	7
2.2 Kolom	7
2.3 Balok.....	11
2.4 FRP (<i>Fiber Reinforced Polymer</i>).....	12
2.4. Sistem Penghamparan Basah (<i>Wet Lay-up</i>).....	13
2.5. Sistem Praimpregnasi	14
2.6. Sistem Prarawat (<i>Precured</i>)	14
2.7. Sistem Pemasangan Perkuatan Dangkal	14
2.5 Material penyusun.....	15
2.5.1 Resin	15
2.5.2 Serat	15

2.5.3	Lapisan Pelindung.....	15
2.6.	Massa Jenis Material FRP.....	16
2.7.	Pengaruh Suhu Terhadap Material FRP	16
2.8.	Pencampuran Resin.....	17
2.9.	Perilaku Tarik	18
2.10.	Perilaku Sistem Tekan FRP	19
2.11.	Perilaku Berdasarkan Fungsi Waktu.....	19
2.11.1.	Runtuh Rangkak	19
2.11.2.	Fatik	19
2.11.3.	Keruntuhan Rangkak dan Batasan Tegangan Fatik.....	19
2.12.	Desain Perkuatan Menggunakan CFRP.....	20
2.13.	Faktor Lingkungan Untuk Sistem FRP.....	21
2.14.	Perkuatan Lentur Dengan Menggunakan FRP	24
2.14.1.	Pola Keruntuhan	24
2.15.	Perkuatan Beton Bertulang Dengan Menggunakan FRP.....	26
2.15.1.	Kekuatan Geser.....	26
2.15.2.	Regangan	29
2.15.3.	Tegangan Di Dalam Perkuatan FRP	31
2.16.	Gaya Tekan Aksial Murni.....	31
2.15.1.	Penampang Lingkaran	33
2.15.2.	Penampang Non Lingkaran	33
BAB III METODOLOGI.....		36
3.1	Pendahuluan.....	36
3.2	Data Proyek Yang Diperoleh	36
3.3	Aturan Pada Standar Desain Perencanaan	37
3.4	Pembebanan Struktur Gedung	37
3.4.1.	Beban Mati.....	37
3.4.2.	Beban Hidup	37
3.4.3.	Beban Gempa.....	37
3.5	Permodelan Desain Struktur	39
3.6	Input Beban.....	41

3.7	Bagan Alur Desain CFRP	43
3.7.1.	Bagan Alur Perencanaan Desain CFRP Pada Kolom Akibat Kegagalan Aksial.....	45
3.7.2.	Bagan Alur Perencanaan Desain CFRP Pada Balok Akibat Kegagalan Aksial.....	46
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN		47
4.1.	Data Struktur Gedung	47
4.1.1.	Deskripsi Umum Struktur.....	47
4.1.2.	Perencanaan Awal Dimensi Struktur (<i>Preliminary Design</i>)	49
4.2.	Permodelan Elemen Struktur.....	49
4.2.1.	Permodelan Pelat	50
4.2.2.	Permodelan Balok.....	50
4.2.3.	Permodelan Kolom	50
4.3.	Permodelan Struktur	51
4.5.1.	Permodelan	51
4.4.	Pembebanan Struktur.....	54
4.4.1.	Pembebanan Gravitasi	54
4.4.2.	Pembebanan Gempa	55
4.4.3.	Kombinasi Pembebanan Struktur	59
4.5.	Pengecekan Perilaku Struktur Bangunan	61
4.5.1.	Rasio Partisipasi Massa	61
4.5.2.	Perhitungan Faktor Skala Gempa	62
4.5.2.1.	Perhitungan Koefisien Respon Seismik.....	62
4.5.2.2.	Perhitungan Faktor Skala Gaya	63
4.5.3.	Pengecekan Gaya Geser.....	65
4.5.4.	Pengecekan Simpangan Antar Tingkat.....	66
4.5.5.	Pengecekan P-Delta	69
4.5.6.	Pengecekan Eksentrisitas dan Torsi.....	71
4.5.6.1.	Pengecekan Eksentrisitas	71
4.5.6.2.	Perhitungan Ketidakberaturan Torsi	73
4.5.7.	Pengecekan Ketidakberaturan Horizontal dan Vertikal.....	74

4.6.	Perancangan Elemen Struktur Beton Bertulang.....	77
4.6.1.	Perancangan Pelat.....	77
4.6.1.1.	Properti Material dan Penampang	77
4.6.1.2.	Gaya Dalam	78
4.6.1.3.	Penulangan Lentur Pelat.....	78
4.6.1.4.	Pengecekan Kapasitas Geser	91
4.6.1.5.	Pengecekan Lendutan Pelat	91
4.6.1.6.	Rekapitulasi Hasil Tulangan Pelat	96
4.6.2.	Perancangan Balok	97
4.6.2.1.	Properti Material dan Penampang.....	97
4.6.2.2.	Perhitungan Tulangan Longitudinal Balok.....	99
4.6.2.3.	Perhitungan Tulangan Transversal Balok.....	113
4.6.2.4.	Perhitungan Torsi Balok	119
4.6.2.5.	Rekapitulasi Hasil Tulangan Balok	130
4.6.3.	Perancangan Kolom.....	130
4.6.3.1.	Properti Material dan Penampang.....	130
4.6.3.2.	Perhitungan Tulangan Longitudinal Kolom	131
4.6.3.3.	Perhitungan Tulangan geser Sebagai <i>Confinement</i>	134
4.6.3.4.	Rekapitulasi Hasil Tulangan Kolom.....	140
4.7.	Perhitungan Pondasi	140
4.8.	Tinjauan Umum	147
4.9.	Analisis Kekuatan Kolom Bertulang Menggunakan FRP ..	148
4.9.1.	Perkuatan Pada Kolom Menggunakan CFRP	150
4.9.1.1	Analisa Perkuatan Kolom K14	151
4.9.1.2	Perkuatan Pada Balok Menggunakan CFRP	165
4.9.1.2.1.	Analisis Perkuatan Balok	165
BAB V	PENUTUP	172
5.1	Kesimpulan	172
5.2	Saran	172
DAFTAR	PUSTAKA	xxxiii
LAMPIRAN		xxxv

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1.	Massa Jenis Material FRP.....	16
Tabel 2.2.	Koefisien Umum Muai Untuk Material FRP.....	17
Tabel 2.3.	Batas Tegangan Menerus dan Siklik Tulangan FRP	20
Tabel 2.4.	Faktor Reduksi Lingkungan Untuk Sistem FRP dan Jenis Paparan.....	23
Tabel 2.5.	Faktor Reduksi Tambahan Untuk Penulangan Geser FRP	28
Tabel 3.1.	Data Proyek.....	36
Tabel 3.2.	Daftar Beban Hidup Dan Mati.....	38
Tabel 3.3.	Kombinasi Beban.....	38
Tabel 3.4.	Tinggi Pada Tiap Lantai	39
Tabel 3.5.	Ukuran Pada Balok, Kolom dan Pelat	39
Tabel 4.1.	Data Model Struktur Gedung.....	47
Tabel 4.2.	Tinggi Antar Lantai Bangunan	48
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	50
Tabel 4.7.	Dimensi Kolom Setelah Pengecekan.....	51
Tabel 4.8.	Pengecekan Story Drift Arah X Pemodelan 1	53
Tabel 4.9.	Pengecekan Story Drift Arah Y Pemodelan 1	53
Tabel 4.10.	Beban Gravitasi.....	55
Tabel 4.11.	Data Parameter Respons Spektra Terpetakan	56
Tabel 4.12.	Parameter Respons Spektra	57
Tabel 4.13.	Kombinasi Pembebanan	60
Tabel 4.14.	Rekapitulasi Rasio Partisipasi Modal Massa	61
Tabel 4.15.	Output Gaya Geser Dasar Statik (V)	63
Tabel 4.16.	Output Gaya Geser Dasar Dinamik (V _i).....	64
Tabel 4.17.	Rekapitulasi Hasil Pengecekan Faktor Skala.....	64

Tabel 4.18. Gaya Geser Desain.....	65
Tabel 4.19. Pengecekan Story Drift Arah X	67
Tabel 4.20. Pengecekan Story Drift Arah Y	68
Tabel 4.21. Pengecekan P-Delta Arah X	69
Tabel 4.22. Pengecekan P-Delta Arah Y	70
Tabel 4.23. Data Eksentrisitas Torsi Bawaan dari ETABS	71
Tabel 4.24. Data Eksentrisitas Torsi Tidak Terduga	71
Tabel 4.25. Nilai dari $\delta_{\max}$, $\delta_{\min}$, δ_{avg} dan A_x untuk Gempa Arah X	72
Tabel 4.26. Nilai dari $\delta_{\max}$, $\delta_{\min}$, δ_{avg} dan A_y untuk Gempa Arah Y	72
Tabel 4.27. Perhitungan Eksentrisitas Desain pada Arah Sumbu X.....	72
Tabel 4.28. Perhitungan Eksentrisitas Desain pada Arah Sumbu Y.....	73
Tabel 4.29. Pengecekan Ketidakberaturan Torsi pada Arah X.....	73
Tabel 4.30. Pengecekan Ketidakberaturan Torsi pada Arah Y.....	73
Tabel 4.31. Cek Ketidakberaturan Torsi 1a dan 1b Arah X	74
Tabel 4.32. Cek Ketidakberaturan Torsi 1a dan 1b Arah Y	74
Tabel 4.33. Cek Ketidakberaturan Kekakuan Tingkat Lunak 1b Arah x dan Y..	75
Tabel 4.34. Cek Ketidakberaturan Berat (Massa).....	76
Tabel 4.35. Pengecekan Ketidakberaturan Vertikal 5a.....	76
Tabel 4.36. Pengecekan Ketidakberaturan Vertikal 5b	76
Tabel 4.37. Rekapitulasi Hasil Tulangan Pelat.....	96
Tabel 4.38. Rekapitulasi Tulangan Balok.....	130
Tabel 4.39. Hasil Analisis Interaksi P_n-M_{pr} Kolom K1	134
Tabel 4.40. Hasil Analisis Interaksi P_n-M Kolom K1 dengan $1,25 f_y$	137
Tabel 4.41. Rekapitulasi Tulangan Kolom	140
Tabel 4.41. Nilai Uji Sondir.....	140
Tabel 4.42. Input Data Kolom Pada Diagram Interaksi.....	150
Tabel 4.43. Detail CFRP	151
Tabel 4.44. Detail Penampang Kolom K14	152
Tabel 4.45. Uraian Perhitungan.....	153

Tabel 4.46	Perhitungan Kondisi Tekan aksial Sentris.....	163
Tabel 4.47	Dimensi Dan Material Data	165

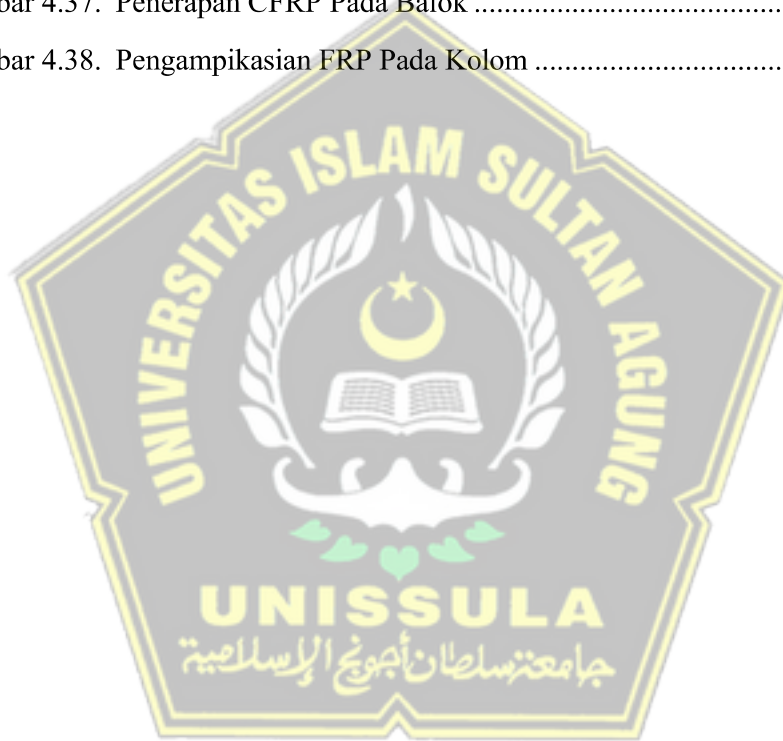


DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1.	Retak Diagonal	9
Gambar 2.2.	Retak Horizontal.....	9
Gambar 2.3.	Retak Pecah	10
Gambar 2.4.	Retak Korosi	10
Gambar 2.5	Retak Lentur	12
Gambar 2.6	Retak Geser	12
Gambar 2.7	Retak Geser Lentur.....	12
Gambar 2.8.	CFRP (<i>Carbon Reinforced Polymer</i>)	13
Gambar 2.9	Ilustrasi Jenis momen	20
Gambar 2.10	Perilaku Batang Lentur Dengan Tulangan.....	25
Gambar 2.11.	Debonding Yang Diinidiasi Oleh Retak Lentur Atau Geser.....	25
Gambar 2.12.	Delaminasi Yang Diinisiasi Oleh Lekukan Tulangan FRP	26
Gambar 2.13.	Skema Lilitan Untuk Perkuatan Geser	27
Gambar 2.14.	Penjelasan Variable Dimensi.....	28
Gambar 2.15.	Distribusi regangan dan Tegangan Penampang Persegi Terhadap Lentur Pada Kondisi Batas Limt	29
Gambar 2.16.	Perilaku Tegangan-Regangan Untuk Beton Terkekang Menggunakan FRP	32
Gambar 2.17.	Model Tegangan-Regangan Untuk Beton Terkekang Menggunakan FRP	32
Gambar 2.18.	Luas Penampang Lingkaran Ekuivalen	34
Gambar 3.1.	Permodelan Gedung Perkantoran Menggunakan ETABS	40
Gambar 3.2	Input Beban Mati Tambahan dan Beban Hidup Lantai 2.....	41
Gambar 3.3	Input Beban Mati Tambahan dan Beban Hidup Lantai 3.....	41
Gambar 3.4	Input Beban Mati Tambahan dan Beban Hidup Lantai 4.....	42
Gambar 3.5	Input Beban Mati Tambahan dan Beban Hidup Lantai Atap.....	42
Gambar 3.6.	Bagan Alur Perencanaan Desain FRP	43
Gambar 3.7.	<i>Flowchart</i> Desain Kolom	45

Gambar 3.7	<i>Flowchart</i> Desain Balok.....	46
Gambar 4.1.	Denah Lantai 1-8 Permodelan Awal	48
Gambar 4.2	Denah Lantai 1 Permodelan 1	52
Gambar 4.3	Model 3D Permodelan 1	52
Gambar 4.4.	Diagram Story Drift Arah X Permodelan 1	53
Gambar 4.5.	Diagram Story Drift Arah X Permodelan 1	54
Gambar 4.6.	Spektrum Respons Desain Lokasi Perancangan.....	59
Gambar 4.7.	Diagram Gaya Geser Gempa Arah X	66
Gambar 4.8.	Diagram Gaya Geser Gempa Arah y	66
Gambar 4.9.	Diagram Story Drift Arah X.....	68
Gambar 4.10.	Diagram Story Drift Arah Y.....	69
Gambar 4.11.	Diagram P-Delta Arah X	70
Gambar 4.12.	Diagram P-Delta Arah Y	70
Gambar 4.13.	Tipe Pelat.....	77
Gambar 4.14.	Penulangan Pelat	97
Gambar 4.15.	Denah Balok B1 Sampel	98
Gambar 4.16.	Momen Ultimit Tumpuan Balok B1.....	100
Gambar 4.17.	Momen Ultimit Lapangan Balok B1	100
Gambar 4.18.	Gaya Geser Ultimit Tumpuan Balok B1	113
Gambar 4.19.	Gaya Geser Ultimit Lapangan Balok B1.....	114
Gambar 4.20.	Gaya Torsi Balok B1	121
Gambar 4.21.	Potongan Memanjang Balok	129
Gambar 4.22.	Tulangan Tumpuan Balok	129
Gambar 4.23.	Tulangan Lapangan Balok.....	130
Gambar 4.24.	Denah Kolom K1 Sampel.....	131
Gambar 4.25.	Tulangan Longitudinal Kolom K1	133
Gambar 4.26.	Diagram Interaksi P_n - M_{pr} SPColumn Kolom K1	133
Gambar 4.27.	Diagram Interaksi P_n - M SPColumn Kolom K1 dengan $1,25 f_y$	136
Gambar 4.28.	Potongan Memanjang Kolom K1	139

Gambar 4.29. Tulangan Ujung Kolom K1	139
Gambar 4.30. Tulangan Tengah Kolom K1	139
Gambar 4.31. NilaiTahanan Aksial <i>Bored Pile</i>	142
Gambar 4.32. Identifikasi Kegagalan.....	147
Gambar 4.33. Detail Kolom yang Digunakan	149
Gambar 4.34. Analisis Kolom Dengan Diagram Interaksi	150
Gambar 4.35. Kolom K30 Yang Mengalami Kegagalan	152
Gambar 4.36. Diagram Interaksi Kolom Dengan FRP	165
Gambar 4.37. Penerapan CFRP Pada Balok	170
Gambar 4.38. Pengampikasian FRP Pada Kolom	171



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)
β_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 layan
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)
ffu	= 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 l_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	= Periode fundamental pendekatan
T_{cr}	= Momen retak torsi (N-mm)
T_L	= Peta transisi periode panjang
T_n	= Kekuatan momen torsi nominal (N-mm)
T_u	= Momen torsi terfaktor pada penampang (N-mm)

U	= Kekuatan perlu untuk menahan beban terfaktor atau momen dan gaya dalam yang terkait dengan kombinasinya
v_s	= Kecepatan rambat gelombang geser pada regangan geser yang kecil (m/detik) ($< 10^{-3}$ persen)
$\bar{v}_s$	= Kecepatan rambat gelombang geser rata-rata pada regangan geser yang kecil, di dalam lapisan 30 m teratas
v_{si}	= Kecepatan rambat gelombang geser dalam lapisan tanah atau batuan ke- i , di dalam lapisan 30 m paling atas
V	= Geser desain total di dasar struktur dalam arah yang ditinjau
V_c	= Kekuatan geser nominal yang disediakan oleh beton (N)
V_e	= Gaya geser desain untuk kombinasi pembebanan termasuk pengaruh gempa (N)
V_{IX}	= Gaya geser dasar inelastik pada arah X
V_{IY}	= Gaya geser dasar inelastik pada arah Y
V_n	= Kekuatan geser nominal (N)
V_s	= Kekuatan geser nominal diberikan oleh penulangan geser (N)
V_{sway}	= Gaya geser rencana berdasarkan momen kapasitas pada balok
V_t	= Nilai desain dari gaya geser dasar akibat seismik
V_u	= Gaya geser terfaktor penampang (N)
V_x	= Geser seismik desain di tingkat-x
V_X	= ELF gaya geser dasar pada arah X
V_Y	= ELF gaya geser dasar pada arah Y
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_{xc}	= 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 bd ; Faktor redundansi struktur
ϕ	= Faktor reduksi kekuatan
ϕR_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 Seminar Hasil Tugas Akhir
- Lampiran 5 : Lembar Bimbingan Tugas Akhir
- Lampiran 6 : Turnitin
- Lampiran 7 : Gambar Kerja



SISTEM PERKUATAN STRUKTUR MENGGUNAKAN *CARBON FIBER REINFORCED POLYMER* (CFRP) PADA GEDUNG 4 LANTAI

Rizky Bayu Saputra¹⁾; Antonius²⁾; Muhammad Rusli Ahyar³⁾

ABSTRAK

Tugas akhir ini mengkaji kelayakan struktur gedung perkantoran 4 lantai dengan kerusakan lentur dan geser pada bagian struktur komponen kolom dan balok tertentu. Salah satu cara untuk meningkatkan kapasitas struktur adalah dengan menggunakan *CFRP* (*Carbon Fiber Reinforced Polymer*). *CFRP* adalah bahan komposit terdiri dari serat dan resin yang diaplikasikan untuk menutupi struktur yang mengalami kegagalan.

Perhitungan Analisa struktur tanpa perkuatan dengan ETABS V18 dimodelkan dengan pembebanan 3D sesuai SNI 1727:2020. Kemudian menganalisa bagian struktur yang rusak yang nantinya akan diperkuat. Berdasarkan hasil yang diperoleh, terdapat kegagalan geser pada balok dan aksial serta momen pada kolom dan balok. Setelah bagian struktur yang mengalami kegagalan ditutupi dengan CFRP HM-60 dengan ketebalan 0,333 mm, 2 lapis kolom dan 2 lapis balok, kekuatan struktural meningkat dengan dimensi, mutu beton dan baja yang sama.

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

STRUCTURAL REINFORCEMENT SYSTEM USING CARBON FIBER REINFORCED POLYMER (CFRP) OF 4 FLOOR BUILDING

Rizky Bayu Saputra¹⁾; Antonius²⁾; Muhammad Rusli Ahyar³⁾

ABSTRACT

This final project examines the feasibility of a 4 floor office building structure with bending and sliding damage to certain parts of the column and beam structural component. One of ways to increase the capacity of the structure is to use CFRP (Carbon Fiber Reinforced Polymer). CFRP is a composite material consisting of fibers and resins that are applied to cover structures that are failed.

Calculation Analysis of structures without concentration use ETABS V18 is modeled with 3D loading according to SNI 1727:2020. Then analyze the damaged parts of the structure that will later be strengthened. Based on the results obtained, there are shear failures on the beam and axial as well as moments on the column and beam. After the failed parts of the structure are covered with CFRP HM-60 with a thickness of 0.333 mm, 2 layers of columns and 2 layers of beams, the structural strength increases with the same dimensions, quality of concrete and steel.

Keywords : CFRP;; structure failure; composites;; Retrofitting.

BAB I

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Beton bertulang adalah material kombinasi dimana tulangan baja disusun di dalam beton sedemikian rupa, berfungsi untuk menahan gaya tarik pada struktur suatu bangunan. Material tersebut digabungkan yang mana beton berfungsi untuk menahan gaya tekan terhadap beban yang dibeikan. Sedangkan tulangan baja berfungsi menahan gaya tarik yang tidak dimiliki beton (Setiawan, 2013).

Balok merupakan suatu elemen struktur penting dari suatu bangunan, sehingga keruntuhan pada suatu balok merupakan lokasi kritis yang menyebabkan runtuhnya (*ccollapse*) lantai yang saling berkesinambungan. Keruntuhan balok merupakan hal yang berbahaya yang perlu mendapat penanganan serius, karena keruntuhan kolom akan menimbulkan akibat yang fatal terhadap konstruksi yang telah dibangun, keruntuhan pada balok dapat disebabkan oleh adanya peningkatan gaya gempa yang terjadi pada wilayah dimana struktur tersebut berdiri.

Percegahan terjadinya keruntuhan total pada suatu struktur balok, maka balok yang sudah mencapai level kinerja harus segera ditangani dengan perbaikan/perkuatan. Perbaikan struktur pada umumnya bertujuan untuk mengembalikan atau meningkatkan kekuatan elemen struktur agar mampu menahan beban sesuai dengan beban rencana dan umur rencana. Umumnya, struktur perlu perkuatan apabila terjadi perubahan fungsi bangunan sehingga perlu tambahan faktor keamanan atau pada saat perencanaan, elemen-elemen strukturnya dirancang sesuai tata cara yang lama dimana beban gempa nominalnya lebih rendah dari yang ditetapkan oleh tata cara saat ini. Perbaikan pada struktur bangunan dapat dilakukan dengan beberapa metode, diantaranya dengan *concrete jacketing*, melapisi dengan FRP (*Fiber Reinforced Polymer*) atau bisa dengan penambahan tulangan.

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.

Fiber Reinforced Polimer (FRP) merupakan material yang sedang populer pada saat ini, biasanya digunakan untuk komponen struktur otomotif, pesawat terbang, perkuatan (retrofit), dan struktur lain termasuk jembatan. *FRP* digunakan sebagai alternatif perkuatan struktur karena jenis bahannya ringan, non korosif, non konduktif, dan memiliki rasio *strength* terhadap berat sendiri yang sangat tinggi. Cara pemasangan *FRP* yaitu dengan melilitkannya mengelilingi permukaan elemen struktur yang akan diperkuat dengan menggunakan perekas berupa *epoxy*.

Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP) merupakan salah satu jenis dari *FRP*. *CFRP* digunakan untuk perbaikan dan memperkuat elemen struktur pada konstruksi. Teknik perkuatan menggunakan *CFRP* dapat dibuat efisien, tidak menyebabkan karat seperti plat baja. Fungsi perkuatan dengan sistem komposit *CFRP* adalah untuk meningkatkan kekuatan atau memberikan peningkatan kapasitas geser, aksial dan daktilitas, atau berbagai kombinasi lainnya. Daya tahan *CFRP* yang tinggi lebih ekonomis digunakan pada lingkungan korosif (baja akan mudah berkarat). Penggunaan *CFRP* akan lebih populer dibandingkan dengan jenis *FRP* lainnya seperti glass dan aramid.

1.2. Tinjauan Umum

Perkuatan struktur beton (*retrofit*) adalah upaya untuk memperbaiki atau memperkuat struktur bangunan yang sudah berdiri, agar mampu untuk menahan beban yang lebih besar, memperbaiki berkurangnya kekuatan karena kerusakan pada beton, mengevaluasi kekurangan pada desain atau kelemahan pada saat pelaksanaan.

Pekerjaan retrofit, selain dilakukan atas pertimbangan preventif struktur terhadap pengaruh gaya gempa, dapat dilakukan diaplikasikan untuk banyak hal, seperti ketidaksesuaian antara perencanaan dan pelaksanaan, serta perubahan fungsi struktur.

1.3. Rumusan Masalah

- a. Bagaimana hasil dari design seismik pada gedung kantor 4 lantai dengan SNI 1726:2019?
- b. Apakah kondisi penampang struktur aman atau tidak aman jika dilakukan pembebanan dengan SNI 1726:2019?
- c. Bagaimana metode perkuatan jika hasil dari evaluasi struktur tidak aman?

1.4. Tujuan Kajian

Tujuan dari tugas akhir dengan judul “Desain perkuatan struktur menggunakan CFRP (*Carbon Fiber Reinforced Polymer*) pada gedung 4 lantai” ini adalah:

- a. Menganalisa jenis kategori design seismic pada bangunan gedung kantor berdasarkan SNI 1726 2019
- b. Menganalisa ketidakberaturan struktur horizontal dan vertikal pada gedung kantor.
- c. Mendesain struktur plat, balok, dan kolom pada gedung kantor 4 lantai
- d. Membandingkan struktur antara kolom atau balok beton bertulang dengan setelah perkuatan FRP

1.5. Batasan Masalah

- a. Tidak memperhitungkan *mechanical electrical*
- b. Hanya menghitung perkuatan pada kolom dan balok
- c. Tidak menghitung biaya konstruksi serta waktu pelaksanaan proyek.
- d. Tidak meninjau metode pelaksanaan secara keseluruhan

1.6. Manfaat Penelitian

- a. Dapat memperluas pengetahuan dalam perencanaan kolom dengan menggunakan tambahan perkuatan material FRP (*Fiber Reinforced Polymers*)
- b. Dapat memberikan rekomendasi perbaikan kolom dari aspek kekuatan menggunakan perkuatan metode FRP (*Fiber Reinforced Polymers*)

1.7. Sistematika Penulisan

pada penulisan ini terdiri dari lima BAB yaitu:

BAB I PENDAHULUAN

Berisi pendahuluan yang terurai tentang latar belakang, maksud dan tujuan, dan sistematika penulisan.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

Berisi tentang kajian atau teori dari berbagai sumber yang dibutuhkan untuk dijadikan sebagai acuan menganalisis struktur.

BAB III METODOLOGI

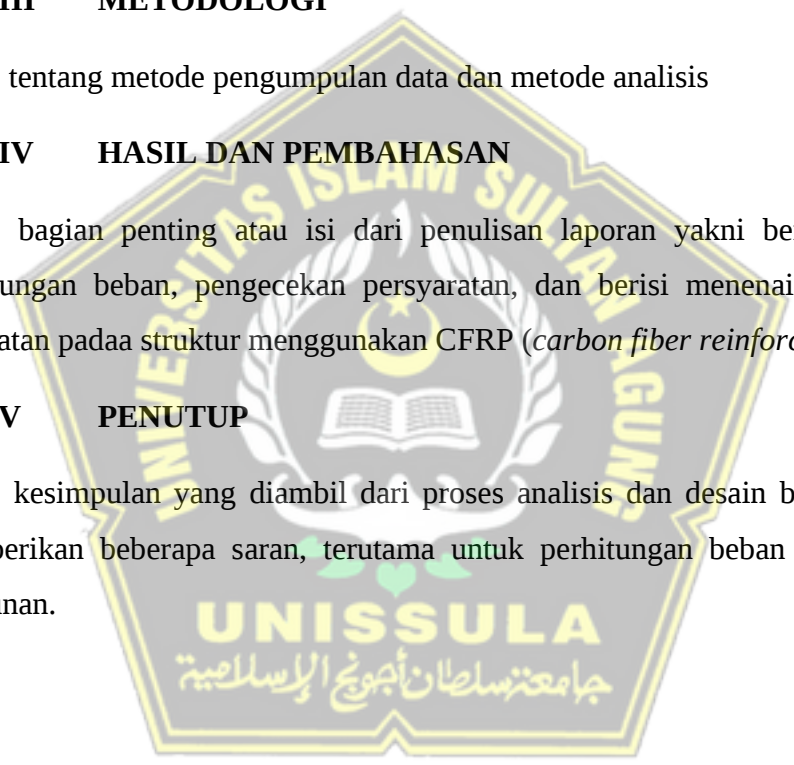
Berisi tentang metode pengumpulan data dan metode analisis

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

Berisi bagian penting atau isi dari penulisan laporan yakni berupa analisis perhitungan beban, pengecekan persyaratan, dan berisi mengenai perhitungan perkuatan padaa struktur menggunakan CFRP (*carbon fiber reinforced polymer*).

BAB V PENUTUP

Berisi kesimpulan yang diambil dari proses analisis dan desain bangunan dan memberikan beberapa saran, terutama untuk perhitungan beban gempa pada bangunan.



BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

Beton sebagai salah satu material yang banyak digunakan pada struktur bangunan sipil mempunyai perilaku yang spesifik yaitu memiliki kuat tarik yang jauh lebih kecil dari kuat tekannya. Oleh karena itu material beton umumnya digabungkan dengan material lain yang mempunyai kuat tarik besar, seperti baja tulangan atau baja profil sehingga merupakan kesatuan struktur yang komposit beton bertulang. Struktur beton bertulang sudah banyak diaplikasikan pada berbagai sarana dan prasarana umum seperti struktur gedung, jembatan, dan lain sebagainya. Seiring dengan berjalannya waktu, seringkali terjadi peningkatan beban yang harus dipikul oleh suatu struktur bangunan, misalnya struktur gedung yang beralih fungsi, atau struktur beton yang telah mengalami kerusakan yang menyebabkan penurunan kapasitas struktur dalam menahan beban. Oleh karena itu struktur tersebut memerlukan perkuatan untuk meningkatkan kapasitas dalam menahan beban. Salah satu material untuk perkuatan ini adalah FRP (*Fiber Reinforced Polymers*). Material ini dipilih karena ringan, nonkorosif, dan memiliki kekuatan tarik tinggi.

2.1. Tinjauan Umum

Konstruksi dari beton mempunyai banyak keuntungan yakni beton termasuk material yang tahan aus dan tahan terhadap kebakaran, beton yang kokoh dan kuat sehingga mampu menahan beban gempa bumi, maupun beban angin, bermacam-macam bentuk konstruksi dapat dibuat dari bahan beton sesuai keinginan, biaya perawatan yang relatif murah, tahan terhadap kelembaban, tidak korosif, dan tidak mudah terbakar. Selain beberapa keuntungan dari beton, konstruksi beton juga memiliki beberapa kelemahan yakni memiliki kuat tarik yang rendah sehingga dapat mengalami keretakan, konstruksi beton yang berat sehingga memerlukan pondasi yang cukup kuat dan besar.

Sebelum dilaksanakan suatu pekerjaan perkuatan pada struktur bangunan perlu adanya penyelidikan pada bagian yang mengalami kerusakan atau kegagalan pada struktur agar penanganannya sesuai. Untuk struktur gedung yang mengalami

kerusakan, selain untuk memperbaiki kondisi agar bangunan gedung dapat dipergunakan kembali (*Rehabilitation*).

Struktur kolom merupakan bagian dari struktur yang rawan terhadap kegagalan Ketika menerima beban yang besar (ledakan atau seismik). Kolom adalah bagian yang penting, jika mengalami kegagalan kolom akan berakibat langsung terhadap komponen struktur lainnya. Sehingga dalam kasus ini sangat penting untuk ditinjau.

Ketika struktur bangunan mengalami perubahan fungsi yang pada meningkatnya beban dari beban rencana maka perlu dicari solusi agar struktur kolom tersebut masih bisa dimanfaatkan tanpa harus mengganti dengan struktur kolom yang baru. Untuk mengatasi permasalahan tersebut, maka penelitian ini akan menawarkan solusi dengan cara memanfaatkan kemajuan teknologi berupa penggunaan material *Fiber Reinforced Polymer* (FRP) untuk perkuatan eksternal struktur kolom. Kelebihan dari perkuatan FRP ini yakni material lebih ringan, kekuatan tarik tinggi, tidak mengalami proses korosi sehingga memiliki durabilitas (keawetan) yang tinggi, mudah dalam pemasangannya sehingga menghemat waktu serta memiliki bahan yang mudah untuk dibentuk (fleksibel).

FRP adalah suatu bahan material campuran (*composite*) yang mempunyai dua unsur bahan pengikat yaitu serat (fiber) dan bahan pengikat serat yang disebut dengan matriks. Unsur utama dari bahan komposit adalah serat. Serat inilah yang akan menentukan kekuatan, ketahanan, kekakuan, keuletan, dan sifat mekanik lainnya. FRP adalah jenis material komposit yang terdiri dari resin polimer yang diperkuat menggunakan serat gelas atau serat karbon. FRP adalah material yang banyak digunakan untuk struktur pada elemen pesawat terbang, perkuatan (*retrofit*), otomotif, dan struktur lainnya seperti jembatan. Kelebihan material FRP dibandingkan material lainnya yaitu bahan tahan terhadap korosi (*corrosion resistance*), bobotnya ringan, memiliki kekuatan yang tinggi, stabilitas dimensi, memiliki karakteristik insulasi listrik/non konduktif, tidak memerlukan proses finishing yang besar.

FRP adalah serat karbon yang didefinisikan sebagai serat yang mengandung setidaknya 90% serat karbon. Serat karbon tidak menunjukkan korosi atau pecah pada suhu kamar. Fungsi perkuatan dengan sistem FRP adalah untuk

meningkatkan kekuatan atau memberikan peningkatan kapasitas lentur, geser, axial dan daktilitas. Cara pemasangan FRP adalah dengan melilitkannya mengelilingi permukaan perimeter elemen struktur yang diperkuat dengan menggunakan perekat epoxy resin. Sistem kerjanya sama dengan tulangan transversal konvensional. (Karmila,Agoes,Tavio,2013)

Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP) yang menawarkan beberapa keunggulan yang tidak dimiliki oleh baja tulangan yaitu : CFRP mempunyai kuat tarik yang jauh lebih tinggi dari kuat tarik baja tulangan, yaitu sebesar 2800 MPa, mempunyai kekakuan yang cukup tinggi dimana modulus elastisitasnya (E) 234.000 MPa, tidak mengalami korosi karena terbuat dari bahan non logam, mempunyai penampang yang kecil dan ringan dengan berat 1,5 g/cm³ jika dibandingkan dengan berat jenis baja adalah 7850 kg/m³., serta mudah pemasangannya.

2.2. Kolom

Kolom adalah suatu elemen struktur yang dapat menahan gaya aksial dan momen lentur. Pada prinsipnya kolom yaitu batang tekan vertikal dari rangka struktural yang memikul beban diatasnya (Balok). Kolom berfungsi untuk meneruskan beban dari elevasi atas ke elevasi yang lebih bawah hingga akhirnya sampai ketanah melalui pondasi.

Kolom merupakan suatu elemen struktur tekan yang memegang peranan penting dari suatu bangunan, sehingga keruntuhan pada suatu kolom merupakan lokasi kritis yang dapat berakibat runtuhnya lantai yang bersangkutan dan juga runtuhnya total seluruh struktur.

SK SNI T-15-1991-03 mendefinisikan kolom merupakan komponen struktur bangunan yang tugas utamanya menyangga beban aksial tekan vertikal dengan bagian tinggi yang tidak ditopang paling tidak tiga kali dimensi lateral terkecil. Fungsi kolom adalah sebagai penerus beban seluruh bangunan ke pondasi. Bila diumpamakan seperti sistem rangka manusia yang memastikan struktur bangunan dapat berdiri dengan kokoh.

Kesimpulannya, sebuah bangunan akan aman dari kerusakan apabila besar dan jenis struktur pondasinya sesuai dengan perhitungan yang direncanakan. Namun,

kondisi tanah juga harus mampu menahan beban dari pondasi. Kolom akan mendistribusikan beban ke pondasi, karena itu pondasinya harus kuat, terutama untuk konstruksi gedung bertingkat, harus diteliti dahulu kedalaman tanah kerasnya agar jika tanah mengalami penurunan (ambles) atau jika terjadi gempa tidak mudah roboh.

Menurut Babay N.I et al (2012) kolom merupakan komponen struktur yang berperan penting dalam memikul beban aksial, momen lentur, dan gaya geser.

Berikut beberapa faktor pemicu terjadinya kerusakan pada kolom diantaranya:

- a. Kapasitas lentur dan aksial yang tidak mencukupi.
- b. Pengekangan tulangan transversal yang tidak memadai.
- c. Adanya penambahan beban yang melebihi kapasitas kolom, karena perubahan fungsi bangunan.
- d. Kuat geser kolom tidak mencukupi.
- e. Detail tulangan serta kekuatan yang tidak memadai pada daerah sambungan baik sambungan antara kolom dengan pondasi maupun sambungan antara kolom dengan balok sehingga terjadi kerusakan.

Dikarenakan kolom memiliki peranan yang sangat penting dalam mencegah keruntuhan total struktur pada bangunan. Dalam merencanakan struktur yang tahan gempa, kolom harus dibuat agar memiliki kekuatan yang cukup dan memadai.

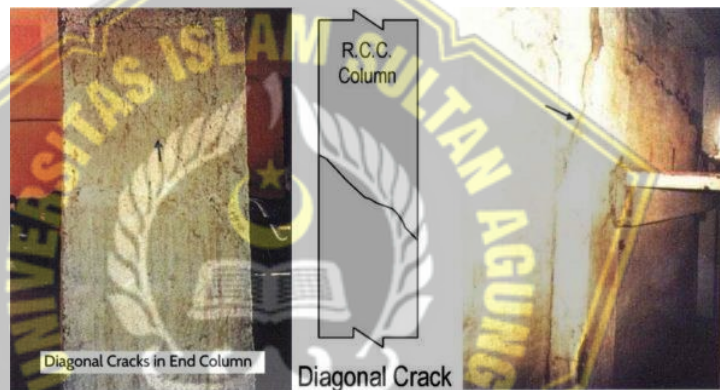
Kolom merupakan salah satu komponen struktur yang sering menggunakan beton bertulang sebagai penyusunnya. Dalam pembuatan desain maupun pelaksanaan pembuatan kolom perlu dilakukan secara teliti dapat menyebabkan terjadinya kendala kerusakan pada struktur kolom dan pada akhirnya menyebabkan kerusakan struktur secara keseluruhan.

Keretakan pada kolom beton bertulang adalah masalah serius dan dapat menyebabkan kehilangan kekuatan, stabilitas, daya tahan, dan estetika yang sangat merugikan bagi struktur bangunan. Oleh karena itu, diperlukan penelitian untuk menyelidiki beberapa jenis retakan yang dapat dimulai pada kolom untuk

mempertimbangkan cara yang sesuai untuk mencegah hal yang terjadi. Keetakan pada kolom terdapat beberapa macam sebagai berikut :

a. Retak Diagonal (*Diagonal Crack*)

Retak diagonal pada kolom beton bertulang terjadi dan dapat mencakup seluruh permukaan kolom. Penyebab utama retak diagonal pada kolom beton adalah daya dukung beban kolom yang tidak memadai. Hal ini juga dapat terjadi jika dimensi penampang tidak cukup dan tulangan baja tidak memadai. Retakan diagonal akan sangat mempengaruhi kekuatan struktur dan karena itu perlu ditangani dengan benar. Keretakan tersebut dapat dilihat pada Gambar 2.1.



Gambar 2.1 Retak Diagonal (*Diagonal Crack*)

b. Retak Horizontal (*Horizontal Crack*)

Retak horizontal pada kolom beton bertulang dapat diamati pada Sebagian besar persimpangam/pertemuan balok-kolom, dan pada permukaan kolom dimana terjadi tegangan tarik besar atau beban tarik. Kolom dengan kapasitas resistansi momen yang memadai, daya topang yang tidak mencukupi, atau disposisi tulangan yang dipasang rentang terhadap keretakan horizontal. Keretakan tersebut dapat dilihat pada Gambar 2.2.



Gambar 2.2 Retak Horizontal (*Horizontal Crack*)

c. Retak Pecah (*Splitting Crack*)

Retak pecah pada beton bertulang adalah retakan vertikal paralel pendek dengan lebar yang tidak seragam. Retak pecah pada kolom beton bisa terjadi sebagai hasil dari titik maksimal kapasitas angkut beban maksimumnya. Kapasitas daya dukung beban maksimal kolom tercapai Ketika penampang beton tidak lagi memadai atau rasio tulangan tidak mencukupi atau kombinasi keduanya. Keretakan tersebut dapat dilihat pada Gambar 2.3.



Gambar 2.3 Retak Pecah (*splitting Crack*)

d. Retak Korosi (*Corrosion/Bond Crack*)

Retakan korosi pada kolom beton terjadi sepanjang garis beban. Jenis retakan ini umumnya mempunyai lebar yang seragam dan melebar karena kolom sudah tua. Kemungkinan karena korosi tulangan dan ikatan yang tidak memadai antara beton dengan tulangan baja sebagai penyebab keretakan tersebut. Jika keretakan seperti itu tidak ditangani, maka korosi

tulangan akan meningkat dengan pesat dan merusak struktur bangunan. Keretakan tersebut dapat dilihat pada Gambar 2.4.



Gambar 2.4 Retak Korosi (*Corrosion/Bond Crack*)

2.3. Balok

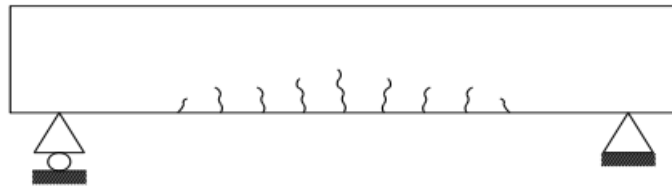
Balok merupakan salah satu element struktur yang mempunyai fungsi yang sangat penting, yaitu menahan beban diatasnya berupa beban plat lantai, beban hidup, beban mati dan berat 5 sendiri balok (Ujianto.Muhammad 2006). Namun, untuk bangunan bertingkat biasanya dalam perhitungan juga menambahkan beban lain seperti beban gempa maupun beban angin.

Salah satu komponen struktur ini sering menggunakan beton bertulang dalam penyusunannya. Dalam pembuatan desain maupun pelaksanaan pembuatan balok perlu dilakukan secara teliti agar tidak menyebabkan kerusakan pada balok dan pada akhirnya menyebabkan kerusakan struktur secara keseluruhan.

Kerusakan pada balok biasanya ditandai oleh keretakan. Keretakan yang terjadi pada suatu struktur dapat diperbaiki atau diperkuat apabila masih dalam kategori tertentu. Menurut Gilbert (1990) bahwa keretakan pada balok umumnya dikategorikan menjadi 3 jenis sebagai berikut :

a. Retak Lentur (*Flexural Crack*)

Keretakan yang terjadi akibat kegagalan balok dalam menahan beban lentur. Biasanya terjadi pada daerah bentang tengah balok dikarenakan momen lentur terbesar berada pada daerah tersebut. Arah retak yang terjadi dapat dilihat pada Gambar 2.5.



Gambar 2.5 Retak Lentur

- b. Retak Geser Pada Bagian Balok (*Web Shear Crack*) Keretakan pada daerah dekat dengan tumpuan akibat kegagalan balok karena tidak dapat menahan gaya geser yang terlalu besar. Keretakan tersebut dapat dilihat pada Gambar 2.6.



Gambar 2.6 Retak Geser

- c. Retak Geser-Lentur (*Flexural Shear Crack*) Balok yang mengalami keretakan ini terjadi akibat sebelumnya sudah mengalami kegagalan lentur kemudian merambat hingga terjadi di daerah dekat tumpuan dan pada tengah bentang seperti pada Gambar 2.7.



Gambar 2.7 Retak Geser Lentur

2.4. FRP (*Fiber Reinforced polymer*)

FRP (*Fiber Reinforced polymer*) ialah material komposit yang dibuat dari matrik resin polimer kemudian dicampurkan dengan memberikan serat karbon (CFRP) atau serat kaca (GFRP). Material karbon merupakan sebuah alternatif untuk perbaikan dan merehabilitasi suatu struktur dibandingkan menggunakan pelat baja konvensional. Untuk dapat dilihat dari Gambar 2.8.



Gambar 2.8 CFRP (*Carbon Fiber Reinforced polymer*)

Bagian struktur yang diikat dengan FRP (*Fiber Reinforced Polymer*) harus diikat dengan beton, karena beton merupakan parameter yang paling penting sebagai bahan lekatan kritis termasuk kekuatan lentur atau geser. Sistem FRP (*Fiber Reinforced Polymer*) memiliki berbagai sistem penerapannya antara lain:

2.4.1. Sistem Penghamparan Basah (*Wet Lay-up*)

Sistem FRP penghamparan basah terdiri dari lembaran serat kering searah atau multi-arah yang diimpregnasi dengan resin jenuh di lapangan. Resin jenuh yang diterapkan setelah aplikasi primer dan dempul (*putty*). Melekatkan lembaran FRP ke permukaan beton. Sistem penghamparan basah di lapangan prosesnya mirip dengan pengecoran di tempat, yang mencakup penjenuhan di lokasi dan perawatan di lapangan. Terdapat tiga jenis sistem FRP penghamparan basah, yaitu:

- a). Lembaran serat kering dimana arah serat dominan ke satu arah planar. Spesifikasi untuk sistem penghamparan basah searah karbon polimer (CFRP) dan serat gelas polimer (GFRP).
- b). Lembaran serat kering yang memiliki setidaknya 2 arah planar.
- c). Serat kering tow yang dipasang secara mekanis ke permukaan beton. Serat ini harus diimpregnasi dengan resin selama proses pengeringan di lapangan.

2.4.2. Sistem Praimpregnasi

Sistem FRP merupakan sistem dimana sebagian serat atau lembaran serat searah atau multi-arah dikeringkan dengan resin jenuh saat proses manufaktur. Sistem FRP dapat dipasang ke permukaan beton dengan atau tanpa resin tambahan, tergantung pada kebutuhan struktur.

Sistem ini mirip sistem penghamparan basah, dikeringkan di lokasi proyek dan dicetak di bekisting. Sistem prapeg biasanya membutuhkan pemasangan tambahan untuk proses pengeringan. Metode penyimpanan, usia, dan prosedur pengeringan harus dikonsultasikan kepada perusahaan produsen. Terdapat tiga jenis sistem FRP prapeg, yaitu:

- a). Lembaran serat searah *prepeg* dimana arah serat dominan ke arah planar.
- b). Lembaran serat multi-arah *prepeg* yang memiliki setidaknya dua arah planar.
- c). Serat prapeg tow yang dipasang secara mekanis ke permukaan beton.

2.4.3. Sistem Prarawat (*Precured*)

Sistem FRP prarawat terdiri dari beragam jenis yang diproduksi di luar lapangan proyek. Berbeda dengan sistem sebelumnya, sistem ini mirip dengan beton pracetak. Biasanya perekat, primer, dan dempul digunakan untuk memasang FRP ke permukaan beton. Jenis sistem ini juga ada tiga, yaitu:

- a). Lembar laminasi searah yang biasanya dikirim kelapangan dalam bentuk stok plat atau lembaran tipis yang digulung.
- b). Lembar laminasi multi-arah yang biasanya dikirim dalam bentuk lembaran tipis yang digulung.

Tempurung prarawat, biasanya dikirim kelapangan dalam bentuk tiap segmen dipotong secara longitudinal agar mudah dibuka dan dipasang kolom, atau anggota struktur lainnya. Multi-lapisan tempurung dilekatkan ke beton dan ke masing-masing lapisan sehingga memberikan kekangan.

2.4.4. Sistem Pemasangan Perkuatan Dangkal (Sistem *Near-Surface Mounted* - NSM)

Sistem Pemasangan Perkuatan Dangkal (Sistem *Near-Surface Mounted* - NSM) yang tertanam di permukaan terdiri dari batang atau pelat bundar atau persegi yang dipasang dan dilekatkan ke coakan tertentu yang dibuat pada permukaan beton. Perekat digunakan untuk mengikat tulangan FRP sesuai jalur coakan dan diramwat ditempat. Dua jenis tulangan FRP yang umum digunakan untuk sistem NSM adalah:

- a). Batang tulangan bundar yang biasanya diproduksi dengan proses cetak tarik, biasanya dikirim ke lokasi dalam bentuk batang tunggal atau gulungan, tergantung dari diameternya.

- b). Batang tulangan dan pelat persegi Panjang yang diproduksi menggunakan proses cetak tarik, biasanya dikirim ke lokasi dalam bentuk gulungan.

2.5. Material Penyusun

Bahan penyusun yang digunakan secara komersial dalam sistem perbaikan FRP sudah tersedia secara masal, termasuk resin, *primer*, *putty*, pengering, perekat, dan serat telah dikembangkan untuk memperkuat struktur beton berdasarkan uji material dan structural.

2.5.1 Jenis Resin

Berbagai jenis resin polimerik resin termasuk *primer*, *putty fillers*, *saturants* dan adhesive digunakan dalam sistem FRP. Resin yang umum digunakan dalam berbagai kondisi lingkungan biasanya terbuat dari epoksi, vinil ester, dan polyester. Syarat resin untuk sistem FRP adalah:

- a). Sesuai dengan zat perekat ke substrat beton.
- b). Sesuai dengan zat perekat ke sistem komposit FRP.
- c). Sesuai dengan zat perekat pada serat penguat.
- d). Tahan terhadap dampak lingkungan, tetapi tidak terbatas pada kelembaban, air, garam, suhu ekstrim, dan bahan kimia yang terdapat di dalam beton.
- e). Kemampuan pengisi.
- f). Kelecatan.
- g). Umur pakai konsisten untuk penggunaannya.
- h). Pengembangan sifat mekanik yang sesuai untuk komposit FRP.

2.5.2 Serat

Serat gelas, aramid, dan karbon adalah material tulangan utama yang digunakan dalam sistem FRP, sedangkan serat memberikan kekuatan dan kekakuan pada sistem FRP.

2.5.3 Fungsi Lapisan Pelindung

Lapisan pelindung berfungsi untuk melindungi lekatan perkuatan FRP dari berbagai potensi kerusakan pengaruh lingkungan dan mekanis. Pelapisan biasanya dipasang dipermukaan luar sistem FRP setelah proses pelekatan atau perekatan atau pengeringan resin jenuh. Jenis lapisan pelindung adalah.:

- a). Lapisan polimer umumnya berupa epoksi atau poliuretan.

- b). Lapisan akrilik berupa sistem akrilik biasa atau sistem akrilik berbasis semen. Sistem akrilik dapat dalam bentuk perbedaan tekstur.
- c). Sistem semen yang memerlukan pengkasaran permukaan FRP (seperti menuangkan pasir ke resin basah) dan dapat dipasang dengan cara yang sama dan dapat diterapkan pada permukaan beton.
- d). Pelapisan tahan api (*intumescent*) yang berbasis polimer yang digunakan untuk perlindungan terhadap kebakaran pasif, control penyebaran api, dan pembentukan asap sesuai kode/syarat yang ada.

2.6. 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 2.1.

Dari Table 2.1 kita dapat mengetahui bahwa massa jenis material FRP berkisar antara 1,2 hingga 2,1 g/cm³, 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 2.1 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 Pedoman Perancangan Dan Pelaksanaan Sistem Serat Berperkat Polimer Terlekat Eksternal Untuk Beton.

2.7. Pengaruh Suhu Terhadap Material FRP

Suhu merupakan salah satu faktor penting dalam sistem perkuatan FRP. Koefisien ekspansi termal material FRP searah berbeda dengan arah memanjang dan melintang, tergantung dari jenis serat, resin, 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 2.2 koefisien negatif ekspansi termal menunjukkan bahwa material mengalami perubahan bentuk saat suhu meningkat dan mengambang ketika suhu menurun.

Tabel 2.2 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 Pedoman Perancangan dan Pelaksanaan Sistem Serat

Berperekat Polimer Terlekat Eksternal Untuk Struktur Beton

Menurut penelitian yang dilakukan oleh Kumaha, et al (1993), diatas suhu 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.

2.8. Pencampuran Resin

Pencampuran Resin harus dilakukan sesuai prosedur yang direkomendasikan oleh produsen sistem FRP. Semua komponen Resin harus dicampur pada suhu yang tepat, dalam rasio yang benar sampai pencampuran komponen yang seragam dan lengkap. Komponen Resin sering kali memiliki warna yang kontras, sehingga pencampuran jenuh dicapai ketika goresan warna hilang. Resin harus dicampur dalam batasan waktu pencampuran yang ditentukan dan diperiksa secara visual untuk keseragaman warna. Produsen bahan harus menyediakan ukuran *bacth* yang direkomendasikan, rasio campuran, metode pencampuran dan waktu pencampuran.

Peralatan pencampuran dapat meliputi bilah pencampur bertenaga kecil atau unit khusus, atau resin dapat dicampur dengan pengadukan tangan, jika

diperlukan. Pencampuran resin harus dalam jumlah yang cukup kecil untuk memastikan bahwa semua resin campuran dapat digunakan dalam masa aktif resin. Campuran resin yang melebihi masa aktifnya tidak boleh digunakan karena viskositas akan terus meningkat dan akan mempengaruhi kemampuan resin untuk menembus permukaan atau menjenuhkan lembaran serat.

2.9. Perilaku Tarik dan Kekakuan Material FRP

Kekuatan tarik dan kekakuan material FRP tergantung dari beberapa faktor, 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 kekuatan tarik dari sistem FRP tertentu harus diperoleh dari proses manufaktur atau menggunakan metode pengujian yang sesuai dengan ASTM D3039/D3039M, D7205/D7205M atau D7565/D755M. Untuk lebih jelasnya dapat dilihat dari Persamaan (2.1) dan Persamaan (2.2).

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

b. Regangan Ultimit

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

Keterangan :

ε_{fu}^* = Nilai regangan ultimit

ε_{fu} = Regangan ultimit rata-rata

σ = Standar Deviasi

2.10. 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).

2.11. 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.

2.11.1. Runtuh Rangkak

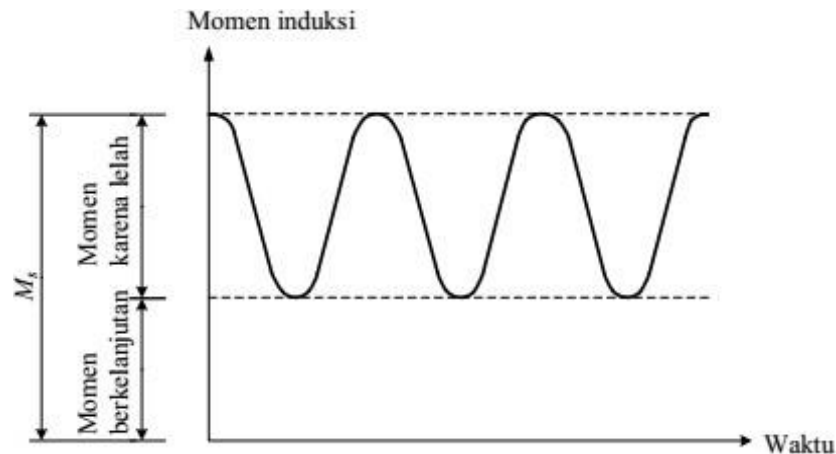
Pembebanan yang dapat ditahan oleh material FRP dalam periode tertentu dapat mengalami kegagalan secara tiba-tiba. Perilaku ini disebut dengan runtuh rangkak. Hal ini disebabkan karena rasio tegangan tarik yang tinggi dari leminasi FRP meningkat sehingga menyebabkan daya tahan menurun.

2.11.2. 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.

2.11.3. Keruntuhan 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 dilihat pada Gambar 2.9.



Gambar 2.9 Ilustrasi Jenis Momen Yang Bekerja Untuk Memeriksa Batas Tegangan Pada Perkuatan FRP

(sumber : RSNI 3 Pedoman Perancangan dan Pelaksanaan Sistem Serat Berperekat Polimer Terlekat Eksternal Untuk Struktur Beton)

Tabel 2.3 Batas Tegangan Menerus dan Siklik Tulangan FRP

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

(sumber : RSNI 3 Pedoman Perancangan dan Pelaksanaan Sistem Serat Berperekat Polimer Terlekat Eksternal Untuk Struktur Beton)

2.12. Desain Perkuatan Menggunakan CFRP (*Carbon Fiber Reinforced Polymers*)

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).

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

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 ACI 216.1 untuk beton bertulang dengan perkuatan FRP maka dapat menggunakan Persamaan (2.4) atau menggunakan peraturan ACI 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.

2.13. 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 Perancangan dan Pelaksanaan Sistem Serat Berekat Polimer Terlekat Eksternal Untuk Struktur Beton*” seperti yang terdapat pada tabel 2.3

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.

Dari tabel 2.3, 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

$$\varepsilon_{fu} : C_E \varepsilon_{fu}^* \dots\dots\dots(2.7)$$

keterangan :

ε_{fu} : Regangan rangkai runtuh

C_E : Faktor reduksi lingkungan

ε_{fu}^* : Desain regangan rangkai runtuh

Tabel 2.4 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 Pedoman Perancangan dan Pelaksanaan Sistem Serat Berperekat Polimer Terlekat 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 rangkak runtuh

Setelah melihat tabel 2.3 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.

2.14. Perkuatan Lentur Dengan Menggunakan FRP

Desain dalam perkuatan dengan menggunakan FRP harus berdasarkan falsafah perdesainan yaitu kekuatan lentur harus melebihi momen tefaktor sesuai dengan 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) dan untuk lebih jelasnya 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

2.14.1. Pola Keruntuhan

Keruntuhan pada penggunaan sistem FRP bisa saja terjadi hal ini dikarenakan prosedur pemasangan yang kurang baik Menurut GangaRao dan Vijay (1998) ada

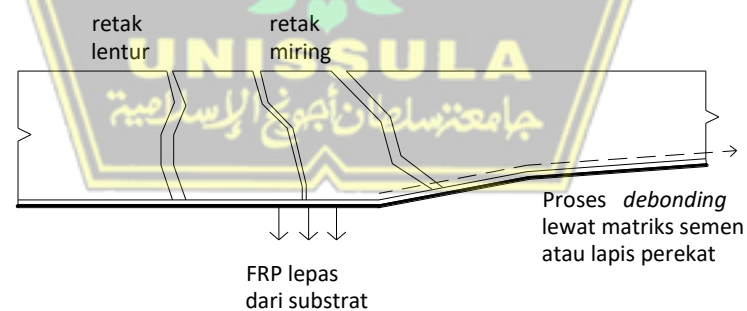
beberapa macam pola keruntuhan yang dapat terjadi pada elemen dengan penggunaan sistem FRP yaitu :

- 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*).

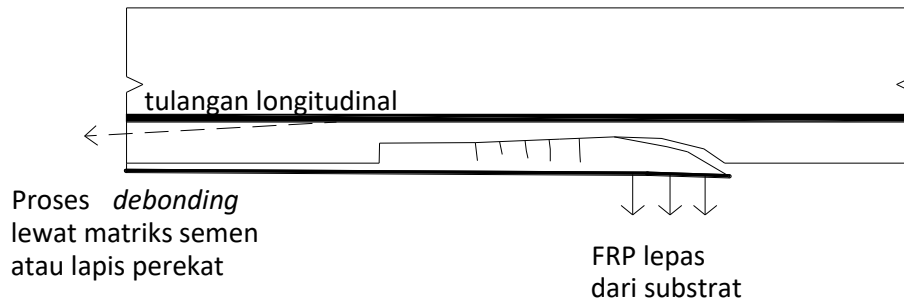
Peristiwa *debonding* atau terlepasnya ikatan jika gaya yang diterima oleh beton tidak dapat ditahan pada daerah lekatan FRP.



Gambar 2.10 Perilaku Batang Lentur Dengan Tulangan



Gambar 2.11 Debonding Yang Diinisiasi Oleh Retak Lentur Atau Geser



Gambar 2.12 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.

$$\epsilon_{fd} = 0,41 \sqrt{\frac{f'rc}{nEftf}} < 0,93 \epsilon_{fu} \dots\dots\dots(2.11)$$

keterangan :

ϵ_{fd} : Regangan debonding

ϵ_{fu} : Regangan runtuh

2.15. Perkuatan Beton Bertulang Dengan Menggunakan FRP

Perkuatan menggunakan FRP secara harfiah memang digunakan untuk meningkatkan kekuatan 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.

2.15.1. 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 dilihat di Gambar (2.13).



Gambar 2.13 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 : Kekuatan geser nominal

V_u : Kekuatan geser 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

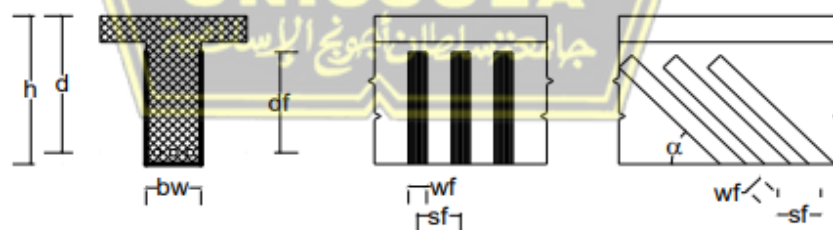
Faktor reduksi digunakan untuk memperhitungkan skema penempatan apabila kurangnya lekatan antara FRP dan substrat beton. Untuk faktor reduksi tambahan disesuaikan dengan Tabel 2.4.

Tabel 2.5 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 Pedoman Perancangan dan Pelaksanaan Sistem Serat Berperekat Polimer Terlekat Eksternal Untuk Struktur 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 dilihat pada Gambar 2.14.



Gambar 2.14 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

$$A_{fv} = 2n_t f_w \dots \dots \dots (2.15)$$

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.

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

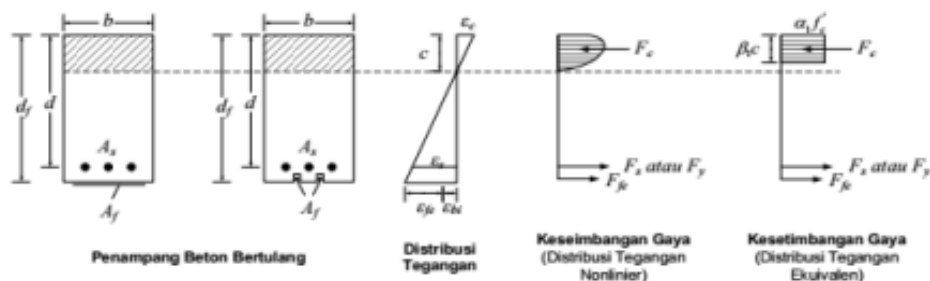
Dalam Peraturan ACI 38, jumlah dari kekuatan geser dari perkuatan geser harus dibatasi dengan Persamaan (2.18). Hal ini dilakukan untuk mengontrol jumlah kontribusi perkuatan geser dan penulangan geser baja.

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

2.15.2. 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 2.15 Distribusi Regangan dan Tegangan Penampang Persegi Terhadap Lentur Pada Kondisi Batas Ultimit

(sumber : RSNI 3 Pedoman Perancangan dan Pelaksanaan Sistem Serat Berperkat Polimer Terlekat Eksternal Untuk Struktur 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).

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

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

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

Untuk pembungkusan tiga sisi

$$K_2 = \frac{dfv - Le}{dfv} \dots\dots\dots(2.26)$$

Untuk pembungkusan dua sisi

$$K_2 = \frac{dfv - 2Le}{dfv} \dots\dots\dots(2.27)$$

2.15.3. 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).

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

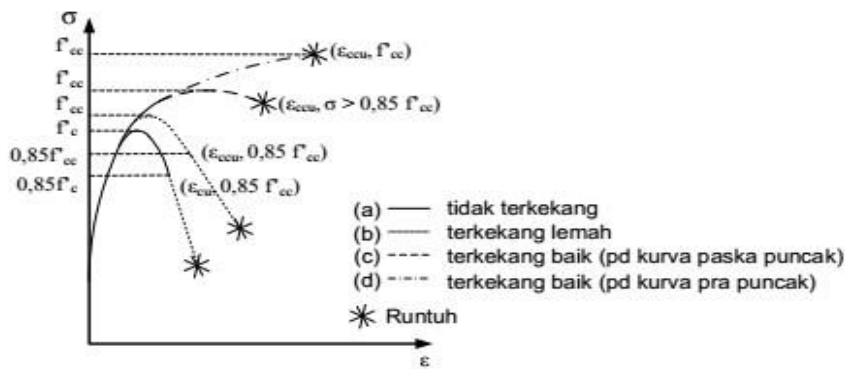
$$f_s = E_s \varepsilon_s < f_y \dots\dots\dots(2.30)$$

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

2.16. 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 2.16 Perilaku Tegangan – Regangan Untuk Beton Terkekang Menggunakan FRP

(sumber : RSNI 3 Pedoman Perancangan dan Pelaksanaan Sistem Serat Berperekat Polimer Terlekat Eksternal Untuk Struktur Beton)



Gambar 2.17 Model Tegangan-Regangan Regangan Untuk Beton Terkekang Menggunakan FRP

(sumber : RSNI 3 Pedoman Perancangan dan Pelaksanaan Sistem Serat Berperekat Polimer Terlekat 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.

$$f_{cc} \left\{ \begin{array}{l} E_c \epsilon_c - \frac{(E_c - E_2)^2}{4 f_c} \end{array} \right\} \epsilon_t \leq \epsilon_c \leq \epsilon_{cmax} \dots\dots\dots(2.33)$$

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

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

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

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

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

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

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

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

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).

$$\varepsilon_{ccu} = \varepsilon_e \left(1,50 + 12 k_b \frac{f_l}{f_c} \left(\frac{\varepsilon_{fe}}{\varepsilon_c} \right) 0,45 \right) \dots\dots\dots(2.40)$$

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.

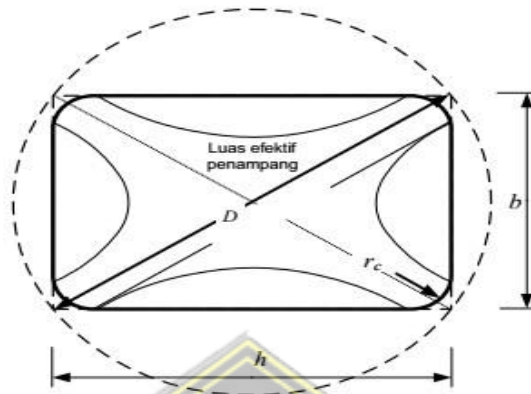
2.15.1. Penampang Lingkaran

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 pengekangan secara merata. Buat penampang lingkaran bisa menggunakan Persamaan (2.37) dan (2.40)

2.15.2. Penampang Non Lingkaran

Menurut pengujian yang telah dilakukan oleh Rocca et. Al (2008) menunjukan bahwa 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 dilihat pada Gambar 2.18.



Gambar 2.18 Luas Penampang Lingkaran Ekuivalen

(sumber : RSNI 3 Pedoman Perancangan dan Pelaksanaan Sistem Serat Berperekat Polimer Terlekat Eksternal Untuk Struktur Beton)

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

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

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

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

Berikut adalah persamaan yang diambil pada peraturan RSNI 3 Pedoman Perancangan dan Pelaksanaan Sistem Serat Berperekat Polimer Terlekat Eksternal Untuk Struktur Beton) dalam menentukan diagram interaksi kolom yang dapat dilihat pada Persamaan 2.45 sampai dengan Persamaan 2.53

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

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

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

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

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

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

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

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

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



BAB III

METODOLOGI PENELITIAN

3.1. Pendahuluan

Penulisan tugas akhir ini bertujuan untuk memodifikasi atau memperbaiki struktur yang sudah ataupun belum mengalami kerusakan, memperbaiki desain dan mengevaluasi pelaksanaan yang kurang dari ketetapan persyaratan. Dengan menggunakan data proyek yang berupa data teknis, data-data yang diperlukan untuk perhitungan dalam pembuatan tugas akhir, dan data dari hasil *Loading Test* untuk mendukung informasi bangunan yang ditinjau.

Data tersebut digunakan untuk menghitung serta meng-analisa beban yang bekerja pada struktur bangunan yang akan diperbaiki dan diperkuat menggunakan material CFRP (*Carbon Fiber Reinforced Polymer*) dimana CFRP ini sangat cocok untuk perbaikan struktur yang telah mengalami suatu kegagalan. Sebelum adanya perbaikan terlebih dulu melakukan analisis dengan program *ETABS v.18* serta memasukkan beban yang bekerja pada struktur bangunan. Dari hasil analisis tersebut kita dapat mengetahui bagian struktur mana saja yang mengalami kerusakan, lendutan, retak ataupun geser yang perlu untuk diperbaiki

3.2. Data Proyek Yang Diperoleh

Dari data yang dipergunakan untuk perencanaan suatu perbaikan dengan menggunakan data primer dapat dilihat pada Tabel 3.1 dibawah ini:

Tabel 3.1 Data Proyek

Nama Proyek	:	Gedung 4 lantai
Luas Bangunan	:	924 m ²
Total Jumlah Lantai	:	4 Lantai
Tinggi Bangunan	:	22,91 m
Kegunaan Bangunan	:	Gedung Perkantoran
Mutu Baja	:	420 MPa
Mutu Beton	:	K-250 MPa

3.3. Aturan Pada Standar Desain Perencanaan

Rencana desain yang digunakan sebagai berikut:

- SNI 1726 2019 mengenai tata cara ketahanan gempa untuk struktur bangunan gedung dan non gedung.
- SNI 1727 2020 mengenai peraturan beban minimum untuk perancangan bangunan gedung dan struktur lainnya.
- SNI 440.2R-17 mengenai tata cara perancangan dan pelaksanaan sistem serat ber perekat polimer terlekat elastis untuk perkuatan struktur beton.

3.4. Pembebanan Struktur Gedung

Pembebanan adalah suatu faktor yang cukup penting dalam merancang suatu struktur bangunan. Karena itu dalam merancang suatu struktur perlu adanya identifikasi beban-beban yang bekerja pada sistem struktur tersebut. Beban yang bekerja pada struktur bangunan yang ditimbulkan langsung oleh gaya-gaya alamiah dan buatan manusia. Secara umum, struktur bangunan dikatakan aman dan stabil apabila mampu menahan beban gravitasi dan beban gempa yang bekerja pada bangunan tersebut.

3.4.1 Beban Mati (SNI 1727:2020)

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

3.4.2 Beban Hidup (SNI 1727:2020)

Beban hidup adalah beban yang diakibatkan oleh penggunaan dan pengguna bangunan gedung atau struktur lain yang tidak termasuk beban konstruksi dan beban lingkungan, seperti diantaranya 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 dan Beban mati pada Lantai

Lantai	No	Lokasi	Tebal Pelat (m)	Berat Material		Berat Sendiri Pelat	Beban Mati (kN/m ²)				Beban Hidup (kN/m ²)
				Beton Bertulang kN/m ³	Beton Polos kN/m ³		Beban Mati Tambahan				
							Fin. Lantai (0.05 m)	Plafond + Penggantung	ME	Total	
Lantai 1	1	Ruang panel	0.10	24	22	2.40	1.10	0.20	0.50	1.80	3.00
	2	Ruang pompa hidrant	0.10	24	22	2.40	1.10	0.20	0.50	1.80	5.00
	3	Ruang Genset	0.10	24	22	2.40	1.10	0.20	0.50	1.80	6.00
	4	Ruang Rapat	0.10	24	22	2.40	1.10	0.20	0.50	1.80	4.80
	5	Hall	0.10	24	22	2.40	1.10	0.20	0.50	1.80	4.80
	6	Lavatory	0.10	24	22	2.40	1.10	0.20	0.50	1.80	2.00
Lantai 2	1	Ruang Meeting	0.12	24	22	2.88	1.10	0.20	0.50	1.80	4.80
	2	Ruang perpustakaan	0.12	24	22	2.88	1.10	0.20	0.50	1.80	4.80
	3	Ruang panel	0.12	24	22	2.88	1.10	0.20	0.50	1.80	3.00
	4	Gudang alat kebersihan	0.12	24	22	2.88	1.10	0.20	0.50	1.80	3.00
	5	Hall	0.12	24	22	2.88	1.10	0.20	0.50	1.80	4.80
	6	Lavatory	0.12	24	22	2.88	1.10	0.20	0.50	1.80	2.00
Lantai 3	1	Ruang mini theater	0.12	24	22	2.88	1.10	0.20	0.50	1.80	4.80
	2	Ruang audio	0.12	24	22	2.88	1.10	0.20	0.50	1.80	2.50
	3	Ruang Kantor	0.12	24	22	2.88	1.10	0.20	0.50	1.80	2.50
	4	Ruang panel	0.12	24	22	2.88	1.10	0.20	0.50	1.80	3.00
	5	Hall	0.12	24	22	2.88	1.10	0.20	0.50	1.80	4.80
	6	Lavatory	0.12	24	22	2.88	1.10	0.20	0.50	1.80	2.00
Lantai 4	1	Ruang kantor	0.12	24	22	2.88	1.10	0.20	0.50	1.80	2.50
	2	Roof top	0.12	24	22	2.88	1.10	0.20	0.50	1.80	1.00
	3	Ruang panel	0.12	24	22	2.88	1.10	0.20	0.50	1.80	3.00
	4	Lavatory	0.12	24	22	2.88	1.10	0.20	0.50	1.80	2.00
Lantai Atap	1	Area Atap	0.12	24	22	2.88	1.10	0.20	0.50	1.80	1.00
	2	Area Roof tank Kapasitas 2 m ³	0.12	24	22	2.88	1.10	0.20	0.50	1.80	2.00

Sumber : SNI 1727:2020

3.4.3 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 3.10.

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 diakibatkan oleh berat konstruksi permanen.

L = Beban hidup yang ditimbulkan oleh penggunaan gedung, termasuk kejut, tidak termasuk beban lingkungan seperti angin, hujan, dll.

L_r = Beban hidup atap

E = Beban gempa

W = Beban angin

R = Beban hujan

3.5. Permodelan Desain Struktur

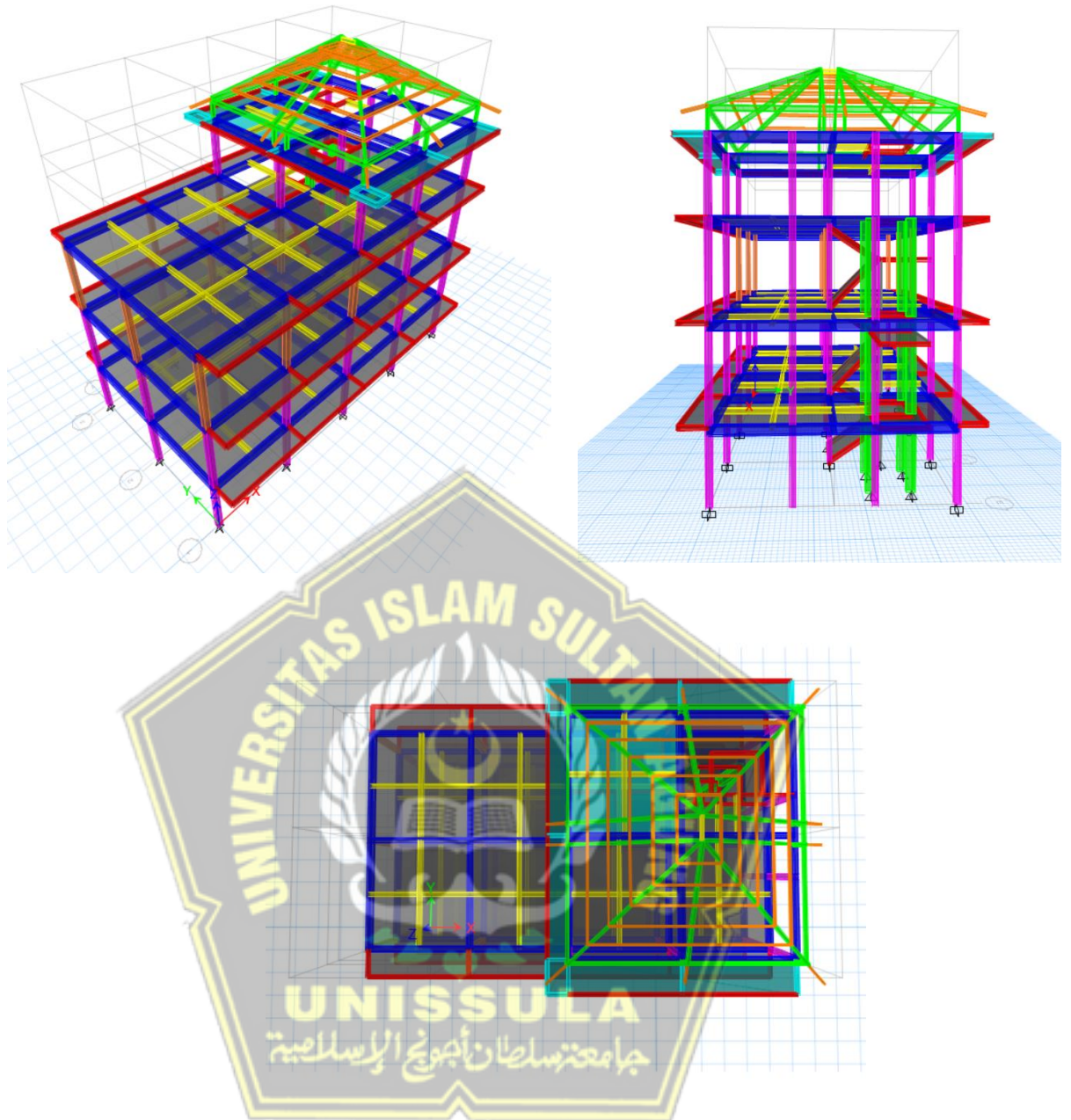
Rekomendasi yang ditinjau pada kolom yang paling kritis yaitu dengan membuat permodelan terlebih dahulu kemudian bisa mengetahui dimana letak kolom yang telah mengalami kerusakan. Ukuran pada tiap komponen dapat dilihat pada Tabel 3.2 dibawah ini:

Tabel 3.5 Tinggi Pada Tiap Lantai

Keterangan	Tinggi	Elevasi
Atap	4910 mm	22910 mm
Lantai 4	4000 mm	18000 mm
Lantai 3	5000 mm	14000 mm
Lantai 2	5000 mm	9000 mm
Lantai 1	4000 mm	4000 mm

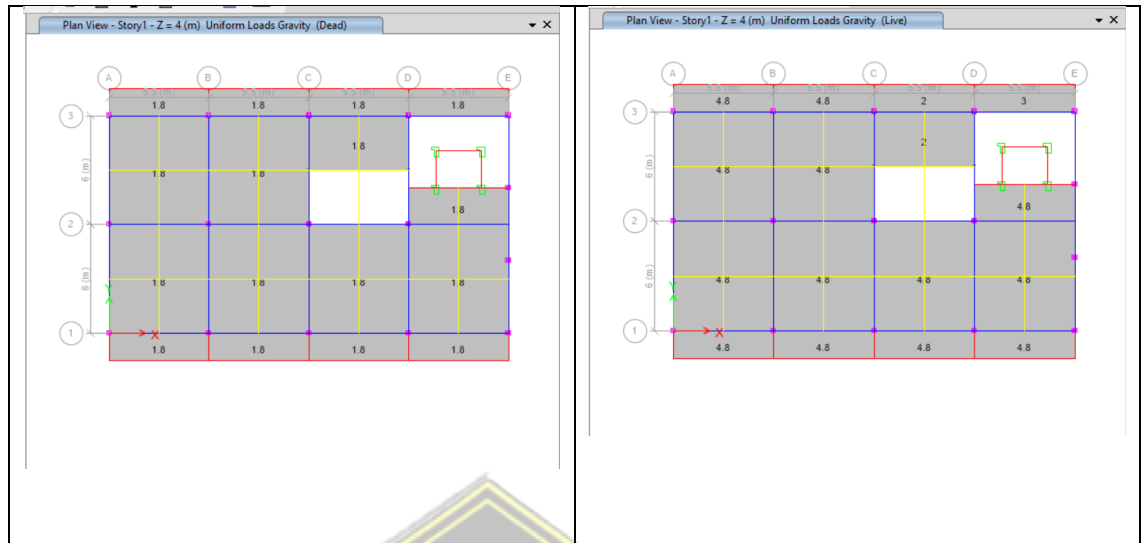
Tabel 3.6 Ukuran Pada Balok, Kolom dan Pelat

Jenis Struktur	Kode	Dimensi/Tebal
Balok	B1	250 x 500
	B2	200 x 300
	B3	150 x 250
Kolom	K1	300 x 300
	K2	200 x 400
Pelat	Plat 12 cm	120
	Plat 10 cm	100

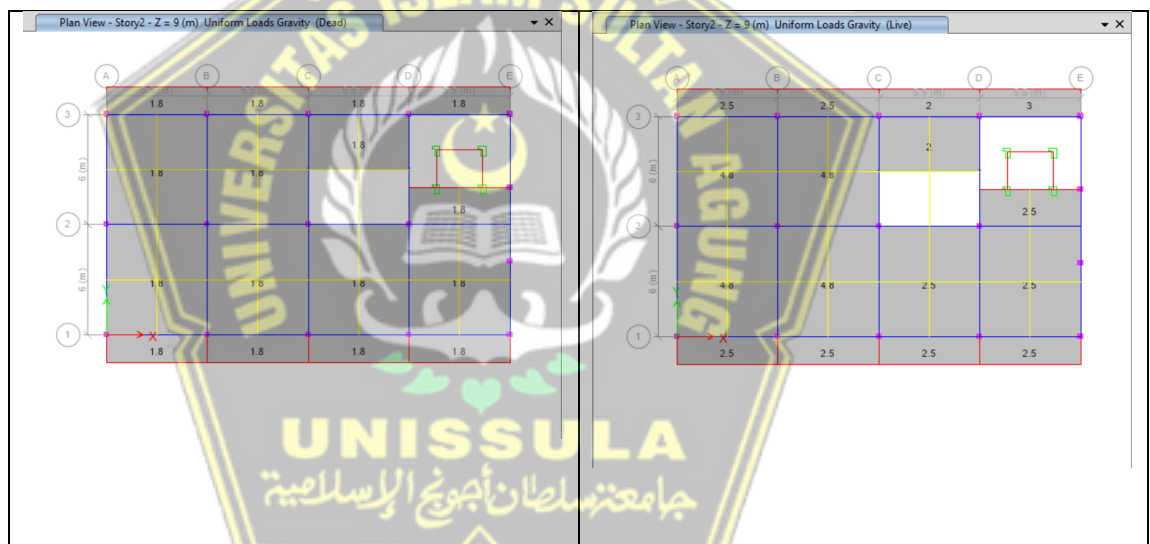


Gambar 3.1 Permodelan Gedung Perkantoran Menggunakan ETABS

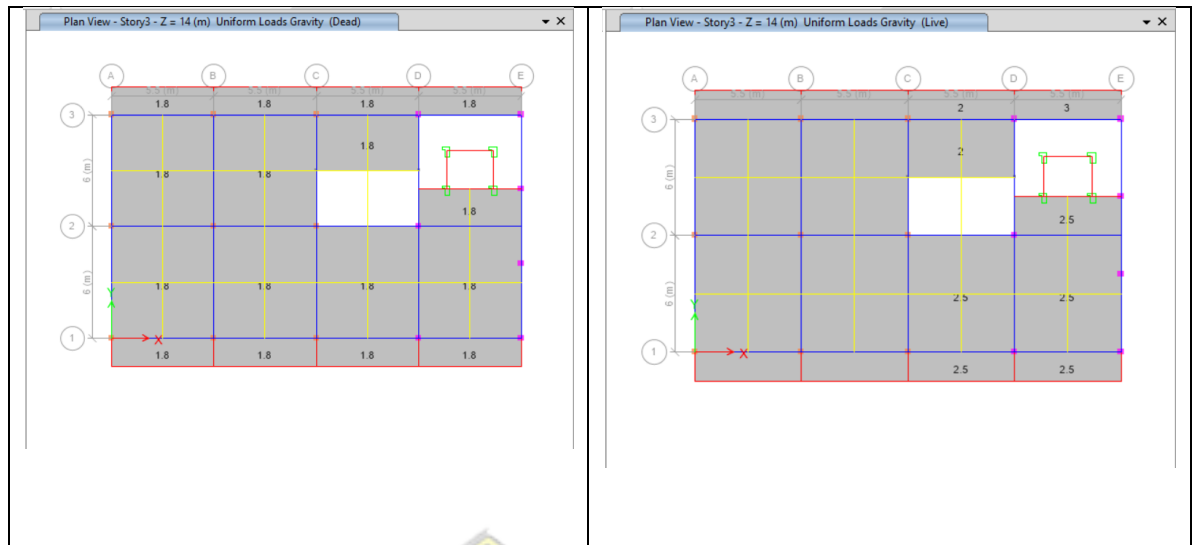
3.6. Input Beban



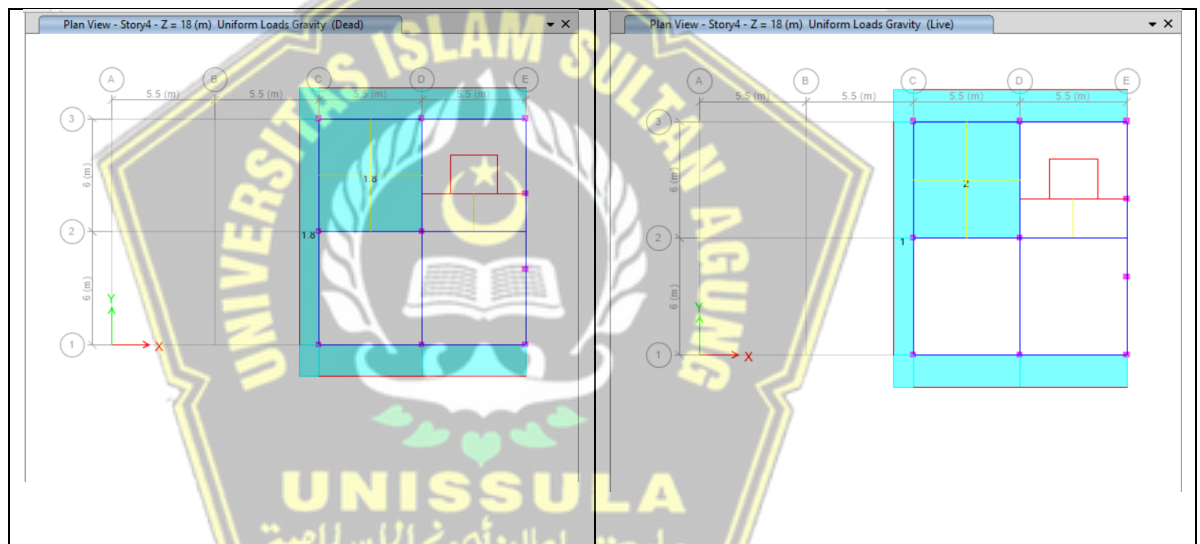
Gambar 3.2 : Input Beban Mati Tambahan dan Beban Hidup Lantai 2



Gambar 3.3 : Input Beban Mati Tambahan dan Beban Hidup Lantai 3



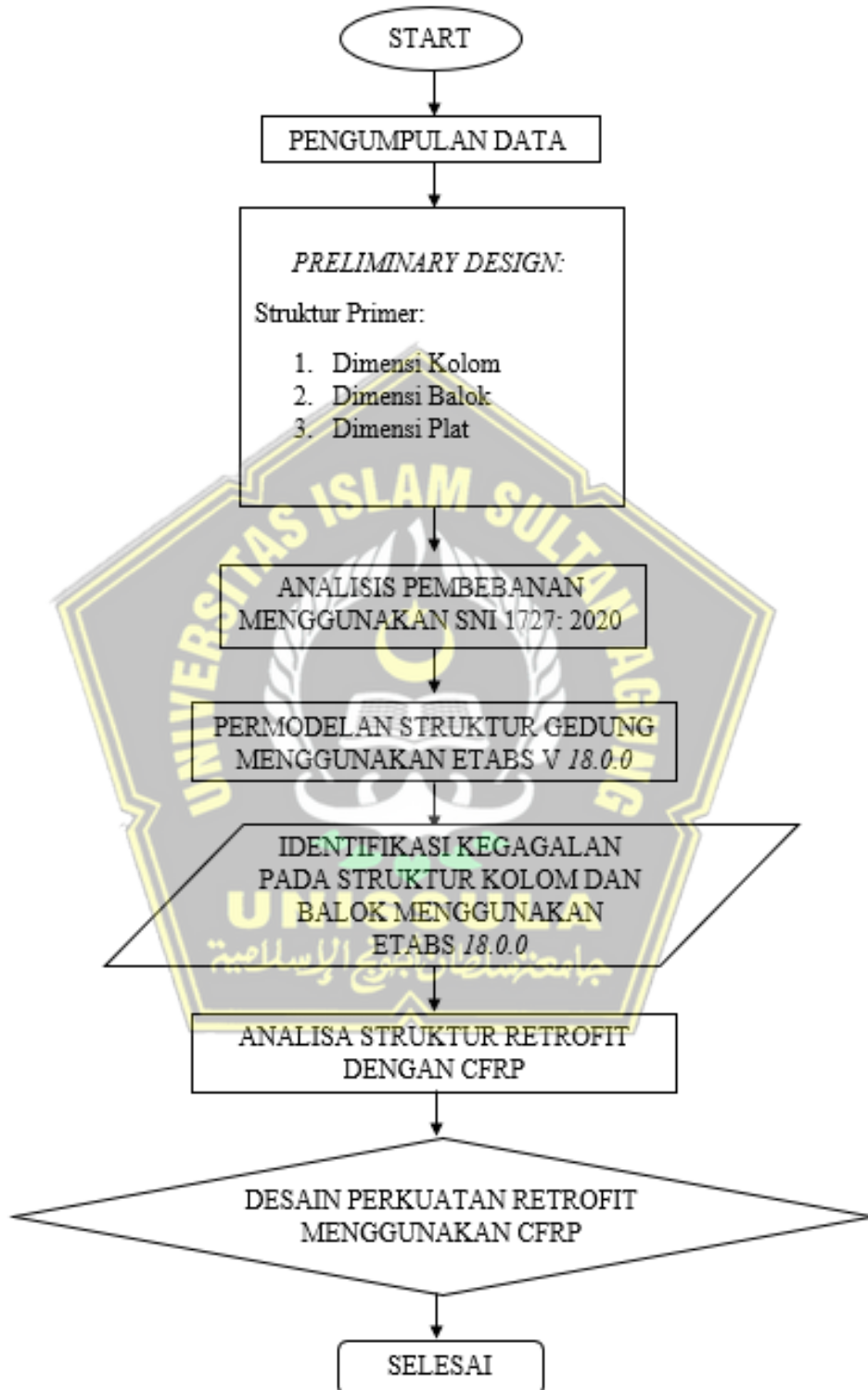
Gambar 3.4 : Input Beban Mati Tambahan dan Beban Hidup Lantai 4



Gambar 3.5 : Input Beban Mati Tambahan dan Beban Hidup Lantai Atap

3.7. Bagan Alur Perencanaan Desain CFRP

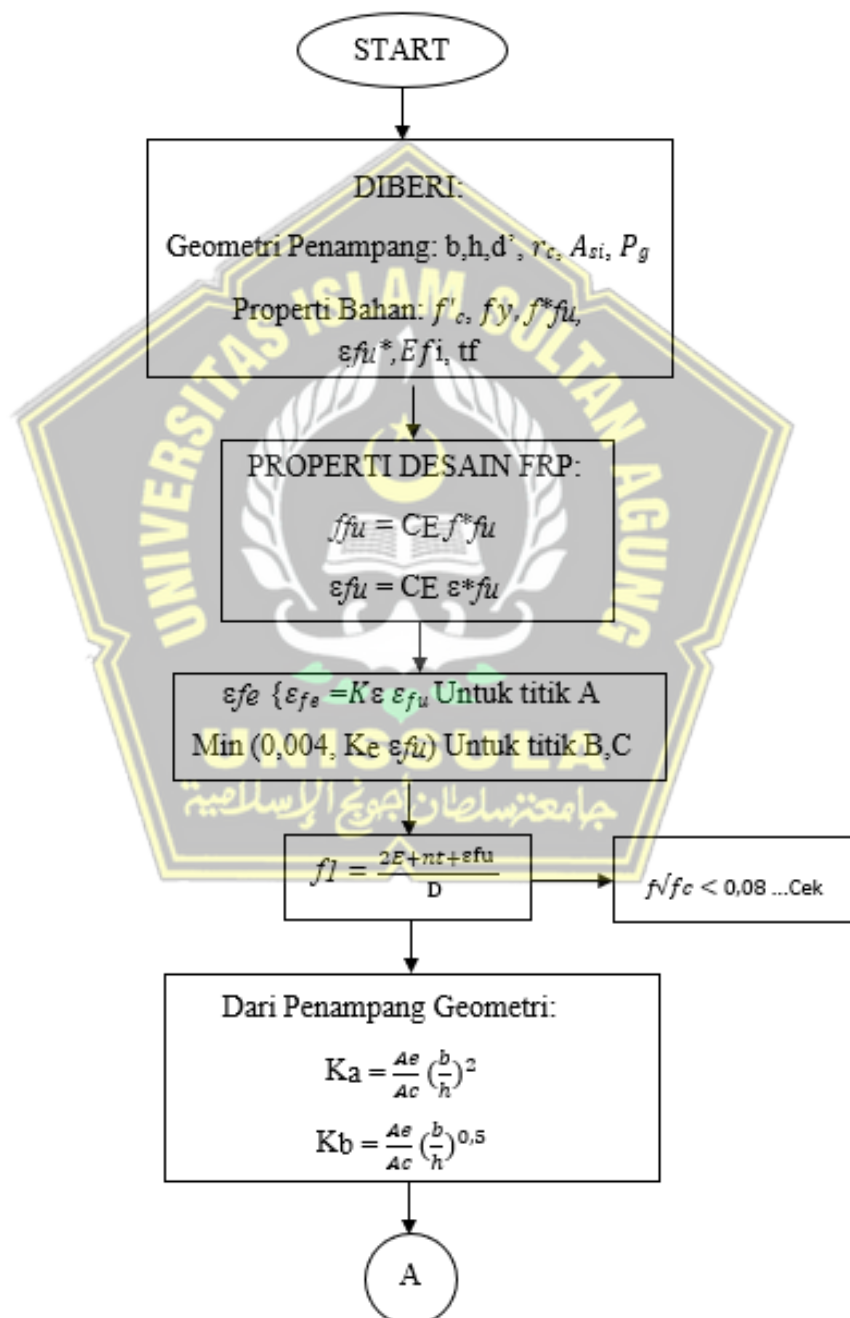
Pada Tugas Akhir ini metode yang dilakukan untuk mendesain CFRP pada suatu struktur secara keseluruhan dapat dilihat pada Gambar 3.6.

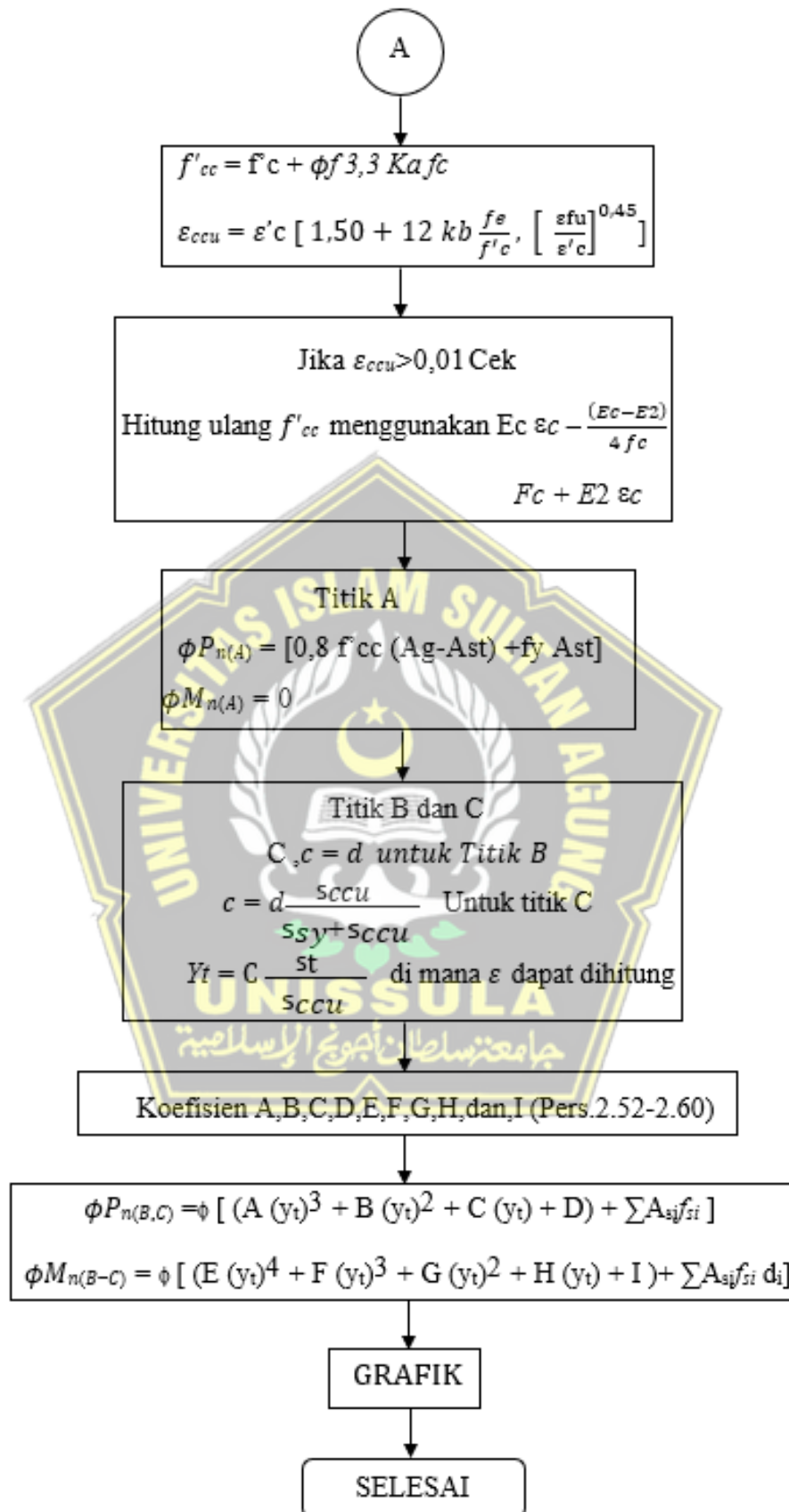


Gambar 3.6 Bagan Alur Perencanaan Desain FRP

3.7.1. 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 3.7.

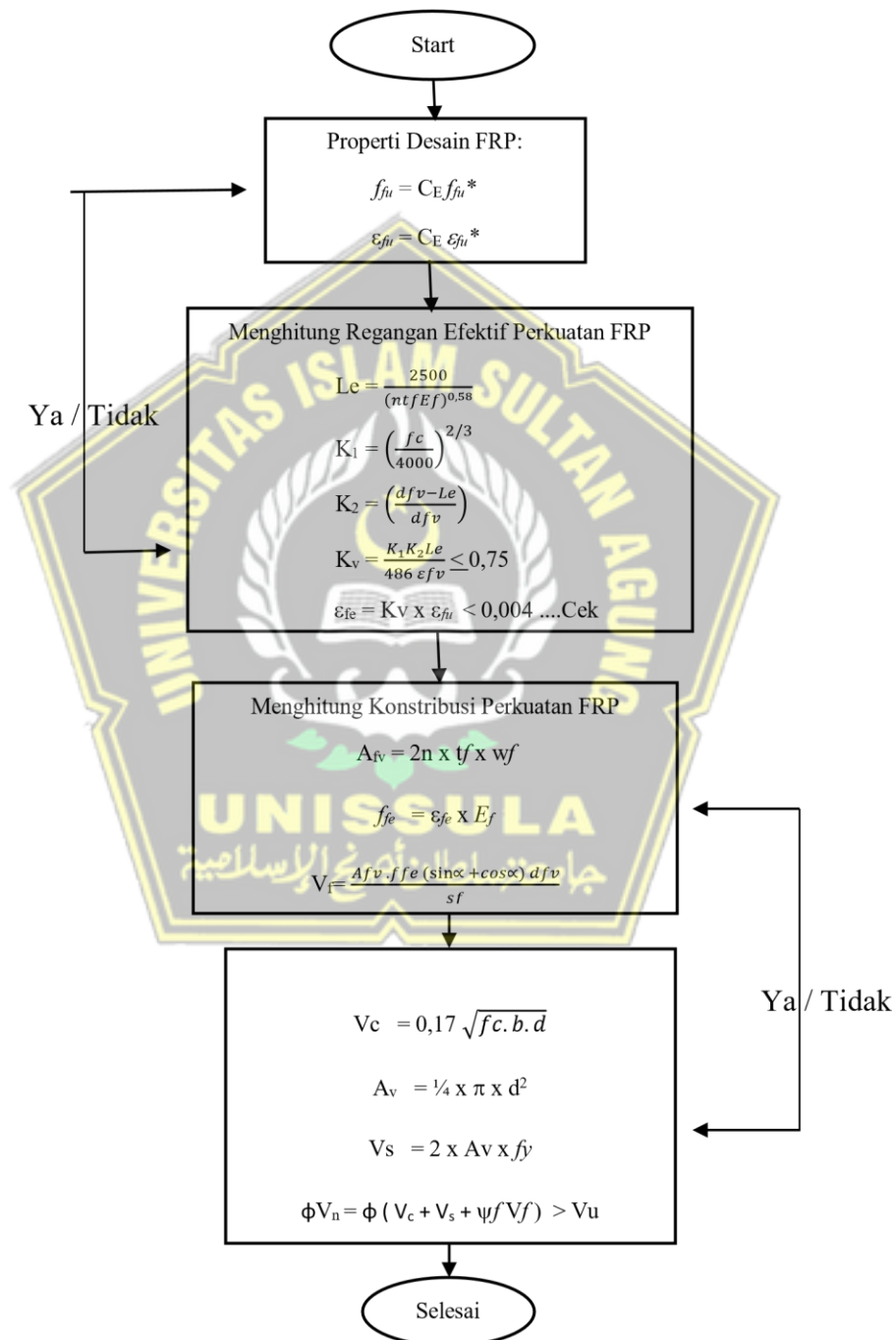




Gambar 3.7 Flowchart Desain Kolom

3.7.2. Bagan Alur Desain CFRP Pada Balok Akibat Kegagalan Geser

Jika pada desain yang telah dianalisis kegagalan struktur pada balok yang terjadi merupakan keggalan geser maka metode yang dilakukan dapat dilihat pada Gambar 3.8



Gambar 3.8 Flowchart Desain Balok

BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1. Data Struktur Gedung

4.1.1. Deskripsi Umum Struktur

Desain perkuatan konstruksi gedung menggunakan permodelan 3D dengan bantuan *software* ETABS V 2018. Elemen *frame* struktur yang dimodelkan pada masing-masing kolom dan balok sedangkan untuk plat dimodelkan dengan elemen *shell*. Pembebanan dan kombinasi yang diterapkan pada desain ini menggunakan peraturan SNI 1727:2019 mengenai “*Beban Minimum Untuk Perancangan Bangunan Gedung Dan Struktur Lain*”.

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

Tabel 4. 1. Data Model Struktur Gedung

Fungsi Bangunan	: Gedung Perkantoran
Jumlah Lantai	: 4 Lantai
Tinggi Total	: 22,91 m
Sistem Struktur	: Sistem Rangka Pemikul Momen Khusus (SRPMK)

Berikut denah permodelan dari gedung yang didesain dapat dilihat pada Gambar 4.1 sebagai berikut:

1) Mutu Baja Tulangan, sesuai Tabel 4.3

Tabel 4. 3. Mutu Baja Tulangan

No	Jenis Tulangan	f_y (MPa)	f_u (MPa)	f_{ye} (MPa)	f_{ue} (MPa)
1	BJTS ($D \geq 10$ mm)	240	390	288	468

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	25	MPa
E	23500	MPa

b) Kolom, sesuai Tabel 4.5

Tabel 4. 5. Mutu Beton Kolom

f'_c	25	MPa
E	23500	MPa

Perhitungan modulus elastisitas (E) diperoleh berdasarkan Persamaan 4.1

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

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

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

4.2. Pemodelan Elemen Struktur

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

4.2.1. Pemodelan Pelat

Pemodelan awal pelat satu arah dan dua arah menggunakan program ETABS dengan memodelkan sebagai *slab* dengan *shell-thin*. Berdasarkan *preliminary*

desain, tebal pelat yang digunakan adalah 12 mm. Untuk memperhitungkan pengaruh keretakan beton ketika terjadinya gempa, momen inersia penampang pelat dan torsi direduksi sebesar 25% untuk menyeimbangkan nilai reduksi terhadap inersia elemen struktur. Elemen pelat akan dimodelkan *semi-rigid* pada program ETABS untuk menghitung gaya yang bekerja pada pelat.

4.2.2. Pemodelan Balok

Balok akan dimodelkan sebagai elemen *frame* dengan *rigid joint* sehingga momen-momen maksimum tempat terbentuknya sendi plastis berada di ujung-ujung balok. Terdapat dua elemen balok yang dimodelkan, yaitu balok induk dan balok anak. Dimensi balok yang digunakan dalam desain dapat dilihat pada Tabel 4.6 sebagai berikut:

Tabel 4.6. Dimensi Balok

Nama	Status Balok	Tipe Balok	H_{dipakai}	B_{dipakai}
B1	Induk	Persegi panjang	500	250
B2	Anak	Persegi panjang	300	200
B3	Anak	Persegi panjang	250	150

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

4.2.3. Pemodelan Kolom

Perancangan bangunan ini menggunakan empat tipe dimensi kolom dengan perbedaan dimensi setiap dua lantai. Kolom dimodelkan sebagai *frame* dan ujung-ujung kolom didesain jepit-jepit. Pada elemen kolom, momen inersia efektif kolom direduksi hingga 70% dari momen inersia awal untuk memperhitungkan keretakan beton akibat gempa. Torsi juga direduksi sebesar 25% untuk menyeimbangkan nilai reduksi terhadap inersia elemen struktur. Dimensi kolom yang digunakan dalam desain dapat dilihat pada Tabel 4.7.

Tabel 4.7. Dimensi Kolom Setelah Pengecekan

Tipe	Dimensi Kolom Sisi Horizontal	Dimensi Kolom Sisi Vertikal
	mm	mm
K1	300	300
K2	200	400

4.3. Pemodelan Struktur

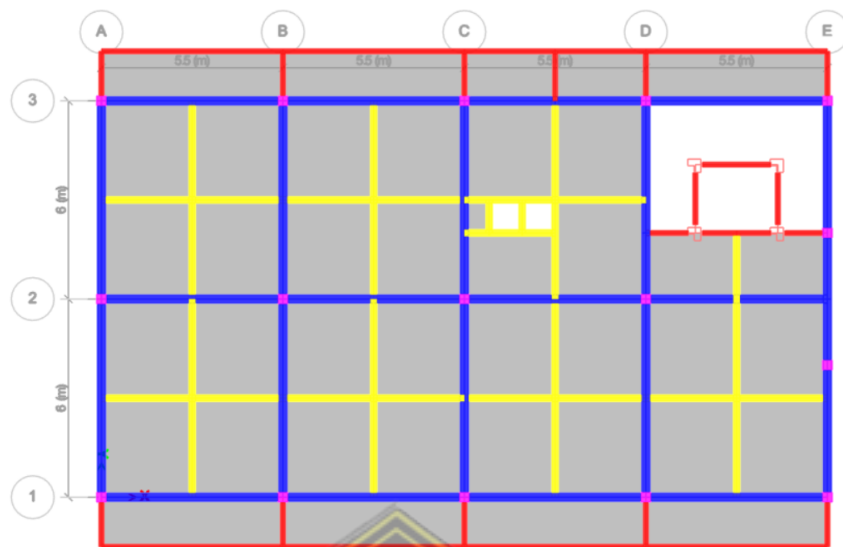
Pemodelan gedung pada akhirnya dirancang sebagai struktur gedung sistem ganda. Pemodelan awal dilakukan dengan bantuan program ETABS dengan dimodelkan sebuah sistem *grid*, dengan *grid* sebagai garis titik berat dan elemen struktur yang dimodelkan.

4.3.1. Permodelan

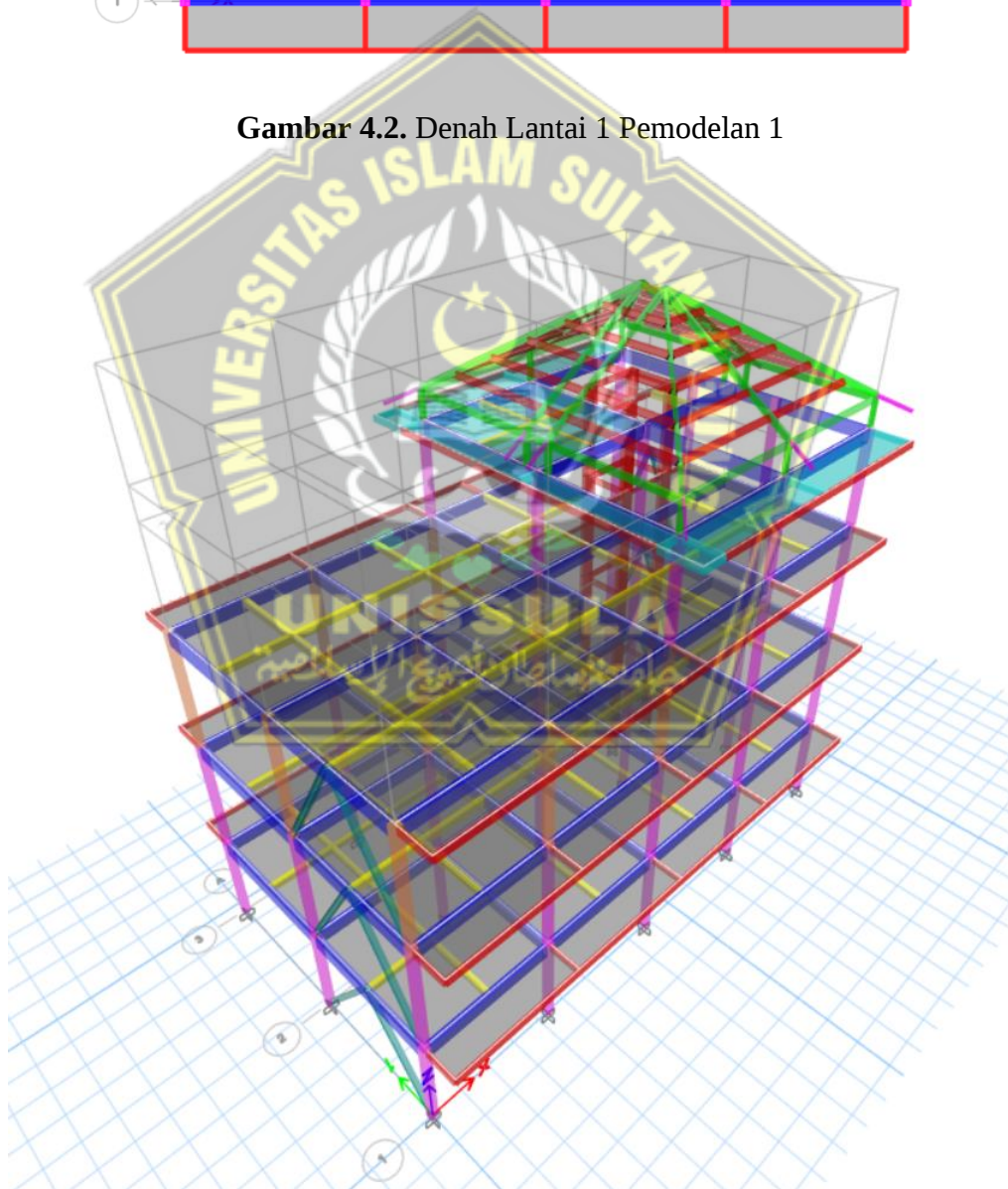
Pada model ini, akan dimodelkan gedung tinggi 4 lantai yang direncanakan berdasarkan Sistem Rangka Pemikul Momen Khusus (SRPMK). Dengan Spesifikasi sebagai Berikut:

- Mutu Beton 25 MPa
- Kolom 300 x 300 (kolom lt 1-4)
- Balok 25x50 (Balok Utama)
- Balok 20x30 (Balok Anak)
- Plat lantai 12 mm

Berikut denah dan gambar 3D dari model gedung yang didesain dapat dilihat pada Gambar 4.2 dan Gambar 4.3.



Gambar 4.2. Denah Lantai 1 Pemodelan 1



Gambar 4.3. Model 3D Pemodelan 1

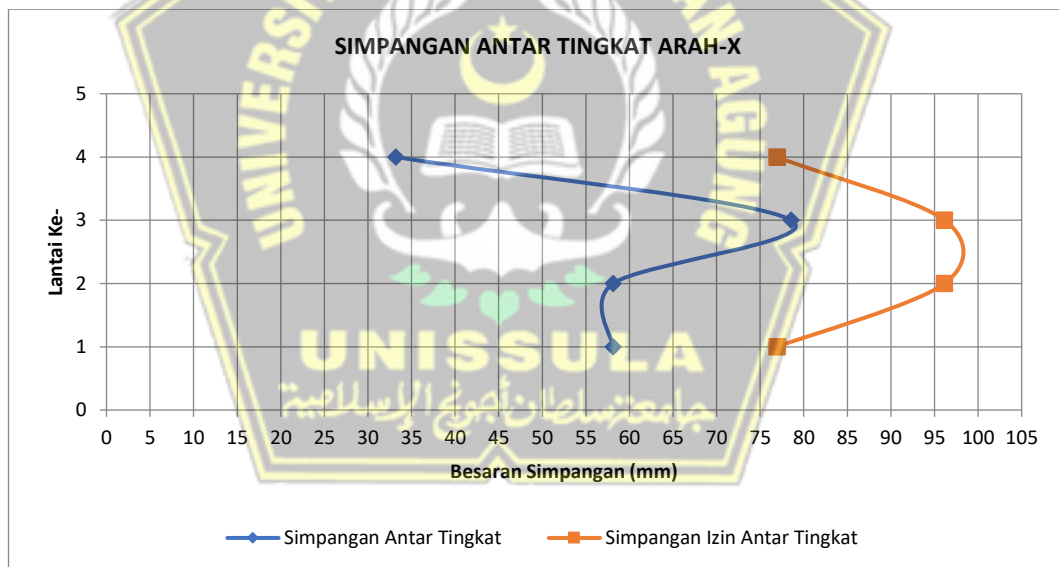
Pada model pertama, bangunan mengalami:

- Mode 1 : Translasi Arah X (1,3637 Detik)
- Mode 2 : Translasi Arah Y (0,6479 Detik)
- Mode 3 : Rotasi (0,4600 Detik)

Dan hasil analisis simpangan antar tingkat (*story drift*) arah X ditunjukkan pada Tabel 4.9 dan Gambar 4.5, sedangkan hasil analisis simpangan antar tingkat arah Y ditunjukkan pada Tabel 4.8 dan Gambar 4.4.

Tabel 4.8. Pengecekan *Story Drift* Arah X Pemodelan 1

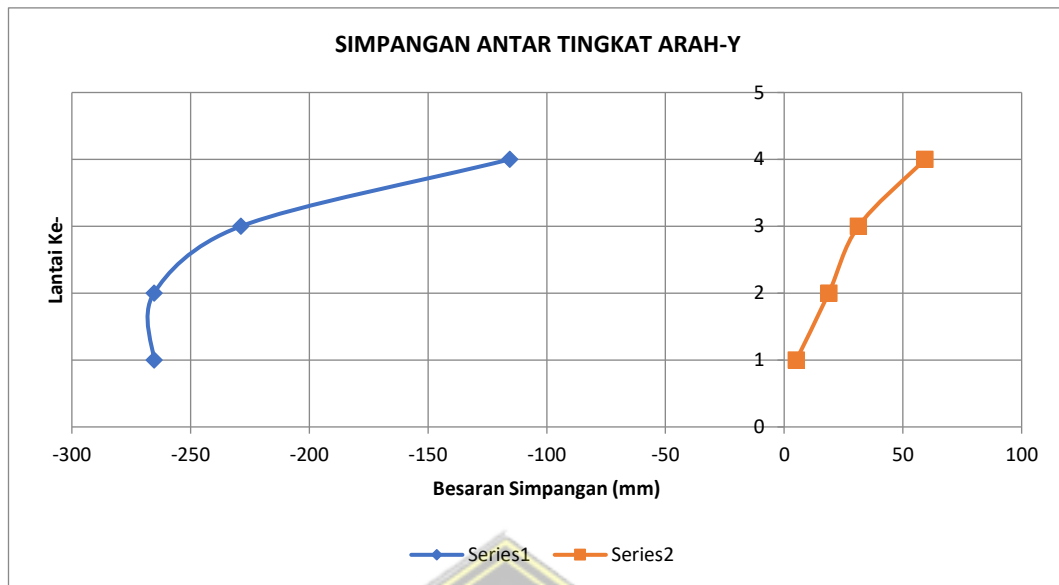
Story	hsx	δe	Δ	Δi	$\Delta izin$	Ket
	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	
4	4000	51.37	282.54	33.21	76.92	OK
3	5000	45.33	249.33	78.56	96.15	OK
2	5000	31.05	170.77	58.12	96.15	OK
1	4000	10.57	58.12	58.12	76.92	OK



Gambar 4.4. 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)	
4	4000	92.67	509.67	-115.60	59.243	OK
3	5000	113.69	625.27	-228.83	31.27	OK
2	5000	72.08	396.44	-265.42	18.757	OK
1	4000	23.82	131.02	-265.42	5.111	OK



Gambar 4.5. Diagram *Story Drift* Arah X 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.

4.4. Pembebanan Struktur

4.4.1. Pembebanan Gravitasi

Pembebanan gravitasi yang digunakan berdasarkan SNI 1727:2020, yaitu Beban Desain Minimum dan Kriteria Terkait untuk Bangunan Gedung dan Struktur Lain. Beban gravitasi dalam perencanaan bangunan tinggi 4 lantai ini meliputi: beban mati berat sendiri (*dead load*), beban mati tambahan (*super imposed dead load*), dan beban hidup (*live load*).

a. Beban Mati Berat Sendiri (DL)

Beban mati (*dead load*) adalah berat seluruh komponen elemen struktural bangunan yang terdiri atas pelat, balok, 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.

c. Beban Hidup (LL)

Beban hidup (*live load*) adalah beban yang terjadi akibat penghunian atau penggunaan gedung yang berasal dari barang atau orang yang dapat berpindah tempat sehingga mengakibatkan perubahan dalam pembebanan lantai dan atap. Beban hidup (*LL*) yang digunakan dalam desain ini dapat dilihat pada Tabel 4.10.

Tabel 4. 10. Beban Gravitasi

Lantai	No	Lokasi	Tebal Pelat (m)	Berat Material		Berat Sendiri Pelat	Beban Mati (kN/m ²)				Beban Hidup (kN/m ²)
				Beton Bertulang kN/m ²	Beton Polos kN/m ²		Beban Mati Tambahan				
							Fin. Lantai (0,05 m)	Plafond + Penggantung	ME	Total	
Lantai 1	1	Ruang panel	0,10	24	22	2,40	1,10	0,20	0,50	1,80	3,00
	2	Ruang pompa hidrant	0,10	24	22	2,40	1,10	0,20	0,50	1,80	5,00
	3	Ruang Genset	0,10	24	22	2,40	1,10	0,20	0,50	1,80	6,00
	4	Ruang Rapat	0,10	24	22	2,40	1,10	0,20	0,50	1,80	4,80
	5	Hall	0,10	24	22	2,40	1,10	0,20	0,50	1,80	4,80
	6	Lavatory	0,10	24	22	2,40	1,10	0,20	0,50	1,80	2,00
Lantai 2	1	Ruang Meeting	0,12	24	22	2,88	1,10	0,20	0,50	1,80	4,80
	2	Ruang perpustakaan	0,12	24	22	2,88	1,10	0,20	0,50	1,80	4,80
	3	Ruang panel	0,12	24	22	2,88	1,10	0,20	0,50	1,80	3,00
	4	Gudang alat kebersihan	0,12	24	22	2,88	1,10	0,20	0,50	1,80	3,00
	5	Hall	0,12	24	22	2,88	1,10	0,20	0,50	1,80	4,80
	6	Lavatory	0,12	24	22	2,88	1,10	0,20	0,50	1,80	2,00
Lantai 3	1	Ruang mini theater	0,12	24	22	2,88	1,10	0,20	0,50	1,80	4,80
	2	Ruang audio	0,12	24	22	2,88	1,10	0,20	0,50	1,80	2,50
	3	Ruang Kantor	0,12	24	22	2,88	1,10	0,20	0,50	1,80	2,50
	4	Ruang panel	0,12	24	22	2,88	1,10	0,20	0,50	1,80	3,00
	5	Hall	0,12	24	22	2,88	1,10	0,20	0,50	1,80	4,80
	6	Lavatory	0,12	24	22	2,88	1,10	0,20	0,50	1,80	2,00
Lantai 4	1	Ruang kantor	0,12	24	22	2,88	1,10	0,20	0,50	1,80	2,50
	2	Roof top	0,12	24	22	2,88	1,10	0,20	0,50	1,80	1,00
	3	Ruang panel	0,12	24	22	2,88	1,10	0,20	0,50	1,80	3,00
	4	Lavatory	0,12	24	22	2,88	1,10	0,20	0,50	1,80	2,00
Lantai Atap	1	Area Atap	0,12	24	22	2,88	1,10	0,20	0,50	1,80	1,00
	2	Area Rooftank Kapasitas 2 m ³	0,12	24	22	2,88	1,10	0,20	0,50	1,80	2,00

4.4.2. Pembebanan Gempa

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

a) Analisis Beban Gempa

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

1. Kategori Risiko dan Faktor Keutamaan Gempa

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

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 4.30.

Tabel 4.11. Data Parameter Respons Spektra Terpetakan

Variabel	Nilai
F_{PGA}	0,4027
S_s (g)	0,9289
S_1 (g)	0,4158
TL (detik)	6

3. Parameter Respons Spektra Percepatan Gempa Tertarget

Nilai parameter respons spektra percepatan gempa tertarget pada periode pendek (S_{MS}) dan periode 1 detik (S_{M1}) disesuaikan dengan pengaruh klasifikasi situs yang diperoleh dari Program Desain Spektra Indonesia di *website* resmi Direktorat Jenderal Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat Indonesia dengan cara menentukan jenis tanah maka didapatkan nilai parameter respons spektra gempa tertarget berdasarkan Persamaan 2.1 dan 2.2 sebagai berikut:

$$F_a = 1,1465$$

$$F_v = 2,3448$$

$$S_{MS} = F_a \times S_s = 1,12844 \times 0,9289 = 1,065$$

$$S_{M1} = F_v \times S_1 = 2,34 \times 0,4158 = 0,975$$

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.

$$S_{DS} = \frac{2}{3} \times S_{MS} = \frac{2}{3} \times 1,065 = 0,71$$

$$S_{D1} = \frac{2}{3} \times S_{M1} = \frac{2}{3} \times 0,975 = 0,65$$

5. Kategori Desain Seismik

Berdasarkan SNI 1726:2019, tiap struktur bangunan diharuskan memiliki suatu Kategori Desain Seismik. Gedung yang 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 Tabel 12 dihasilkan koefisien modifikasi respon (R) = 8, faktor kuat lebih sistem (Ω_0) = 3, dan faktor pembesaran defleksi (C_d) = 5,5.

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

b) Rekap Analisis Beban Gempa

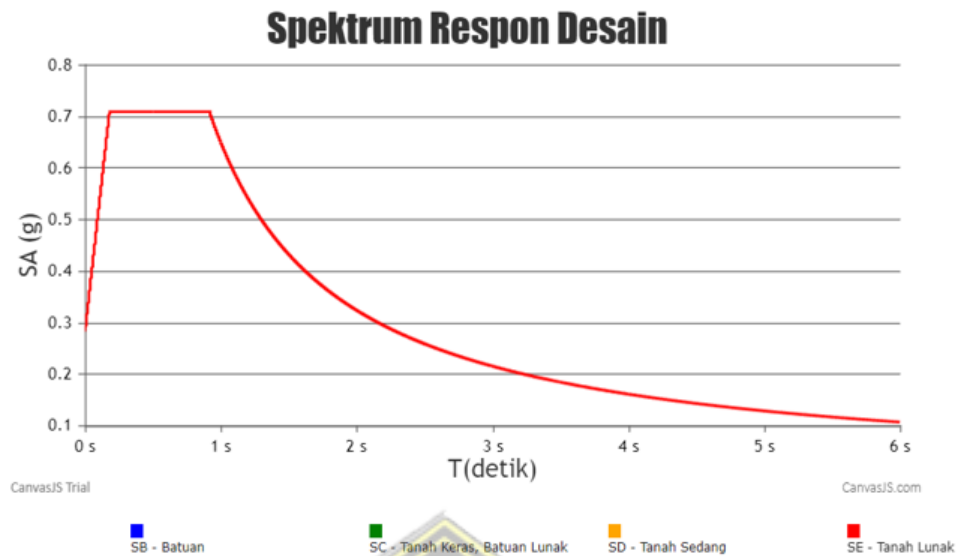
Berdasarkan SNI 1726:2019, pembebanan gempa untuk bangunan Sistem Rangka Pemikul Momen Khusus (SRPMK) dan Sistem Ganda yang terletak di Gunungpati, Semarang memiliki parameter seperti pada Tabel 4.12.

Tabel 4.12. Parameter Respons Spektra

Parameter Respons Spektra		
Kategori Risiko		II
Faktor Keutamaan	I_e	1
Klasifikasi Situs		SD (Tanah Lunak)

Percepatan gempa MCE_R terpetakan untuk periode pendek	S_s	0,4027
Percepatan gempa MCE_R terpetakan untuk periode 1 detik	S_1	0,4158
Faktor amplifikasi periode pendek	F_a	1.1465
Faktor amplifikasi periode 1 detik	F_v	2.3449
Percepatan pada periode pendek	S_{MS}	1.065
Percepatan pada periode 1 detik	S_{M1}	0.975
Percepatan desain pada periode pendek	S_{DS}	0,71
Percepatan desain pada periode 1 detik	S_{D1}	0,65
Parameter periode	T_0	0,18
	T_s	0,92
Parameter Sistem Rangka Pemikul Momen Khusus (SRPMK)		
Faktor koefisien modifikasi	R	8
Faktor kuat lebih sistem	Ω_0	3
Faktor pembesaran defleksi	C_d	5,5

Dari parameter respons spektra di atas, spektrum respons desain dapat dilihat pada Gambar 4.6.



Gambar 4.6. Spektrum Respon Desain Lokasi Perancangan

4.4.3. Kombinasi Pembebanan Struktur

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

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

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

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

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

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

$$S_{DS} (g) = 0,7031 \text{ (Gunungpati, Semarang; Tanah Sedang)}$$

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

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

4.5. Pengecekan Perilaku Struktur Bangunan

4.5.1. Rasio Partisipasi Massa

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

Tabel 4.14. Rekapitulasi Rasio Partisipasi Modal Massa

Case	Mode	Period	UX	UY	RZ
		sec			
Modal	1	1.441	0.8098	3.39E-06	1.42E-06
Modal	2	0.698	3.37E-05	0.6185	0.1135
Modal	3	0.493	0.0111	0.0519	0.4315
Modal	4	0.474	0.1035	0.0036	0.0407
Modal	5	0.373	0.0002	0.1306	0.1479
Modal	6	0.298	0.0593	0.0003	0.0003
Modal	7	0.266	0.0007	0.0383	0.0871
Modal	8	0.257	0.0139	0.0008	0.0046
Modal	9	0.179	0	0.1056	0.001
Modal	10	0.158	0.0001	2.12E-06	1.42E-05
Modal	11	0.142	2.71E-05	0.0038	0.126
Modal	12	0.124	2.72E-06	0.0449	0.0017
Modal	13	0.113	0.0004	2.97E-06	1.11E-05
Modal	14	0.096	1.47E-05	0.0014	0.0454
Modal	15	0.081	0	0	1.55E-06
Modal	16	0.081	0	0	1.40E-06
Modal	17	0.075	0	0	0
Modal	18	0.074	0	0	0
Modal	19	0.074	0	0	0
Modal	20	0.074	0	0	0
Modal	21	0.07	0.0005	0	0.0001
Modal	22	0.069	2.72E-05	0	1.17E-06

Modal	23	0.061	0	1.15E-06	3.06E-06
Modal	24	0.056	0	0	0
Modal	25	0.055	0.0003	0	0.0001
Modal	26	0.054	0.0001	0	1.61E-05
Modal	27	0.046	0	0	0
Modal	28	0.046	0	0	0
Modal	29	0.045	0	0	0
Modal	30	0.045	0	0	0
Modal	31	0.045	0	0	0
Modal	32	0.045	0	0	0
Modal	33	0.038	0	0	0
Modal	34	0.035	0	0	0
Modal	35	0.028	0	0	0
Modal	36	0.028	0	0	0
Modal	37	0.027	0	0	0
Modal	38	0.024	0	0	0
Modal	39	0.023	0	0	0
Modal	40	0.023	0	0	0
Modal	41	0.021	0.0001	0	2.35E-05

4.5.2. Perhitungan Faktor Skala Gempa

4.5.2.1. Perhitungan Koefisien Respons Seismik (C_s)

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

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

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

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

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

- Periode Minimum

$$T_{\min} = C_t \times h_n^x = 0,0466 \times (22,91)^{0,9} = 0,781 \text{ detik}$$

- Periode Maksimum

$$T_{\max} = C_u \times T_{\min} = 1,4 \times 0,781 = 1,093 \text{ detik}$$

- Periode arah X dan Y pada ETABS

$$- T_a \text{ dari ETABS arah X } (T_{cx}) = 1,441 \text{ detik}$$

$$- T_a \text{ dari ETABS arah Y } (T_{cy}) = 0,698 \text{ detik}$$

- 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:

$$- T \text{ arah X } (T_x) = 1,441 \text{ detik}$$

$$- T \text{ arah Y } (T_y) = 0,698 \text{ detik}$$

4.5.2.2. Perhitungan Faktor Skala Gaya

Dari hasil ETABS diperoleh nilai gaya geser dasar seismik statik (V) untuk arah X dan Y ditunjukkan pada Tabel 4.15.

Tabel 4. 15. Output Gaya Geser Dasar Statik (V)

Lantai	Elevasi (m)	V_x (kN)	V_y (kN)
Lantai 4	18	-114.2668	-136.529
Lantai 3	14	-358.9126	-452.9013
Lantai 2	9	-500.7047	-662,0353
Lantai 1	4	-547.2024	-749.3378

Sedangkan perhitungan gaya geser dinamik yang dihasilkan oleh ETABS ditunjukkan pada Tabel 4.16.

Tabel 4. 16. Output Gaya Geser Dasar Dinamik (V_I)

Lantai	Elevasi (m)	V_{IX} (kN)	V_{IY} (kN)
Lantai 4	18	75,3723	119,8994
Lantai 3	14	250,1976	315,117
Lantai 2	9	368,4181	443,9498
Lantai 1	4	422,2466	494,0263

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

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

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

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

$$\eta_x = \frac{V_X}{V_{IX}} = \frac{547.2024}{422,2466} = 1,2959$$

$$\eta_y = \frac{V_Y}{V_{IY}} = \frac{749,338}{494,0263} = 1,5168$$

Maka, diperoleh rekapitulasi hasil pengecekan faktor skala pada Tabel 4.17 sebagai berikut:

Tabel 4. 7. Rekapitulasi Hasil Pengecekan Faktor Skala

W_t (berat total bangunan)	677,529	kN
V_X	547.2024	kN
V_Y	749,338	kN
V_{IX}	422,2466	kN
V_{IY}	494,0263	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	1,2959	
Faktor skala arah Y	1,5168	

Selanjutnya gempa dibesarkan dari kedua arahnya maka didapatkan nilai gaya geser dasar dinamik terkoreksi dapat dilihat pada Tabel 4.17.

Tabel 4. 17. Output Gaya Geser Dinamik Terkoreksi

Lantai	Elevasi (m)	V_{Spec-X} (kN)	V_{Spec-Y} (kN)
Lantai 4	18	97.984	182.247
Lantai 3	14	325.257	478.9774
Lantai 2	9	478.9438	674.8032
Lantai 1	4	548.9209	750.9194

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 4.18.

Tabel 4.18. Gaya Geser Desain

Lantai	Elevation m	STATIK		DINAMIK CORRECT		GAYA GESER DESAIN	
		V_x	V_y	V_{SPEC-x}	V_{SPEC-y}	V_x	V_y
		kN	kN	kN	kN	kN	kN
Lantai 4	18,8	114.27	136.53	97.98	182.25	114.27	17209
Lantai 3	14,2	358.91	452.90	325.26	478.98	358.91	23825
Lantai 2	9,6	500.70	662.04	478.94	674.80	500.70	27969
Lantai 1	4,8	547.20	749.34	548.92	750.92	548.92	29699

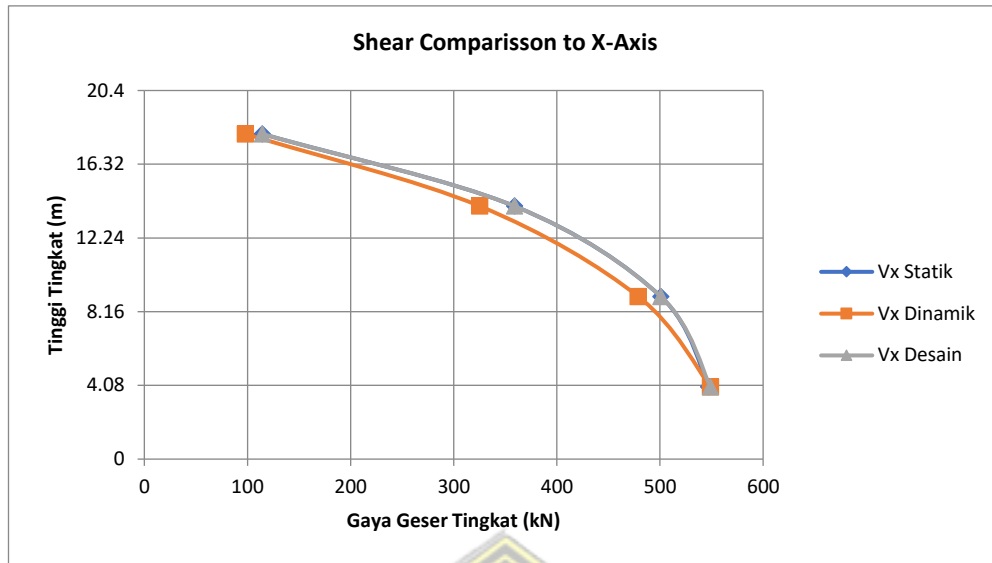
Keterangan :

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

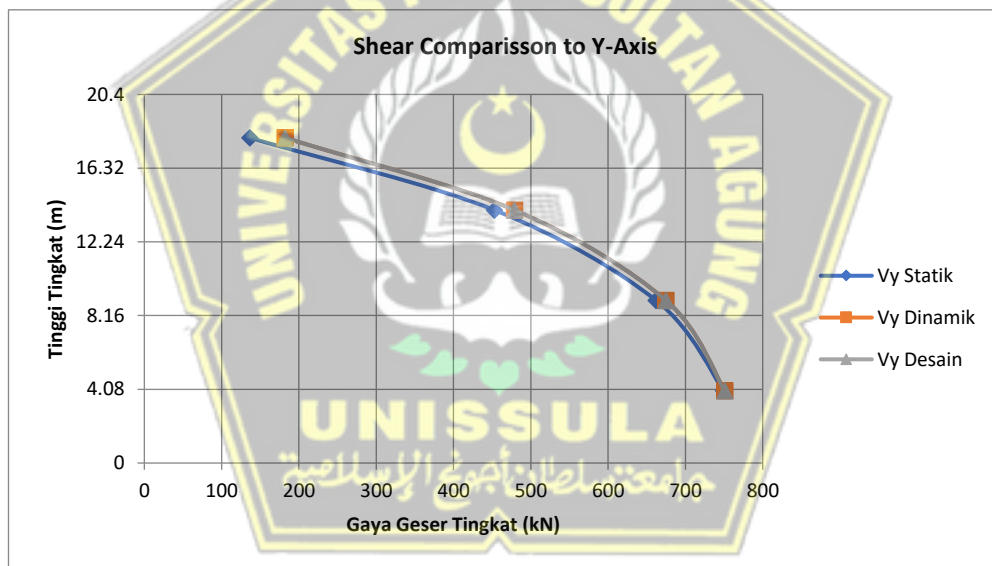
V_{Spec-Y} = Gaya geser dinamik arah Y

4.5.3. Pengecekan Gaya Geser

Gaya geser pada struktur dapat diperoleh langsung dari ETABS. Berikut diagram geser struktur terhadap ketinggian bangunan arah X dan arah Y ditunjukkan pada Gambar 4.7. dan Gambar 4.8.



Gambar 4. 7. Diagram Gaya Geser Gempa Arah X



Gambar 4. 8. Diagram Gaya Geser Gempa Arah Y

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

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

- Faktor pembesaran defleksi (C_d) untuk Sistem Ganda = 5,5 (Tabel 8 SNI 1726:2019),
- Faktor Keutamaan Gempa (I_e) = 1 (Tabel 2 SNI 1726:2019),

- Faktor redundansi untuk gedung dengan KDS D adalah $\rho = 1,3$ (Pasal 7.3.4.2 1726:2019),
- Simpangan antar lantai tingkat desain (Δ) tidak boleh melebihi simpangan antar lantai izin. Berdasarkan SNI 1726:2019 Pasal 7.12.1, simpangan antar lantai izin untuk gedung dengan kategori risiko II adalah $= (0,010) \times h$, dimana h adalah tinggi tingkat.

Simpangan antar tingkat merupakan perpindahan horizontal di bagian atas tingkat relatif terhadap bawahnya. Berdasarkan analisis program ETABS, didapat simpangan arah X dan Y yang ditampilkan pada Tabel 4.16 dan Tabel 4.17.

Tabel 4.18. Pengecekan *Story Drift* Arah X

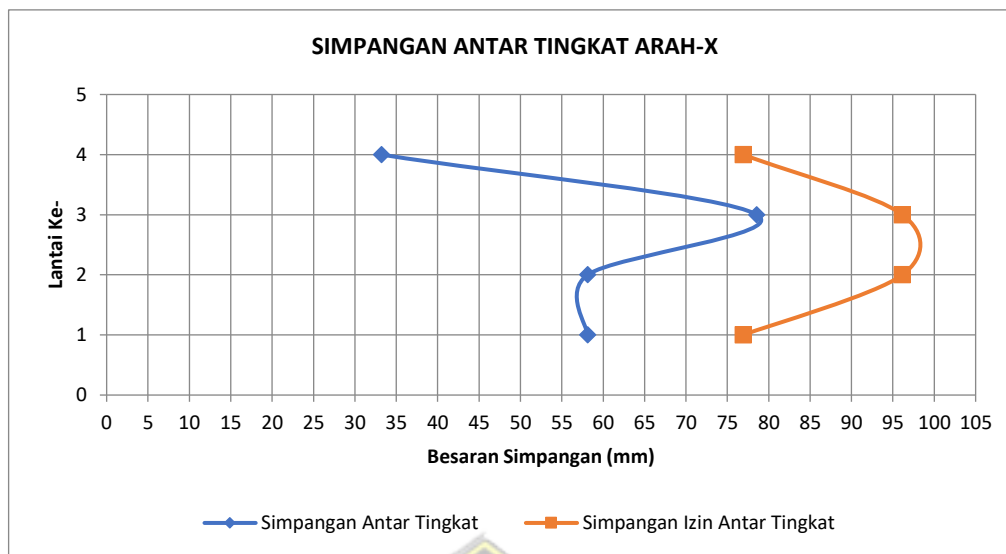
Lantai	h (mm)	Simpangan Elastis (δ) (mm)	Perpindahan yang diperbesar (mm)	Simpangan antar tingkat (mm)	Simpangan yang diizinkan (mm)	Ket
Lantai 4	4000	51.37	282.54	33.21	76.92	OK
Lantai 3	5000	45.33	249.33	78.56	96.15	OK
Lantai 2	5000	31.05	170.77	58.12	96.15	OK
Lantai 1	4000	10.57	58.12	58.12	76.92	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 4.9.



Gambar 4.9. Diagram *Story Drift* Arah X

Tabel 4.20. Pengecekan *Story Drift* Arah Y

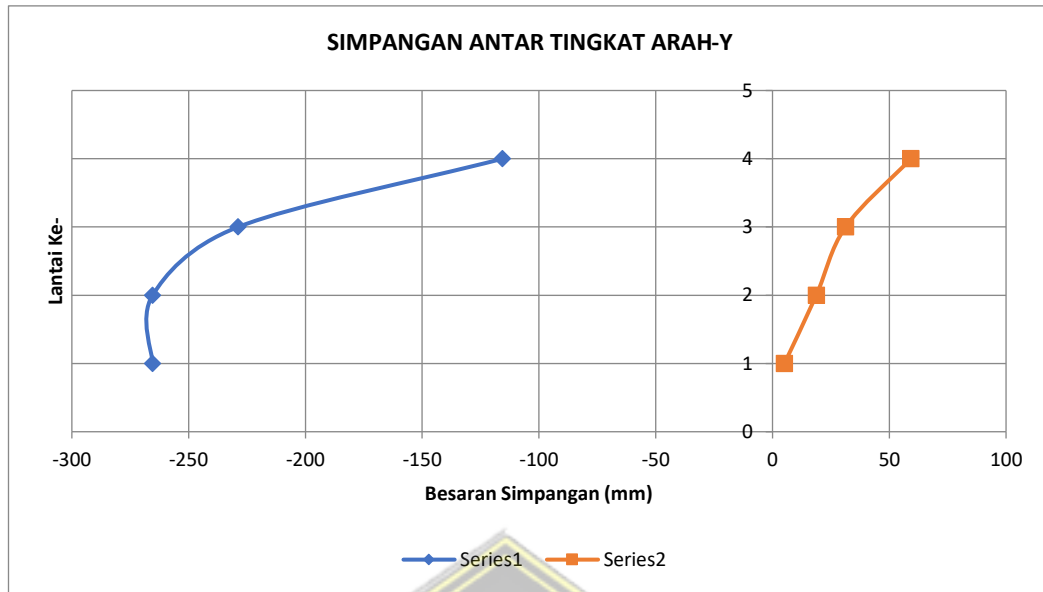
Lantai	h (mm)	Simpangan Elastis (δ) (mm)	Perpindahan yang diperbesar (mm)	Simpangan antar tingkat (mm)	Simpangan yang diizinkan (mm)	Ket
Lantai 4	4000	92.67	509.67	-115.60	59.243	OK
Lantai 3	5000	113.69	625.27	-228.83	31.27	OK
Lantai 2	5000	72.08	396.44	-265.42	18.757	OK
Lantai 1	4000	23.82	131.02	-265.42	5.111	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 4.10.



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

4.5.5. Pengecekan P-Delta

Pengaruh P-Delta ditentukan berdasarkan nilai dari koefisien stabilitas (θ). Jika nilai θ lebih kecil dari nilai θ maksimum, maka pengaruh P-Delta dapat diabaikan. Nilai θ maksimum dihitung dengan rumus berikut:

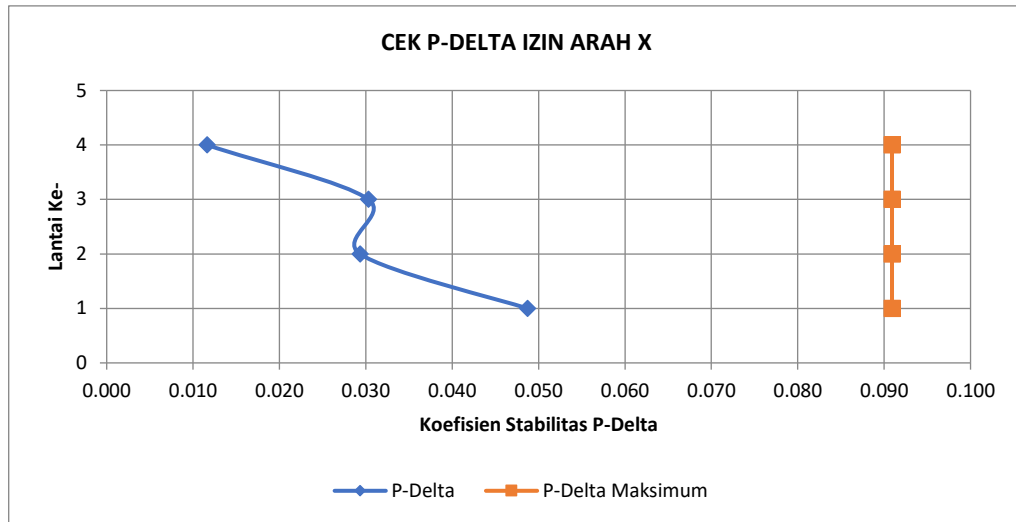
$$\theta_{\max} = \frac{0,5}{C_d \times \beta} = \frac{0,5}{5,5 \times 1} = 0,0909$$

Hasil dari pengecekan P-Delta arah X dapat dilihat pada Tabel 4.18.

Tabel 4.21. Pengecekan P-Delta Arah X

Lantai	h_{sx} (mm)	Δ_i (mm)	P (kN)	V_x (kN)	θ	$\theta_{\max}$	Cek
Lantai 4	4000	-33.21	879.70	114.27	-0.0116	0.0909	STABIL
Lantai 3	5000	78.56	3806.48	358.91	0.0303	0.0909	STABIL
Lantai 2	5000	58.12	6946.98	500.70	0.0293	0.0909	STABIL
Lantai 1	4000	58.12	10120.92	548.92	0.0487	0.0909	STABIL

Dari pengecekan P-Delta arah X menghasilkan diagram stabilitas P-Delta arah X dapat dilihat di Gambar 4.11.



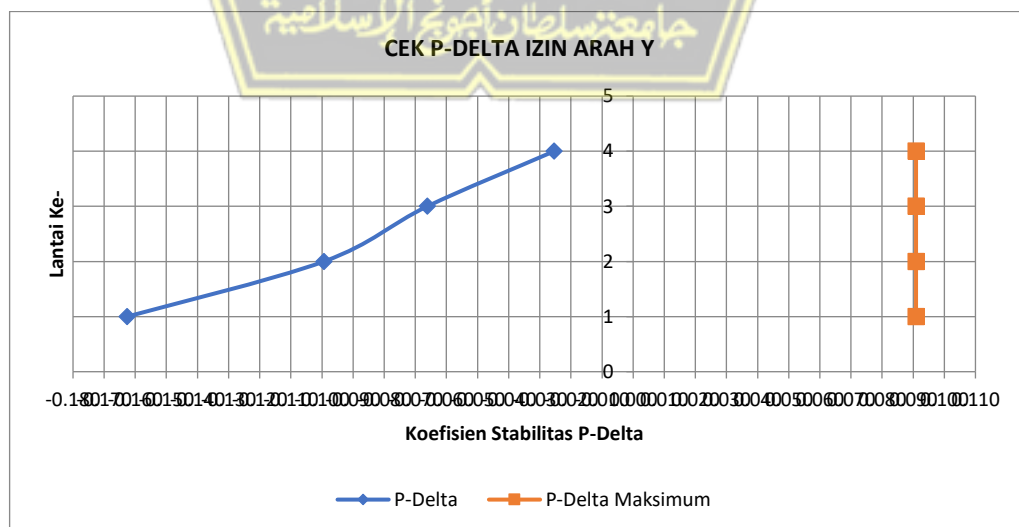
Gambar 4. 11. Diagram P-Delta Arah X

Sedangkan untuk hasil dari pengecekan P-Delta arah Y dapat dilihat pada Tabel 4.19 sebagai berikut:

Tabel 4.22. Pengecekan P-Delta Arah Y

Lantai	h_{sx} (mm)	Δ_i (mm)	P (kN)	V_y (kN)	θ	θ_{max}	Cek
Lantai 4	4000	-115.60	879.70	182.25	-0.0254	0.0909	STABIL
Lantai 3	5000	-228.83	3806.48	478.98	-0.0661	0.0909	STABIL
Lantai 2	5000	-265.42	6946.98	674.80	-0.0994	0.0909	STABIL
Lantai 1	4000	-265.42	10120.92	750.92	-0.1626	0.0909	STABIL

Kemudian dari pengecekan P-Delta arah Y menghasilkan diagram stabilitas P-Delta arah Y dapat dilihat pada Gambar 4.12.



Gambar 4. 22. Diagram P-Delta Arah Y

4.5.6. Pengecekan Eksentrisitas dan Torsi

4.5.6.1. Pengecekan Eksentrisitas

Berdasarkan SNI 1726:2019 Pasal 7.8.4.1 dan Pasal 7.8.4.2, torsi terdiri dari torsi bawaan dan torsi tidak terduga. Nilai eksentrisitas dari torsi bawaan dapat dilihat dari program ETABS. Data eksentrisitas torsi ditunjukkan pada Tabel 4.23.

Tabel 4. 23. Data Eksentrisitas Torsi Bawaan dari ETABS

Lantai	XCM	YCM	XCR	YCR	e_{ox}	e_{oy}
	m	m	m	m	m	m
Lantai 4	10.5985	9.5016	6.5832	6.5832	4.0153	2.9184
Lantai 3	10.6781	8.7629	6.4086	6.4086	4.2695	2.3543
Lantai 2	10.7528	8.7414	6.2523	6.2523	4.5005	2.4891
Lantai 1	14.6628	15.7369	6.4169	6.4169	8.2459	9.32

Adapun eksentrisitas dari torsi tidak terduga adalah eksentrisitas tambahan sebesar 5% dari dimensi arah tegak lurus panjang bentang struktur bangunan tempat gaya gempa bekerja. Perhitungan eksentrisitas tidak terduga dapat dilihat pada Tabel 4.24.

Tabel 4.24. 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 4	22	12	1.1	0.6
Lantai 3	22	12	1.1	0.6
Lantai 2	22	12	1.1	0.6
Lantai 1	22	12	1.1	0.6

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 4.22 dan Tabel 4.23.

Tabel 4.25. Nilai dari $\delta_{\max}$, $\delta_{\min}$, δ_{avg} dan A_x untuk Gempa Arah X

Lantai	$\delta_{\max}$ (mm)	$\delta_{\min}$ (mm)	δ_{avg} (mm)	1,2 δ_{avg} (mm)	$A_x =$ $(\delta_{\max}/1,2\delta_{\text{avg}})^2$	Kontrol Torsi
4	18827.093	75394.810	-114.267	-137.120	0.500	Ada ketidakberaturan torsi
3	23121.585	247502.810	-358.913	-430.695	0.306	Ada ketidakberaturan torsi
2	25092.194	262882.780	-500.705	-600.846	0.309	Ada ketidakberaturan torsi
1	59108.526	262040.970	-547.202	-656.643	0.475	Ada ketidakberaturan torsi

Tabel 4. 26. Nilai dari $\delta_{\max}$, $\delta_{\min}$, δ_{avg} dan A_y untuk Gempa Arah Y

Lantai	$\delta_{\max}$ (mm)	$\delta_{\min}$ (mm)	δ_{avg} (mm)	1,2 δ_{avg} (mm)	$A_y =$ $(\delta_{\max}/1,2\delta_{\text{avg}})^2$	Kontrol Torsi
4	27063.72	75394.81	-136.530	-163.836	0.599	Ada ketidakberaturan torsi
3	95694.314	247502.81	-452.901	-543.482	0.622	Ada ketidakberaturan torsi
2	129701.468	262882.78	-662.035	-794.442	0.702	Ada ketidakberaturan torsi
1	322289.91	262040.97	-749.338	-899.205	1.109	Ada ketidakberaturan torsi

Dari Tabel 4.26, 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 4.27 dan 4.28.

Tabel 4.27. Perhitungan Eksentrisitas Desain pada Arah Sumbu X

Lantai	e_{ox}	0,05 L_x	A_y	e_{dx}	Eksentrisitas, x
	(m)	(m)			(m)
4	4.015	1.100	1.000	2.915	0.133
3	4.270	1.100	1.000	3.170	0.144
2	4.501	1.100	1.000	3.401	0.155

1	8.246	1.100	1.000	7.146	0.325
---	-------	-------	-------	-------	-------

Tabel 4.28. Perhitungan Eksentrisitas Desain pada Arah Sumbu Y

Lantai	e_{oy}	$0,05 L_y$	A_x	e_{dy}	Eksentrisitas, y
	(m)	(m)			(m)
4	2.918	0.600	1.000	3.518	0.293
3	2.354	0.600	1.000	2.954	0.246
2	2.489	0.600	1.000	3.089	0.257
1	9.320	0.600	1.000	9.920	0.827

4.5.6.2. Perhitungan Ketidakberaturan Torsi

Berdasarkan SNI 1726:2019, tipe dari ketidakberaturan torsi yang ditentukan berdasarkan defleksi maksimum (δ_{max}), defleksi minimum (δ_{min}), dan defleksi rata-rata (δ_{avg}). Pengecekan ketidakberaturan torsi arah X dan arah Y dapat dilihat pada Tabel 4.29 dan Tabel 4.30.

Tabel 4.29. Pengecekan Ketidakberaturan Torsi pada Arah X

lantai	δ_{max}	max story drift	max story drift x C_d	δ_{min}	min story drift	min story drift x C_d	δ_{avg}	1,2 δ_{avg}	1,4 δ_{avg}	Cek x
	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	
4	18827.093	7.109	39.100	75394.810	8.615	47.383	43.241	51.889	60.537	Tanpa Torsi
3	23121.585	15.675	86.213	247502.810	9.801	53.906	70.059	84.071	98.083	Tanpa Torsi
2	25092.194	20.480	112.640	262882.780	10.240	56.320	84.480	101.376	118.272	Tanpa Torsi
1	59108.526	10.138	55.759	262040.970	10.447	57.459	56.609	67.931	79.252	Tanpa Torsi

Tabel 4.30. Pengecekan Ketidakberaturan Torsi pada Arah Y

lantai	δ_{max}	max story drift	max story drift x C_d	δ_{min}	min story drift	min story drift x C_d	δ_{avg}	1,2 δ_{avg}	1,4 δ_{avg}	Cek y
	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	
4	27063.72	6.22	34.23	75394.81	8.24	45.34	39.78	47.74	55.69	Tanpa Torsi
3	95694.31	6.36	34.97	247502.81	9.46	52.05	43.51	52.21	60.91	Tanpa Torsi
2	129701.47	6.75	37.14	262882.78	9.94	54.66	45.90	55.08	64.26	Tanpa Torsi
1	322289.91	2.94	16.14	262040.97	10.20	56.11	36.13	43.35	50.58	Tanpa Torsi

4.5.7. Pengecekan Ketidakberaturan Horizontal dan Vertikal

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

1. Ketidakberaturan Horizontal

a) Ketidakberaturan torsi 1a dan 1b

Hasil pengecekan ketidakberaturan torsi 1a dan 1b arah X dan arah Y dapat dilihat pada Tabel 4.31 dan Tabel 4.32.

Tabel 4.30. 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 4	EX	7.109	6.069	1.171	< 1,2	OK	< 1,4	OK
Lantai 3	EX	15.675	15.514	1.01	< 1,2	OK	< 1,4	OK
Lantai 2	EX	20.48	19.955	1.026	< 1,2	OK	< 1,4	OK
Lantai 1	EX	10.138	9.258	1.095	< 1,2	OK	< 1,4	OK

Tabel 4.32. 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 4	EY	6.223	5.045	1.234	< 1,2	NOT OK	< 1,4	OK
Lantai 3	EY	6.358	4.718	1.348	< 1,2	NOT OK	< 1,4	OK
Lantai 2	EY	6.752	5.097	1.325	< 1,2	NOT OK	< 1,4	OK
Lantai 1	EY	2.935	2.325	1.262	< 1,2	NOT 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 24 m^2 dan luas bruto 24 m^2 maka persentasenya adalah 7,3% 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 lurus terhadap bidang

Struktur tidak mengalami ketidakberaturan akibat pergeseran tegak lurus 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.

2. Ketidakberaturan Vertikal

a) Ketidakberaturan kekakuan tingkat lunak 1a dan 1b

Ketidakberaturan kekakuan tingkat lunak 1a terjadi jika tingkat kekakuan lateral kurang dari 70% kekakuan lateral tingkat di atasnya atau 80% dari kekakuan rata-rata ketiga tingkat di atasnya. Hasil pengecekan ketidakberaturan kekakuan tingkat lunak dapat dilihat pada Tabel 4.33.

Tabel 4.33. Cek Ketidakberaturan Kekakuan Tingkat Lunak 1b Arah x dan Y

Lantai	Arah X		Arah Y	
	Kekakuan	Cek	Kekakuan	Cek
	kN/m		kN/m	
4	18827.093		27063.72	
3	23121.585	OK	95694.314	OK
2	25092.194	OK	129701.47	OK
1	59108.526	OK	322289.91	OK

b) Ketidakberaturan Berat (Massa)

Ketidakberaturan ini terjadi jika massa efektif diseberang tingkat lebih dari 150% massa efektif di dekatnya. Hasil pengecekan ketidakberaturan berat (massa) dapat dilihat pada Tabel 4.34.

Tabel 4.34. Cek Ketidakberaturan Berat (Massa)

Lantai	Massa (kN)	Dibandingkan dengan 1,5 x massa di lantai atas	Dibandingkan dengan 1,5 x massa di lantai bawah
Lantai 4	75394.81	OK	OK
Lantai 3	247502.81	OK	OK
Lantai 2	262882.78	OK	OK
Lantai 1	262040.97	OK	OK

c) Ketidakberaturan Geometri Vertikal

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

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

Struktur tidak mengalami ketidakberaturan akibat diskontinuitas bidang pada elemen vertikal pemikul gaya lateral dikarenakan dinding geser didesain menerus dari lantai 1 sampai lantai 8.

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

Hasil pengecekan ketidakberaturan tingkat lemah akibat diskontinuitas pada kekuatan lateral tingkat ditunjukkan pada Tabel 4.35. dan Tabel 4.36.

Tabel 4.35. Pengecekan Ketidakberaturan Vertikal 5a

Lantai	Load Case / Combo	Location	V _x	V _y	Cek 80% arah X	Cek 80% arah Y
Lantai 4	Envelope Max	Bottom	-114.2668	-136.5273	ok	ok
Lantai 3	Envelope Max	Bottom	-358.9126	-452.8932	ok	ok
Lantai 2	Envelope Max	Bottom	-500.7047	-662.0228	ok	ok
Lantai 1	Envelope Max	Bottom	-547.2024	-749.3229	ok	ok

Tabel 4.36. Pengecekan Ketidakberaturan Vertikal 5b

Lantai	Load Case / Combo	Location	V _x	V _y	Cek 65% arah X	Cek 65% arah Y
Lantai 4	Envelope Max	Bottom	-114.2668	-136.5273	ok	ok
Lantai 3	Envelope Max	Bottom	-358.9126	-452.8932	ok	ok
Lantai 2	Envelope Max	Bottom	-500.7047	-662.0228	ok	ok
Lantai 1	Envelope Max	Bottom	-547.2024	-749.3229	ok	ok

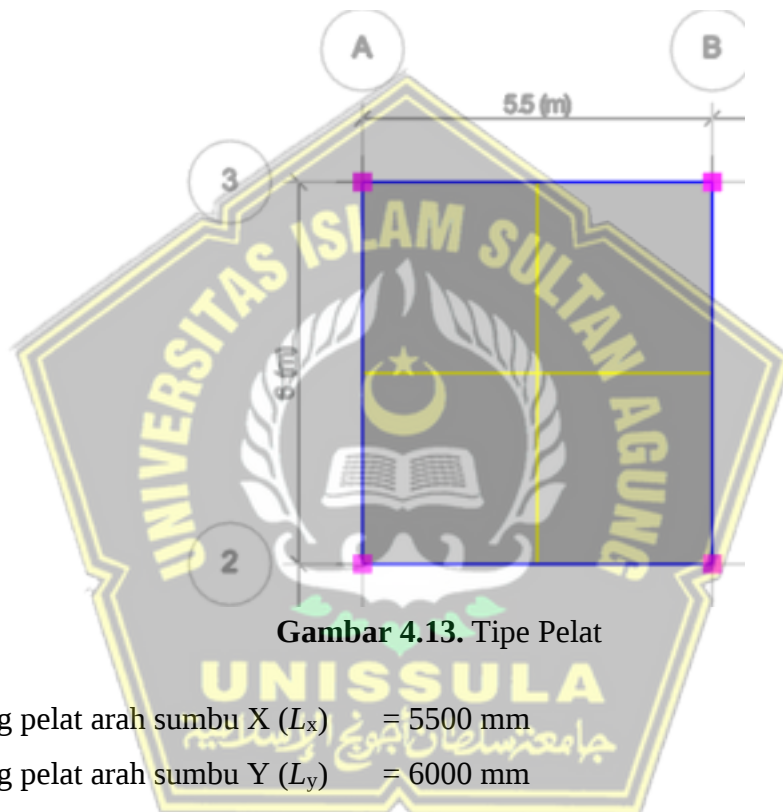
4.6. Perancangan Elemen Struktur Beton Bertulang

4.6.1. Perancangan Pelat

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

4.6.1.1. Properti Material dan Penampang

Tipe pelat yang akan digunakan sebagai contoh perhitungan dapat dilihat pada Gambar 4.13.



Gambar 4.13. Tipe Pelat

Panjang pelat arah sumbu X (L_x) = 5500 mm

Panjang pelat arah sumbu Y (L_y) = 6000 mm

Perbandingan panjang pelat ($\frac{L_y}{L_x}$) = $\frac{6}{5,5} = 1,09$

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

Tebal pelat (h) = 120 mm

Diamater tulangan (d_b) = 12 mm

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

Tebal efektif penampang (d)
= $h - c_c - d_s - d_b/2$
= $120 - 20 - 10 - 12/2$
= 82

Kuat tekan beton (f'_c) = 25 MPa

$$\begin{aligned}
\text{Kuat leleh tulangan } (f_y) &= 420 \text{ MPa} \\
\text{Modulus elastisitas beton } (E_c) &= 4700 \times \sqrt{f'_c} \\
&= 4700 \times \sqrt{25} \\
&= 23500 \text{ MPa}
\end{aligned}$$

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

$$\begin{aligned}
\beta_1 &= 0,85 - 0,05 \times \frac{(f'_c - 28)}{7} \\
&= 0,85 - 0,05 \times \frac{(25 - 28)}{7} \\
&= 0,8500
\end{aligned}$$

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

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

4.6.1.2. Gaya Dalam

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

- $M_{\max}$ akibat $M_{11 \max}$ = 8.145 kN-m
- $M_{\min}$ akibat $M_{11 \min}$ = -15.954 kN-m
- $M_{\max}$ akibat $M_{22 \max}$ = 8.966 kN-m
- $M_{\min}$ akibat $M_{22 \min}$ = -17.935 kN-m
- V_u = 28.201 kN

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

a) Momen Positif M_{11}

(Tulangan Lapangan Bawah Arah Sumbu X)

- Spasi tulangan (s)

$$s = 200 \text{ mm}$$

- 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 :

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

- Jumlah tulangan negatif tumpuan (n)

$$n = \frac{b}{s} = \frac{1000}{s} = \frac{1000}{200} = 5$$

- Diameter tulangan (d_b)

$$d_b = 12 \text{ mm}$$

- Jarak bersih antar tulangan

$$s - d_b = 200 - 12 = 188 \text{ mm}$$

- Cek jarak bersih

(SNI 2847:2019 Pasal 25.2.1)

$$\text{Syarat} = \text{Jarak bersih} \geq d_b = 188 \geq 12 \rightarrow \text{OK}$$

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

$$\begin{aligned} A_{s \text{ pasang}} &= n \times \frac{1}{4} \times \pi \times d_b^2 \\ &= 5 \times \frac{1}{4} \times 3,14 \times 12^2 \\ &= 565,487 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

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

(SNI 2847:2019 Pasal 7.6.1.1 dan Pasal 8.6.1.1)

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

$$\begin{aligned} A_{s \text{ min}} &= 0,2\% \times b \times h \\ &= 0,2\% \times 1000 \times 12 \\ &= 240 \text{ mm}^2 \text{ (tidak dipakai karena } f_y = 420 \text{ MPa)} \end{aligned}$$

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

$$\begin{aligned} A_{s \text{ min1}} &= \left(0,18\% \times \frac{420}{f_y}\right) \times b \times h \\ &= \left(0,18\% \times \frac{420}{420}\right) \times 1000 \times 12 \\ &= 216 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} A_{s \text{ min2}} &= 0,14\% \times b \times h \\ &= 0,14\% \times 1000 \times 12 \\ &= 116 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

$$A_{s \text{ min}} = 216 \text{ mm}^2 \text{ (dipilih yang terbesar)}$$

- Cek $A_s \text{ min}$:

$$\text{Syarat} = A_s \text{ pasang} \geq A_s \text{ min} = 565,487 \geq 216 \rightarrow \text{OK}$$

- Tinggi blok beton (a)

(SNI 2847:2019 Pasal 22.2.2.4.1)

$$a = A_s \times \frac{f_y}{0,85 \times f'_c \times b} = 565,487 \times \frac{420}{0,85 \times 25 \times 1000} = 11,117 \text{ mm}$$

- Kapasitas lentur (M_n)

(SNI 2847:2019 Pasal 22.2.2.4.1)

$$\begin{aligned} M_n &= A_s \times f_y \times \left(d - \frac{a}{2}\right) \times 10^{-6} \\ &= 565,487 \times 420 \times \left(82 - \frac{11,177}{2}\right) \times 10^{-6} \\ &= 18,148 \text{ kN-m} \end{aligned}$$

- Lokasi garis netral (c)

(SNI 2847:2019 Pasal 22.2.2.4.1)

$$c = \frac{a}{\beta_1} = \frac{11,177}{0,8500} = 13,149 \text{ mm}$$

- Regangan tulangan tarik (ϵ_t)

(SNI 2847:2019 Pasal 22.2.1.2 dan Pasal 22.2.2.1)

$$\epsilon_t = \frac{(d-c)}{c} \times 0,003 = \frac{(82-13,149)}{13,149} \times 0,003 = 0,016$$

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

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

- Batas tulangan regangan tarik

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

- Faktor reduksi (ϕ)

(SNI 2847:2019 Tabel 21.2.2)

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

$$\phi = 0,65$$

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

$$\begin{aligned} \phi &= 0,65 + 0,25 \times \frac{(\epsilon_t - \epsilon_{ty})}{(0,005 - \epsilon_{ty})} \\ &= 0,65 + 0,25 \times \frac{(0,016 - 0,002)}{(0,005 - 0,002)} \\ &= 2,57 \end{aligned}$$

- Untuk $\epsilon_t \geq 0,005$

$$\phi = 0,90$$

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

- Kapasitas lentur tereduksi (ϕM_n)

$$\begin{aligned}\phi M_n &= \phi \times M_n \\ &= 0,90 \times 18,148 \\ &= 16,333 \text{ kN-m}\end{aligned}$$

- Momen ultimit (M_u)

$$\begin{aligned}M_u &= |M_{\text{max}} \text{ akibat } M_{11 \text{ max}}| \\ &= |8.145| \\ &= 8.145 \text{ kN-m}\end{aligned}$$

- Cek kapasitas :

$$\begin{aligned}\text{Syarat} &= \phi M_n > M_u \\ &= 16,333 > 8.145 \rightarrow \text{OK}\end{aligned}$$

- Kesimpulan :

Digunakan Tulangan D 12 - 200

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)

$$s_{\text{max}} = 2 \times h = 2 \times 12 = 240 \text{ mm}$$

- Cek spasi :

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

- Jumlah tulangan negatif tumpuan (n)

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

- Diameter tulangan (d_b)

$$d_b = 12 \text{ mm}$$

- Jarak bersih antar tulangan

$$s - d_b = 150 - 12 = 138 \text{ mm}$$

- Cek jarak bersih

(SNI 2847:2019 Pasal 25.2.1)

Syarat = Jarak bersih $\geq d_b = 138 \geq 10 \rightarrow \text{OK}$

- Luas tulangan yang dipasang (A_s pasang)

$$\begin{aligned} A_{s \text{ pasang}} &= n \times \frac{1}{4} \times \pi \times d_b^2 \\ &= 7 \times \frac{1}{4} \times 3,14 \times 12^2 \\ &= 752,982 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

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

(SNI 2847:2019 Pasal 7.6.1.1 dan Pasal 8.6.1.1)

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

$$\begin{aligned} A_{s \text{ min}} &= 0,2\% \times b \times h \\ &= 0,2\% \times 1000 \times 12 \\ &= 240 \text{ mm}^2 \text{ (tidak dipakai karena } f_y = 420 \text{ MPa)} \end{aligned}$$

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

$$\begin{aligned} A_{s \text{ min1}} &= \left(0,18\% \times \frac{420}{f_y}\right) \times b \times h \\ &= \left(0,18\% \times \frac{420}{420}\right) \times 1000 \times 12 \\ &= 216 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} A_{s \text{ min2}} &= 0,14\% \times b \times h \\ &= 0,14\% \times 1000 \times 12 \\ &= 168 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

$$A_{s \text{ min}} = 216 \text{ mm}^2 \text{ (dipilih yang terbesar)}$$

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

Syarat = $A_{s \text{ pasang}} \geq A_{s \text{ min}} = 752,982 \geq 216 \rightarrow \text{OK}$

- Tinggi blok beton (a)

(SNI 2847:2019 Pasal 22.2.2.4.1)

$$a = A_s \times \frac{f_y}{0,85 \times f'_c \times b} = 752,982 \times \frac{420}{0,85 \times 25 \times 1000} = 14,902 \text{ mm}$$

- Kapasitas lentur (M_n)

(SNI 2847:2019 Pasal 22.2.2.4.1)

$$\begin{aligned} M_n &= A_s \times f_y \times \left(d - \frac{a}{2}\right) \times 10^{-6} \\ &= 752,982 \times 420 \times \left(82 - \frac{14,902}{2}\right) \times 10^{-6} \\ &= 23,608 \text{ kN-m} \end{aligned}$$

- Lokasi garis netral (c)

(SNI 2847:2019 Pasal 22.2.2.4.1)

$$c = \frac{a}{\beta_1} = \frac{14,902}{0,8500} = 17,532 \text{ mm}$$

- Regangan tulangan tarik (ϵ_t)

(SNI 2847:2019 Pasal 22.2.1.2 dan Pasal 22.2.2.1)

$$\epsilon_t = \frac{(d-c)}{c} \times 0,003 = \frac{(82-17,532)}{17,532} \times 0,003 = 0,011$$

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

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

- Batas tulangan regangan tarik

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

- Faktor reduksi (ϕ)

(SNI 2847:2019 Tabel 21.2.2)

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

$$\phi = 0,65$$

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

$$\begin{aligned} \phi &= 0,65 + 0,25 \times \frac{(\epsilon_t - \epsilon_{ty})}{(0,005 - \epsilon_{ty})} \\ &= 0,65 + 0,25 \times \frac{(0,011 - 0,002)}{(0,005 - 0,002)} \\ &= 2,57 \end{aligned}$$

- Untuk $\epsilon_t \geq 0,005$

$$\phi = 0,90$$

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

- Kapasitas lentur tereduksi (ϕM_n)

$$\begin{aligned} \phi M_n &= \phi \times M_n \\ &= 0,90 \times 23,608 \\ &= 15,954 \text{ kN-m} \end{aligned}$$

- Momen ultimit (M_u)

$$\begin{aligned} M_u &= |M_{\min} \text{ akibat } M_{11 \min}| \\ &= |21,247| \\ &= 21,247 \text{ kN-m} \end{aligned}$$

- Cek kapasitas :

$$\begin{aligned} \text{Syarat} &= \phi M_n > M_u \\ &= 21,247 > 15,954 \rightarrow \text{OK} \end{aligned}$$

- Kesimpulan :

Digunakan Tulangan D 12 – 150

c) Momen Positif M_{22}

(Tulangan Lapangan Bawah Arah Sumbu Y)

- Spasi tulangan (s)

$$s = 200 \text{ mm}$$

- 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)

$$n = \frac{b}{s} = \frac{1000}{200} = 5$$

- Diameter tulangan (d_b)

$$d_b = 12 \text{ mm}$$

- Jarak bersih antar tulangan

$$s - d_b = 200 - 12 = 188 \text{ mm}$$

- Cek jarak bersih

(SNI 2847:2019 Pasal 25.2.1)

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

$$= 188 \geq 12 \rightarrow \text{OK}$$

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

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

$$= 5 \times \frac{1}{4} \times 3,14 \times 12^2$$

$$= 565,487 \text{ mm}^2$$

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

(SNI 2847:2019 Pasal 7.6.1.1 dan Pasal 8.6.1.1)

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

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

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

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

- Untuk $f_y \geq 420$ MPa

$$\begin{aligned} A_{s \min 1} &= (0,18\% \times \frac{420}{f_y}) \times b \times h \\ &= (0,18\% \times \frac{420}{420}) \times 1000 \times 120 \\ &= 216 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} A_{s \min 2} &= 0,14\% \times b \times h \\ &= 0,14\% \times 1000 \times 120 \\ &= 168 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

$$A_{s \min} = 216 \text{ mm}^2 \text{ (dipilih yang terbesar)}$$

- Cek $A_{s \min}$:

$$\begin{aligned} \text{Syarat} &= A_s \text{ pasang} \geq A_{s \min} \\ &= 565,487 \geq 216 \rightarrow \text{OK} \end{aligned}$$

- Tinggi blok beton (a)

(SNI 2847:2019 Pasal 22.2.2.4.1)

$$\begin{aligned} a &= A_s \times \frac{f_y}{0,85 \times f'_c \times b} \\ &= 565,487 \times \frac{420}{0,85 \times 25 \times 1000} \\ &= 11,177 \text{ mm} \end{aligned}$$

- Kapasitas lentur (M_n)

(SNI 2847:2019 Pasal 22.2.2.4.1)

$$\begin{aligned} M_n &= A_s \times f_y \times (d - d_b - \frac{a}{2}) \times 10^{-6} \\ &= 565,487 \times 420 \times (82 - 12 - \frac{11,177}{2}) \times 10^{-6} \\ &= 15,298 \text{ kN-m} \end{aligned}$$

- Lokasi garis netral (c)

(SNI 2847:2019 Pasal 22.2.2.4.1)

$$c = \frac{a}{\beta_1} = \frac{11,177}{0,8500} = 13,149 \text{ mm}$$

- Regangan tulangan tarik (ϵ_t)

(SNI 2847:2019 Pasal 22.2.1.2 dan Pasal 22.2.2.1)

$$\begin{aligned} \epsilon_t &= \frac{(d-c)}{c} \times 0,003 \\ &= \frac{(82-13,149)}{13,149} \times 0,003 \\ &= 0,016 \end{aligned}$$

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

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

- Batas tulangan regangan tarik

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

- Faktor reduksi (ϕ)

(SNI 2847:2019 Tabel 21.2.2)

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

$$\phi = 0,65$$

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

$$\begin{aligned}\phi &= 0,65 + 0,25 \times \frac{(\varepsilon_t - \varepsilon_{ty})}{(0,005 - \varepsilon_{ty})} \\ &= 0,65 + 0,25 \times \frac{(0,016 - 0,002)}{(0,005 - 0,002)} \\ &= 2,57\end{aligned}$$

- Untuk $\varepsilon_t \geq 0,005$

$$\phi = 0,90$$

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

- Kapasitas lentur tereduksi (ϕM_n)

$$\begin{aligned}\phi M_n &= \phi \times M_n \\ &= 0,90 \times 15,298 \\ &= 13,768 \text{ kN-m}\end{aligned}$$

- Momen ultimit (M_u)

$$\begin{aligned}M_u &= |M_{\max} \text{ akibat } M_{22 \max}| \\ &= |13,768| \\ &= 13,768 \text{ kN-m}\end{aligned}$$

- Cek kapasitas :

$$\begin{aligned}\text{Syarat} &= \phi M_n > M_u \\ &= 15,298 > 13,768 \rightarrow \text{OK}\end{aligned}$$

- Kesimpulan :

Digunakan Tulangan D 12 - 200

d) Momen Negatif M_{22}

(Tulangan Tumpuan Atas Arah Sumbu Y)

- Spasi tulangan (s)

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

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

(SNI 2847:2019 Pasal 8.7.2.2)

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

- 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)

$$d_b = 12 \text{ mm}$$

- Jarak bersih antar tulangan

$$s - d_b = 150 - 12 = 138 \text{ mm}$$

- Cek jarak bersih

(SNI 2847:2019 Pasal 25.2.1)

$$\begin{aligned} \text{Syarat} &= \text{Jarak bersih} \geq d_b \\ &= 138 \geq 12 \rightarrow \text{OK} \end{aligned}$$

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

$$\begin{aligned} A_s \text{ pasang} &= n \times \frac{1}{4} \times \pi \times d_b^2 \\ &= 7 \times \frac{1}{4} \times 3,14 \times 12^2 \\ &= 753,982 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

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

$$\begin{aligned} A_{s \min 1} &= \left(0,18\% \times \frac{420}{f_y}\right) \times b \times h \\ &= \left(0,18\% \times \frac{420}{420}\right) \times 1000 \times 120 \\ &= 216 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

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

$$= 0,14\% \times 1000 \times 120$$

$$= 168 \text{ mm}^2$$

$$A_{s \text{ min}} = 216 \text{ mm}^2 \text{ (dipilih yang terbesar)}$$

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

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

$$= 523753,982 \geq 216 \rightarrow \text{OK}$$

- Tinggi blok beton (a)

$$\text{(SNI 2847:2019 Pasal 22.2.2.4.1)}$$

$$\begin{aligned} a &= A_s \times \frac{f_y}{0,85 \times f'_c \times b} \\ &= 753,982 \times \frac{420}{0,85 \times 25 \times 1000} \\ &= 14,902 \text{ mm} \end{aligned}$$

- Kapasitas lentur (M_n)

$$\text{(SNI 2847:2019 Pasal 22.2.2.4.1)}$$

$$\begin{aligned} M_n &= A_s \times f_y \times \left(d - d_b - \frac{a}{2} \right) \times 10^{-6} \\ &= 753,982 \times 420 \times \left(82 - 12 - \frac{14,902}{2} \right) \times 10^{-6} \\ &= 19,808 \text{ kN-m} \end{aligned}$$

- Lokasi garis netral (c)

$$\text{(SNI 2847:2019 Pasal 22.2.2.4.1)}$$

$$c = \frac{a}{\beta_1} = \frac{14,902}{0,8500} = 17,532 \text{ mm}$$

- Regangan tulangan tarik (ϵ_t)

$$\text{(SNI 2847:2019 Pasal 22.2.1.2 dan Pasal 22.2.2.1)}$$

$$\begin{aligned} \epsilon_t &= \frac{(d-c)}{c} \times 0,003 \\ &= \frac{(82-17,532)}{17,532} \times 0,003 \\ &= 0,011 \end{aligned}$$

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

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

- Batas tulangan regangan tarik

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

- Faktor reduksi (ϕ)

$$\text{(SNI 2847:2019 Tabel 21.2.2)}$$

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

$$\phi = 0,65$$

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

$$\begin{aligned}\phi &= 0,65 + 0,25 \times \frac{(\varepsilon_t - \varepsilon_{ty})}{(0,005 - \varepsilon_{ty})} \\ &= 0,65 + 0,25 \times \frac{(0,011 - 0,002)}{(0,005 - 0,002)} \\ &= 2,57\end{aligned}$$

- Untuk $\varepsilon_t \geq 0,005$

$$\phi = 0,90$$

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

- Kapasitas lentur tereduksi (ϕM_n)

$$\begin{aligned}\phi M_n &= \phi \times M_n \\ &= 0,90 \times 19,808 \\ &= 17,532 \text{ kN-m}\end{aligned}$$

- Momen ultimit (M_u)

$$\begin{aligned}M_u &= |M_{\min} \text{ akibat } M_{22 \min}| \\ &= |17,532| \\ &= 17,532 \text{ kN-m}\end{aligned}$$

- Cek kapasitas :

$$\begin{aligned}\text{Syarat} &= \phi M_n > M_u \\ &= 17,532 > 117,532 \rightarrow \text{OK}\end{aligned}$$

- Kesimpulan :
Digunakan Tulangan D 12 - 150

e) Tulangan Minimum

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

- Spasi tulangan (s)

$$s = 200 \text{ mm}$$

- 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 :

$$s < s_{\max} = 200 < 240 \rightarrow \text{OK}$$

- Diameter tulangan (d_b)

$$d_b = 12 \text{ mm}$$

- Jarak bersih antar tulangan

$$s - d_b = 200 - 12 = 188 \text{ mm}$$

- Cek jarak bersih

(SNI 2847:2019 Pasal 25.2.1)

$$\begin{aligned} \text{Syarat} &= \text{Jarak bersih} \geq d_b \\ &= 188 \geq 12 \rightarrow \text{OK} \end{aligned}$$

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

$$\begin{aligned} A_s \text{ pasang} &= n \times \frac{1}{4} \times \pi \times d_b^2 \\ &= 5 \times \frac{1}{4} \times 3,14 \times 12^2 \\ &= 565,487 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

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

$$\begin{aligned} A_{s \text{ min1}} &= \left(0,18\% \times \frac{420}{f_y}\right) \times b \times h \\ &= \left(0,18\% \times \frac{420}{420}\right) \times 1000 \times 120 \\ &= 216 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} A_{s \text{ min2}} &= 0,14\% \times b \times h \\ &= 0,14\% \times 1000 \times 120 \\ &= 168 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

$$A_{s \text{ min}} = 216 \text{ mm}^2 \text{ (dipilih yang terbesar)}$$

- Cek $A_s \text{ min}$:

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

$$= 565,487 \geq 216 \rightarrow \text{OK}$$

- Kesimpulan :

Digunakan Tulangan D 12 - 200

4.6.1.4. Pengecekan Kapasitas Geser

- Kapasitas geser beton (V_c)

$$\begin{aligned} V_c &= 0,17 \times \sqrt{f'_c} \times b \times d \\ &= 0,17 \times \sqrt{25} \times 1000 \times 82/1000 \\ &= 69,700 \text{ kN} \end{aligned}$$

- 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)

$$\begin{aligned} \text{Batas} &= 0,5 \times \phi \times V_c \\ &= 0,5 \times 0,75 \times 69,700 \\ &= 26,138 \text{ kN} \end{aligned}$$

- Cek keperluan tulangan geser pelat

$$\begin{aligned} \text{Syarat} &= V_u > 0,5 \times \phi \times V_c \\ &= 25,201 < 26,138 \rightarrow \text{Tidak perlu tulangan geser} \end{aligned}$$

4.6.1.5. Pengecekan Lendutan Pelat

a) Kapasitas Retak Lentur

- Momen inersia pelat (I_g)

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

- Tegangan retak (f_r)

$$f_r = 0,62 \times \sqrt{f'_c} = 0,62 \times \sqrt{25} = 3,100 \text{ MPa}$$

- Garis netral (y)

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

- Kapasitas retak lentur (M_{cr})

$$M_{cr} = f_r \times \frac{I_g}{y} \times 10^{-6} = 3,1 \times \frac{144000000}{60} \times 10^{-6} = 7,44 \text{ kNm}$$

- 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 = 2.915 kN-m
- $M_{11 \text{ min}}$ akibat DL = -5.568 kN-m
- $M_{11 \text{ max}}$ akibat $SIDL$ = 1.348 kN-m
- $M_{11 \text{ min}}$ akibat $SIDL$ = -2.738 kN-m
- $M_{11 \text{ max}}$ akibat LL = 1.935 kN-m
- $M_{11 \text{ min}}$ akibat LL = -3.873 kN-m

- Data hasil olah gaya dalam :

- $M_a \text{ lapangan (+)}$ = $\sum M_{11 \text{ max}}$
= 2.915 + 1.348 + 1.935
= 6,328 kN-m
- $M_a \text{ tumpuan (-)}$ = $\sum M_{11 \text{ min}}$
= -5.568 + (-2.738) + (-3.873)
= -12,269 kN-m
- $M_{cr} / M_a \text{ lapangan}$ = 7,44 / 6,328
= 1,200 kN-m
- $M_{cr} / M_a \text{ tumpuan}$ = 7,44 / 12,269
= 0,606 kN-m
- $I_e \text{ lapangan}$ = $\left(\frac{M_{cr}}{M_a}\right)^3 \times I_g + \left[1 - \left(\frac{M_{cr}}{M_a}\right)^3\right] \times I_{cr}$
= $(1,2)^3 \times 1,44 \times 10^8 + [1 - (1,2)^3] \times 3,6 \times 10^7$
= 144000000 mm^4
- $I_e \text{ lapangan dipakai}$ = $I_g = 144000000 \text{mm}^4$ (karena $I_e = \text{lapangan } I_g$)
- $I_e \text{ tumpuan}$ = $\left(\frac{M_{cr}}{M_a}\right)^3 \times I_g + \left[1 - \left(\frac{M_{cr}}{M_a}\right)^3\right] \times I_{cr}$
= $(1,2)^3 \times 1,44 \times 10^8 + [1 - (1,2)^3] \times 3,6 \times 10^7$
= 60083248 mm^4
- $I_e \text{ tumpuan dipakai}$ = $I_g = 144000000 \text{mm}^4$ (karena $I_e \text{ tumpuan} < I_g$)
- $I_e \text{ rata-rata}$ = $0,5 \times I_e \text{ lapangan} + 0,5 \times I_e \text{ tumpuan}$

$$= 0,5 \times 162760417 + 0,5 \times 162760417$$

$$= 162760417 \text{ mm}^4$$

- Lendutan seketika akibat DL (δ_{DL})

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

$$= \frac{\frac{5}{48} \times 5500 \times (6,328 + 0,2 \times 12,269)}{2,964 \times 4,227} \times 10^6$$

$$= 4,187 \text{ mm}$$

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

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

$$= \frac{\frac{5}{48} \times 5500 \times (6,328 + 0,2 \times 12,269)}{1,195 \times 2,339} \times 10^6$$

$$= 1,828 \text{ mm}$$

- Lendutan seketika akibat LL (δ_{LL})

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

$$= \frac{\frac{5}{48} \times 5500 \times (6,328 + 0,2 \times 12,269)}{1,478 \times 2,293} \times 10^6$$

$$= 2,293 \text{ mm}$$

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

(SNI 2847:2019 Tabel 24.2.2)

$$\text{Syarat} = \frac{L}{360} = \frac{5500}{360} = 15278 \text{ mm}$$

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

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

$$= 2,293 < 15,278 \rightarrow \text{OK}$$

- Rasio tulangan pelat (ρ)

$$\rho = \frac{A_{s \text{ pakai}}}{b \times d} = \frac{565,487}{1000 \times 82} = 0,00689$$

- Faktor jangka panjang (λ)

$$\lambda = \frac{2}{1 + 50 \times \rho} = \frac{2}{1 + 50 \times 0,00689} = 1,487$$

- Lendutan jangka panjang (δ_{LT})

(SNI 2847:2019 Tabel 24.2.2)

$$\begin{aligned}\delta_{LT} &= \lambda \times (\delta_{DL} + \delta_{SIDL}) + \delta_{LL} \\ &= 1,487 \times (1,828 + 1,487) + 2,129 \\ &= 11,074 \text{ mm}\end{aligned}$$

- Syarat lendutan jangka panjang (δ_{LT})

(SNI 2847:2019 Tabel 24.2.2)

$$\text{Syarat} = \frac{L}{240} = \frac{5500}{240} = 22,917 \text{ mm}$$

- Cek lendutan jangka panjang (δ_{LT})

$$\begin{aligned}\text{Cek} &= \delta_{LT} < \frac{L}{240} \\ &= 11,074 < 22,917 \rightarrow \text{OK}\end{aligned}$$

c) Lendutan Arah Sumbu Y

- Gaya dalam yang diperoleh dalam ETABS :

$$\begin{aligned}- M_{11 \text{ max}} \text{ akibat } DL &= 2,915 \text{ kN-m} \\ - M_{11 \text{ min}} \text{ akibat } DL &= -5,568 \text{ kN-m} \\ - M_{11 \text{ max}} \text{ akibat } SIDL &= 1,348 \text{ kN-m} \\ - M_{11 \text{ min}} \text{ akibat } SIDL &= -2,738 \text{ kN-m} \\ - M_{11 \text{ max}} \text{ akibat } LL &= 1,935 \text{ kN-m} \\ - M_{11 \text{ min}} \text{ akibat } LL &= -3,873 \text{ kN-m}\end{aligned}$$

- Data hasil olah gaya dalam :

$$\begin{aligned}- M_a \text{ lapangan (+)} &= \sum M_{11 \text{ max}} \\ &= 2,915 + 1,348 + 1,935 \\ &= 6,328 \text{ kN-m} \\ - M_a \text{ tumpuan (-)} &= \sum M_{11 \text{ min}} \\ &= -5,568 + (-2,738) + (-3,873) \\ &= -12,269 \text{ kN-m} \\ - M_{cr} / M_a \text{ lapangan} &= 7,44 / 6,328 \\ &= 1,200 \text{ kN-m} \\ - M_{cr} / M_a \text{ tumpuan} &= 7,44 / 12,269 \\ &= 0,606 \text{ kN-m} \\ - I_e \text{ lapangan} &= \left(\frac{M_{cr}}{M_a} \right)^3 \times I_g + \left[1 - \left(\frac{M_{cr}}{M_a} \right)^3 \right] \times I_{cr} \\ &= (1,2)^3 \times 1,44 \times 10^8 + [1 - (1,2)^3] \times 3,6 \times 10^7\end{aligned}$$

$$= 144000000 \text{ mm}^4$$

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

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

$$= (1,2)^3 \times 1,44 \times 10^8 + [1 - (1,2)^3] \times 3,6 \times 10^7$$

$$= 60083248 \text{ mm}^4$$

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

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

$$= 0,5 \times 162760417 + 0,5 \times 162760417$$

$$= 162760417 \text{ mm}^4$$

▪ Lendutan seketika akibat DL (δ_{DL})

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

$$= \frac{\frac{5}{48} \times 5500 \times (6,328 + 0,2 \times 12,269)}{2,964 \times 4,227} \times 10^6$$

$$= 4,187 \text{ mm}$$

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

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

$$= \frac{\frac{5}{48} \times 5500 \times (6,328 + 0,2 \times 12,269)}{1,195 \times 2,339} \times 10^6$$

$$= 1,828 \text{ mm}$$

▪ Lendutan seketika akibat LL (δ_{LL})

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

$$= \frac{\frac{5}{48} \times 5500 \times (6,328 + 0,2 \times 12,269)}{1,478 \times 2,293} \times 10^6$$

$$= 2,293 \text{ mm}$$

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

(SNI 2847:2019 Tabel 24.2.2)

$$\text{Syarat} = \frac{L}{360} = \frac{5500}{360} = 15278 \text{ mm}$$

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

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

$$= 2,293 < 15,278 \rightarrow \text{OK}$$

- Rasio tulangan pelat (ρ)

$$\rho = \frac{A_s \text{ pakai}}{b \times d} = \frac{565,487}{1000 \times 82} = 0,00689$$

- Faktor jangka panjang (λ)

$$\lambda = \frac{2}{1 + 50 \times \rho} = \frac{2}{1 + 50 \times 0,00689} = 1,487$$

- Lendutan jangka panjang (δ_{LT})

(SNI 2847:2019 Tabel 24.2.2)

$$\begin{aligned} \delta_{LT} &= \lambda \times (\delta_{DL} + \delta_{SIDL}) + \delta_{LL} \\ &= 1,487 \times (1,828 + 1,487) + 2,129 \\ &= 11,074 \text{ mm} \end{aligned}$$

- Syarat lendutan jangka panjang (δ_{LT})

(SNI 2847:2019 Tabel 24.2.2)

$$\text{Syarat} = \frac{L}{240} = \frac{5500}{240} = 22,917 \text{ mm}$$

- Cek lendutan jangka panjang (δ_{LT})

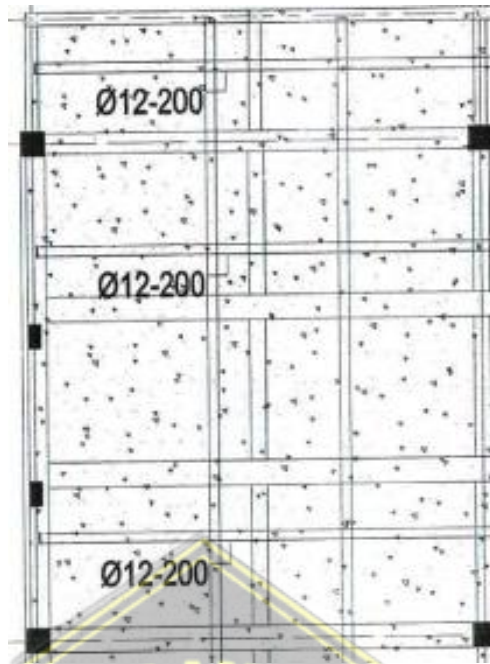
$$\begin{aligned} \text{Cek} &= \delta_{LT} < \frac{L}{240} \\ &= 11,074 < 22,917 \rightarrow \text{OK} \end{aligned}$$

4.6.1.6. Rekapitulasi Hasil Tulangan Pelat

Rekapitulasi hasil tulangan pelat dan gambar penulangan pelat beton pada perancangan ditunjukkan pada Tabel 4.62 dan Gambar 4.23.

Tabel 4.37. Rekapitulasi Hasil Tulangan Pelat

Pelat	L_x (m)	L_y (m)	Arah	Tumpuan		Lapangan	
				Atas	Bawah	Atas	Bawah
S1	5,5	8	X	D12-150	D12-200	D12-200	D12-200
			Y	D12-150	D12-200	D12-200	D12-200
S2	5,5	8	X	D12-150	D12-200	D12-200	D12-200
			Y	D12-150	D12-200	D12-200	D12-200



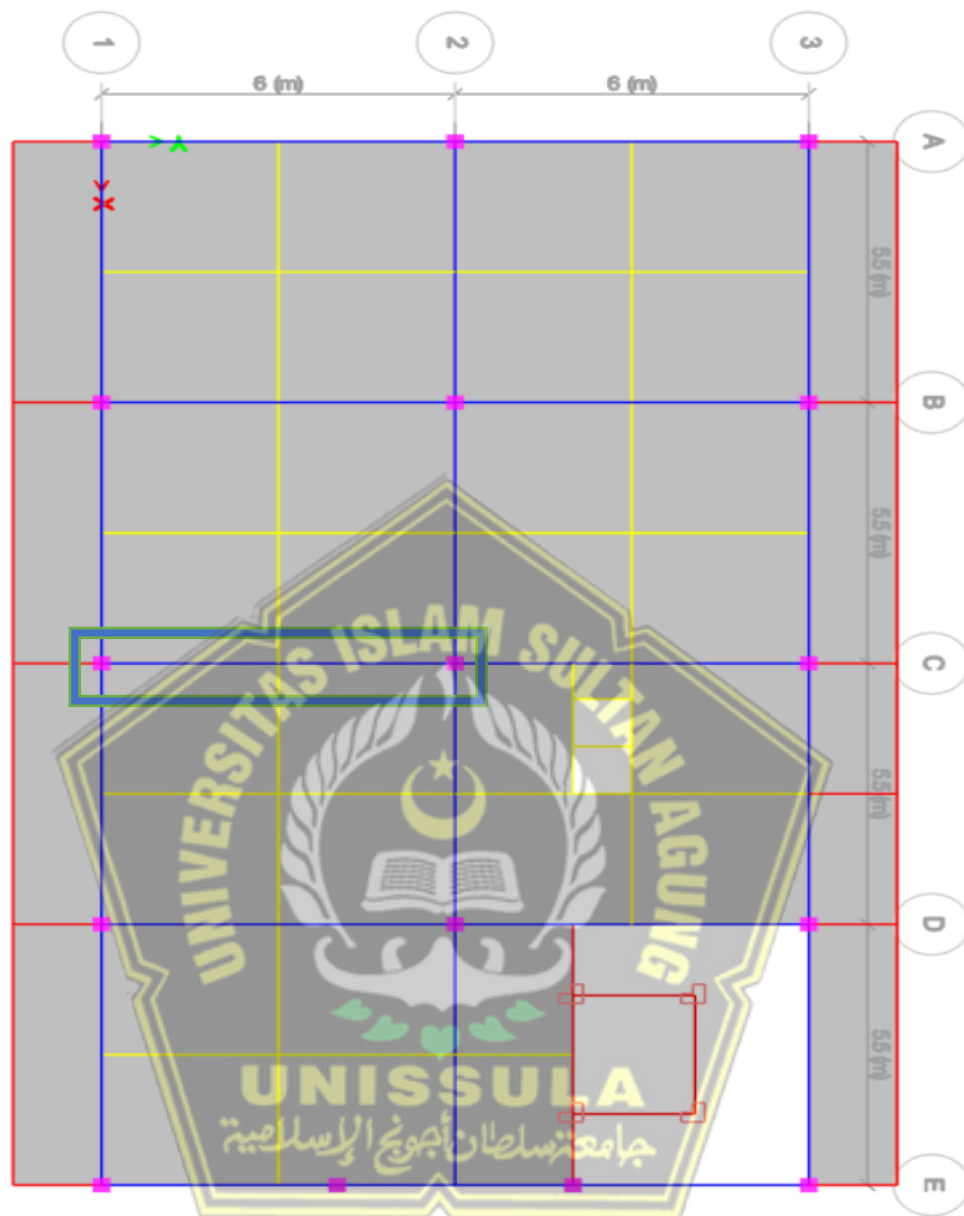
Gambar 4.14. Penulangan Pelat

4.6.2. Perancangan Balok

Perhitungan tulangan lentur balok, tulangan geser, dan perhitungan torsi balok dilakukan secara konvensional sebagai bagian dari analisis kapasitas perancangan balok berdasarkan SRPMK untuk menentukan jumlah beban yang diperlukan.

4.6.2.1. Properti Material dan Penampang

Tipe balok yang akan digunakan sebagai contoh perhitungan adalah balok B1 pada tingkat kelima yang ditunjukkan Gambar 4.24.



Gambar 4.15. Denah Balok B1 Sampel

Panjang balok (L)	= 600 mm
Lebar balok (b)	= 250 mm
Tinggi balok (h)	= 500 mm
Panjang tumpuan	= $2 \times h = 2 \times 500 = 1000$ mm
Diamater tulangan longitudinal (d_b)	= 16 mm
Diamater tulangan pinggang (d_{bt})	= 16 mm
Diamater tulangan sengkang (d_s)	= 10 mm

$$\begin{aligned}
\text{Tebal selimut bersih } (c_c) &= 30 \text{ mm} \\
\text{Tebal efektif balok } (d) &= h - c_c - d_s - d_b/2 \\
&= 500 - 30 - 10 - 16/2 \\
&= 452 \text{ mm} \\
\text{Kuat tekan beton } (f_c') &= 25 \text{ MPa} \\
\text{Kuat leleh tulangan longitudinal } (f_y) &= 420 \text{ MPa} \\
\text{Kuat leleh tulangan transversal } (f_y) &= 420 \text{ MPa} \\
\text{Faktor distribusi tegangan } (\beta_1) &= 0,85 - 0,05 \times \frac{(f_c' - 28)}{7} \\
&= 0,85 - 0,05 \times \frac{(25 - 28)}{7} \\
&= 0,8500 \\
\text{Panjang Kolom } (c_1) &= 300 \text{ mm} \\
\text{Lebar Kolom } (c_2) &= 300 \text{ mm} \\
\text{Panjang bersih balok } (L_n) &= L - c_1 = 6000 - 300 = 5700 \text{ mm} \\
\text{Faktor modifikasi } (\lambda) &= 1 \text{ (beton normal)}
\end{aligned}$$

4.6.2.2. Perhitungan Tulangan Longitudinal Balok

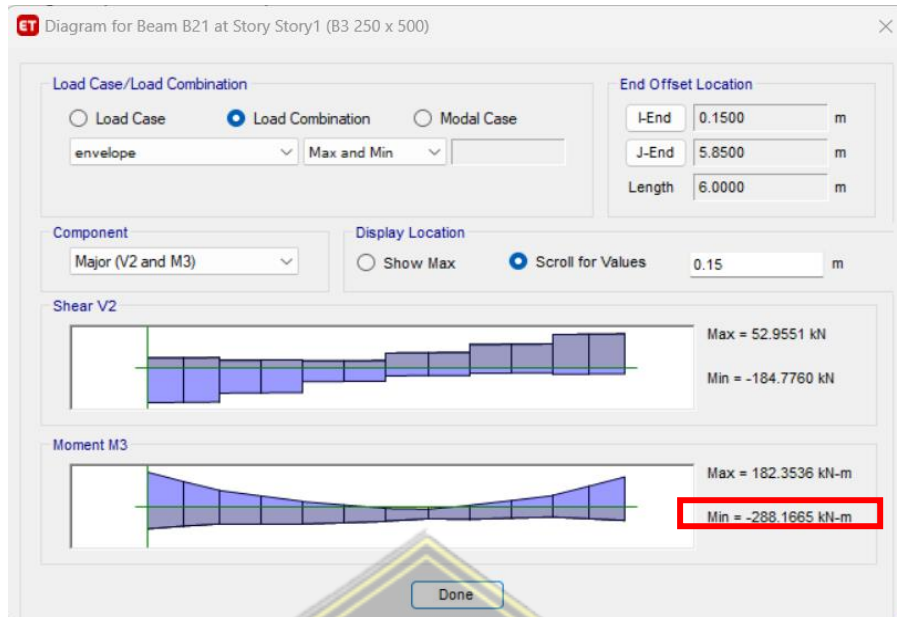
Tahapan-tahapan perhitungan tulangan longitudinal balok yang dilakukan, antara lain:

1. Gaya Dalam

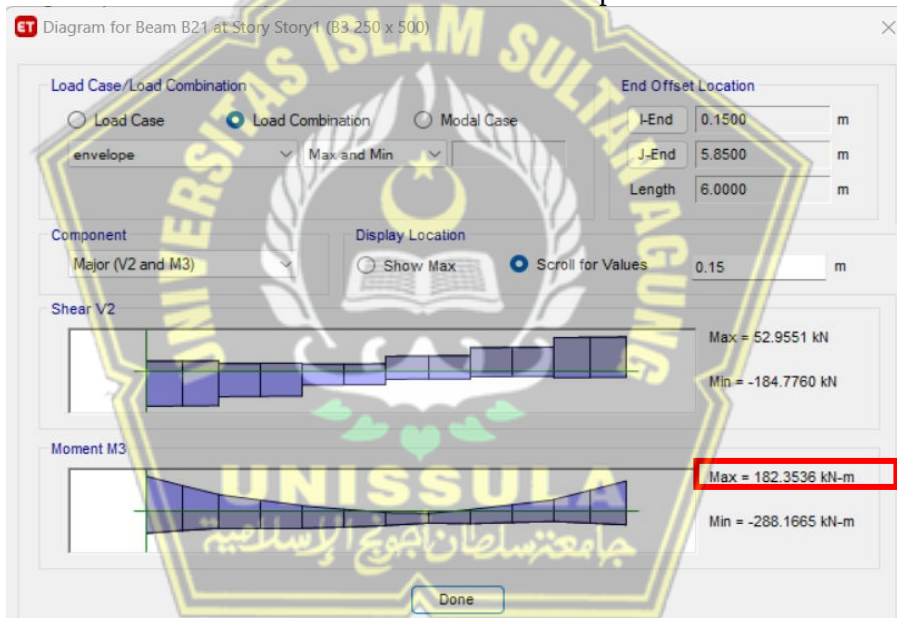
Gaya dalam berupa momen ultimit tumpuan dan lapangan pada balok B1 yang didapat dari ETABS yang digunakan untuk mendesain tulangan longitudinal balok sebagai berikut:

- M_u tumpuan (-) = -288,265 kN-m
- M_u tumpuan (+) = 182,3536 kN-m
- M_u lapangan (-) = -52,9551 kN-m
- M_u lapangan (+) = 184,7760 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 4.16. Momen Ultimit Tumpuan Balok B1



Gambar 4.17. Momen Ultimit Lapangan Balok B1

2. Syarat Gaya dan Geometri

a) Syarat Gaya Aksial

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

$$\begin{aligned}
 \text{Syarat} &= P_u \leq 0,1 A_g \times f'_c \\
 &= 0 \leq 0,1 \times 250 \times 500 \times 25 \\
 &= 0 \leq 3,2500 \rightarrow \text{OK}
 \end{aligned}$$

b) Syarat Tinggi Efektif

(SNI 2847:2019 pada Pasal 18.6.2.1)

$$\begin{aligned}\text{Syarat} &= L_n \geq 4 d \\ &= 5700 \geq 4 \times 452 \\ &= 5700 \geq 1808 \rightarrow \text{OK}\end{aligned}$$

c) Syarat Lebar 1

(SNI 2847:2019 pada Pasal 18.6.2.1)

$$\begin{aligned}\text{Syarat} &= b \geq \text{minimal } (0,3 h \text{ atau } 250 \text{ mm}) \rightarrow \text{ambil nilai terkecil} \\ &= 350 \geq \text{minimal } (0,3 \times 500 \text{ atau } 250 \text{ mm}) \\ &= 350 \geq \text{minimal } (150 \text{ atau } 250 \text{ mm}) \\ &= 350 \geq 150 \rightarrow \text{OK}\end{aligned}$$

d) Syarat Lebar 2

(SNI 2847:2019 pada Pasal 18.6.2.1)

$$\begin{aligned}\text{Syarat} &= b \leq c_2 + 2 \times \text{minimal } (c_2 \text{ atau } 0,75 c_1) \rightarrow \text{ambil terkecil} \\ &= 250 \leq 300 + 2 \times \text{minimal } (300 \text{ atau } 0,75 \times 300) \\ &= 250 \leq 300 + 2 \times \text{minimal } (300 \text{ atau } 225) \\ &= 250 \leq 300 + 2 \times 225 \\ &= 250 \leq 750 \rightarrow \text{OK}\end{aligned}$$

3. Tulangan Tumpuan Atas

- Jumlah tulangan tumpuan atas (n)

$$n = 9$$

- Diameter tulangan longitudinal (d_b)

$$d_b = 16 \text{ mm}$$

- Jarak bersih antar tulangan

$$\begin{aligned}\text{Jarak bersih} &= \frac{b - 2 c_c - 2 d_s - n \times d_b}{n - 1} \\ &= \frac{250 - 2 \times 30 - 2 \times 10 - 9 \times 16}{9 - 1} \\ &= 3,250 \text{ mm}\end{aligned}$$

- Cek jarak bersih

(SNI 2847:2019 pada Pasal 25.2.1)

$$\begin{aligned}\text{Syarat} &= \text{Jarak Bersih} \geq \text{maksimal } (d_b \text{ dan } 25 \text{ mm}) \\ &= 3,250 \geq \text{maksimal } (16 \text{ dan } 25) \rightarrow \text{ambil nilai terbesar} \\ &= 3,250 \geq 25 \rightarrow \text{Tidak Ok}\end{aligned}$$

- Luas tulangan yang dipasang (A_s pasang)

$$\begin{aligned} A_s \text{ pasang} &= n \times \frac{1}{4} \times \pi \times d_b^2 \\ &= 9 \times \frac{1}{4} \times 3,14 \times 16^2 \\ &= 1808,640 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

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

$$\begin{aligned} A_{s \text{ min } 1} &= \frac{0,25 \times \sqrt{f_c'}}{f_y} \times b \times d \\ &= \frac{0,25 \times \sqrt{25}}{420} \times 250 \times 452 \\ &= 336,310 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} A_{s \text{ min } 2} &= \frac{1,4}{f_y} \times b \times d \\ &= \frac{1,4}{420} \times 250 \times 452 \\ &= 376,667 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} A_{s \text{ min}} &= \text{maksimum } (A_{s \text{ min } 1} \text{ atau } A_{s \text{ min } 2}) \\ &= 376,667 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

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

$$\begin{aligned} \text{Syarat} &= A_s \text{ pasang} \geq A_{s \text{ min}} \\ &= 1808,640 \geq 376,667 \rightarrow \text{OK} \end{aligned}$$

- Rasio tulangan (ρ)

$$\rho = \frac{A_s \text{ pasang}}{b \times d} = \frac{1808,640}{250 \times 452} = 0,016$$

- Rasio tulangan maksimum (ρ_{max})

$$\begin{aligned} \rho_{\text{max } 1} &= 0,75 \times \beta_1 \times 0,85 \times \frac{f_c'}{f_y} \times \frac{600}{600 + f_y} \\ &= 0,75 \times 0,8500 \times 0,85 \times \frac{25}{420} \times \frac{600}{600 + 420} \\ &= 0,0189 \end{aligned}$$

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

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

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

$$\begin{aligned} \text{Syarat} &= \rho \leq \rho_{\text{max}} \\ &= 0,0189 \leq 0,0250 \rightarrow \text{OK} \end{aligned}$$

- Tinggi blok beton (a)

(SNI 2847:2019 pada Pasal 22.2.2.4.1)

$$\begin{aligned} a &= A_s \times \frac{f_y}{0,85 \times f'_c \times b} \\ &= 1808,640 \times \frac{420}{0,85 \times 25 \times 250} \\ &= 142,989 \text{ mm} \end{aligned}$$

- Kapasitas lentur (M_n)

(SNI 2847:2019 pada Pasal 22.2.2.4.1)

$$\begin{aligned} M_n &= A_s \times f_y \times \left(d - \frac{a}{2}\right) \times 10^{-6} \\ &= 1808,640 \times 420 \times \left(452 - \frac{142,989}{2}\right) \times 10^{-6} \\ &= 289,043 \text{ kN-m} \end{aligned}$$

- Lokasi garis netral (c)

(SNI 2847:2019 pada Pasal 22.2.2.4.1)

$$c = \frac{a}{\beta_1} = \frac{142,989}{0,8500} = 169,222 \text{ mm}$$

- Regangan tulangan tarik (ε_t)

(SNI 2847:2019 pada Pasal 22.2.1.2 dan 22.2.2.1)

$$\begin{aligned} \varepsilon_t &= \frac{(d-c)}{c} \times 0,003 \\ &= \frac{(452-169,222)}{169,222} \times 0,003 \\ &= 0,005 \end{aligned}$$

- Faktor reduksi (ϕ)

(SNI 2847:2019 pada Pasal 22.2.1.2 dan 22.2.2.1)

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

- Kapasitas lentur tereduksi (ϕM_n)

$$\begin{aligned} \phi M_n &= \phi \times M_n \\ &= 0,90 \times 289,043 \\ &= 260,139 \text{ kN-m} \end{aligned}$$

- Momen ultimit (M_u)

$$\begin{aligned} M_u &= |M_{u \text{ tumpuan}} (-)| \\ &= |-288,165| \\ &= 288,165 \text{ kN-m} \end{aligned}$$

- Cek kapasitas :

$$\begin{aligned}\text{Syarat} &= \phi M_n > M_u \\ &= 260,139 > 288,165 \rightarrow \text{TIDAK OK}\end{aligned}$$

- Luas tulangan yang diperlukan (A_s perlu)

$$\begin{aligned}A_s \text{ perlu} &= \frac{M_u}{f_y \times (d - \frac{a}{2})} \times 10^6 \\ &= \frac{260,139}{420 \times (452 - \frac{142,989}{2})} \times 10^6 \\ &= 1803,146 \text{ mm}^2\end{aligned}$$

4. Tulangan Tumpuan Bawah

- Jumlah tulangan tumpuan bawah (n)

$$n = 3$$

- Diameter tulangan longitudinal (d_b)

$$d_b = 16 \text{ mm}$$

- Jarak bersih antar tulangan

$$\begin{aligned}\text{Jarak bersih} &= \frac{b - 2 c_c - 2 d_s - n \times d_b}{n - 1} \\ &= \frac{250 - 2 \times 30 - 2 \times 10 - 3 \times 16}{3 - 1} \\ &= 61 \text{ mm}\end{aligned}$$

- Cek jarak bersih

(SNI 2847:2019 pada Pasal 25.2.1)

$$\begin{aligned}\text{Syarat} &= \text{Jarak bersih} \geq \text{maksimal } (d_b \text{ dan } 25 \text{ mm}) \\ &= 61 \geq \text{maksimal } (16 \text{ dan } 25) \rightarrow \text{ambil nilai terbesar} \\ &= 16 \geq 25 \rightarrow \text{OK}\end{aligned}$$

- Luas tulangan yang dipasang (A_s pasang)

$$\begin{aligned}A_s \text{ pasang} &= n \times \frac{1}{4} \times \pi \times d_b^2 \\ &= 3 \times \frac{1}{4} \times 3,14 \times 16^2 \\ &= 603,186 \text{ mm}^2\end{aligned}$$

- Luas tulangan minimum (A_s min)

(SNI 2847:2019 pada Pasal 9.6.1.2 dan 18.6.3.2)

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

$$= \frac{0,25 \times \sqrt{25}}{420} \times 250 \times 452$$

$$= 336,310 \text{ mm}^2$$

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

$$= \frac{1,4}{420} \times 250 \times 452$$

$$= 376,667 \text{ mm}^2$$

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

$$= 0,5 \times 1808,640$$

$$= 904,320 \text{ mm}^2$$

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

$$= 950,320 \text{ mm}^2$$

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

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

$$= 603,186 \geq 950,320 \rightarrow \text{TIDAK OK}$$

- Rasio tulangan (ρ)

$$\rho = \frac{A_{s \text{ pasang}}}{b \times d} = \frac{603,186}{250 \times 452} = 0,019$$

- Rasio tulangan maksimum (ρ_{max})

$$\rho_{\text{max } 1} = 0,75 \times \beta_1 \times 0,85 \times \frac{f_c'}{f_y} \times \frac{600}{600 + f_y}$$

$$= 0,75 \times 0,8500 \times 0,85 \times \frac{25}{420} \times \frac{600}{600 + 420}$$

$$= 0,025$$

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

$$\rho_{\text{max}} = \text{maksimum } (\rho_{\text{max } 1} \text{ atau } \rho_{\text{max } 2})$$

$$= 0,025$$

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

$$\text{Syarat} = \rho \leq \rho_{\text{max}}$$

$$= 0,025 \leq 0,025 \rightarrow \text{OK}$$

- Tinggi blok beton (a)

(SNI 2847:2019 pada Pasal 22.2.2.4.1)

$$a = A_s \times \frac{f_y}{0,85 \times f_c' \times b}$$

$$= 603,186 \times \frac{420}{0,85 \times 25 \times 250}$$

$$= 47,687 \text{ mm}$$

- Kapasitas lentur (M_n)

(SNI 2847:2019 pada Pasal 22.2.2.4.1)

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

$$= 603,186 \times 420 \times \left(452 - \frac{47,687}{2}\right) \times 10^{-6}$$

$$= 108,468 \text{ kN-m}$$

- Lokasi garis netral (c)

(SNI 2847:2019 pada Pasal 22.2.2.4.1)

$$c = \frac{a}{\beta_1} = \frac{47,687}{0,8500} = 56,103 \text{ mm}$$

- Regangan tulangan tarik (ε_t)

(SNI 2847:2019 pada Pasal 22.2.1.2 dan 22.2.2.1)

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

$$= \frac{(452-56,103)}{56,103} \times 0,003$$

$$= 0,021$$

- Faktor reduksi (ϕ)

(SNI 2847:2019 pada Pasal 22.2.1.2 dan 22.2.2.1)

$$\phi = 0,90 \text{ (karena } \varepsilon_t \geq 0,005 = 0,021 \geq 0,005)$$

- Kapasitas lentur tereduksi (ϕM_n)

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

$$= 0,90 \times 108,468$$

$$= 97,621 \text{ kN-m}$$

- Momen ultimit (M_u)

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

$$= |182,3536|$$

$$= 182,3536 \text{ kN-m}$$

- Cek kapasitas :

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

$$= 97,621 > 182,3536 \rightarrow \text{TIDAK OK}$$

- Luas tulangan yang diperlukan (A_s perlu)

$$\begin{aligned}
 A_{s \text{ perlu}} &= \frac{M_u}{f_y \times (d - \frac{a}{2})} \times 10^6 \\
 &= \frac{182,3536}{420 \times (420 - \frac{47,687}{2})} \times 10^6 \\
 &= 1014,058 \text{ mm}^2
 \end{aligned}$$

5. Tulangan Lapangan Atas

- Jumlah tulangan lapangan atas (n)

$$n = 3$$

- Diameter tulangan longitudinal (d_b)

$$d_b = 16 \text{ mm}$$

- Jarak bersih antar tulangan

$$\begin{aligned}
 \text{Jarak bersih} &= \frac{b - 2 c_c - 2 d_s - n \times d_b}{n - 1} \\
 &= \frac{250 - 2 \times 30 - 2 \times 10 - 3 \times 16}{3 - 1} \\
 &= 61 \text{ mm}
 \end{aligned}$$

- Cek jarak bersih

(SNI 2847:2019 pada Pasal 25.2.1)

$$\begin{aligned}
 \text{Syarat} &= \text{Jarak Bersih} \geq \text{maksimal } (d_b \text{ dan } 25 \text{ mm}) \\
 &= 61 \geq \text{maksimal } (16 \text{ dan } 25) \rightarrow \text{ambil nilai terbesar} \\
 &= 61 \geq 25 \rightarrow \text{OK}
 \end{aligned}$$

- Luas tulangan yang dipasang (A_s pasang)

$$\begin{aligned}
 A_{s \text{ pasang}} &= n \times \frac{1}{4} \times \pi \times d_b^2 \\
 &= 4 \times \frac{1}{4} \times 3,14 \times 16^2 \\
 &= 603,186 \text{ mm}^2
 \end{aligned}$$

- Luas tulangan minimum (A_s min)

(SNI 2847:2019 pada Pasal 9.6.1.2 dan 18.6.3.2)

$$\begin{aligned}
 A_{s \text{ min } 1} &= \frac{0,25 \times \sqrt{f_c}}{f_y} \times b \times d \\
 &= \frac{0,25 \times 25}{420} \times 250 \times 452 \\
 &= 336,310 \text{ mm}^2
 \end{aligned}$$

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

$$= \frac{1,4}{420} \times 250 \times 452$$

$$= 376,667 \text{ mm}^2$$

$$A_{s \text{ min } 3} = 0,25 \times A_{s \text{ tumpuan } (-)}$$

$$= 0,25 \times 1808,640$$

$$= 452,160 \text{ mm}^2$$

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

$$= 452,160 \text{ mm}^2$$

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

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

$$= 603,186 \geq 452,160 \rightarrow \text{OK}$$

- Rasio tulangan (ρ)

$$\rho = \frac{A_{s \text{ pasang}}}{b \times d} = \frac{603,186}{250 \times 452} = 0,0053$$

- Rasio tulangan maksimum (ρ_{max})

$$\rho_{\text{max } 1} = 0,75 \times \beta_1 \times 0,85 \times \frac{f'_c}{f_y} \times \frac{600}{600 + f_y}$$

$$= 0,75 \times 0,8500 \times 0,85 \times \frac{25}{420} \times \frac{600}{600 + 420}$$

$$= 0,019$$

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

$$\rho_{\text{max}} = \text{maksimum } (\rho_{\text{max } 1} \text{ atau } \rho_{\text{max } 2})$$

$$= 0,025$$

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

$$\text{Syarat} = \rho \leq \rho_{\text{max}}$$

$$= 0,0053 \leq 0,025 \rightarrow \text{OK}$$

- Tinggi blok beton (a)

(SNI 2847:2019 pada Pasal 22.2.2.4.1)

$$a = A_s \times \frac{f_y}{0,85 \times f'_c \times b}$$

$$= 603,186 \times \frac{420}{0,85 \times 25 \times 250}$$

$$= 47,687 \text{ mm}$$

- Kapasitas lentur (M_n)

(SNI 2847:2019 pada Pasal 22.2.2.4.1)

$$\begin{aligned} M_n &= A_s \times f_y \times \left(d - \frac{a}{2}\right) \times 10^{-6} \\ &= 603,186 \times 420 \times \left(452 - \frac{47,687}{2}\right) \times 10^{-6} \\ &= 108,468 \text{ kN-m} \end{aligned}$$

- Lokasi garis netral (c)

(SNI 2847:2019 pada Pasal 22.2.2.4.1)

$$c = \frac{a}{\beta_1} = \frac{47,687}{0,8500} = 56,103 \text{ mm}$$

- Regangan tulangan tarik (ε_t)

(SNI 2847:2019 pada Pasal 22.2.1.2 dan 22.2.2.1)

$$\begin{aligned} \varepsilon_t &= \frac{(d-c)}{c} \times 0,003 \\ &= \frac{(452-56,103)}{56,103} \times 0,003 \\ &= 0,021 \end{aligned}$$

- Faktor reduksi (ϕ)

(SNI 2847:2019 pada Pasal 22.2.1.2 dan 22.2.2.1)

$$\phi = 0,90 \text{ (karena } \varepsilon_t \geq 0,005 = 0,021 \geq 0,005)$$

- Kapasitas lentur tereduksi (ϕM_n)

$$\begin{aligned} \phi M_n &= \phi \times M_n \\ &= 0,90 \times 108,468 \\ &= 263,140 \text{ kN-m} \end{aligned}$$

- Momen ultimit (M_u)

$$\begin{aligned} M_u &= |M_{u \text{ lapangan}} (-)| \\ &= |-52,995| \\ &= 52,995 \text{ kN-m} \end{aligned}$$

- Cek kapasitas :

$$\begin{aligned} \text{Syarat} &= \phi M_n > M_u \\ &= 263,140 > 52,995 \rightarrow \text{OK} \end{aligned}$$

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

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

$$= \frac{52,995}{420 \times (452 - \frac{47,687}{2})} \times 10^6$$

$$= 294,480 \text{ mm}^2$$

6. Tulangan Lapangan Bawah

- Jumlah tulangan lapangan bawah (n)

$$n = 9$$

- Diameter tulangan longitudinal (d_b)

$$d_b = 16 \text{ mm}$$

- Jarak bersih antar tulangan

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

$$= \frac{250 - 2 \times 30 - 2 \times 10 - 9 \times 16}{9 - 1}$$

$$= 3,250 \text{ mm}$$

- Cek jarak bersih

(SNI 2847:2019 pada Pasal 25.2.1)

$$\text{Syarat} = \text{Jarak bersih} \geq \text{maksimal } (d_b \text{ dan } 25 \text{ mm})$$

$$= 3,250 \geq \text{maksimal } (16 \text{ dan } 25) \rightarrow \text{ambil nilai terbesar}$$

$$= 3,250 \geq 25 \rightarrow \text{TIDAK OK}$$

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

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

$$= 9 \times \frac{1}{4} \times 3,14 \times 16^2$$

$$= 1809,557 \text{ mm}^2$$

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

(SNI 2847:2019 pada Pasal 9.6.1.2 dan 18.6.3.2)

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

$$= \frac{0,25 \times \sqrt{25}}{420} \times 250 \times 452$$

$$= 336,310 \text{ mm}^2$$

$$\begin{aligned}
 A_{s \text{ min } 2} &= \frac{1,4}{f_y} \times b \times d \\
 &= \frac{1,4}{420} \times 250 \times 452 \\
 &= 376,667 \text{ mm}^2
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 A_{s \text{ min } 3} &= 0,25 \times A_{s \text{ tumpuan (-)}} \\
 &= 0,25 \times 1808,640 \\
 &= 452,160 \text{ mm}^2
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 A_{s \text{ min}} &= \text{maksimum } (A_{s \text{ min } 1} ; A_{s \text{ min } 2} ; \text{ atau } A_{s \text{ min } 3}) \\
 &= 452,160 \text{ mm}^2
 \end{aligned}$$

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

$$\begin{aligned}
 \text{Syarat} &= A_{s \text{ pasang}} \geq A_{s \text{ min}} \\
 &= 603,186 \geq 452,160 \rightarrow \text{OK}
 \end{aligned}$$

- Rasio tulangan (ρ)

$$\rho = \frac{A_{s \text{ pasang}}}{b \times d} = \frac{1809,557}{250 \times 452} = 0,0016$$

- Rasio tulangan maksimum (ρ_{max})

$$\begin{aligned}
 \rho_{\text{max } 1} &= 0,75 \times \beta_1 \times 0,85 \times \frac{f_c'}{f_y} \times \frac{600}{600 + f_y} \\
 &= 0,75 \times 0,8500 \times 0,85 \times \frac{25}{420} \times \frac{600}{600 + 420} \\
 &= 0,019
 \end{aligned}$$

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

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

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

$$\begin{aligned}
 \text{Syarat} &= \rho \leq \rho_{\text{max}} \\
 &= 0,0016 \leq 0,025 \rightarrow \text{OK}
 \end{aligned}$$

- Tinggi blok beton (a)

(SNI 2847:2019 pada Pasal 22.2.2.4.1)

$$\begin{aligned}
 a &= A_s \times \frac{f_y}{0,85 \times f_c' \times b} \\
 &= 1809,557 \times \frac{420}{0,85 \times 25 \times 250} \\
 &= 143,061 \text{ mm}
 \end{aligned}$$

- Kapasitas lentur (M_n)

(SNI 2847:2019 pada Pasal 22.2.2.4.1)

$$\begin{aligned} M_n &= A_s \times f_y \times \left(d - \frac{a}{2}\right) \times 10^{-6} \\ &= 1809,557 \times 420 \times \left(452 - \frac{143,061}{2}\right) \times 10^{-6} \\ &= 289,162 \text{ kN-m} \end{aligned}$$

- Lokasi garis netral (c)

(SNI 2847:2019 pada Pasal 22.2.2.4.1)

$$c = \frac{a}{\beta_1} = \frac{143,061}{0,8500} = 168,308 \text{ mm}$$

- Regangan tulangan tarik (ε_t)

(SNI 2847:2019 pada Pasal 22.2.1.2 dan 22.2.2.1)

$$\begin{aligned} \varepsilon_t &= \frac{(d-c)}{c} \times 0,003 \\ &= \frac{(452-168,308)}{168,308} \times 0,003 \\ &= 0,005 \end{aligned}$$

- Faktor reduksi (ϕ)

(SNI 2847:2019 pada Pasal 22.2.1.2 dan 22.2.2.1)

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

- Kapasitas lentur tereduksi (ϕM_n)

$$\begin{aligned} \phi M_n &= \phi \times M_n \\ &= 0,90 \times 289,162 \\ &= 260,246 \text{ kN-m} \end{aligned}$$

- Momen ultimit (M_u)

$$\begin{aligned} M_u &= |M_{u \text{ lapangan}} (+)| \\ &= |184,776| \\ &= 184,776 \text{ kN-m} \end{aligned}$$

- Cek kapasitas :

$$\begin{aligned} \text{Syarat} &= \phi M_n > M_u \\ &= 260,246 > 184,776 \rightarrow \text{OK} \end{aligned}$$

- Luas tulangan yang diperlukan (A_s perlu)

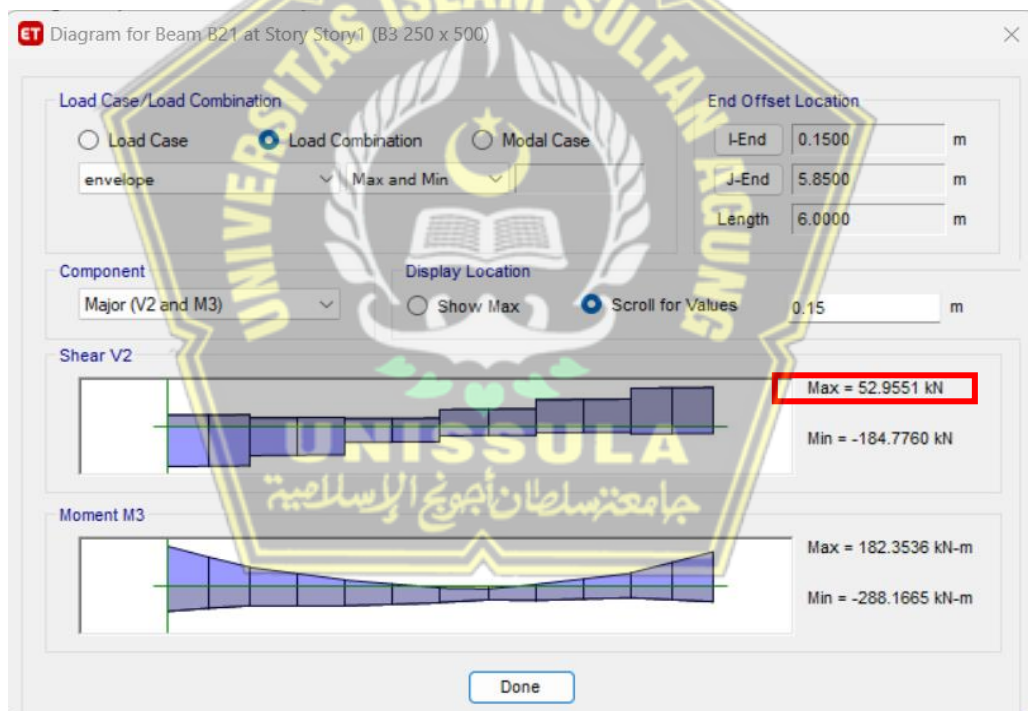
$$\begin{aligned}
 A_s \text{ perlu} &= \frac{M_u}{f_y \times (d - \frac{a}{2})} \times 10^6 \\
 &= \frac{184,776}{420 \times (452 - \frac{143,061}{2})} \times 10^6 \\
 &= 1156,316 \text{ mm}^2
 \end{aligned}$$

4.6.2.3. Perhitungan Tulangan Transversal Balok

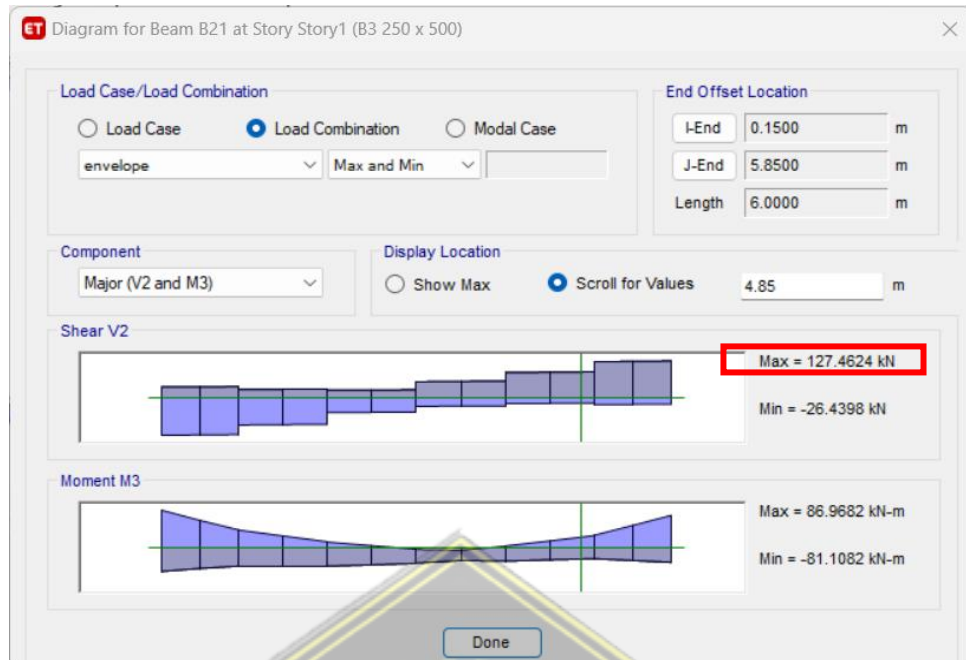
Tulangan transversal pada balok merupakan tulangan yang berguna untuk menahan gaya geser ultimit yang diterima balok. Tahapan-tahapan perhitungan tulangan transversal balok yang dilakukan, antara lain:

1. Gaya Dalam

Gaya dalam berupa gaya geser ultimit tumpuan dan lapangan pada balok G1. Tampilan gaya geser ultimit tumpuan dan lapangan pada balok G1 yang didapat dari ETABS dapat dilihat pada Gambar 4.27 dan Gambar 4.28.



Gambar 4.18. Gaya Geser Ultimit Tumpuan Balok B1



Gambar 4. 1. 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 = 52.9551 kN
- V_u lapangan = 127.4624 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:

$$V_g \text{ tumpuan} = 177.1722 \text{ kN}$$

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

$$A_s^+ \text{ tumpuan} = 603,186 \text{ mm}^2$$

$$A_s^- \text{ tumpuan} = 1808,64 \text{ mm}^2$$

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

$$\begin{aligned} a_{pr}^{+} &= 1,25 a \text{ (tumpuan positif desain lentur)} \\ &= 1,25 \times 47,689 \\ &= 59,609 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} a_{pr}^{-} &= 1,25 a \text{ (tumpuan negatif desain lentur)} \\ &= 1,25 \times 142,989 \\ &= 178,736 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} M_{pr}^{+} &= A_s^{+} \times 1,25 f_y \times \left(d - \frac{a_{pr}^{+}}{2}\right) \\ &= 603,186 \times 1,25 \times 420 \times \left(452 - \frac{59,609}{2}\right) \\ &= 133697728 \text{ Nmm} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} M_{pr}^{-} &= A_s^{-} \times 1,25 f_y \times \left(d - \frac{a_{pr}^{-}}{2}\right) \\ &= 1808,640 \times 1,25 \times 420 \times \left(452 - \frac{178,736}{2}\right) \\ &= 344332049 \text{ Nmm} \end{aligned}$$

- Gaya Geser Akibat Goyangan (V_{sway})

(SNI 2847:2019 pada Pasal 18.6.5.1)

Gaya geser akibat goyangan dihitung dengan rumus berikut:

$$\begin{aligned} V_{sway} \text{ atau } V_{pr} &= \frac{M_{pr}^{+} + M_{pr}^{-}}{L_n} \\ &= \frac{133697728 + 344332049}{5700} \\ &= 83865 \text{ N} \end{aligned}$$

- Gaya Geser Desain Akibat Goyangan (V_e)

(SNI 2847:2019 pada Pasal 18.6.5.1)

Gaya geser desain akibat goyangan dihitung dengan rumus berikut:

$$\begin{aligned} V_e &= V_g + V_{pr} \\ &= -177,1722 \times 10^3 + 83865 \\ &= -93307 \text{ N} \end{aligned}$$

b) Tahanan Geser Beton

- Gaya Geser Akibat Goyangan (V_{sway})

$$V_{sway} \text{ atau } V_{pr} = 83865 \text{ N}$$

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

$$\frac{1}{2} V_e = \frac{1}{2} \times -93307 = -46654 \text{ N}$$

- Gaya Aksial Terfaktor (P_u)

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

- Menghitung $A_g f_c' / 20$:

$$\frac{A_g f_c'}{20} = \frac{250 \times 500 \times 25}{20} = 156250 \text{ N}$$

- Kuat Geser Nominal Beton (V_c)

(SNI 2847:2019 pada Pasal 18.6.5.2)

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

$$V_{pr} \geq \frac{1}{2} V_e = 83865 \geq -46654 \rightarrow \text{OK}$$

$$P_u < \frac{A_g f_c'}{20} = 0 < 156250 \rightarrow \text{OK}$$

$$V_c = 0$$

c) Penulangan Geser

- Jumlah kaki (n)

$$n = 8$$

- Luas tulangan geser (A_v)

$$\begin{aligned} A_v &= n \times \frac{1}{4} \times \pi \times d_s^2 \\ &= 8 \times \frac{1}{4} \times 3,14 \times 10^2 \\ &= 628,319 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

- Spasi tulangan (s)

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

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

(SNI 2847:2019 pada Pasal 18.6.4.4)

$$s_{\max 1} = \frac{1}{4} \times d = \frac{1}{4} \times 452 = 113 \text{ mm}$$

$$s_{\max 2} = 6 \times d_b = 6 \times 16 = 96 \text{ mm}$$

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

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

$$= 150 \text{ mm}$$

- Cek spasi :

$$s < s_{\max} = 150 < 150 \rightarrow \text{NOT OK}$$

- Kuat geser nominal akibat penulangan geser (V_s)
(SNI 2847:2019 pada Pasal 22.5.10.5.3)

$$\begin{aligned} V_s &= \frac{A_v \times f_y \times d}{s} \\ &= \frac{628,319 \times 420 \times 452}{150} \\ &= 795200 \text{ N} \end{aligned}$$

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

$$\begin{aligned} \text{Batas } V_s &= 0,66 \times \sqrt{f_c} \times b \times d \\ &= 0,66 \times \sqrt{25} \times 250 \times 452 \\ &= 372900 \text{ N} \end{aligned}$$

- 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)

$$\begin{aligned} V_n &= V_c + V_s \\ &= 0 + 372900 \\ &= 372900 \text{ N} \end{aligned}$$

- Kapasitas geser tereduksi (ϕV_n)

$$\begin{aligned} \phi V_n &= \phi \times V_n \\ &= 0,75 \times 372900 \\ &= 279,675 \text{ N} \end{aligned}$$

- Gaya geser ultimit (V_u)

$$\begin{aligned} V_u &= V_{u \text{ tumpuan}} \times 10^3 \\ &= 52,9551 \times 10^3 \\ &= 52955,1 \text{ N} \end{aligned}$$

- Cek kapasitas :

$$\begin{aligned} \text{Syarat} &= \frac{\phi V_n}{V_u} \geq 1 \\ &= \frac{279,675}{52955} \geq 1 \\ &= 5,281 \geq 1 \rightarrow \text{OK} \end{aligned}$$

3. Tulangan Transversal Lapangan

a) Gaya Dalam

$$V_u \text{ lapangan} = 127,4624 \text{ kN}$$

b) Penulangan Geser

- Jumlah kaki (n)

$$n = 8$$

- Luas tulangan geser (A_v)

$$\begin{aligned} A_v &= n \times \frac{1}{4} \times \pi \times d_s^2 \\ &= 8 \times \frac{1}{4} \times 3,14 \times 10^2 \\ &= 628,319 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

- Spasi tulangan (s)

$$s = 200 \text{ mm}$$

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

(SNI 2847:2019 pada Pasal 18.6.4.6)

$$s_{\max} = \frac{1}{2} \times d = \frac{1}{2} \times 452 = 226 \text{ mm}$$

- Cek spasi :

$$s < s_{\max} = 200 < 226 \rightarrow \text{OK}$$

- Kuat geser nominal akibat penulangan geser (V_s)

(SNI 2847:2019 pada Pasal 22.5.10.5.3)

$$\begin{aligned} V_s &= \frac{A_v \times f_y \times d}{s} \\ &= \frac{628,319 \times 420 \times 452}{200} \\ &= 596400 \text{ N} \end{aligned}$$

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

(SNI 2847:2019 pada Pasal 22.5.1.2)

$$\begin{aligned} \text{Batas } V_s &= 0,66 \times \sqrt{f_c} \times b \times d \\ &= 0,66 \times 25 \times 250 \times 452 \\ &= 372900 \text{ N} \end{aligned}$$

- Kuat geser nominal beton (V_c)

(SNI 2847:2019 pada Pasal 22.5.5.1)

$$\begin{aligned} V_c &= 0,17 \times \sqrt{f_c} \times b \times d \\ &= 0,17 \times \sqrt{25} \times 250 \times 452 \\ &= 96050 \text{ N} \end{aligned}$$

- 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)

$$\begin{aligned} V_n &= V_c + V_s \\ &= 96050 + 372900 \\ &= 468950 \text{ N} \end{aligned}$$

- Kapasitas geser tereduksi (ϕV_n)

$$\begin{aligned} \phi V_n &= \phi \times V_n \\ &= 0,75 \times 490442 \\ &= 468950 \text{ N} \end{aligned}$$

- Gaya geser ultimit (V_u)

$$\begin{aligned} V_u &= V_{u \text{ lapangan}} \times 10^3 \\ &= 127,4624 \times 10^3 \\ &= 127462,4 \text{ N} \end{aligned}$$

- Cek kapasitas :

$$\begin{aligned} \text{Syarat} &= \frac{\phi V_n}{V_u} \geq 1 \\ &= \frac{468950}{127462,4} \geq 1 \\ &= 2,759 \geq 1 \rightarrow \text{OK} \end{aligned}$$

4.6.2.4. Perhitungan Tulangan Torsi Balok

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

1. Parameter Umum untuk Perhitungan Torsi

- Luas dibatasi keliling luar penampang beton (A_{cp})

$$A_{cp} = b \times h = 250 \times 500 = 125000 \text{ mm}^2$$

- Keliling luar penampang beton (p_{cp})

$$\begin{aligned} p_{cp} &= 2 \times (b + h) \\ &= 2 \times (250 + 500) \\ &= 1500 \text{ mm} \end{aligned}$$

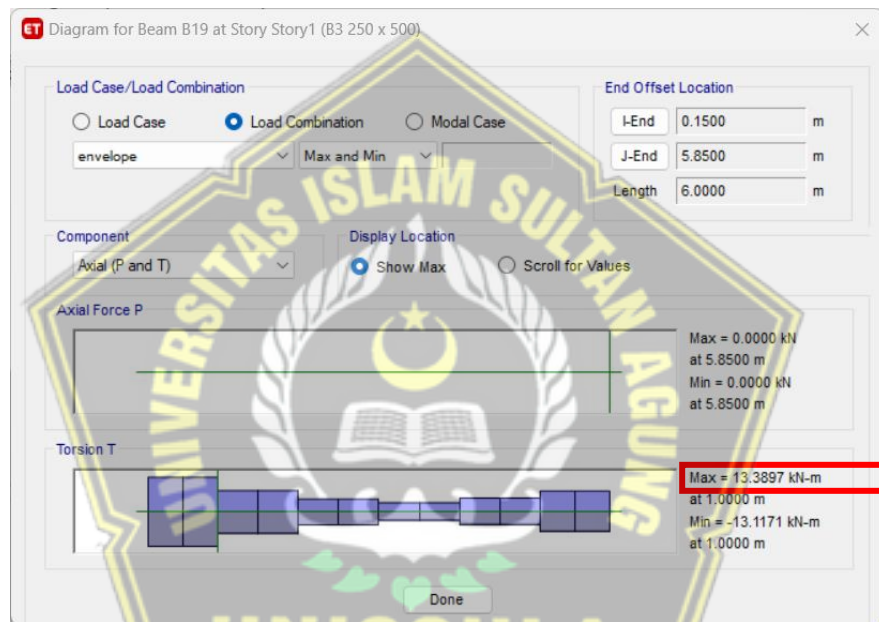
- $x_0 = b - 2c_c - d_s$
 $= 250 - 2 \times 30 - 10$
 $= 180 \text{ mm}$
- $y_0 = h - 2c_c - d_s$
 $= 500 - 2 \times 30 - 10$
 $= 430 \text{ mm}$
- Luas lingkup garis pusat tulangan torsi (A_{oh})
 (SNI 2847:2019 pada Penjelasan Pasal R22.7.6.1.1)
 $A_{oh} = x_0 \times y_0$
 $= 180 \times 430$
 $= 77400 \text{ mm}^2$
- Luas bruto lingkup lintasan alir geser (A_o)
 (SNI 2847:2019 pada Pasal 22.7.6.1.1)
 $A_o = 0,85 \times A_{oh}$
 $= 0,85 \times 77400$
 $= 65790 \text{ mm}^2$
- Keliling garis pusat tulangan torsi (p_h)
 (SNI 2847:2019 pada Pasal 22.7.6.1)
 $p_h = 2 \times (x_0 + y_0)$
 $= 2 \times (180 + 430)$
 $= 1220 \text{ mm}$
- 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)
 $\theta = 45^\circ \text{ (non prategang)}$

1. Gaya Dalam

Gaya dalam berupa gaya torsi pada balok B1 yang didapat dari ETABS yang digunakan untuk mendesain tulangan torsi balok sebagai berikut:

$$\begin{aligned}T_u &= 13,3897 \text{ kN-m} \\&= 13,3897 \times 10^6 \\&= 13389700 \text{ N-mm}\end{aligned}$$

Tampilan gaya torsi pada balok B1 yang didapat dari ETABS dapat dilihat pada Gambar 4.29.



Gambar 4. 20. Gaya Torsi Balok B1

3. Pengecekan Kebutuhan Tulangan Torsi

- Momen retak torsi (T_{cr})

$$\begin{aligned}T_{cr} &= 0,33 \times \sqrt{f_c} \times \frac{A_{cp}^2}{p_{cp}} \\&= 0,33 \times \sqrt{25} \times \frac{125000}{1500} \\&= 17187500 \text{ N-mm}\end{aligned}$$

- Faktor reduksi kuat torsi (ϕ)

(SNI 2847:2019 pada Tabel 21.2.1)

$$\phi = 0,75$$

- Kapasitas torsi tereduksi (ϕT_{cr})

$$\begin{aligned}\phi T_{cr} &= \phi \times T_{cr} \\ &= 0,75 \times 17187500 \\ &= 12890625 \text{ N-mm}\end{aligned}$$

- Cek perlu tulangan torsi :

(SNI 2847:2019 pada Tabel 22.7.4.1)

$$\begin{aligned}\text{Syarat} &= T_u > \frac{1}{4} \phi T_{cr} \\ &= 13389700 > \frac{1}{4} \times 12890625 \\ &= 13389700 > 3222656 \rightarrow \text{Perlu}\end{aligned}$$

4. Pengecekan Kecukupan Dimensi Penampang

- Momen torsi ultimit yang dipakai (T_u pakai)

(SNI 2847:2019 pada Pasal 22.7.3.2 dan 22.7.5)

$$\begin{aligned}T_u \text{ pakai} &= \text{minimal } (\phi T_{cr} \text{ atau } T_u) \\ &= \text{minimal } (38747947,68 \text{ atau } 17852000) \\ &= 12890625 \text{ N-mm}\end{aligned}$$

- Gaya geser ultimit (V_u)

$$\begin{aligned}V_u &= V_{u \text{ tumpuan}} \times 10^3 \\ &= 52,955 \times 10^3 \\ &= 52955 \text{ N}\end{aligned}$$

- Kuat geser nominal beton (V_c)

(SNI 2847:2019 pada Pasal 22.5.5.1)

$$\begin{aligned}V_c &= 0,17 \times \sqrt{f_c} \times b \times d \\ &= 0,17 \times 25 \times 250 \times 452 \\ &= 96050 \text{ N}\end{aligned}$$

- Tegangan ultimit geser + torsi

(SNI 2847:2019 pada Tabel 22.7.7.1)

$$\begin{aligned}\text{Tegangan ultimit geser + torsi} &= \sqrt{\left(\frac{V_u}{b \times d}\right)^2 + \left(\frac{T_u \times p_h}{1,7 \times A_{oh}^2}\right)^2} \\ &= \sqrt{\left(\frac{52955}{250 \times 452}\right)^2 + \left(\frac{112890625 \times 1220}{1,7 \times 77400^2}\right)^2} \\ &= 1,614 \text{ MPa}\end{aligned}$$

- Kapasitas tegangan beton

(SNI 2847:2019 pada Tabel 22.7.7.1)

$$\begin{aligned}\text{Kapasitas tegangan beton} &= \phi \times \left(\frac{V_c}{b \times d} + 0,66 \times \sqrt{f'_c} \right) \\ &= 0,75 \times \left(\frac{96050}{250 \times 452} + 0,66 \times 25 \right) \\ &= 3,113 \text{ MPa}\end{aligned}$$

- Cek dimensi penampang :

$$\begin{aligned}\sqrt{\left(\frac{V_u}{b \times d} \right)^2 + \left(\frac{T_u \times p_h}{1,7 \times A_{oh}^2} \right)^2} &\leq \phi \times \left(\frac{V_c}{b \times d} + 0,66 \times \sqrt{f'_c} \right) \\ 1,614 &\leq 3,113 \rightarrow \text{OK}\end{aligned}$$

5. Penulangan Transversal Torsi

- Jumlah kaki (n)

$$n_{\text{tumpuan}} = 8$$

$$n_{\text{lapangan}} = 8$$

- Spasi tulangan (s)

$$s_{\text{tumpuan}} = 150 \text{ mm}$$

$$s_{\text{lapangan}} = 200 \text{ mm}$$

- Spasi maksimum (s_{max})

(SNI 2847:2019 pada Pasal 9.7.6.3.3)

$$s_{\text{max } 1} = \frac{1}{8} \times p_h = \frac{1}{8} \times 1220 = 152,5 \text{ mm}$$

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

$$\begin{aligned}s_{\text{max}} &= \text{minimal } (s_{\text{max } 1} \text{ atau } s_{\text{max } 2}) \\ &= 152,5 \text{ mm}\end{aligned}$$

- Cek spasi :

$$s_{\text{tumpuan}} < s_{\text{max}} = 150 < 152,5 \rightarrow \text{OK}$$

$$s_{\text{lapangan}} < s_{\text{max}} = 200 < 152,5 \rightarrow \text{NOT OK}$$

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

$$\begin{aligned}\frac{A_{v+t}}{s_{\text{tumpuan pasang}}} &= \frac{n_{\text{tumpuan}} \times \frac{1}{4} \times \pi \times d s^2}{s_{\text{Tumpuan}}} \\ &= \frac{8 \times \frac{1}{4} \times 3,14 \times 10^2}{150} \\ &= 4,189 \text{ mm}^2/\text{mm}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 A_{v+t} / s \text{ lapangan pasang} &= \frac{n \text{ Lapangan} \times \frac{1}{4} \times \pi \times ds^2}{s \text{ Lapangan}} \\
 &= \frac{8 \times \frac{1}{4} \times 3,14 \times 10^2}{200} \\
 &= 3,142 \text{ mm}^2/\text{mm}
 \end{aligned}$$

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

$$\begin{aligned}
 A_t / s &= \frac{T_u}{2 \times \phi \times A_o \times f_{yt}} \\
 &= \frac{12890625}{2 \times 0,75 \times 65790 \times 420} \\
 &= 0,311 \text{ mm}^2/\text{mm}
 \end{aligned}$$

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

$$\begin{aligned}
 A_v / s \text{ tumpuan perlu} &= \left(\frac{V_u \text{ tumpuan}}{\phi} - V_c \text{ tumpuan} \right) / (f_y \times d) \\
 &= \left(\frac{52955}{0,75} - 0 \right) / (420 \times 452) \\
 &= 0,372 \text{ mm}^2/\text{mm}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 A_v / s \text{ lapangan perlu} &= \left(\frac{V_u \text{ lapangan}}{\phi} - V_c \text{ lapangan} \right) / (f_y \times d) \\
 &= \left(\frac{127462,4}{0,75} - 596400 \right) / (420 \times 452) \\
 &= 0,389 \text{ mm}^2/\text{mm}
 \end{aligned}$$

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

$$\begin{aligned}
 A_{v+t} / s \text{ tumpuan perlu} &= 2 \times (A_t / s) + (A_v / s \text{ tumpuan perlu}) \\
 &= 2 \times 0,311 + 0,372 \\
 &= 0,994 \text{ mm}^2/\text{mm}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 A_{v+t} / s \text{ lapangan perlu} &= 2 \times (A_t / s) + (A_v / s \text{ lapangan perlu}) \\
 &= 2 \times 0,311 + 0,389 \\
 &= 1,011 \text{ mm}^2/\text{mm}
 \end{aligned}$$

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

$$\begin{aligned}
 A_{v+t} / s_{\text{min } 1} &= 0,062 \times \sqrt{f_c} \times \frac{b}{f_y} \\
 &= 0,062 \times \sqrt{25} \times \frac{250}{420} \\
 &= 0,185 \text{ mm}^2/\text{mm}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 A_{v+t} / s_{\min 2} &= 0,35 \times \frac{b}{f_y} \\
 &= 0,35 \times \frac{250}{420} \\
 &= 0,208 \text{ mm}^2/\text{mm} \\
 A_{v+t} / s_{\min} &= \text{maksimum } (A_{v+t} / s_{\min 1} \text{ atau } A_{v+t} / s_{\min 2}) \\
 &= 0,208 \text{ mm}^2/\text{mm}
 \end{aligned}$$

- Cek geser + torsi :

$$\begin{aligned}
 A_{v+t} / s_{\text{tumpuan pasang}} &\geq \text{maksimum } (A_{v+t} / s_{\text{perlu}} \text{ atau } A_{v+t} / s_{\min}) \\
 4,189 &\geq \text{maksimum } (0,994 \text{ atau } 0,208) \\
 4,189 &\geq 0,994 \rightarrow \text{OK} \\
 A_{v+t} / s_{\text{lapangan pasang}} &\geq \text{maksimum } (A_{v+t} / s_{\text{perlu}} \text{ atau } A_{v+t} / s_{\min}) \\
 3,142 &\geq \text{maksimum } (1,011 \text{ atau } 0,208) \\
 3,142 &\geq 1,011 \rightarrow \text{OK}
 \end{aligned}$$

6. Penulangan Longitudinal Torsi

- Diameter tulangan pinggang (d_b)
 $d_b = 16 \text{ mm}$
- Diameter tulangan pinggang minimum ($d_{b \min}$)
 (SNI 2847:2019 pada Pasal 9.7.5.2)
 $d_{b \min} = 0,042 s$
 $= 0,042 \times \text{maksimum } (s_{\text{tumpuan}} \text{ atau } s_{\text{lapangan}})$
 $= 0,042 \times 200$
 $= 8,4 \text{ mm}$

- Cek d_b :

$$\begin{aligned}
 \text{Syarat} &= d_b \geq d_{b \min} \\
 &= 16 \geq 8,4 \rightarrow \text{OK}
 \end{aligned}$$

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

$$\begin{aligned}
 A_s \text{ perlu tumpuan atas} &= 1803,146 \text{ mm}^2 \\
 A_s \text{ perlu tumpuan bawah} &= 1014,058 \text{ mm}^2 \\
 A_s \text{ perlu lapangan atas} &= 294,480 \text{ mm}^2 \\
 A_s \text{ perlu lapangan bawah} &= 1156,316 \text{ mm}^2
 \end{aligned}$$

- Luas tulangan longitudinal torsi (A_l)
(SNI 2847:2019 pada Pasal 22.7.6.1)

$$\begin{aligned} A_l &= (A_t / s) \times p_h \\ &= 0,311 \times 1220 \\ &= 379,431 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

- Luas tulangan longitudinal torsi minimum ($A_{l \text{ min}}$)
(SNI 2847:2019 pada Pasal 9.6.4.3)

$$\begin{aligned} A_{l \text{ min}} &= 0,42 \times \sqrt{f_c} \times \frac{A_{cp}}{f_y} - \left(\frac{A_t}{s}\right) \times p_h \\ &= 0,42 \times \sqrt{25} \times \frac{125000}{420} - 0,311 \times 1220 \\ &= 245,569 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

- Luas tulangan longitudinal (A_s)

$$\begin{aligned} A_s &= \text{maksimum } (A_l \text{ atau } A_{l \text{ min}}) \\ &= \text{maksimum } (379,431 \text{ atau } 245,569) \\ &= 379,431 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

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

$$\begin{aligned} A_{l \text{ perlu tumpuan}} &= A_s \text{ perlu tumpuan atas} + A_s \text{ perlu tumpuan bawah} \\ &= 1803,146 + 1014,058 \\ &= 2817,204 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} A_{l \text{ perlu lapangan}} &= A_s \text{ perlu lapangan atas} + A_s \text{ perlu lapangan bawah} \\ &= 294,480 + 1156,316 \\ &= 1450,797 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

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

$$\begin{aligned} A_s + A_{l \text{ perlu tumpuan}} &= 379,431 + 2817,204 \\ &= 3196,637 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} A_s + A_{l \text{ perlu lapangan}} &= 379,431 + 1450,797 \\ &= 1830,228 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

- Jumlah tulangan negatif (n)

$$n \text{ tumpuan atas} = 9$$

$$n \text{ tumpuan tengah} = 2 \text{ (angka kelipatan 2)}$$

$$\begin{aligned}
 n_{\text{tumpuan bawah}} &= 3 \\
 n_{\text{tumpuan vertikal}} &= 2 + n_{\text{tumpuan tengah}} / 2 \\
 &= 2 + 2 / 2 \\
 &= 3 \\
 n_{\text{lapangan atas}} &= 3 \\
 n_{\text{lapangan tengah}} &= 2 \text{ (angka kelipatan 2)} \\
 n_{\text{lapangan bawah}} &= 9 \\
 n_{\text{lapangan vertikal}} &= 2 + n_{\text{lapangan tengah}} / 2 \\
 &= 2 + 2 / 2 \\
 &= 3
 \end{aligned}$$

• Minimal n (n_{atas} atau n_{bawah})

$$\begin{aligned}
 \text{Minimal } n_{\text{tumpuan}} &= \text{minimal } (n_{\text{tumpuan atas}} \text{ atau } n_{\text{tumpuan bawah}}) \\
 &= \text{minimal } (9 \text{ atau } 3) \\
 &= 3
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Minimal } n_{\text{lapangan}} &= \text{minimal } (n_{\text{lapangan atas}} \text{ atau } n_{\text{lapangan bawah}}) \\
 &= \text{minimal } (3 \text{ atau } 9) \\
 &= 3
 \end{aligned}$$

• Spasi tumpuan (s_{tumpuan})

$$\begin{aligned}
 S_{\text{horizontal tumpuan}} &= \frac{b - 2c_c - 2d_s - d_b}{\min(n_{\text{atas}} \text{ atau } n_{\text{bawah}}) - 1} \\
 &= \frac{350 - 2 \times 40 - 2 \times 10 - 19}{3 - 1} \\
 &= 77 \text{ mm}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 S_{\text{vertikal tumpuan}} &= \frac{h - 2c_c - 2d_s - d_b}{n_{\text{vertikal}} - 1} \\
 &= \frac{500 - 2 \times 30 - 2 \times 10 - 16}{3 - 1}
 \end{aligned}$$

$$= 202$$

$$\begin{aligned}
 S_{\text{tumpuan}} &= \text{maksimum } (s_{\text{horizontal}} \text{ atau } s_{\text{vertikal}}) \\
 &= \text{maksimum } (77 \text{ atau } 202) \\
 &= 202
 \end{aligned}$$

- Spasi lapangan (s_{lapangan})

$$\begin{aligned}
 S_{\text{horizontal lapangan}} &= \frac{b - 2c_c - 2d_s - d_b}{\min(n_{\text{atas}} \text{ atau } n_{\text{bawah}}) - 1} \\
 &= \frac{250 - 2 \times 30 - 2 \times 10 - 16}{3 - 1} \\
 &= 77 \text{ mm}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 S_{\text{vertikal lapangan}} &= \frac{h - 2c_c - 2d_s - d_b}{n_{\text{vertikal}} - 1} \\
 &= \frac{500 - 2 \times 30 - 2 \times 10 - 16}{3 - 1} \\
 &= 202
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 S_{\text{lapangan}} &= \text{maksimum } (s_{\text{horizontal}} \text{ atau } s_{\text{vertikal}}) \\
 &= \text{maksimum } (77 \text{ atau } 202) \\
 &= 202
 \end{aligned}$$

- Cek spasi tulangan longitudinal :

$$s_{\text{tumpuan}} \leq 300 \quad = 202 \leq 300 \rightarrow \text{OK}$$

$$s_{\text{lapangan}} \leq 300 \quad = 202 \leq 300 \rightarrow \text{OK}$$

- Luas tulangan longitudinal (A_s)

$$\begin{aligned}
 A_{s \text{ tumpuan}} &= (n_{\text{atas}} + n_{\text{bawah}}) \times \frac{\pi}{4} \times d_b^2 \\
 &= (9 + 3) \times \frac{3,14}{4} \times 16^2 \\
 &= 2412,7431 \text{ mm}^2
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 A_{s \text{ lapangan}} &= (n_{\text{atas}} + n_{\text{bawah}}) \times \frac{\pi}{4} \times d_b^2 \\
 &= (9 + 3) \times \frac{3,14}{4} \times 16^2 \\
 &= 2412,7431 \text{ mm}^2
 \end{aligned}$$

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

$$\begin{aligned}
 A_{l \text{ pasang tumpuan}} &= (n_{\text{tengah}}) \times \frac{\pi}{4} \times d_{bt}^2 \\
 &= 2 \times \frac{3,14}{4} \times 16^2 \\
 &= 402,123 \text{ mm}^2
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 A_{l \text{ pasang lapangan}} &= (n_{\text{tengah}}) \times \frac{\pi}{4} \times d_{bt}^2 \\
 &= 2 \times \frac{3,14}{4} \times 16^2 \\
 &= 402,123 \text{ mm}^2
 \end{aligned}$$

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

$$\begin{aligned} A_{s \text{ tumpuan}} + A_{l \text{ pasang tumpuan}} &= 2412,7431 + 402,123 \\ &= 2814,867 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

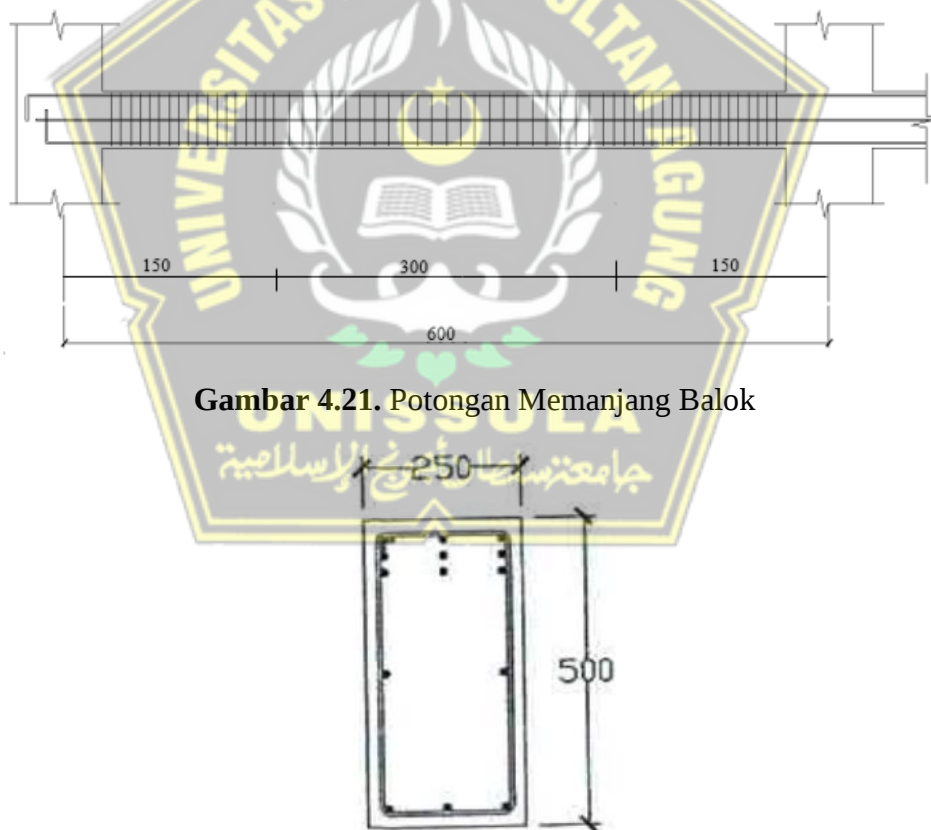
$$\begin{aligned} A_{s \text{ lapangan}} + A_{l \text{ pasang lapangan}} &= 2412,7431 + 402,123 \\ &= 2814,867 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

- Cek lentur + torsi :

$$\begin{aligned} A_{s \text{ tumpuan}} + A_{l \text{ pasang tumpuan}} &\geq A_s + A_{l \text{ perlu tumpuan}} \\ 2814,867 &\geq 3196,635 \rightarrow \text{NOT OK} \end{aligned}$$

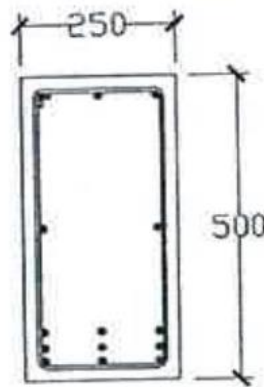
$$\begin{aligned} A_{s \text{ lapangan}} + A_{l \text{ pasang lapangan}} &\geq A_s + A_{l \text{ perlu lapangan}} \\ 2814,867 &\geq 1830,228 \rightarrow \text{OK} \end{aligned}$$

Gambar tulangan balok B1 yang didapat berdasarkan perhitungan di atas dapat dilihat pada Gambar 4.30 sampai Gambar 4.32.



Gambar 4.21. Potongan Memanjang Balok

Gambar 4. 2. Tulangan Tumpuan Balok



Gambar 4.23. Tulangan Lapangan Balok

4.6.2.5. Rekapitulasi Hasil Tulangan Balok

Dari hasil perhitungan terdapat rekapitulasi tulangan balok yang dapat dilihat pada Tabel 4.63 di bawah ini.

Tabel 4.38. Rekapitulasi Tulangan Balok

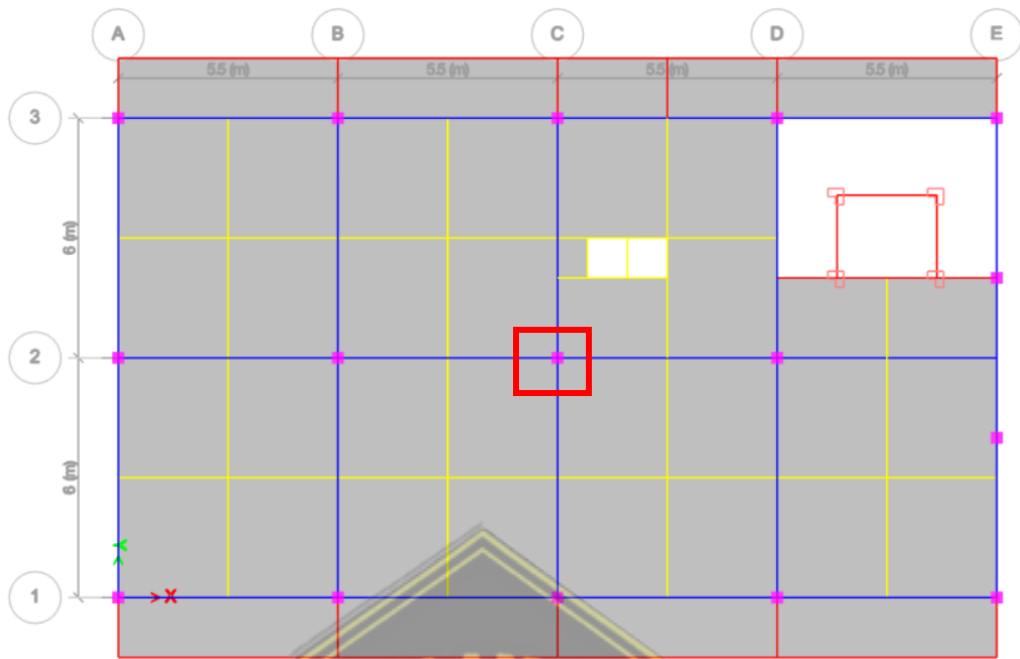
Balok Kode	Dimensi (cm)	Lokasi	Tulangan Longitudinal		Tulangan Transversal	
			Tumpuan	Lapangan	Tumpuan	Lapangan
B1	25 × 50	Atas	9 D16	3 D16	8D10-150	8D10-200
		Bawah	3 D16	9 D16		

4.6.3. Perancangan Kolom

Desain dimensi penampang kolom harus mampu menahan gaya momen dan gaya geser sehingga diperlukan analisis kapasitas desain kolom. Diagram interaksi Pn-M kolom juga disertakan dalam analisis kapasitas desain kolom untuk mengetahui kapasitas kolom terhadap gaya aksial yang menumpunya.

4.6.3.1. Properti Material dan Penampang

Tipe kolom yang akan digunakan sebagai contoh perhitungan adalah kolom K1 pada tingkat pertama yang ditunjukkan Gambar 4.16.



Gambar 4.24. Denah Kolom K1 Sampel

Tinggi kolom (L)	= 4000 mm
Dimensi ($b \times h$)	= 300 x 300 mm
Luas penampang (A_g)	= 90000 mm ²
Tebal selimut bersih (c_c)	= 40 mm
Diameter tulangan longitudinal (d_b)	= 19 mm
Diameter tulangan sengkang (d_s)	= 10 mm
Tinggi efektif kolom (d)	= $b - c_c - d_s - d_b/2$
	= $300 - 40 - 10 - 19/2$
	= 240,5 mm

Kuat tekan beton (f'_c)	= 40 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+})	= 82,9923 kNm
Momen kapasitas balok (M_{nb-})	= 83,2610 kNm

4.6.3.2. Perhitungan Tulangan Longitudinal Kolom

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

1. Gaya Dalam

Gaya dalam berupa gaya tekan aksial yang diterima kolom dan gaya geser pada kolom K1 dan kolom atasnya yang didapat dari ETABS yang digunakan untuk mendesain tulangan longitudinal kolom sebagai berikut:

- P_u kolom atas = 1016,4964 kN
- P_u kolom desain = 1437,2052 kN
- V_u kolom desain = 42,2691 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

$$\text{Syarat} \quad = b \geq 300 = 300 \geq 300 \rightarrow \text{OK}$$

b) Rasio dimensi penampang tidak kurang dari 0,4

$$\text{Syarat} \quad = \frac{b}{h} \geq 0,4 = \frac{300}{300} \geq 0,4 = 1 \geq 0,4 \rightarrow \text{OK}$$

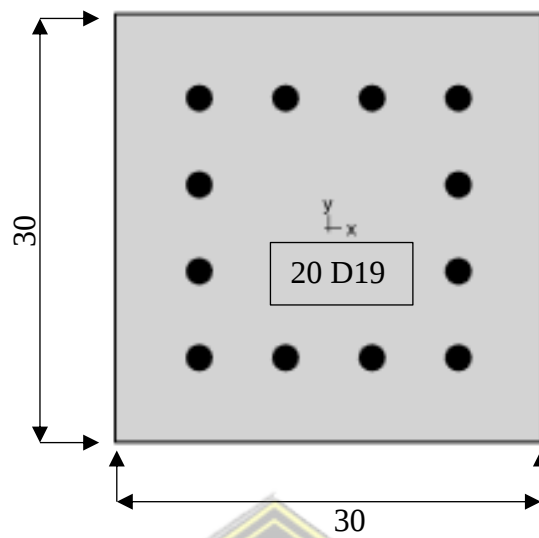
3. Cek syarat komponen struktur tahan gempa

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

$$\begin{aligned} \text{Syarat} \quad &= P_u \leq 0,3 A_g \times f_c' \\ &= 1437,2052 \leq 0,3 \times 90000 \times 40 \times 10^{-3} \\ &= 1437,2052 \leq 3600 \rightarrow \text{OK} \end{aligned}$$

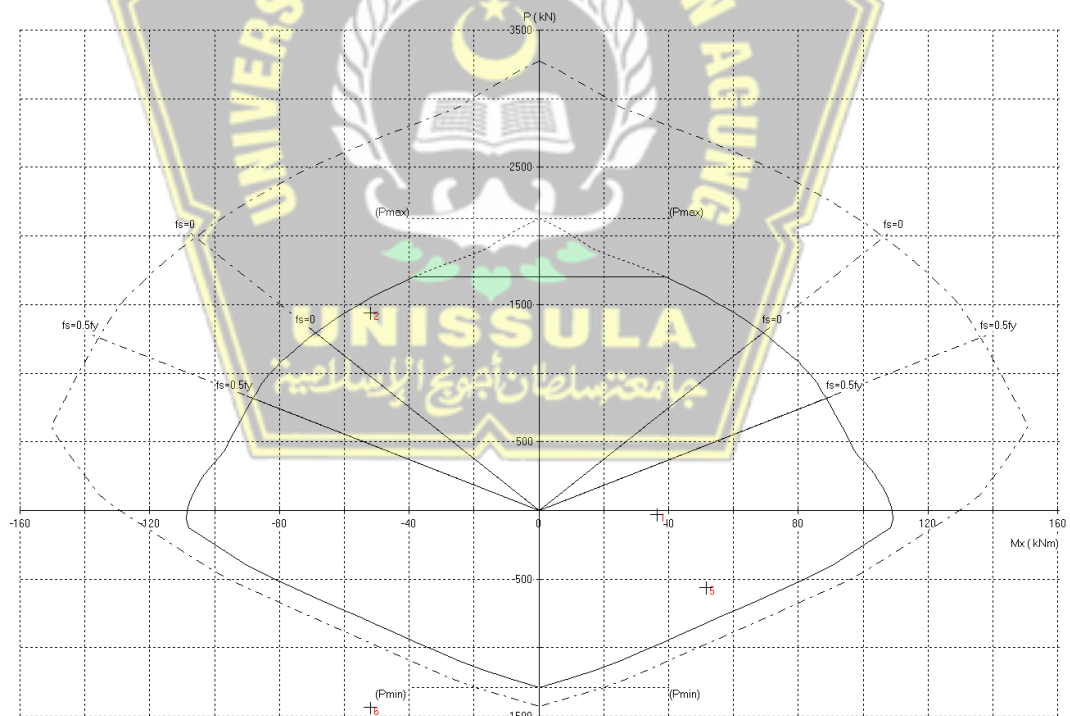
4. Menentukan tulangan longitudinal penahan lentur

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 4.17.



Gambar 4.25. 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 4.18 dan Tabel 4.36.



Gambar 4.26. Diagram Interaksi P_n - M_{pr} SPColumn Kolom K1

Tabel 4.39. Hasil Analisis Interaksi P_n - M_{pr} Kolom K1

No	P_u (kN)	M_{ux} (kNm)	ϕM_{nx} (kNm)	$\phi M_n/M_u$	NA depth (mm)	dt depth (mm)	ε_t	ϕ
1	-30.9	36.13	108.73	3.009	96	241	0.0045	0.857
2	1437.2	-52	-60.04	1.155	264	241	-0.00026	0.65

$$0,01 A_g = 0,01 \times 90000$$

$$= 900 \text{ mm}^2$$

$$0,06 A_g = 0,06 \times 90000$$

$$= 5400 \text{ mm}^2$$

$$A_{st} = n \times 1/4 \times \pi \times D^2$$

$$= 20 \times 1/4 \times 3,14 \times 19^2$$

$$= 5667,7 \text{ mm}^2$$

$$\text{Syarat} = 0,01 A_g < A_{st} < 0,06 A_g$$

$$= 900 < 5667,7 < 5400 \rightarrow \text{NOT OK}$$

4.6.3.3. Perhitungan Tulangan Transversal Kolom

Tahapan-tahapan perhitungan tulangan transversal kolom yang dilakukan, antara lain:

1. Analisis Tulangan Geser sebagai *Confinement*

Pada analisis tulangan geser sebagai kolom ini melalui beberapa tahap, yaitu:

- Menentukan daerah pemasangan tulangan sengkang persegi (*hoop*), tulangan *hoop* diperlukan sepanjang ℓ_o dari ujung-ujung kolom. Sesuai SNI 2847:2019

Pasal 18.4.3.3 dengan ℓ_o merupakan nilai terbesar dari:

- $1/6$ tinggi bersih kolom = $3500 / 6 = 583,34 \text{ mm}$
- Dimensi maksimum kolom = 300 mm
- 450 mm

Jadi, jarak ℓ_o digunakan 450 mm

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

- $1/4$ dimensi komponen struktur minimum = $450 / 4 = 112,5 \text{ mm}$
- $6D = 6 \times 19 = 144 \text{ mm}$
- s_o , tidak melebihi 150 mm dan tidak kurang dari 100 mm

$$s_o = 100 + \frac{250 - 0,33 (300 - 2 \times 40 - 2(10) - 2)}{3} = 165,55 \text{ mm}$$

Ambil jarak tulangan transversal 150 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})

$$b_{c1} = h - (2 \times c_c) = 300 - (2 \times 40) = 220 \text{ mm}$$

- Lebar penampang inti beton yang tertekan (b_{c2})

$$b_{c2} = b - (2 \times c_c) = 300 - (2 \times 40) = 220 \text{ mm}$$

- Luas penampang inti beton (A_{ch})

$$A_{ch} = b_{c1} \times b_{c2} = 220 \times 220 = 48400 \text{ mm}^2$$

- Faktor kekuatan beton (k_f)

$$k_f = \frac{f'_c}{175} + 0,6 = \frac{25}{175} + 0,6 = 0,7428 \rightarrow \text{minimal } 1$$

- Faktor efektivitas pengeangan (k_n)

$$k_n = \frac{n_i}{n_i - 2} = \frac{8}{8 - 2} = 1,33$$

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

Sisi Pendek / Sumbu Lemah

$$\begin{aligned} A_{sh1} &= 0,3 \times \left(bc \times \frac{A_g}{A_{ch}} - 1 \right) \times \frac{f'_c}{f_{yt}} \\ &= 0,3 \times \left(220 \times \frac{90000}{48400} - 1 \right) \times \frac{25}{420} \\ &= 3,377 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} A_{sh2} &= 0,09 \times 220 \times \frac{f'_c}{f_{yt}} \\ &= 0,09 \times 220 \times \frac{25}{420} \\ &= 1,179 \end{aligned}$$

Sisi Panjang / Subu Kuat

$$\begin{aligned} A_{sh1} &= 0,3 \times \left(bc \times \frac{A_g}{A_{ch}} - 1 \right) \times \frac{f'_c}{f_{yt}} \\ &= 0,3 \times \left(220 \times \frac{90000}{48400} - 1 \right) \times \frac{25}{420} \\ &= 3,377 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} A_{sh2} &= 0,09 \times 220 \times \frac{f'_c}{f_{yt}} \\ &= 0,09 \times 220 \times \frac{25}{420} \end{aligned}$$

$$= 1.179$$

Maka dapat digunakan Sengkang (*hoop*) 8 D19-150

$$A_{s \text{ pasang}} = \frac{8 \times 1/4 \times 3,14 \times 19 \times 19}{150} = 4,189 \text{ mm}^2$$

$$\begin{aligned} \text{Syarat} &= A_{s \text{ pasang}} > A_{sh} \\ &= 4,189 > 3.377 \text{ mm}^2 \rightarrow \text{OK} \end{aligned}$$

d) Berdasarkan SNI 2847:2019 Pasal 18.7.5.5. Untuk daerah di luar ℓ_0 diberi sengkang dengan spasi tidak melebihi nilai terkecil dari:

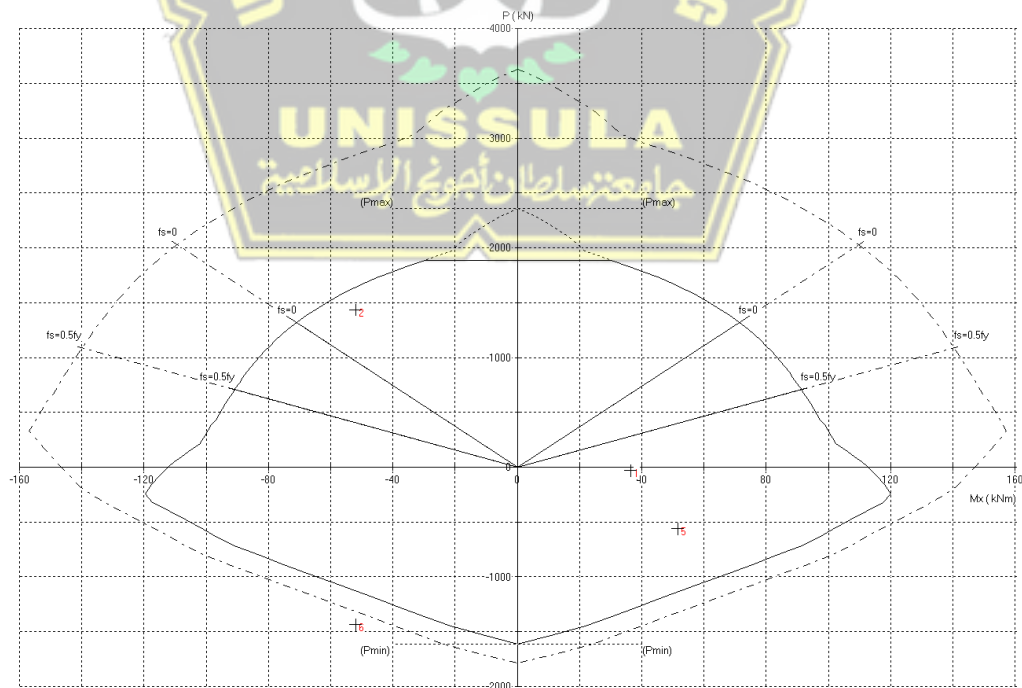
$$\text{a. } 6D = 6 \times 22 = 132 \text{ mm}$$

$$\text{b. } 150 \text{ mm}$$

Maka $s_{\max} = 150 \text{ mm}$ dan dapat digunakan spasi (s) = 150 mm sepanjang sisa kolom bersih.

2. Analisis Gaya Geser Desain Tulangan Sengkang Kolom

Gaya geser V_e harus diambil dari gaya geser yang berhubungan dengan sendi plastis pada kedua ujung kolom sesuai SNI 2847:2019 Pasal 18.7.6.1.1. Nilai M_{pr} pada kolom ditentukan dengan anggapan kekuatan tarik memanjang minimal $1,25f_y$ dan $\phi = 1$. Untuk diagram interaksi P_n - M SPColumn dengan $1,25f_y$ dan hasil analisis interaksi P_n - M SPColumn dengan $1,25f_y$ dapat dilihat pada Gambar 4.36 dan Tabel 4.65.



Gambar 4.27. Diagram Interaksi P_n - M SPColumn Kolom K1 dengan $1,25 f_y$

Tabel 4.40. Hasil Analisis Interaksi P_n - M Kolom K1 dengan $1,25 f_y$

No	P_u (kN)	M_{ux} (kNm)	ϕM_{nx} (kNm)	$\phi M_n/M_u$	NA depth (mm)	dt depth (mm)	ϵ_t	ϕ
1	-1437.2	-52	-22.83	0.439	32	241	0.01961	0.9

- Probable Moment of Column (M_{prc})

$$M_{prc} = 82,9923 \text{ kNm}$$

- Tinggi bersih kolom (L_n)

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

$$= 3500 - 500$$

$$= 3000 \text{ mm}$$

$$= 3 \text{ m}$$

- Probable Moment of Beam (M_{prb})

$$M_{prb \text{ atas}} = 63,4939 \text{ kNm}$$

$$M_{prb \text{ bawah}} = 58,1721 \text{ kNm}$$

$$\sum M_{prb} = 58,1721 + 63,4939$$

$$= 121,666 \text{ kNm}$$

- Faktor distribusi kolom (D_f)

$$D_f = 0,5 \text{ (atas dan bawah dianggap sama)}$$

- Faktor reduksi geser (ϕ)

$$\phi = 0,75$$

- Gaya geser desain (V_e)

$$V_{e1} = \frac{M_{prc \text{ atas}} + M_{prc \text{ bawah}}}{L_n}$$

$$= \frac{82,9923 + 82,9923}{3}$$

$$= 55,3282 \text{ kN}$$

V_e tidak perlu melebihi dari:

$$V_{e2} = \frac{\sum M_{prb} \times D_{f \text{ atas}} + \sum M_{prb} \times D_{f \text{ bawah}}}{L_n}$$

$$= \frac{121,666 \times 0,5 + 121,666 \times 0,5}{3}$$

$$= 40,55 \text{ kN}$$

V_e tidak boleh kurang dari gaya geser terfaktor hasil analisis:

$$V_{e3} = 40,55 \text{ kN}$$

- Dari nilai V_e yang telah dihitung, maka diambil $V_u = 40,55 \text{ kN}$. Asumsi kuat geser yang disumbang oleh beton, $V_c = 0$. Maka:

$$V_s = \frac{V_u}{\phi} = \frac{40,55}{0,75} = 54,06 \text{ kN}$$

$$\frac{A_v}{s} = \frac{V_s}{f_y \times d} = \frac{54,06}{420 \times 240,5} = 0,0005 \text{ mm}^2/\text{mm}$$

- Untuk $s = 100 \text{ mm}$, maka:

$$A_v = \frac{A_v}{s} \times 100 = 0,0005 \times 100 = 0,05 \text{ mm}^2/\text{mm}$$

- Cek $A_{sh} > A_v$

$$\begin{aligned} \text{Syarat} &= A_{sh} > A_v \\ &= 3,37 > 0,05 \rightarrow \text{OK} \end{aligned}$$

Digunakan 8 D19-150 untuk sengkang tertutup dan ikat silang dengan $A_{sh} = 3,377 \text{ mm}^2$.

3. Menghitung nilai V_c daerah di luar ℓ_0

(SNI 2847:2019 Pasal 22.5.6.1)

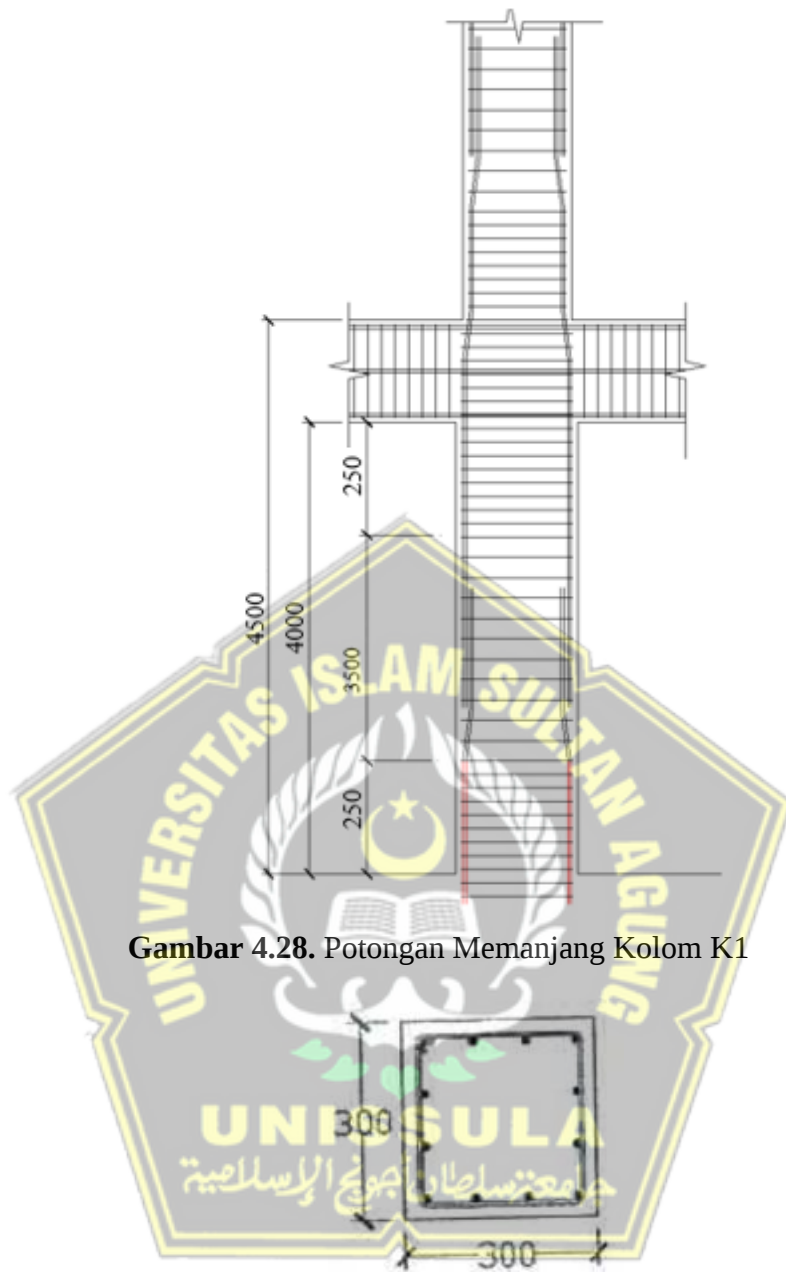
$$\begin{aligned} V_c &= 0,17 \times \left(1 + \frac{P_u}{14A_g}\right) \times \lambda \times \sqrt{f'_c} \times b_w \times d \\ &= 0,17 \times \left(1 + \frac{1437,205 \times 10^3}{14 \times 90000}\right) \times 1 \times \sqrt{25} \times 300 \times 240,5 \\ &= 61328 \text{ kN} \end{aligned}$$

Karena $V_c > V_u$ ($V_u = 47424 \text{ kN}$) maka daerah di luar ℓ_0 dipasang tulangan sengkang dengan jarak:

$$s = \frac{d}{2} = \frac{240,5}{2} = 120,25 \text{ mm}$$

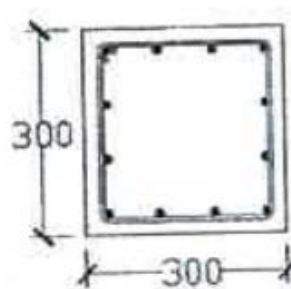
Berdasarkan SNI 2847:2019 Pasal 18.7.5.5, jarak tulangan transversal diluar ℓ_0 tidak boleh lebih dari 150 mm atau $6d_b$ (114 mm). Maka dipasang jarak maksimal 150 mm.

Berikut adalah gambar dari hasil perhitungan ditunjukkan pada Gambar 4.37 sampai Gambar 4.39.



Gambar 4.28. Potongan Memanjang Kolom K1

Gambar 4.29. Tulangan Ujung Kolom K1



Gambar 4. 3. Tulangan Tengah Kolom K1

4.6.3.4. Rekapitulasi Hasil Tulangan Kolom

Dari hasil perhitungan tulangan pada semua tipe kolom yang telah dilakukan, berikut adalah rekapitulasi hasil tulangan kolom ditunjukkan pada Tabel 4.66.

Tabel 4.41. Rekapitulasi Tulangan Kolom

No	Tipe Kolom	Dimensi Kolom	Tulangan Pokok	Tulangan Geser	
				Tumpuan	Lapangan
1	K1	300 × 300	20 D19	8 D19-150	8 D19-150

4.7 Perhitungan Daya Dukung Pondasi

A. Data Bahan

jenis pondasi yang digunakan adalah pondasi bore pile

Diameter tiang pancang = 0,30 m

Panjang tiang pancang = 5 m

Berat beton bertulang = 24 kN/m³

B. Tahanan Aksial Pondasi Bore Pile

Berdasarkan Hasil Uji Sondir (BAGEMANN)

a. Tahanan Ujung

Tahanan Ujung nominal dihitung dengan rumus : $P_b = \phi \times A_b \times q_c$

ϕ = faktor reduksi nilai tahanan ujung nominal tiang

A_b = luas ujung bawah tiang

q_c = tahanan penetrasi kerucut statis yang merupakan nilai rata-rata dihitung dari 8.D di atas dasar tiang sampai 4.D di bawah dasar tiang (kN/m²),

Diameter Tiang Pancang $D = 0,30$ m

Luas Tampang Tiang Pancang $A_b = 0,0707$ m²

Faktor reduksi nilai tahanan ujung nominal tiang pancang $\phi = 0,50$

b. Tahanan Gesek

Tahanan gesek nominal menurut Skempton dihitung dg rumus :

$$P_s = \sum [A_s \cdot q_f]$$

A_f = Luas permukaan segmen dinding tiang (m²).

$$A_s = p \cdot D \cdot L_1$$

q_f = (tahanan gesek kerucut statis rata-rata kN/m).

L_1 = panjang segmen tiang pancang yang ditinjau (m).

c. Tahanan Aksial Bore pile

Tahanan nominal tiang pancang, $P_n = P_b + P_s$; kN

Faktor reduksi kekuatan, $\Phi = 0.60$

Tahanan aksial tiang pancang, $\phi * P_n$; kN

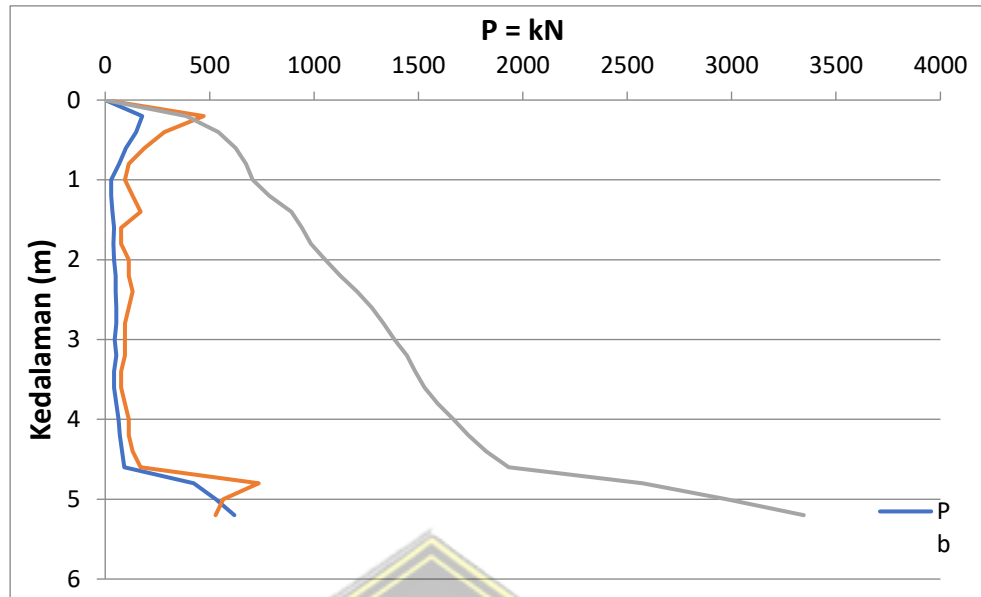
Tabel 4.39 Nilai Uji Sondir

No	Kedalaman z_1 (m)	q_c kN/m ²	q_f kN/m ²	L_1 (m)	A_s (m ²)	P_b kN	P_s (kN)	$\phi * P_n$ (kN)
1	0	0	0	0.2	0.1885	0.00	0.00	0.00
2	0.2	5000	2500	0.2	0.1885	176.71	471.24	388.77
3	0.4	4200	1500	0.2	0.1885	148.44	282.74	541.45
4	0.6	2800	1000	0.2	0.1885	98.96	188.50	624.86
5	0.8	1900	600	0.2	0.1885	67.15	113.10	673.64
6	1.0	800	500	0.2	0.1885	28.27	94.25	706.86
7	1.2	800	700	0.2	0.1885	28.27	131.95	786.03
8	1.4	1000	900	0.2	0.1885	35.34	169.65	892.06
9	1.6	1200	400	0.2	0.1885	42.41	75.40	941.54
10	1.8	1100	400	0.2	0.1885	38.88	75.40	984.65
11	2.0	1200	600	0.2	0.1885	42.41	113.10	1054.63
12	2.2	1400	600	0.2	0.1885	49.48	113.10	1126.73
13	2.4	1400	700	0.2	0.1885	49.48	131.95	1205.90
14	2.6	1500	600	0.2	0.1885	53.01	113.10	1275.88
15	2.8	1500	500	0.2	0.1885	53.01	94.25	1332.43
16	3.0	1300	500	0.2	0.1885	45.95	94.25	1384.74
17	3.2	1500	500	0.2	0.1885	53.01	94.25	1445.53
18	3.4	1200	400	0.2	0.1885	42.41	75.40	1484.40
19	3.6	1200	400	0.2	0.1885	42.41	75.40	1529.64
20	3.8	1500	500	0.2	0.1885	53.01	94.25	1592.55
21	4.0	1800	600	0.2	0.1885	63.62	113.10	1666.77
22	4.2	2000	600	0.2	0.1885	70.69	113.10	1738.87
23	4.4	2300	700	0.2	0.1885	81.29	131.95	1824.40
24	4.6	2600	900	0.2	0.1885	91.89	169.65	1932.55
25	4.8	12000	3900	0.2	0.1885	424.12	735.13	2572.96
26	5.0	15000	3000	0.2	0.1885	530.14	565.49	2975.87
27	5.2	17500	2800	0.2	0.1885	618.50	527.79	3345.56

$$P_s = \Sigma [A_s * q_f] = 4657,45$$

$$\phi * P_n = 1592,55 \text{ kN}$$

$$= 159,26 \text{ Ton}$$



Gambar 4.31 NilaiTahanan Aksial *Bore Pile*

d. Kapasitas Pondasi Bore Pile

Beban Aksial = 1437.2050 Kn
 Qall = 1592.6 kN/m²
 Berat tiang pancang, = 8.48 kN
 Beban Total = Beban Aksial +
 Berat Tiang = 1445.69 kN
 Jumlah Tiang = 3.00
 Qall total = jumlah tiang x
 Qall = 4777.655568 kN
 FS 3.30 > 3.....OK

e. DATA BAHAN PILECAP

Kuat tekan beton, $f_c' = 25$ MPa
 Kuat leleh baja tulangan deform ($\varnothing > 12$ mm), $f_y = 420$ MPa
 Kuat leleh baja tulangan polos ($\varnothing \leq 12$ mm), $f_y = 240$ MPa

f. DATA DIMENSI FONDASI

Lebar kolom arah x,	$b_x =$	0.30	m
Lebar kolom arah y,	$b_y =$	0.30	m
Jarak tiang pancang tepi terhadap sisi luar beton	$a =$	0.30	m
Tebal pilecap,	$h =$	1.00	m
Tebal tanah di atas pilecap,	$z =$	0.00	m
Berat volume tanah di atas pilecap,	$w_s =$	18.00	kN/m ³
Gaya aksial kolom akibat beban terfaktor,	$P_{uk} =$	1437.21	kN

g. DATA BEBAN FONDASI

Momen arah x akibat beban terfaktor,	$M_{ux} =$	51.39	kNm
Momen arah y akibat beban terfaktor,	$M_{uy} =$	52.01	kNm
Gaya lateral arah x akibat beban terfaktor,	$H_{ux} =$	82.99	kN
Gaya lateral arah y akibat beban terfaktor,	$H_{uy} =$	83.36	kN
Tahanan aksial tiang pancang,	$f * P_n =$	4512.82	kN
Tahanan lateral tiang pancang,	$f * H_n =$	261.75	kN

h. DATA SUSUNAN TIANG PANCANG

No.	Jumlah	x	n * x ²	No.	Jumlah	y	n * y ²
	n	(m)	(m ²)		n	(m)	(m ²)
1	1	0.45	0.20	1	1	0.50	0.25
2	1	0.00	0.00	2	2	-0.20	0.08
3	1	-0.45	0.20				
		Σx^2				Σy^2	
n =	3	=	0.41	n =	3	=	0.33
Lebar pilecap arah x,				$L_x =$		1.50	m
Lebar pilecap arah y,				$L_y =$		1.30	m

1. GAYA AKSIAL PADA TIANG PANCANG

Berat tanah di atas pilecap, $W_s = L_x * L_y * z * w_s = 0.00$ kN Berat pilecap,

$$W_c = L_x * L_y * h * w_c = 46.80 \text{ kN}$$

Total gaya aksial terfaktor,

$$P_u = P_{uk} + 1.2 * W_s + 1.2 * W_c = 1493.37 \text{ kN}$$

Lengan maksimum tiang pancang arah x thd. pusat, $x_{max} = 0.45 \text{ m}$

Lengan maksimum tiang pancang arah y thd. pusat, $y_{max} = 0.50 \text{ m}$

Lengan minimum tiang pancang arah x thd. pusat, $x_{min} = -0.45 \text{ m}$

Lengan minimum tiang pancang arah y thd. pusat, $y_{min} = -0.20 \text{ m}$

Gaya aksial maksimum dan minimum pada tiang pancang,

$$p_{umax} = P_u / n + M_{ux} * x_{max} / S_x^2 + M_{uy} * y_{max} / S_y^2 = 633.69 \text{ kN}$$

$$\text{Syarat : } p_{umax} \leq f * P_n$$

$$633.69 < 4512.82 \rightarrow \text{AMAN (OK)}$$

2. GAYA LATERAL PADA TIANG PANCANG

Gaya lateral arah x pada tiang,

$$h_{ux} = H_{ux} / n = 27.66 \text{ kN}$$

Gaya lateral arah y pada tiang,

$$h_{uy} = H_{uy} / n = 27.79 \text{ kN}$$

Gaya lateral kombinasi dua arah,

$$h_{umax} = \sqrt{(h_{ux}^2 + h_{uy}^2)} = 39.21 \text{ kN}$$

$$\text{Syarat : } h_{umax} \leq f * H_n$$

$$39.21 < 261.75 \rightarrow \text{AMAN (OK)}$$

3. TINJAUAN GESER ARAH X

Jarak pusat tulangan terhadap sisi luar beton,

Tebal efektif pilecap,

Jarak bid. kritis terhadap sisi luar,

$$c_x = (L_x - b_x - d) / 2 = 0.150 \text{ m}$$

Berat beton,

$$W_1 = c_x * L_y * h * w_c = 4.680 \text{ kN}$$

Berat tanah,

$$W_2 = c_x * L_y * z * w_s = 0.000 \text{ kN}$$

Gaya geser arah x,

$$V_{ux} = 3 * p_{umax} - W_1 - W_2 = 1896.389 \text{ kN}$$

Lebar bidang geser untuk tinjauan arah x,

$$b = L_y = 1300 \text{ mm}$$

Tebal efektif pilecap, $d = 900 \text{ mm}$

Rasio sisi panjang thd. sisi pendek kolom,

$$b_c = b_x / b_y = 1.0000$$

Kuat geser pilecap arah x, diambil nilai terkecil dari V_c yang diperoleh dari pers.sbb. :

$$V_c = [1 + 2 / b_c] * \sqrt{f'_c} * b * d / 6 * 10^{-3} = 2925.000 \text{ kN}$$

$$V_c = [a_s * d / b + 2] * \sqrt{f'_c} * b * d / 12 * 10^{-3} = 14475.000 \text{ kN}$$

$$V_c = 1 / 3 * \sqrt{f'_c} * b * d * 10^{-3} = 1950.000 \text{ kN}$$

Diambil, kuat geser pilecap, ® $V_c = 1950.000 \text{ kN}$

Faktor reduksi kekuatan geser, $f = 0.75$

Kuat geser pilecap, $f * V_c = 1462.500 \text{ kN}$

Syarat yang harus dipenuhi,

$$f * V_c \geq V_{ux}$$

$$1462.500 < 1896.389 \quad \text{® TDK AMAN (NG)}$$

4. TINJAUAN GESER ARAH Y

Jarak pusat tulangan terhadap sisi luar beton,

Tebal efektif pilecap,

Jarak bid. kritis terhadap sisi luar,

$$c_y = (L_y - b_y - d) / 2 = 0.050 \text{ m}$$

Berat beton,

$$W_1 = c_y * L_x * h * w_c = 1.800 \text{ kN}$$

Berat tanah,

$$W_2 = c_y * L_x * z * w_s = 0.000 \text{ kN}$$

Gaya geser arah y,

$$V_{uy} = 3 * p_{umax} - W_1 - W_2 = 1899.269 \text{ kN}$$

Lebar bidang geser untuk tinjauan arah y,

$$b = L_x = 1500 \text{ mm}$$

Tebal efektif pilecap, $d = 900 \text{ mm}$

Rasio sisi panjang thd. sisi pendek kolom,

$$b_c = b_x / b_y = 1.0000$$

Kuat geser pilecap arah y, diambil nilai terkecil dari V_c yang diperoleh dari pers.sbb. :

$$V_c = [1 + 2 / b_c] * \sqrt{f'_c} * b * d / 6 * 10^{-3} = 3375.000 \text{ kN}$$

$$V_c = [a_s * d / b + 2] * \sqrt{f'_c} * b * d / 12 * 10^{-3} = 14625.000 \text{ kN}$$

$$V_c = 1 / 3 * \sqrt{f'_c} * b * d * 10^{-3} = 2250.000 \text{ kN}$$

Diambil, kuat geser pilecap,

$$\textcircled{R} V_c = 2250.000 \text{ kN}$$

Faktor reduksi kekuatan geser, $f = 0.75$

Kuat geser pilecap,

$$f * V_c = 1687.500 \text{ kN}$$

Syarat yang harus dipenuhi,

$$f * V_c \geq V_{ux}$$

$$1687.500 < 1899.269$$

$\textcircled{R}$ TDK AMAN (NG)

5. TINJAUAN GESER DUA ARAH (PONS)

Jarak pusat tulangan terhadap sisi luar beton, $d' = 0,100 \text{ m}$

Tebal efektif pilecap,

$$d = h - d' = 0,900 \text{ m}$$

Lebar bidang geser pons arah x,

$$B_x = b_x + d = 1,200 \text{ m}$$

Lebar bidang geser pons arah y,

$$B_y = b_y + d = 1,200 \text{ m}$$

Gaya geser pons akibat beban terfaktor pada kolom, $P_{uk} = 1437,205$

Luas bidang geser pons,

$$A_p = 2 * (B_x + B_y) * d = 4,320 \text{ m}^2$$

Lebar bidang geser pons,

$$b_p = 2 * (B_x + B_y) = 4,800 \text{ m}$$

Rasio sisi panjang thd. sisi pendek kolom,

$$b_c = b_x / b_y = 1$$

Tegangan geser pons, diambil nilai terkecil dari f_p yang diperoleh dari pers.sbb:

$$f_p = [1 + 2 / b_c] * \sqrt{f_c'} / 6 = 2500 \text{ MPa}$$

$$f_p = [a_s * d / b_p + 2] * \sqrt{f_c'} / 12 = 3,958 \text{ MPa}$$

$$f_p = 1 / 3 * \sqrt{f_c'} = 1,667 \text{ MPa}$$

Tegangan geser pons yang disyaratkan, $f_p = 1,667 \text{ MPa}$

Faktor reduksi kekuatan geser pons, $\phi = 0,75$

Kuat geser pons,

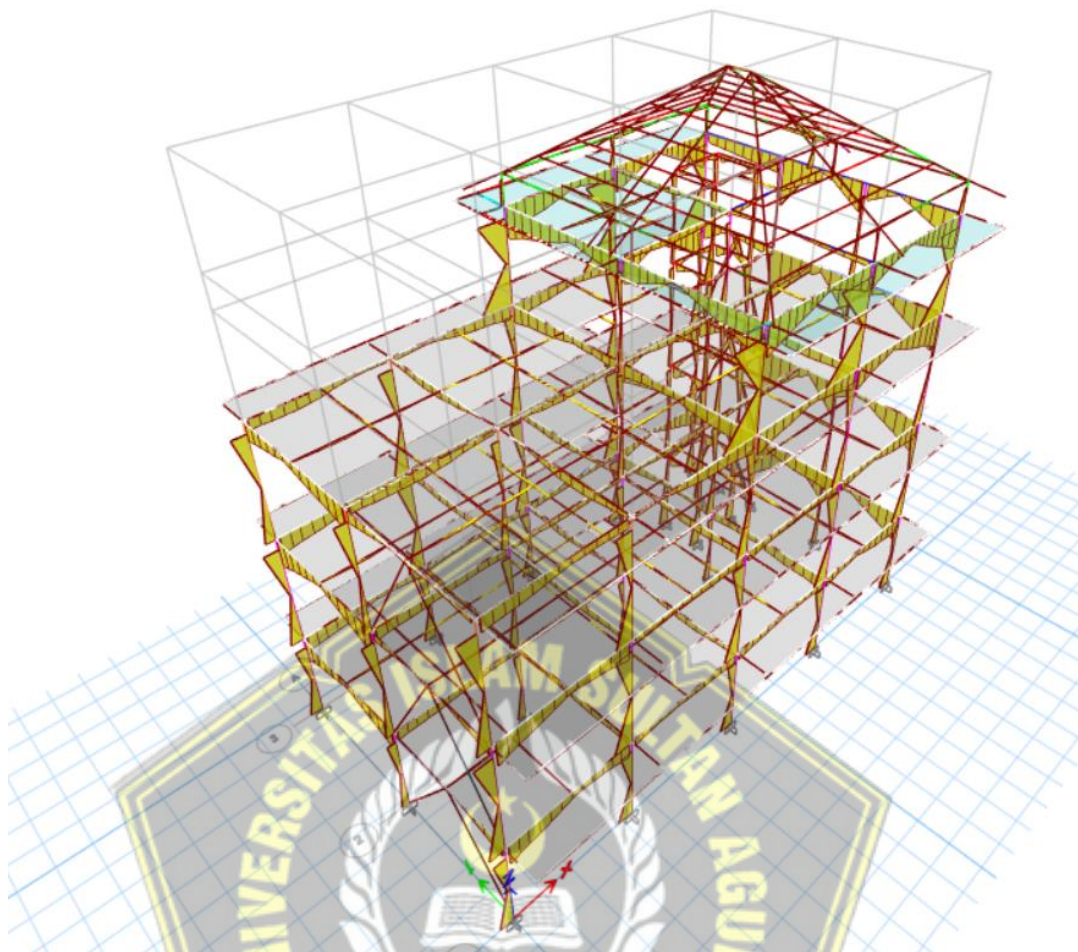
$$f * V_{np} = \phi * A_p * f_p * 10^3 = 5400 \text{ kN}$$

Syarat : $\phi * V_{np} \geq P_{uk}$

$$5400 \geq 1437,205 \text{ AMAN (OK)}$$

4.8 Perkuatan CFRP

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 4.32



Gambar 4.32. Identifikasi Kegagalan

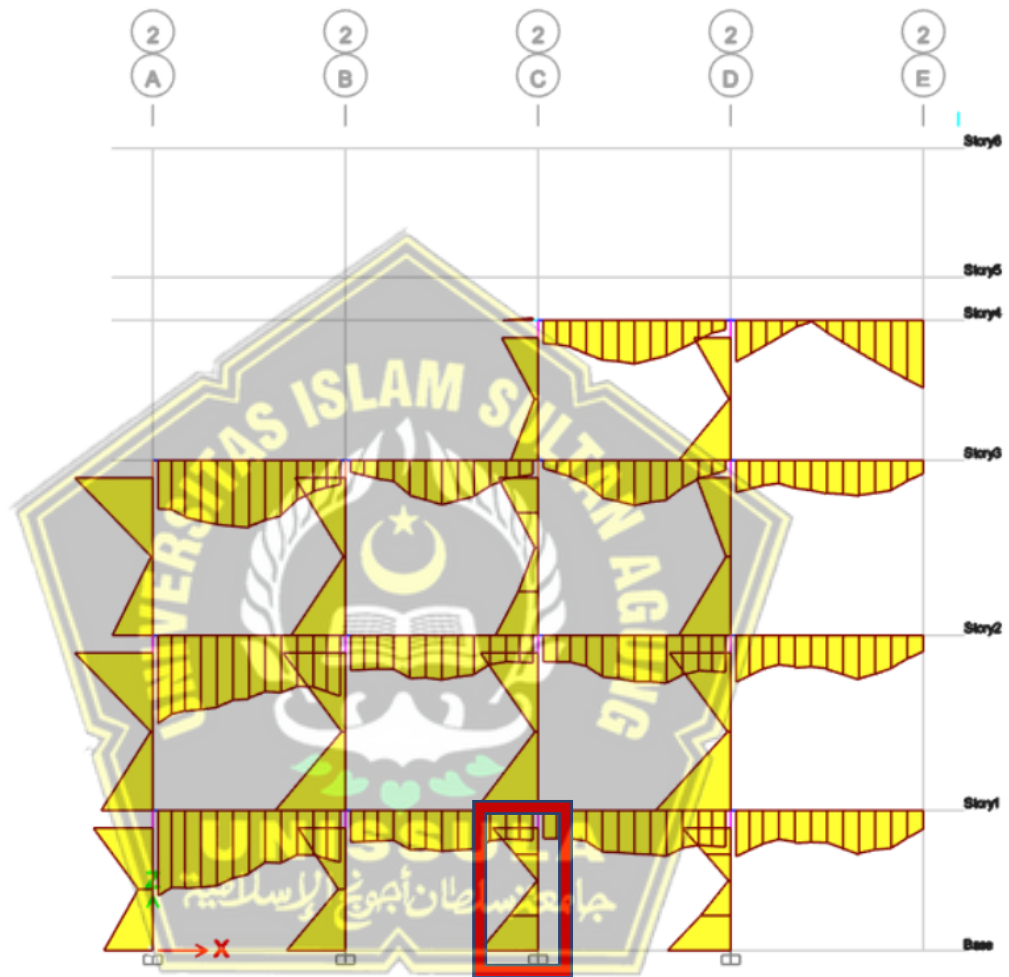
setelah diketahui bagian struktur yang perlu diperkuat dengan menggunakan sistem FRP jenis CFRP maka perlu analisis kembali apabila sudah diperkuat. Untuk menganalisisnya dimodelkan secara 2D guna memudahkan dalam proses analisis dan perhitungan. Proses analisis ini mengacu pada Peraturan RSNI 3 *Pedoman Perancangan dan Pelaksanaan Sistem Serat Berperekat Polimer Terlekat Eksternal Untuk Struktur Beton*.

4.9 Analisis Kekuatan Beton Bertulang Menggunakan CFRP

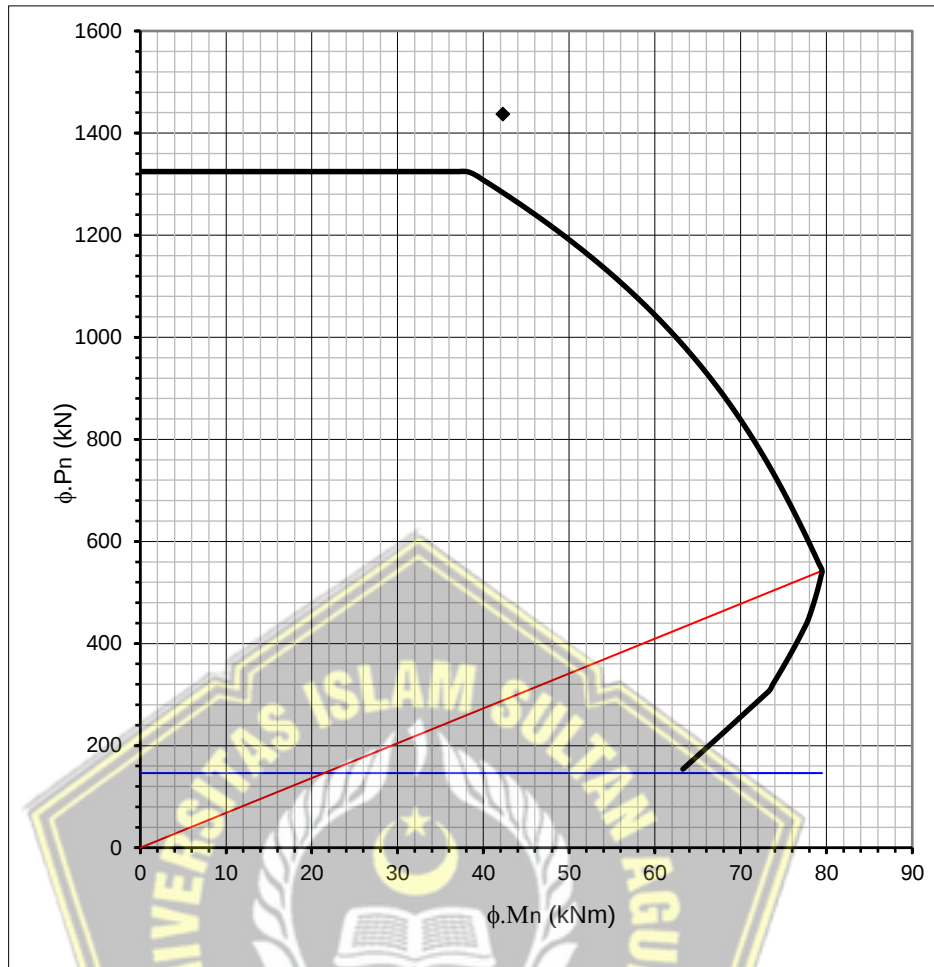
Sebelum menganalisa sebuah perkuatan bangunan yang menggunakan perkuatan jenis CFRP, perlu adanya analisis kembali tentang penyebab kegagalan pada suatu struktur tersebut. Kegagalan struktur tersebut gagal ketika menerima gaya geser, momen, atau normal (*aksial*). Karena penanganan untuk tiap kegagalan yang terjadi berbeda dan analisis yang digunakan juga berbeda satu sama lain.

4.9.1 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 K14. Detail pada kolom dapat dilihat pada Gambar 4.33.



Gambar 4.33 Detail Kolom yang Digunakan



Gambar 4.34 Analisis Kolom Dengan Diagram Interaksi

Berikut data input kolom pada diagram interaksi dapat dilihat pada Tabel 4.42 dibawah ini.

Tabel 4.42 Input Data Kolom Pada Diagram Interaksi

Kuat tekan beton	$f_c' = 25 \text{ MPa}$
Tegangan leleh baja	$f_y = 420 \text{ MPa}$
Lebar kolom	$b = 300 \text{ mm}$
Tinggi kolom	$h = 300 \text{ mm}$
Tebal brutto selimut beton	$d_s = 40 \text{ mm}$
Jumlah tulangan dan diameter tulangan	Tulangan 12 D 10 mm
Beban aksial	$P_u = 1437,2052 \text{ kN}$

Momen	$M_u = 42,2691 \text{ kNm}$
-------	-----------------------------

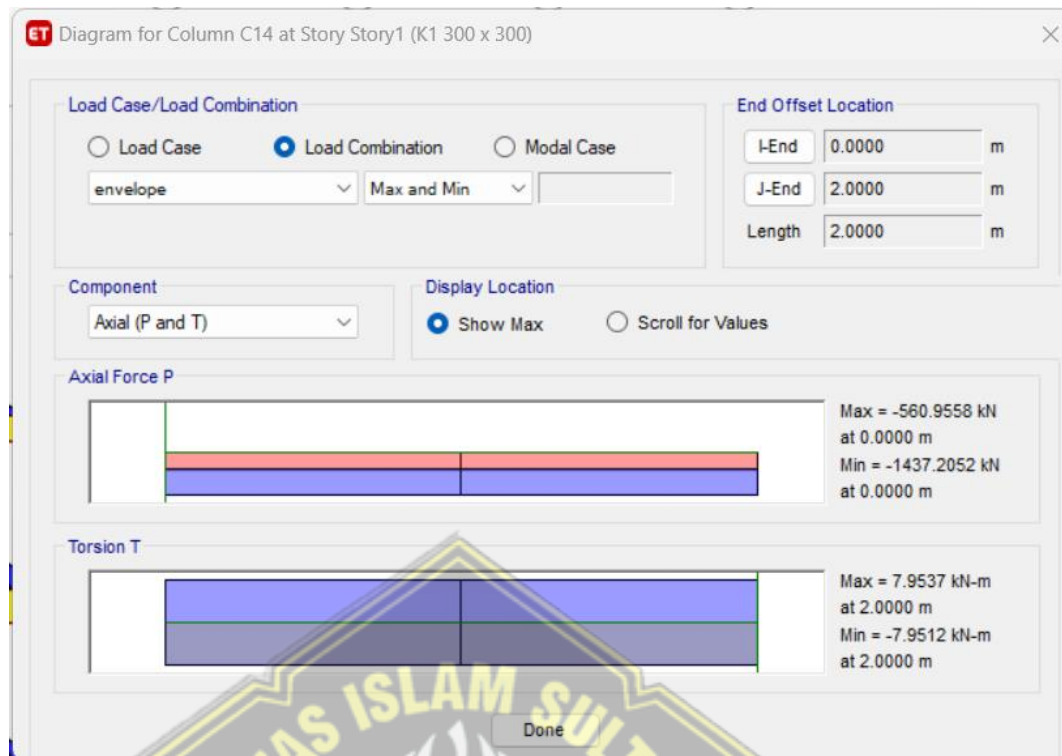
Jenis CFRP yang digunakan dalam analisis ini berasal dari produk Shanghai Horse Construction tipe HM-60 dengan karakteristik yang dapat dilihat pada Tabel 4.43 berikut.

Tabel 4.43 Detail CFRP

Kekuatan Tegangan Tarik Ultimit Terjamin (f_{tu})	3792 MPa
Modulus Elastisitas (E)	227527 MPa
Regangan (ASTM D3039) (ϵ)	0,0167 mm/mm
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 g/cm ³
Tebal CFRP (t_f)	0,333 mm
Jumlah Lapis FRP n_f	2

4.9.1.1. Analisa Perkuatan Kolom K14

Setelah diketahui bagian struktrur 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 4.35. Kolom K30 Yang Mengalami Kegagalan

Bagian yang akan dianalisis untuk contoh perhitungan perkuatan FRP jenis CFRP pada Gambar 5.5 adalah kolom C35 yang terletak pada base dikarenakan pada bagian tersebut memiliki gaya terbesar.

Tabel 4.44 Detail Penampang Kolom K14

	$f_c = 25 \text{ MPa}$
	$f_y = 420 \text{ MPa}$
	Tulangan 12 D 10
	$A_g = 90000 \text{ mm}^2$
	$A_{st} = 5319,16 \text{ mm}^2$
	$\epsilon_c = 0,002$
	$C_E = 0,95$
	$\phi = 0,65$

Tabel 4.45. 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 :	$C_s = [\sum F_{si}] * 10^{-3}$	kN
Momen akibat gaya internal masing-masing baja tulangan :	$M_{si} = F_{si} * (h/2 - d_i)$	kNmm
	$M_s = \sum M_{si}$	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 :	$P_u = \phi * P_n$	kN
Momen rencana :	$M_u = \phi * M_n$	kNm

Contoh Perhitungan Perkuatan Aksial dan Lentur Kolom Base K14

a. Langkah 1 Menghitung Sifat Material Desain Sistem FRP

CFRP yang digunakan berdasarkan Tabel 5.1

$$\begin{aligned}
 f_{fu} &= C_E \times f_{fu} * \\
 &= 0,95 \times 3792 \\
 &= 3602,4 \text{ Mpa}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\varepsilon_{fu} &= C_E \varepsilon_{fu}^* \\ &= 0,95 \times 0,016 \\ &= 0,0159 \text{ Mpa}\end{aligned}$$

b. Tekanan Tegangan Pengengkang karena selubung FRP f_l

$$\begin{aligned}\frac{A_e}{A_c} &= \frac{1 - \frac{[(\frac{b}{h})(h-2r_c)^2 + (\frac{b}{h})(b-2r_c)^2]}{3 A_g} - P_g}{1 - P_g} \\ &= \frac{1 - \frac{[(\frac{300}{300})(300-2.25)^2 + (\frac{300}{300})(300-2.25)^2]}{3.90000} - 0,0265}{1 - 0,0265} \\ &= 0,423\end{aligned}$$

Langkah Menghitung Variabel Model Kekangan Beton

$$\begin{aligned}f_l &= \frac{2.E_f . ntf . \varepsilon_{fe}}{D} \\ &= \frac{2.227527.3.0,007}{300} \\ &= 4,247 \text{ Mpa} \\ f'_{cc} &= f_c + \Psi_f \times 3.3K_a \times f_l \\ &= 25 + 0,95 \times 0,423 \times 4,247 \\ &= 31,63 \text{ Mpa}\end{aligned}$$

$$\frac{f_l}{f_c} \geq 0,08$$

$$\frac{4,247}{25} \geq 0,08$$

$$0,169 \geq 0,08 \text{ (Ok)}$$

c. Verifikasi Regangan Aksial Ultimit Beton $\varepsilon_{ccu} \leq 0,01$

$$\begin{aligned}K_b &= \frac{A_e}{A_c} \left(\frac{b}{h}\right)^2 \\ &= 0,423 \left(\frac{300}{300}\right)^2 \\ &= 0,423\end{aligned}$$

d. Penentuan Kurva yang diperkuat

- Kapasitas Nominal Aksial di Titik A

$$\begin{aligned}\phi P_{n(A)} &= \phi 0,80 (0,85 f_{cc} (A_g - A_{st}) + f_y A_{st}) \\ &= 0,95. 0,90. (0,85. 31,63(90000-1591,98) \\ &= 2314679,403 \text{ Mpa} \\ &= 2314,68 \text{ Mpa}\end{aligned}$$

- Kapasitas Nominal Aksial di Titik B

$$\begin{aligned}
 E_c &= 4700 \sqrt{f_c} \\
 &= 4700 \sqrt{25} \\
 &= 23500 \text{ Mpa}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 A &= \frac{-b(E_c - E_2)^2}{12f'_c} \left(\frac{\epsilon_{ccu}}{C} \right)^2 \\
 &= \frac{-300(23500 - 1605,67)^2}{12,25} \left(\frac{0,004}{253,5} \right)^2 \\
 &= -0,127 \text{ N/mm}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 B &= \frac{b(E_c - E_2)}{2} \left(\frac{\epsilon_{ccu}}{C} \right) \\
 &= \frac{300 (23500 - 1605,67)}{2} \left(\frac{0,004}{253,5} \right) 300 (23500 - 1605,67) \\
 &= 53,505 \text{ kN/mm}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 C &= -bcf'_c \\
 &= -300 \cdot 25 \\
 &= -7500 \text{ kN/mm}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 D &= bcf'_c + \frac{(bcE_2)}{2} (\epsilon_{ccu}) \\
 &= 300 \cdot 253,5 \cdot 25 + \frac{(300 \cdot 253,5 \cdot 1605,67)}{2} (0,004) \\
 &= 2115409,069 \text{ N/mm}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 E &= \frac{-b(E_c - E_2)^2}{16f'_c} \left(\frac{\epsilon_{ccu}}{C} \right)^2 \\
 &= \frac{-300(23500 \cdot 253,5 - 1605,67)^2}{16,25} \left(\frac{0,004}{253,5} \right)^2 \\
 &= -0,095 \text{ N/mm}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 F &= b \left(c - \frac{h}{2} \right) \frac{(E_c - E_2)^2}{12f'_c} \left(\frac{\epsilon_{ccu}}{c} \right)^2 + b \frac{(E_c - E_2)}{3} \left(\frac{\epsilon_{ccu}}{c} \right) \\
 &= 300 \left(253,5 - \frac{300}{2} \right) \frac{(23500 - 1605,67)^2}{12.25} \left(\frac{0,004}{253,5} \right)^2 + \\
 &\quad 300 \frac{(23500 - 1605,67)}{3} \left(\frac{0,004}{253,5} \right) \\
 &= 48,839 \text{ N/mm}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 G &= - \left(\frac{b}{2} f'_c + b \left(c - \frac{h}{2} \right) \frac{(E_c - E_2)}{2} \left(\frac{\epsilon_{ccu}}{c} \right) \right) \\
 &= - \left(\frac{300}{2} 25 + 300 \left(253,5 - \frac{300}{2} \right) \frac{(23500 - 1605,67)}{2} \left(\frac{0,004}{253,5} \right) \right) \\
 &= -9287,77 \text{ N/mm}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 H &= b f'_c \left(c - \frac{h}{2} \right) \\
 &= 300.25 \left(253,5 - \frac{300}{2} \right) \\
 &= 776250 \text{ N/m}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 I &= \frac{bc^2}{2} f'_c + b c f'_c \left(c - \frac{h}{2} \right) + \frac{(bc^2 E_2)}{3} (\epsilon_{ccu}) - \frac{(bc E_2)}{2} \left(c - \frac{h}{2} \right) (\epsilon_{ccu}) \\
 &= \frac{300c^2}{2} 25 + 300.253,5.25 \left(253,5 - \frac{300}{2} \right) + \\
 &\quad \frac{(300.253,5^2.1605,67)}{3} (0,004) - \frac{(300.1605,67)}{2} \left(253,5 - \frac{300}{2} \right) (0,004) \\
 &= 64871960,91 \text{ N/mm}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \epsilon'_t &= \frac{2f'_c}{E_c - E_2} \\
 &= \frac{2.25}{23500 - 1605,67} \\
 &= 0,002
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 y_t &= c \frac{\epsilon'_t}{\epsilon_{ccu}} \\
 &= 253,5 \frac{0,002}{0,004} \\
 &= 140,174
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 A_{S1} &= \text{jumlah tulangan} \times A_s \\
 &= 4 \times 132,665 \\
 &= 530,66 \text{ mm}^2
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 A_{S2} &= \text{jumlah tulangan} \times A_s \\
 &= 4 \times 132,665 \\
 &= 530,66 \text{ mm}^2
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 A_{S3} &= \text{jumlah tulangan} \times A_s \\
 &= 4 \times 132,665 \\
 &= 530,66 \text{ mm}^2
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 A_{S4} &= \text{jumlah tulangan} \times A_s \\
 &= 4 \times 132,665 \\
 &= 530,66 \text{ mm}^2
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \Sigma A_s &= A_{S1} + A_{S2} + A_{S3} + A_{S4} \\
 &= 530,66 + 530,66 + 530,66 + 530,66 \\
 &= 2122,64
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 d_{\text{tulangan}} &= \frac{h-2s}{3} \\
 &= \frac{300-2 \cdot 40}{3} \\
 &= 99,200 \text{ mm}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 d_1 &= s + \frac{1}{2} \phi \\
 &= 40 + \frac{1}{2} 13 \\
 &= 46,5 \text{ mm}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 d_2 &= d_{\text{tulangan}} + s \\
 &= 99,200 + 40 \\
 &= 139,200 \text{ mm}
 \end{aligned}$$

$$d_3 = 2d_{\text{tulangan}} + s$$

$$= 2 \cdot 99,200 + 40$$

$$= 238,400 \text{ mm}$$

$$d_4 = h - s - \frac{1}{2} \phi$$

$$= 300 - 40 - \frac{1}{2} 13$$

$$= 253,5 \text{ mm}$$

$$\epsilon_{s1} = \epsilon_{ccu} \frac{h-d1}{h}$$

$$= 0,004 \frac{300-46,5}{300}$$

$$= 0,004 \text{ mm}$$

$$\epsilon_{s2} = \epsilon_{ccu} \frac{h-d2}{h}$$

$$= 0,004 \frac{300-139,200}{300}$$

$$= 0,002 \text{ mm}$$

$$\epsilon_{s3} = \epsilon_{ccu} \frac{h-d3}{h}$$

$$= 0,004 \frac{300-238,400}{300}$$

$$= 0,001 \text{ Nmm}$$

$$\epsilon_{s4} = 0$$

$$f_{s1} = E_s \cdot \epsilon_{s1}$$

$$= 200000 \cdot 0,004$$

$$= 687,970 \text{ MPa}$$

$$f_{s2} = E_s \cdot \epsilon_{s2}$$

$$= 200000 \cdot 0,002$$

$$= 442,736 \text{ MPa}$$

$$f_{s3} = E_s \cdot \epsilon_{s3}$$

$$= 200000 \cdot 0,001$$

$$= 169,605 \text{ MPa}$$

$$A_{s1} \cdot f_{s1} = 530,66 \cdot 420$$

$$= 222877.200 \text{ N}$$

$$A_{s2} \cdot f_{s2} = 530,66 \cdot 420$$

$$= 222877.200 \text{ N}$$

$$A_{s3} \cdot f_{s3} = 530,66 \cdot 169,605$$

$$= 90002.766 \text{ N}$$

$$A_{s4} \cdot f_{s4} = 530,66 \cdot 0,000$$

$$= 0 \text{ N}$$

$$\Sigma A_{si} \cdot f_{si} \cdot d_i = A_{s1} f_{s1} d_1 + A_{s2} f_{s2} d_2 + A_{s3} f_{s3} d_3 + A_{s4} f_{s4} d_4$$

$$= 222877.200 + 222877.200 + 90002.766 + 0,000$$

$$= 535757,166 \text{ N}$$

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

$$= 0,95 [(-0,095 + 48,839(140,174)^3 + \\ -9287,77(140,174)^2 + 776250(140,174) + \\ 68537412,7) + 62844955,5]$$

$$= 47376281,49 \text{ N.mm}$$

$$= 47,376 \text{ kN.m}$$

- Kapasitas Nominal Aksial di Titik C

$$\epsilon_{sy} = \frac{1,7 \cdot f_c}{E_c}$$

$$= \frac{1,7 \cdot 25}{23500}$$

$$= 0,0018 \text{ mm}$$

$$c = c \frac{\epsilon_{ccu}}{\epsilon_{sy} + \epsilon_{ccu}}$$

$$= 253,5 \frac{0,004}{0,0018 + 0,004}$$

$$= 176,2991 \text{ mm}$$

$$y_t = c \frac{\epsilon'_t}{\epsilon_{ccu}}$$

$$= 253,5 \frac{0,002}{0,004}$$

$$\begin{aligned}
&= 97,485 \text{ mm} \\
A &= \frac{-b(E_C - E_2)^2}{12f'_c} \left(\frac{\epsilon_{ccu}}{C}\right)^2 \\
&= \frac{-300(23500 - 1605,67)^2}{12.25} \left(\frac{0,004}{253,5}\right)^2 \\
&= -0,265 \text{ N/mm}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
B &= \frac{b(E_C - E_2)}{2} \left(\frac{\epsilon_{ccu}}{C}\right) \\
&= \frac{300(23500 - 1605,67)}{12.17} \left(\frac{0,004}{253,5}\right) \\
&= 76,935 \text{ kN/mm}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
C &= -bcf'_c \\
&= -300 \cdot 25 \\
&= -7500 \text{ kN/mm}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
D &= bcf'_c + \frac{(bcE_2)}{2} (\epsilon_{ccu}) \\
&= 300.253,5.25 + \frac{(500. 253,5. 1605,67)}{2} (0,004) \\
&= 1497611,101 \text{ N/mm}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
E &= \frac{-b(E_C - E_2)^2}{16f'_c} \left(\frac{\epsilon_{ccu}}{C}\right)^2 \\
&= \frac{-300(23500 - 1605,67)^2}{16.25} \left(\frac{0,004}{253,5}\right)^2 \\
&= -0,197 \text{ N/mm}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
F &= b \left(c - \frac{h}{2} \right) \frac{(E_C - E_2)^2}{12f'_c} \left(\frac{\epsilon_{ccu}}{C}\right)^2 + b \frac{(E_C - E_2)}{3} \left(\frac{\epsilon_{ccu}}{C}\right) \\
&= 300 \left(253,5 - \frac{300}{2} \right) \frac{(23500 - 1605,67)^2}{12.25} \left(\frac{0,004}{253,5}\right)^2 + \\
&\quad 300 \frac{(23500 - 1605,67)}{3} \left(\frac{0,004}{253,5}\right)
\end{aligned}$$

$$= 58,205 \text{ N/mm}$$

$$\begin{aligned} G &= -\left(\frac{b}{2}f'_c + b\left(c - \frac{h}{2}\right)\frac{(E_c - E_2)}{2}\left(\frac{\epsilon_{ccu}}{c}\right)\right) \\ &= -\left(\frac{300}{2}25 + 300\left(253,5 - \frac{300}{2}\right)\frac{(23500 - 1605,67)^2}{12.25}\left(\frac{0,004}{253,5}\right)^2\right) \\ &= -5773,327 \text{ N/mm} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} H &= bf'_c\left(c - \frac{h}{2}\right) \\ &= 300.25\left(253,5 - \frac{300}{2}\right) \\ &= 197244,411 \text{ N/mm} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} I &= \frac{bc^2}{2}f'_c + bcf'_c\left(c - \frac{h}{2}\right) + \frac{(bc^2E_2)}{3}(\epsilon_{ccu}) - \frac{(bcE_2)}{2}\left(c - \frac{h}{2}\right)(\epsilon_{ccu}) \\ &= \frac{300 \cdot 253,5^2}{2}25 + 300 \cdot 253,5 \cdot 25\left(253,5 - \frac{300}{2}\right) + \\ &\quad \frac{(300 \cdot 253,5^2 \cdot 1605,7)}{3}(0,004) - \frac{(300 \cdot 253,5 \cdot 1605,67)}{2}\left(253,5 - \frac{300}{2}\right)(0,004) \\ &= 112242634,3 \text{ N/mm} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \epsilon_{s1} &= \epsilon_{ccu} \frac{h-d1}{h} \\ &= 0,004 \frac{300-46,5}{300} \\ &= 0,003 \text{ N/mm} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \epsilon_{s2} &= \epsilon_{ccu} \frac{h-d2}{h} \\ &= 0,004 \frac{300-139,200}{300} \\ &= 0,002 \text{ N/mm} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \epsilon_{s3} &= \epsilon_{ccu} \frac{h-d3}{h} \\ &= 0,004 \frac{300-238,400}{300} \\ &= 0,001 \text{ N/mm} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\varepsilon_{s4} &= \varepsilon_{sy} \\ &= 0,0018 \text{ N/mm}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}f_{s1} &= E_s \cdot \varepsilon_{s1} \\ &= 200000 \cdot 0,003 \\ &= 697,97 \text{ MPa}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}f_{s2} &= E_s \cdot \varepsilon_{s2} \\ &= 200000 \cdot 0,002 \\ &= 442,737 \text{ MPa}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}f_{s3} &= E_s \cdot \varepsilon_{s3} \\ &= 200000 \cdot 0,002 \\ &= 169,605 \text{ MPa}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}f_{s4} &= E_s \cdot \varepsilon_{s4} \\ &= 200000 \cdot 0,0018 \\ &= 362,703 \text{ MPa}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}A_{s1} \cdot f_{s1} &= 530,66 \cdot 420 \\ &= 222877,200 \text{ N}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}A_{s2} \cdot f_{s2} &= 530,66 \cdot 420 \\ &= 222877,200 \text{ N}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}A_{s3} \cdot f_{s3} &= 530,66 \cdot 211,897 \\ &= 90002,766 \text{ N}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}A_{s4} \cdot f_{s4} &= 530,66 \cdot -362,703 \\ &= 191940,851 \text{ N}\end{aligned}$$

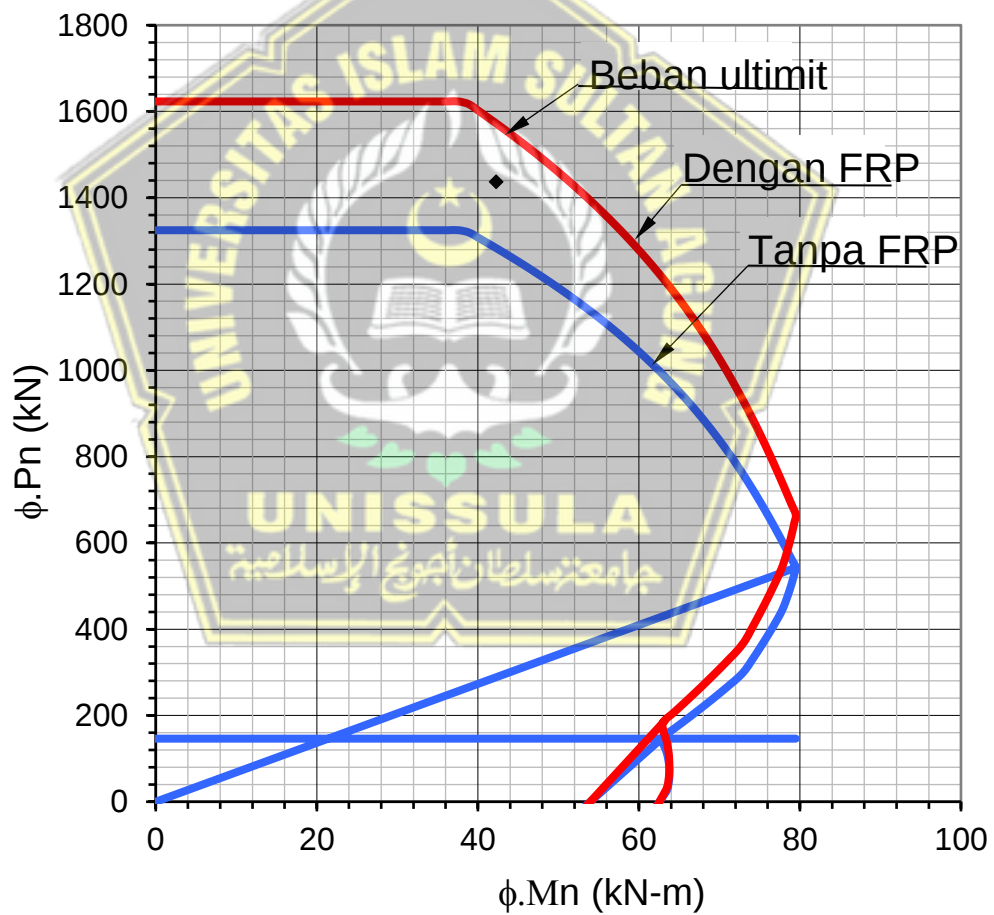
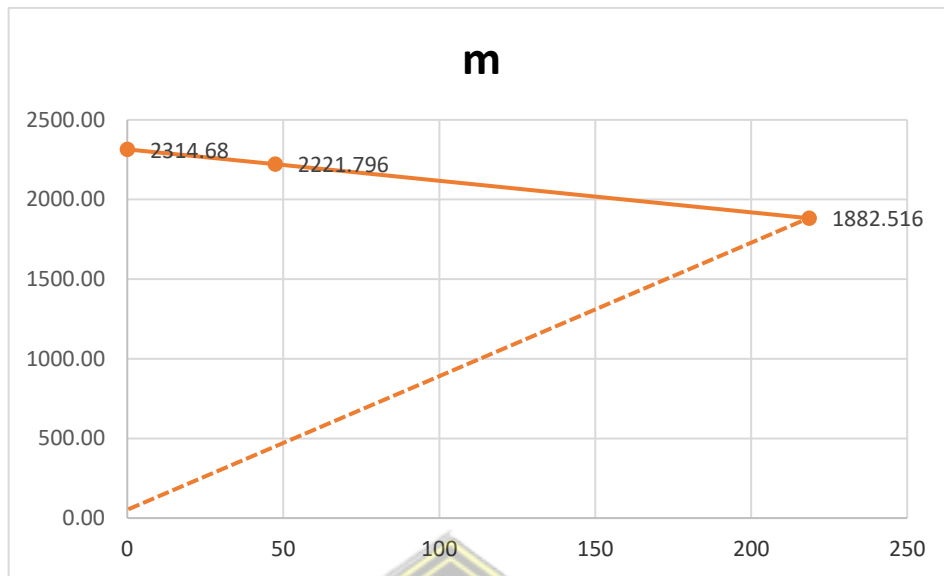
$$\begin{aligned}\Sigma A_{si} \cdot f_{si} \cdot d_i &= A_{s1} f_{s1} d_1 + A_{s2} f_{s2} d_2 + A_{s3} f_{s3} d_3 + A_{s4} f_{s4} d_4 \\ &= 222877,200 + 222877,200 + 90002,766 + 191940,851 \\ &= 1237838,000 \text{ N}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\phi M_{n(B)} &= \phi[(E(y_t)^4 + F(y_t)^3 + G(y_t)^2 + H(y_t) + I) + \Sigma A_{si} f_{si} d_i] \\ &= 0,95[(-0,075(168,598)^4 + 41,573(168,598)^3 + \\ &\quad -8277,238(168,598)^2 + 678985,526(168,598) + \\ &\quad 520874379,7) + 111501961,2] \\ &= 218578838 \text{ N.mm}\end{aligned}$$

$$= 218,578 \text{ kN.m}$$

Tabel 4.46. Perhitungan Kondisi Tekan aksial Sentris

M_s	a	C_c	M_c	P_n	M_n	Φ	$\Phi.P_n$	$\Phi.M_n$	$\Phi.P_{nfrp}$
kNmm	mm	kN	kNmm	kN	kNm		kN	kNm	kN
				1830.65	0.00	0.65	1189.92	0.00	1636.74
11698.36	267.75	1706.91	27523.86	1830.65	39.22	0.65	1189.92	25.49	1636.74
11870.66	265.20	1690.65	29417.31	1830.65	41.29	0.65	1189.92	26.84	1636.74
12046.30	262.65	1674.39	31269.30	1830.65	43.32	0.65	1189.92	28.16	1636.74
12225.38	260.10	1658.14	33079.84	1830.65	45.31	0.65	1189.92	29.45	1636.74
12408.01	257.55	1641.88	34848.93	1830.65	47.26	0.65	1189.92	30.72	1636.74
12594.30	255.00	1625.63	36576.56	1830.65	49.17	0.65	1189.92	31.96	1636.74
12784.34	252.45	1609.37	38262.74	1830.65	51.05	0.65	1189.92	33.18	1636.74
12978.27	249.90	1593.11	39907.47	1830.65	52.89	0.65	1189.92	34.38	1636.74
13176.19	247.35	1576.86	41510.74	1820.22	54.69	0.65	1183.14	35.55	1627.41
13378.24	244.80	1560.60	43072.56	1801.19	56.45	0.65	1170.78	36.69	1610.40
13584.54	242.25	1544.34	44592.93	1782.11	58.18	0.65	1158.37	37.82	1593.34
13795.23	239.70	1528.09	46071.84	1762.97	59.87	0.65	1145.93	38.91	1576.23
14010.45	237.15	1511.83	47509.30	1743.77	61.52	0.65	1133.45	39.99	1559.06
14230.35	234.60	1495.58	48905.30	1724.50	63.14	0.65	1120.93	41.04	1541.83
14455.09	232.05	1479.32	50259.85	1705.17	64.71	0.65	1108.36	42.06	1524.55
14684.81	229.50	1463.06	51572.95	1685.77	66.26	0.65	1095.75	43.07	1507.20
14919.70	226.95	1446.81	52844.60	1666.29	67.76	0.65	1083.09	44.05	1489.79
15159.93	224.40	1430.55	54074.79	1646.75	69.23	0.65	1070.39	45.00	1472.32
15405.68	221.85	1414.29	55263.53	1627.13	70.67	0.65	1057.63	45.93	1454.77
15657.15	219.30	1398.04	56410.81	1607.43	72.07	0.65	1044.83	46.84	1437.16
15914.53	216.75	1381.78	57516.64	1587.65	73.43	0.65	1031.97	47.73	1419.48
16178.04	214.20	1365.53	58581.02	1567.78	74.76	0.65	1019.06	48.59	1401.72
16447.90	211.65	1349.27	59603.95	1547.83	76.05	0.65	1006.09	49.43	1383.88
16724.34	209.10	1333.01	60585.42	1527.79	77.31	0.65	993.06	50.25	1365.96
17007.61	206.55	1316.76	61525.44	1507.66	78.53	0.65	979.98	51.05	1347.96
17297.96	204.00	1300.50	62424.00	1487.42	79.72	0.65	966.83	51.82	1329.87
17595.66	201.45	1284.24	63281.11	1467.09	80.88	0.65	953.61	52.57	1311.69
17900.99	198.90	1267.99	64096.77	1446.66	82.00	0.65	940.33	53.30	1293.42
18214.26	196.35	1251.73	64870.97	1426.11	83.09	0.65	926.97	54.01	1275.05
18535.76	193.80	1235.48	65603.72	1405.45	84.14	0.65	913.54	54.69	1256.58
18865.85	191.25	1219.22	66295.02	1384.68	85.16	0.65	900.04	55.35	1238.00
19204.85	188.70	1202.96	66944.86	1363.78	86.15	0.65	886.46	56.00	1219.32
19553.14	186.15	1186.71	67553.25	1342.75	87.11	0.65	872.79	56.62	1200.52
19911.10	183.60	1170.45	68120.19	1321.60	88.03	0.65	859.04	57.22	1181.60
20279.15	181.05	1154.19	68645.67	1300.30	88.92	0.65	845.19	57.80	1162.56
20657.72	178.50	1137.94	69129.70	1278.86	89.79	0.65	831.26	58.36	1143.40
21047.25	175.95	1121.68	69572.28	1257.27	90.62	0.65	817.23	58.90	1124.09
21448.25	173.40	1105.43	69973.40	1235.52	91.42	0.65	803.09	59.42	1104.65
21861.21	170.85	1089.17	70333.07	1213.61	92.19	0.65	788.85	59.93	1085.06
22286.69	168.30	1072.91	70651.29	1191.53	92.94	0.65	774.50	60.41	1065.32
22725.26	165.75	1056.66	70928.05	1169.27	93.65	0.65	760.03	60.87	1045.41
23177.54	163.20	1040.40	71163.36	1146.82	94.34	0.65	745.43	61.32	1025.34



Gambar 4.36. Diagram Interaksi Kolom Dengan FRP

4.9.1.2. Perkuatan Pada Balok Menggunakan CFRP

Pada desain perencanaan balok yang sudah dibahas pada Bab IV terdapat kegagalan pada gaya geser ,sehingga perlu adanya perkuatan agar beban geser yang bekerja pada balok memenuhi persyaratan dan berkategori aman.

4.9.1.2.1. Analisis Perkuatan Balok

Analisis yang dihitung merupakan salah satu balok yang mengalami kegagalan geser terbesar yaitu balok B19 yang terletak pada lantai 1 bangunan gedung perkantoran



Gambar 4.36. Penampang Balok Yang Mengalami Kegagalan Geser

Tabel 4.47 Dimensi Dan Material Data

h (mm)	500
b (mm)	250
Ln (mm)	5,700
dp (mm)	452
f'c (Mpa)	25
n	3
n'	3
Ø (mm)	16

Ø' (mm)	10
fy (Mpa)	420
Es (Mpa)	200,000
Ketebalan per lapis tf (mm)	0.33
Jumlah Lapisan nf	2
Lebar Lapisan (mm)	250
Ef (N/mm ²)	227527
ffu (N/mm ²)	3792
ffe (N/mm ²)	1137.6
Rupture Strain εfu mm/mm	0.0159

a. Langkah 1 Menghitung Properti bahan desain FRP

- $$ffu = CE \cdot ffu^*$$

$$= 0,95 \cdot 3792$$

$$= 3602,40 \text{ MPa}$$
- $$\epsilon_{fu} = CE \cdot \epsilon_{fu}^*$$

$$= 0,95 \cdot 0,0159$$

$$= 0,0152$$

b. Langkah 2. Perhitungan Awal

- $$\beta_1 = 1,05 - 0,05 \frac{f'_c}{1000}$$

$$\beta_1 = 1,05 - 0,05 \frac{25}{1000}$$

$$= 1,0488$$

$$Ec = 4700 \sqrt{f'_c}$$

$$= 23.500 \text{ N/mm}^2$$
- Sifat baja yang ada

$$As = 3 \times 0,25 \times 3,14 \times 16^2$$

$$= 602,8800 \text{ mm}^2$$

- Area perkuatan FRP

$$A_f = n t_f \cdot w_f$$

$$= 2 \times 0,33 \times 250$$

$$= 165 \text{ mm}^2$$

- Luas Penampang

$$A_{cg} = b \cdot h$$

$$= 500 \times 200$$

$$= 125.000$$

- Jarak dari serat atas ke pusat bagian

$$y_t = \frac{\sum (y \cdot A)}{\sum A}$$

$$= 500 \times 0,5$$

$$= 250 \text{ mm}$$

- Momen inersia kotor

$$I_g = \frac{b \cdot h^3}{12}$$

$$= \frac{250 \cdot 500^3}{12}$$

$$= 2604200000 \text{ mm}^4$$

- Radius girasi

$$r = (I_g / A_{cg})^{0,5}$$

$$= 2604200000 / 125000$$

$$= 144,33 \text{ mm}$$

- Regangan Prategang Efektif

$$\epsilon_{pe} = 0,3 \frac{f_{pe}}{f'c}$$

$$= 0,3 \frac{3}{25}$$

$$= 0,005$$

- Gaya Prategang Efektif

$$P_e = A_f \cdot f_{fe}$$

$$= 165 \times 1137,6$$

$$= 187.704 \text{ N}$$

- Gaya Prategang Eksentrisitas

$$\begin{aligned} Y_b &= h - Y_t \\ &= 452 - 250 \\ &= 202 \text{ mm} \end{aligned}$$

- c. Langkah 3. Tentukan keadaan regangan yang ada pada soffit

- Jarak dari serat paling bawah ke pusat penampang:

$$\begin{aligned} Y_b &= h - Y_t \\ &= 250 - 500 \\ &= -250 \end{aligned}$$

- Regangan awal pada balok soffit

$$\begin{aligned} \epsilon_{bi} &= \frac{-pe}{Ec \cdot A_{cg}} \left(1 + \frac{e \cdot Y_b}{r^2} \right) + \frac{M_{dl} \cdot Y_b}{Ec \cdot I_g} \\ &= 0,0000169 \end{aligned}$$

- d. Langkah 4. Tentukan regangan desain sistem FRP

$$\begin{aligned} \epsilon_{fd} &= 0,042 \sqrt{\frac{f'_c}{n \cdot E_f \cdot t_f}} \leq 0,9 \epsilon_{fu} \\ 0,0005 &\leq 0,0135945 \text{ (ok)} \end{aligned}$$

- e. Langkah 5. Perkirakan c, kedalaman ke sumbu netral

$$= 311,79$$

- f. Langkah 6. Menentukan tingkat regangan efektif pada tulangan FRP

$$\epsilon_{fe} = \left(\frac{d_f - c}{c} \right) - \epsilon_{bi} \leq \epsilon_{fd}$$

$$0.0019800 > 0.0005419 \quad \text{cek !}$$

Kegagalan diatur oleh debonding FRP

$$\epsilon_{fe} = \epsilon_{fd} = 0.0005$$

- g. Langkah 7. Menghitung Regangan pada CFRP Prategang Eksisting

$$\begin{aligned} \epsilon_{pnet} &= (\epsilon_{fe} + \epsilon_{bi}) \left(\frac{d_p - c}{d_f - c} \right) \\ &= 0,0003 \end{aligned}$$

- $\epsilon_{ps} = \epsilon_{pe} + \frac{Pe}{AcE_c} \left(1 + \frac{e^2}{r^2}\right) + \epsilon_{pnet} \leq 0,035$

$$0.0055 \leq 0.0350 \quad \text{OK !}$$

h. Langkah 8. Hitung tingkat Tegangan pada CFRP dan Baja prategang

$$f_{ps} = \begin{cases} 196500 \text{ N/mm}^2 & \text{for } \epsilon_{ps} \leq 0,0086 \\ 1860 - \frac{0,276}{\epsilon_{ps} - 0,007} & \text{for } \epsilon_{ps} > 0,0086 \end{cases} = 1074.2055 \text{ N/mm}^2$$

$$f_{fe} = E_f \cdot \epsilon_{fe} = 123.3002 \text{ N/mm}^2$$

i. Langkah 9. Hitung parameter blok tegangan tekan beton ekuivalen α_1 dan β_1

$$\begin{aligned} \epsilon_c &= (\epsilon_{fe} + \epsilon_{bi}) \left(\frac{c}{d_f - c} \right) = 0.00062 \\ \frac{1,7 f'_c}{\beta_1 E_c} &= 0.00181 \\ \frac{4 \epsilon'_c - \epsilon_c}{6 \epsilon'_c - 2 \epsilon_c} &= 0.68808 \\ \alpha_1 &= \frac{3 \epsilon'_c \cdot \epsilon_c - \epsilon_c^2}{3 \beta_1 \cdot \epsilon'_c^2} = 0.4399 \end{aligned}$$

j. Langkah 10. Hitung resultan gaya dalam dan periksa kesetimbangan

$$C = 311.79 \text{ mm}$$

$$c = 311.79 = 311.79 \quad \text{OK !}$$

k. Langkah 11. Sesuaikan c sampai kesetimbangan gaya terpenuhi

l. Langkah 12. Menghitung Komponen Kekuatan Lentur

- Kontribusi Baja terhadap Bending

$$M_{ns} = A_s f_y \left(d_p - \frac{\beta_1 c}{2} \right) = 87.2897 \text{ KN-m}$$

- Kontribusi FRP Pratekan pada Bending

$$M_{nf} = A_f f_{fe} \left(d_f - \frac{\beta_1 c}{\gamma} \right) = 315.3347 \text{ KN-m}$$

m. Langkah 13. Hitung kekuatan lentur rencana penampang

$$\begin{aligned} \Phi M_n &= \Phi [M_{np} + \Psi f M_{nf}] \\ &= 0,9 (87,2897 + 0,85 \times 31,3347) \\ &= 319,7918 \text{ KN/m} \end{aligned}$$

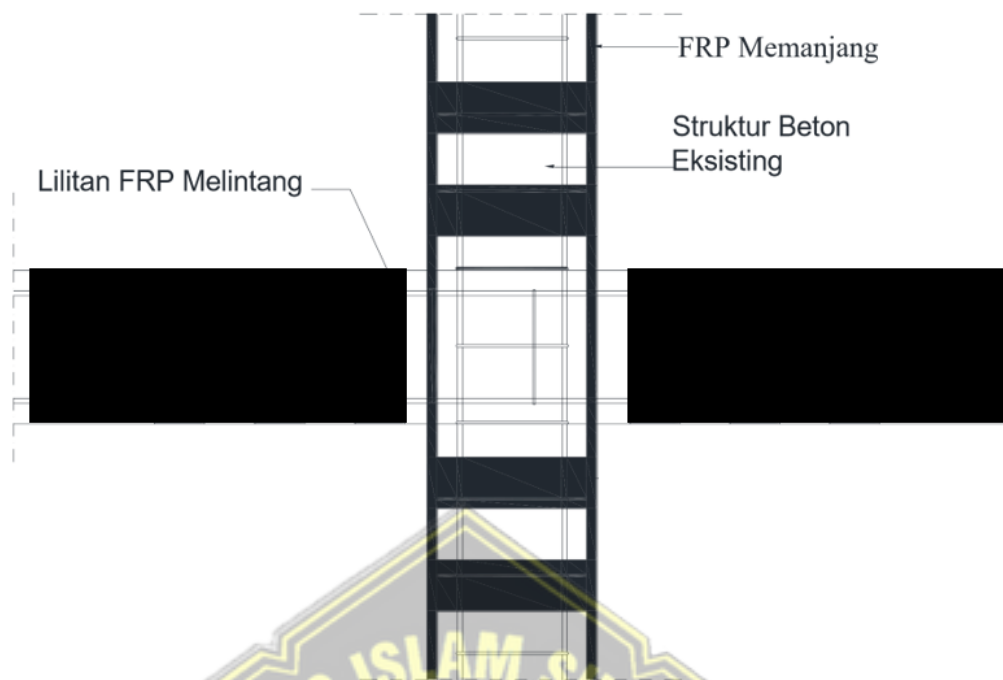
$$\begin{aligned} P &= \frac{(\Phi M_n \times 2)}{1,3} \\ &= \frac{(319,7918 \times 2)}{1,3} \\ &= 491,9873 \text{ kN} \end{aligned}$$

Nilai P FRP > Nilai P desain

$$491,9873 > 288.165 \text{ (OKE)}$$



Gambar 4.37 Penerapan CFRP Pada Balok



Gambar 4.38. Pengampikasian FRP Pada Kolom

Dari hasil perhitungan diatas dapat disimpulkan bahwa penggunaan CFRP pada perencanaan desain untuk perkuatan suatu struktur apabila terjadi kegagalan geser, aksial , dan momen dengan pelapisan CFRP menjadikan bagian struktur tersebut menjadi lebih kuat sehingga aman dalam menerima gaya dengan dimensi dan mutu yang sama.

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, ada beberapa kesimpulan yang dapat diambil berkaitan dengan Desain Perkuatan Struktur Menggunakan CFRP sebagai berikut :

- a. Dari hasil analisis desain struktur gedung yang dibuat dengan bantuan ETABS V 18 terdapat bagian struktur yang mengalami kegagalan pada kolom.
- b. Untuk kegagalan kolom terjadi kegagalan pada gaya aksial dan gaya momen yang terlalu besar sehingga mengalami kehancuran.
- c. Pada struktur kolom setelah dilapisi dengan CFRP kapasitas gaya yang dimiliki untuk kapasitas gaya aksial $P_n \text{ kN}_{(A)} = 1437,2052 \text{ kN}$, serta untuk kapasitas gaya momen $M_n \text{ kN.m}_{(A)} = 42,2691 \text{ kN.m}$.
- d. Lapisan yang diperlukan untuk kolom membutuhkan 5 lapis CFRP.
- e. Pada struktur kolom setelah dilapisi dengan CFRP kapasitas gaya yang dimiliki untuk kapasitas $M_n = 288.165 \text{ kN-m}$
- f. Lapisan yang diperlukan untuk balok membutuhkan 3 lapis CFRP.

5.2 Saran

Berdasarkan proses pengerjaan yang dialami penulis pada saat melakukan analisis desain ini, ada beberapa saran agar pengembangan dalam laporan Tugas Akhir Desain Perkuatan Struktur Menggunakan CFRP yaitu :

- a. Peraturan – 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 tentang sistem perkuatan untuk struktur beton.



DAFTAR PUSTAKA

- Atmadja, H. S., & Maulana, S. A. (2017). *Redesign Gedung Training Centre II Universitas Diponegoro Kota Semarang*. (Tugas Akhir, Universitas Islam Sultan Agung).
- Budiono, 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).
- 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*. (Tugas Akhir, Universitas Islam Sultan Agung).
- Menna et al. 2013. *Assessment of Ecological Sustainability of a Building*

Subjected to Potential Seismic Events During Lifetime. The International Journal of Life Cycle Assessment, V.18. No.2, pp. 504-515, doi: 10. 1007/s11367-012-0477-9

Babay , N.I et al. 2012. *Studi Perkuatan Kolom Bulat Beton Bertulang Dengan Menggunakan GFRP Sheet 2 Lapis*. Makasar : Fakultas Teknik Universitas Hasanudin.

RSNI 3 *Pedoman Perancangan dan Pelaksanaan Sistem Serat Berperekat Polimer Terlekat Eksternal Untuk Struktur Beton*

Gilbert, R.I. dan Mickleborough, N.C,1990. *Design of Prestressed Concrete*. Sydney : Unwin Hyman, Ltd

Kumahara et al. 1993. *Tensile Strength of Continuous Fiber Bar Under High Temperature. International Symposium on Fiber- Reinforced Plastic Reinforcement for Concrete Structures, SP-138, A.Nanni and C. W.Dolan, eds , American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, pp. 731-742 .*

D., Agung, I. S., Arifudzaky, S., & Andhika, T. (2020). *Tugas Akhir Desain Perkuatan Struktur Menggunakan Cfrp (Carbon Fiber Reinforced Polymer)*

