

TUGAS AKHIR

EVALUASI DAN PERKUATAN ELEMEN STRUKTUR BALOK DAN KOLOM PADA BANGUNAN GEDUNG HOTEL DI YOGYAKARTA MENGGUNAKAN *CARBON FIBER REINFORCED POLYMER (CFRP)* *(EVALUATION AND REINFORCEMENT OF BEAM AND COLUMN STRUCTURAL ELEMENTS IN A HOTEL BUILDING IN YOGYAKARTA USING CARBON FIBER REINFORCED POLYMER (CFRP))*

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



**Hajrah Zulfika
21511173**

**PROGRAM STUDI TEKNIK SIPIL – PROGRAM SARJANA
FAKULTAS TEKNIK SIPIL DAN PERENCANAAN
UNIVERSITAS ISLAM INDONESIA
2026**

TUGAS AKHIR

EVALUASI DAN PERKUATAN ELEMEN STRUKTUR BALOK DAN KOLOM PADA BANGUNAN GEDUNG HOTEL DI YOGYAKARTA MENGGUNAKAN *CARBON FIBER REINFORCED POLYMER (CFRP)* (*EVALUATION AND REINFORCEMENT OF BEAM AND COLUMN STRUCTURAL ELEMENTS IN A HOTEL BUILDING IN YOGYAKARTA USING CARBON FIBER REINFORCED POLYMER (CFRP)*)

Disusun oleh



Hajrah Zulfika
21511173

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

Diuji pada tanggal 19 Mei 2026

Oleh Dewan Penguji

22-05
2026

Pembimbing

Jafar, S.T., MURP., M.T.
NIK : 185111305

Penguji I

29.05.26

Astriaana Hardawati, S.T., M.Eng.
NIK : 165111301

Penguji II:

Ir. Yunalia Muntafi, S.T., M.T., Ph.D. (Eng)., IPM.
NIK : 095110101



Mengesahkan,
Ketua Program Studi Teknik Sipil

Ir. Yunalia Muntafi, S.T., M.T., Ph.D. (Eng)., IPM.
NIK : 095110101

25/05/2026

PERNYATAAN BEBAS PLAGIASI

Dengan ini saya menyatakan bahwa Tugas Akhir yang telah saya kerjakan sebagai syarat untuk penyelesaian Program Sarjana di Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Islam Indonesia merupakan hasil karya saya sendiri. Saya menyadari pentingnya integritas akademik dan menghormati hak cipta serta kontribusi karya ilmiah dari pihak lain. Saya menyatakan bahwa dalam menyusun Tugas Akhir ini, saya telah secara tepat mencantumkan sumber informasi, data, referensi, kutipan, atau pendapat dari karya orang lain dengan mengikuti aturan penulisan sesuai dengan kaidah dan etika penulisan karya ilmiah. Apabila di kemudian hari dalam Tugas Akhir ini ditemukan seluruh atau sebagian adanya kesamaan atau plagiasi dengan karya orang lain, saya bersedia menerima konsekuensi dan sanksi sesuai dengan peraturan yang berlaku.

Demikian pernyataan bebas plagiasi ini saya buat dengan sebenarnya. Atas pernyataan ini, saya siap bertanggung jawab sepenuhnya.

Yogyakarta, 22 Mei 2026

Yang membuat pernyataan,



Hajrah Zulfika

21511173

KATA PENGANTAR

Alhamdulillah puji dan rasa syukur yang senantiasa tercurahkan kehadirat Tuhan Yang Maha Esa, sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir yang berjudul *Evaluasi dan Perkuatan Elemen Struktur Balok dan Kolom pada Bangunan Gedung Hotel di Yogyakarta menggunakan Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP)*. Tugas Akhir ini merupakan salah satu syarat akademik dalam menyelesaikan studi tingkat strata satu di Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Islam Indonesia, Yogyakarta.

Dalam penyusunan Tugas Akhir ini, Penulis menghadapi banyak hambatan, namun berkat saran, kritik, bimbingan, dukungan semangat, serta bantuan dari berbagai pihak, Alhamdulillah Tugas Akhir ini dapat diselesaikan. Untuk itu, Penulis ingin mengucapkan terima kasih yang sedalam-dalamnya kepada:

1. Keluarga, kedua orang tua dan kedua kakak penulis.
2. Ibu Ir. Yunalia Muntafi, S.T., M.T., Ph.D.(Eng)., IPM., selaku Ketua Program Studi Teknik Sipil Universitas Islam Indonesia,
3. Bapak Jafar, S.T., MURP., M.T., selaku Dosen Pembimbing Tugas Akhir,
4. Ibu Astriana Hardawati, S.T., M.Eng., selaku Dosen Penguji I,
5. Ibu Ir. Yunalia Muntafi, S.T., M.T., Ph.D.(Eng)., IPM., selaku Dosen Penguji II,
6. Ibu Shofwatul Fadilah, S.T.P., selaku Dosen Pembimbing Akademik,
7. Sahabat “UNLIMITED” penulis Arbain, Sherly dan Lia, serta sahabat “WARGA LAPE” terutama Aulia Nawar Rahman, Ercella Aftaphilia, Amalia Siva Rachmadhani, serta Azizah Nadya Soraya Utami.

Penulis berharap agar Tugas Akhir ini dapat bermanfaat bagi berbagai pihak yang membacanya.

Yogyakarta, Mei 2026
Penulis,

Hajrah Zulfika
21511173

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
HALAMAN PENGESAHAN	ii
PERNYATAAN BEBAS PLAGIASI	iii
KATA PENGANTAR	iv
DAFTAR ISI	v
DAFTAR TABEL	viii
DAFTAR GAMBAR	x
DAFTAR NOTASI DAN SINGKATAN	xii
ABSTRAK	xvii
<i>ABSTRACT</i>	xviii
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	3
1.3 Tujuan Penelitian	4
1.4 Manfaat Penelitian	4
1.5 Batasan Penelitian	4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	6
2.1 Penelitian Terdahulu	6
2.2 Perbandingan Penelitian Terdahulu dan Penelitian Sekarang	9
2.3 Keaslian Penelitian	13
BAB III LANDASAN TEORI	14
3.1 Standar dan Peraturan yang digunakan	14
3.2 Pembebanan Struktur	15
3.2.1 Beban Mati	15
3.2.2 Beban Hidup	17
3.2.3 Beban Gempa	18
3.2.4 Kombinasi Beban	28

3.2.5	Faktor Redudansi ρ	30
3.2.6	Periode Fundamental Struktur	31
3.2.7	Penskalaan Gaya	32
3.2.8	Partisipasi Massa Ragam	32
3.2.9	Gaya Geser Dasar Seismik	32
3.2.10	Gaya Seismik Lateral	33
3.3	Balok	34
3.3.1	Momen Lentur Balok	34
3.3.2	Gaya Geser Balok	38
3.4	Kolom	41
3.4.1	Faktor Kelangsingan	41
3.4.2	Gaya Aksial dan Momen Lentur Kolom	43
3.4.3	Kekuatan Lentur Minimum Kolom	45
3.4.4	Gaya Geser Kolom	46
3.5	Perkuatan Elemen Struktur	49
3.5.1	Perkuatan Pada Balok	50
3.5.2	Perkuatan Pada Kolom	57
BAB IV METODE PENELITIAN		64
4.1	Objek Penelitian	64
4.2	Program Yang Digunakan	64
4.3	Tahapan Penelitian	64
4.4	Bagan Alir Penelitian	76
BAB V HASIL DAN PEMBAHASAN		78
5.1	Pembebanan Struktur	78
5.1.1	Beban Mati	78
5.1.2	Beban Hidup	82
5.1.3	Beban Gempa	83
5.2	Kombinasi Beban	86
5.3	Analisis Struktur Bangunan	87
5.3.1	Periode Fundamental Struktur	87
5.3.2	Partisipasi Massa	88

5.3.3	Gaya Geser Dasar Seismik	89
5.3.4	Kontrol Gaya Geser Dasar	91
5.3.5	Analisis Balok	92
5.3.5.1	Analisis Kapasitas Lentur Balok	93
5.3.5.2	Analisis Kapasitas Geser Balok	116
5.3.6	Analisis Kolom	124
5.3.6.1	Analisis Kapasitas Aksial dan Lentur Kolom	125
5.3.6.2	Analisis Kapasitas Geser Kolom	131
5.4	Analisis Perkuatan Struktur	144
5.4.1	Analisis Perkuatan Balok	142
5.4.1.1	Analisis Perkuatan Terhadap Kapasitas Lentur Balok	145
5.4.1.2	Analisis Perkuatan Terhadap Kapasitas Geser Balok	155
5.4.2	Analisis Perkuatan Kolom	160
5.4.2.1	Analisis Perkuatan Terhadap Kapasitas Aksial dan Lentur Kolom	162
5.4.2.2	Analisis Perkuatan Terhadap Kapasitas Geser Kolom	196
BAB VI KESIMPULAN		204
6.1	Kesimpulan	204
6.2	Saran	205
DAFTAR PUSTAKA		206
LAMPIRAN		208

DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1 Perbandingan Penelitian Terdahulu dan Penelitian Sekarang	10
Tabel 3.1 Berat Sendiri Bahan Bangunan	15
Tabel 3. 2 Berat Sendiri Komponen Gedung	16
Tabel 3. 3 Beban Hidup Terdistribusi Merata Minimum L_o dan Beban Hidup Terpusat Minimum	17
Tabel 3.4 Kategori Risiko Bangunan Gedung dan Nongedung untuk Beban Gempa	19
Tabel 3.5 Faktor Keutamaan Gempa	21
Tabel 3. 6 Klasifikasi Situs	21
Tabel 3.7 Koefisien Situs, F_a	24
Tabel 3.8 Koefisien Situs, F_v	24
Tabel 3.9 Kategori Desain Seismik Berdasarkan Parameter Respons Percepatan Pada Periode Pendek	27
Tabel 3.10 Kategori Desain Seismik Berdasarkan Parameter Respons Percepatan Pada Periode 1 Detik	27
Tabel 3.11 Faktor R , C_d dan Untuk Sistem Pemikul Gaya Seismik	28
Tabel 3.12 Persyaratan Untuk Masing – Masing Tingkat Yang Menahan Lebih Dari 35% Gaya Geser Dasar	30
Tabel 3.13 Koefisien Untuk Batas Atas Pada Periode Yang Dihitung	31
Tabel 3.14 Nilai Parameter Periode Pendekatan C_t dan α	31
Tabel 3. 15 Faktor Reduksi Kekuatan (ϕ)	36
Tabel 3. 16 Faktor Reduksi Lingkungan Untuk Sistem FRP dab Jenis Paparannya (Exposure)	50
Tabel 3.17 Faktor Reduksi Tambahan yang Direkomendasikan Untuk Penulangan Geser FRP	56
Tabel 4. 1 Tipe dan Dimensi Kolom	66
Tabel 4. 2 Tipe dan Dimensi Balok	66

Tabel 4. 3 Tipe dan Dimensi Balok	67
Tabel 5. 2 Beban Mati 78	
Tabel 5. 3 Beban Tambahan Pelat Lantai	79
Tabel 5. 4 Beban Mati Tambahan Pelat Atap	80
Tabel 5. 5 Beban Merata Dinding	81
Tabel 5. 6 Beban Merata Tangga	82
Tabel 5. 7 Beban Hidup	83
Tabel 5. 8 Kombinasi Pembebanan	87
Tabel 5. 9 Partisipasi Massa	89
Tabel 5. 10 Nilai Gaya Seismik Lateral	91
Tabel 5. 11 Hasil Gaya Geser Dasar Skala Awal	91
Tabel 5. 12 Hasil Gaya Geser Dasar Skala Baru	92
Tabel 5. 13 Rekapitulasi Kapasitas Lentur Balok	114
Tabel 5. 14 Rekapitulasi Kapasitas Geser Balok	122
Tabel 5. 15 Gaya Aksial – Momen Lentur Kolom K2(M) Arah X	126
Tabel 5. 16 Gaya Aksial – Momen Lentur Kolom K2(M) Arah Y	126
Tabel 5.17 Rekapitulasi Kapasitas Aksial dan Lentur Kolom K2(M)	127
Tabel 5. 18 Rekapitulasi Kapasitas Geser Kolom	142
Tabel 5. 19 Rekapitulasi Perkuatan Kapasitas Lentur Balok Setelah Perkuatan	154
Tabel 5. 20 Rekapitulasi Kapasitas Geser Balok Setelah Perkuatan	160
Tabel 5. 21 Rekapitulasi Hasil Perhitungan Perkuatan CFRP terhadap Kapasitas Aksial – Lentur Kolom K2 (M)	192
Tabel 5. 22 Rekapitulasi Kapasitas Geser Balok Setelah Perkuatan	201

DAFTAR GAMBAR

Gambar 3.1 Parameter Gerak Tanah S_s , Gempa Maksimum yang Dipertimbangkan Risiko-Tertarget (MCE_R) Wilayah Indonesia Untuk Spektrum Respons 0,2 Detik (Redaman Kritis 5%)	23
Gambar 3.2 Parameter Gerak Tanah S_1 , Gempa Maksimum yang Dipertimbangkan Risiko-Tertarget (MCE_R) Wilayah Indonesia Untuk Spektrum Respons 0,2 Detik (Redaman Kritis 5%)	23
Gambar 3.3 Spektrum Respons Desain	26
Gambar 3.4 Peta Transisi Periode Panjang, T_L Wilayah Indonesia	26
Gambar 3.5 Distribusi Regangan dan Tegangan Penampang Balok	38
Gambar 3. 6 Gaya Geser Desain Balok	39
Gambar 3. 7 Distribusi Regangan dan Tegangan Penampang Kolom	44
Gambar 3. 8 Diagram Interaksi	45
Gambar 3.9 Konsep Kolom Kuat – Balok Lemah	46
Gambar 3.10 Gaya Geser Desain Kolom	47
Gambar 3.11 Perkuatan Struktur Balok dengan Perkuatan Lentur	54
Gambar 3.12 Skema Lilitan Pembungkusan	55
Gambar 3.13 Distribusi Regangan di titik B	60
Gambar 3.14 Distribusi Regangan di titik C	60
Gambar 3.15 Diagram Interaksi	61
Gambar 4. 1 Denah Kolom	67
Gambar 4. 2 Denah Kolom	68
Gambar 4. 3 Denah Pelat Lantai	68
Gambar 4. 4 Detail Kolom	69
Gambar 4. 5 Detail Balok	69
Gambar 4. 6 Potongan Portal Arah X	70
Gambar 4. 7 Potongan Portal Arah Y	70
Gambar 4. 8 CFRP <i>Laminate Tape</i>	71
Gambar 4. 9 CFRP Wrap	71

Gambar 4. 10 Material Struktur	73
Gambar 4. 11 Penampang Struktur	73
Gambar 4. 12 Pemodelan Struktur	74
Gambar 4. 13 Pembebanan Struktur	75
Gambar 4. 14 Bagan Alir Penelitian	77
Gambar 5. 2 Kurva Respons Spektrum Desain	86
Gambar 5. 3 Balok Tipe B2	93
Gambar 5. 4 Kolom Tipe K2(M)	125
Gambar 5. 5 Diagram Interaksi Kolom K2(M) Arah-X	128
Gambar 5. 6 Diagram Interaksi Kolom K2(M) Arah-Y	128
Gambar 5. 7 Perkuatan Kapasitas Lentur pada Balok B2	153
Gambar 5. 8 Perkuatan Kapasitas Geser pada Balok B2	160
Gambar 5. 9 Diagram Interaksi kolom K2(M) arah X setelah Perkuatan	193
Gambar 5. 10 Gambar Perkuatan CFRP terhadap Kapasitas Aksial – Lentur pada Kolom K2(M) arah X	193
Gambar 5. 11 Gambar Perkuatan CFRP terhadap Kapasitas Geser pada Kolom K2(M) arah X	200

DAFTAR NOTASI DAN SINGKATAN

A_c	: Luas penampang beton komponen beton, mm ²
A_e	: Luas permukaan melintang pada penampang beton terkekang efektif, mm ²
A_f	: Luas perkuatan eksternal FRP, mm ²
A_{fv}	: Luas perkuatan geser FRP dengan spasi s , mm ²
A_g	: Luas bruto penampang struktur, mm ²
A_s	: Luasan tulangan tarik longitudinal nonprategang, mm ²
A'_s <i>ata</i>	: Luas tulangan tekan, mm ²
$A_{s\ min}$	: Luas tulangan minimum, mm ²
A_{sc}	: Luas tulangan tarik utama dalam korbak atau braket, mm ²
A_{st}	: Luas total tulangan longitudinal, mm ²
A_v	: Luas tulangan geser dalam spasi s , mm ²
b	: Lebar penampang struktur, mm
b_w	: Lebar badan, tebal dinding atau diameter penampang lingkaran, mm
c	: Jarak antara serat tekan paling jauh ke sumbu netral, mm
c_1	: Dimensi kolom persegi yang diukur dalam arah bentang dimana momen ditentukan, mm
c_2	: Dimensi kolom persegi yang diukur dalam arah tegak lurus terhadap c_1 , mm
C_d	: Faktor pembesaran simpangan lateral
C_E	: Faktor reduksi lingkungan
C_S	: Koefisien respons seismik
C_u	: Koefisien untuk batasan atas pada periode
C_t	: Koefisien periode pendekatan
d	: Jarak dari serat tekan terjauh ke titik pusat tulangan, mm

d'	: Jarak dari serat tekan terjauh ke pusat tulangan tekan longitudinal, mm
d_b	: Diameter nominal batang tulangan, mm
d_f	: Tinggi efektif perkuatan lentur FRP, mm
d_{fv}	: Tinggi efektif perkuatan geser FRP, mm
D	: Pengaruh dari beban mati
E	: Pengaruh beban seismic
E_c	: Modulus elastisitas beton, MPa
E_f	: Modulus elastisitas tarik FRP, MPa
E_h	: Pengaruh beban seismic horizontal
E_s	: Modulus elastisitas baja, MPa
E_v	: Pengaruh beban seismic vertikal
E_2	: Kemiringan bagian lurus dari model tegangan regangan untuk beton terkekang FRP, MPa
f_c	: Tegangan tekan beton, MPa
f'_c	: Kekuatan tekan beton yang disyaratkan, MPa
f'_{cc}	: Kekuatan tekan beton terkekang, MPa
f_{fu}	: Kekuatan tarik ultimit rencana FRP, MPa
f_{fu}^*	: Kekuatan tarik ultimit material FRP berdasarkan keterangan manufaktur, MPa
f_{fe}	: Tegangan efektif di dalam FRP, MPa
f_l	: Tekanan kekangan maksimum karena selubung FRP, MPa
f_s	: Tegangan tulangan baja non prategang, MPa
f_y	: Kekuatan leleh tulangan yang disyaratkan, MPa
F_a	: Koefisien situs untuk periode pendek yaitu pada periode 0,2 detik
F_v	: Koefisien situs untuk periode panjang (pada periode 1 detik)
h	: Tinggi atau tebal penampang struktur, mm
h_n	: Batasan tinggi struktur, m
I_{cr}	: Momen inersia penampang retak yang ditransfer ke beton, 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_1	: Faktor modifikasi untuk k_v , dengan memperhitungkan kekuatan tekan beton
k_2	: Faktor modifikasi untuk k_v , dengan memperhitungkan skema pembungkusan
l_c	: Panjang komponen tekan, mm
l_n	: Panjang bentang bersih yang diukur muka ke muka tumpuan, mm
l_u	: Panjang tak tertumpu komponen struktur tekan, mm
L	: Pengaruh beban hidup
L_e	: Panjang lekatan aktif laminasi FRP, mm
L_r	: Pengaruh beban hidup di atap
M_n	: Kekuatan lentur nominal pada penampang, Nmm
M_{nb}	: Kekuatan lentur nominal balok, Nmm
M_{nc}	: Kekuatan lentur nominal kolom, Nmm
M_{nf}	: Kontribusi perkuatan FRP terhadap kekuatan lentur nominal, Nmm
M_{ns}	: Kontribusi tulangan baja terhadap kekuatan lentur nominal, Nmm
M_u	: Momen terfaktor pada penampang, Nmm
MCE_R	: Gempa maksimum yang dipertimbangkan risiko-tertarget
n	: Jumlah tulangan / jumlah lapisan perkuatan FRP
P_n	: Kekuatan aksial nominal penampang, N
P_u	: Gaya aksial terfaktor, N
Q	: Indeks stabilitas untuk suatu tingkat
Q_E	: Pengaruh gaya seismik horizontal
r	: Radius girasi penampang komponen struktur tekan, mm
R	: Kapasitas rasio
S	: Spasi tulangan, mm
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_s	: Parameter percepatan respons spektral MCE dari peta gempa pada periode pendek, r
S_1	: Parameter percepatan respons spektral MCE dari peta gempa pada periode 1 detik
S_{MS}	: Parameter respons spektral percepatan gempa MCE_R terpetakan untuk periode pendek
S_{M1}	: Parameter respons spektral percepatan gempa MCE_R terpetakan untuk periode 1,0 detik
t_f	: Tebal nominal satu lapis perkuatan FRP, mm
T	: Periode getar fundamental struktur, detik
T_a	: Periode fundamental pendekatan, detik
T_L	: Peta transisi periode Panjang, detik
V	: Geser desain total di dasar struktur dalam arah yang ditinjau, N
V_c	: Kekuatan geser nominal yang disediakan oleh beton, N
V_e	: Gaya geser desain untuk kombinasi pembebanan termasuk pengaruh gempa, N
V_f	: Kekuatan geser nominal oleh sitrup FRP, N
V_n	: Kekuatan geser nominal, N
V_s	: Kekuatan geser nominal yang diberikan oleh penulangan geser, N
V_u	: Gaya geser terfaktor penampang, N
V_{us}	: Gaya geser horizontal terfaktor pada suatu tingkat, N
w_f	: Lebar tulangan FRP per lapisan, mm
w_u	: Beban terfaktor per satuan panjang balok, N/mm
W	: Berat seismik efektif bangunan, N
x	: Tingkat yang sedang ditinjau
y_t	: Koordinat vertikal pada zona tekan yang diukur dari sumbu netral berdasarkan regangan transisi ϵ_t , mm
Δ	: Simpangan antar tingkat desain
Δ_a	: Simpangan antar tingkat yang diizinkan

Δ_0	: Defleksi lateral relatif antara bagian atas dan bawah suatu tingkat akibat V_{us} , mm
β_1	: Nilai distribusi tegangan beton
δ_{xe}	: Defleksi pada lokasi yang disyaratkan
ε_{bi}	: Regangan subtrak beton saat pemasangan tulangan FRP, mm/mm
ε_c	: Regangan beton, mm/mm
ε_{ccu}	: Regangan tekan aksial ultimit beton
ε_{fd}	: Regangan letakan tulangan FRP eksternal, mm/mm
ε_{fe}	: Regangan efektif tulangan FRP saat runtuh, mm/mm
ε_{fu}	: Regangan runtuh pada tulangan FRP, mm/mm
ε_{fu}^*	: Regangan runtuh ultimit pada tulangan FRP, mm/mm
ε_s	: Regangan tulangan non prategang, mm/mm
ε'_t	: Ragangan transisi pada kurva tegangan – regangan tulangan FRP, mm/mm
κ_a	: Faktor efisiensi tulangan FRP dalam menentukan f'_{cc}
κ_b	: Faktor efisiensi tulangan FRP dalam menentukan ε_{cc}
ρ	: Rasio tulangan terpasang
ρ	: Faktor redudansi struktur
λ	: Faktor modifikasi terhadap jenis beton
$\emptyset$	: Faktor reduksi
Ω_0	: faktor kuat lebih system
Ψ_f	: Faktor reduksi kekuatan tulangan FRP

ABSTRAK

Indonesia merupakan wilayah rawan gempa bumi sehingga bangunan gedung perlu dievaluasi untuk mengetahui kemampuan struktur dalam menahan beban gravitasi dan gempa sesuai standar yang berlaku. Penambahan lantai pada bangunan gedung dapat meningkatkan beban dan gaya dalam pada elemen struktur sehingga kapasitas balok dan kolom berpotensi tidak memenuhi persyaratan kekuatan struktur. Oleh karena itu, diperlukan perkuatan untuk meningkatkan kapasitas elemen struktur. Salah satu metode perkuatan yang dapat digunakan adalah Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP). Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi kapasitas elemen struktur balok dan kolom pada bangunan hotel di Ngampilan, Yogyakarta yang mengalami penambahan satu lantai serta menganalisis pengaruh perkuatan menggunakan CFRP.

Analisis dilakukan menggunakan perangkat lunak ETABS untuk memperoleh gaya dalam struktur. Evaluasi struktur dilakukan dengan membandingkan gaya ultimit terhadap kapasitas nominal elemen struktur yang dikalikan faktor reduksi kekuatan sesuai SNI 2847:2019. Elemen struktur dinyatakan memenuhi persyaratan apabila memiliki rasio kapasitas kurang dari satu ($R < 1$).

Hasil analisis menunjukkan bahwa beberapa balok dan kolom tidak memenuhi kapasitas lentur, geser, serta aksial-lentur akibat penambahan lantai. Perkuatan menggunakan CFRP sesuai SNI 8971:2021 terbukti efektif meningkatkan kapasitas struktur. Pada balok, CFRP laminate tape meningkatkan kapasitas lentur sebesar 28% hingga 131%, sedangkan CFRP wrap meningkatkan kapasitas geser sebesar 29% hingga 45%. Pada kolom, CFRP wrap meningkatkan kapasitas aksial sebesar 0,27% hingga 334%, kapasitas lentur sebesar 14% hingga 443%, serta kapasitas geser sebesar 15% hingga 148%. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penggunaan CFRP efektif meningkatkan kapasitas elemen struktur sehingga memenuhi persyaratan kekuatan struktur dengan nilai rasio kapasitas kurang dari satu ($R < 1$).

Kata kunci: balok, kolom, rasio kapasitas, perkuatan struktur, CFRP

ABSTRACT

Indonesia is an earthquake-prone region; therefore, building structures need to be evaluated to determine their ability to resist gravity and seismic loads in accordance with applicable standards. The addition of floors to a building can increase loads and internal forces acting on structural elements, causing the capacity of beams and columns to potentially not satisfy structural strength requirements. Therefore, strengthening is required to improve the capacity of structural elements. One strengthening method that can be used is Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP). This study aims to evaluate the capacity of beam and column structural elements in a hotel building in Ngampilan, Yogyakarta, which experienced the addition of one floor; and to analyze the effect of strengthening using CFRP.

The analysis was carried out using ETABS software to obtain internal forces in the structure. Structural evaluation was conducted by comparing the ultimate forces with the nominal capacities of structural elements multiplied by the strength reduction factor in accordance with SNI 2847:2019. Structural elements were considered to satisfy the requirements if they had a capacity ratio of less than one ($R < 1$).

The analysis results showed that several beams and columns did not satisfy flexural, shear, and axial-flexural capacities due to the additional floor. Strengthening using CFRP in accordance with SNI 8971:2021 proved effective in improving structural capacity. In beams, CFRP laminate tape increased flexural capacity by 28% to 131%, while CFRP wrap increased shear capacity by 29% to 45%. In columns, CFRP wrap increased axial capacity by 0.27% to 334%, flexural capacity by 14% to 443%, and shear capacity by 15% to 148%. The results indicate that the use of CFRP is effective in improving the capacity of structural elements so that they satisfy structural strength requirements with a capacity ratio value of less than one ($R < 1$).

Keywords: *beams, columns, capacity ratio, structural strengthening, CFRP*

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Indonesia merupakan negara yang berada dalam kawasan cincin api pasifik dan dilalui oleh tiga lempeng tektonik utama, yaitu lempeng Eurasia, lempeng Pasifik dan lempeng Indo-Australia. Posisi geografis ini menyebabkan Indonesia memiliki tingkat kerentanan yang tinggi terhadap bencana gempa bumi, baik yang bersifat tektonik maupun vulkanik. Salah satu wilayah yang tergolong rawan gempa adalah Provinsi Daerah Istimewa Yogyakarta. Kondisi tersebut menyebabkan bangunan gedung yang berada di Indonesia harus dirancang dan direncanakan sebagai bangunan tahan gempa, termasuk bangunan yang telah berdiri lama juga harus dievaluasi untuk menjamin keandalan bangunan gedung tersebut.

Peningkatan kebutuhan ruang yang menyebabkan penambahan lantai merupakan salah satu bentuk perubahan struktur yang dapat mempengaruhi kinerja bangunan. Penambahan lantai mengakibatkan bertambahnya beban gravitasi dan beban gempa yang bekerja pada struktur sehingga meningkatkan momen lentur, gaya geser, dan gaya aksial pada elemen struktur, terutama balok dan kolom. Kondisi tersebut berpotensi menyebabkan kapasitas elemen struktur yang sebelumnya memenuhi persyaratan menjadi tidak lagi memenuhi ketentuan kekuatan berdasarkan standar yang berlaku. Penelitian oleh Nicko (2019) menunjukkan bahwa penambahan lantai pada Gedung Fakultas Teknik Universitas Islam Riau menyebabkan peningkatan beban dan momen pada kolom sehingga diperlukan evaluasi ulang terhadap kapasitas struktur.

Pada penelitian ini, objek yang ditinjau adalah bangunan gedung hotel di Ngampilan, Yogyakarta yang dibangun pada tahun 2012 dan mengalami penambahan satu lantai akibat peningkatan kebutuhan ruang. Penambahan lantai tersebut dapat menyebabkan struktur eksisting menerima beban yang lebih besar sehingga diperlukan evaluasi terhadap kapasitas balok dan kolom untuk mengetahui apakah struktur masih memenuhi standar yang berlaku serta menentukan kebutuhan

perkuatan apabila diperlukan. Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh Wandaning (2023) mengenai evaluasi struktur gedung bertingkat di daerah Denpasar, Bali menunjukkan bahwa balok mengalami kegagalan dalam menahan momen lentur dan gaya geser akibat penambahan lantai, sementara kolom tidak mampu menahan beban aksial tambahan dan tidak memenuhi prinsip *strong column weak beam*. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa penambahan lantai dapat menurunkan kinerja struktur eksisting sehingga diperlukan tindakan perkuatan struktur untuk menjamin keselamatan dan kelayakan bangunan.

Menurut Khoeri (2021), perkuatan adalah suatu tindakan modifikasi struktur yang mungkin dilakukan sebelum terjadi kerusakan, dengan tujuan untuk menambah kekuatan atau kemampuan bangunan untuk memikul beban – beban yang lebih besar. *Fiber Reinforced Polymer* (FRP) merupakan salah satu alternatif perkuatan yang dapat dilakukan pada elemen struktur bangunan eksisting. Perkuatan struktur menggunakan FRP pada gedung rumah sakit Dr. Cipto Mangunkusumo *Central Medical Unit 3* Jakarta Pusat dapat meningkatkan kapasitas geser balok sebesar 67% serta kapasitas aksial dan lentur kolom sebesar 40% (Salam, 2023). Salah satu jenis FRP yang merupakan alternatif efektif dan efisien untuk memperkuat elemen struktur gedung adalah *Carbon Fiber Reinforced Polymer* (CFRP). *Carbon Fiber Reinforced Polymer* (CFRP) merupakan material komposit buatan yang terdiri dari matriks resin sebagai pengikat dan serat karbon sebagai penguat, yang dirancang untuk meningkatkan kapasitas struktur bangunan gedung. CFRP dapat meningkatkan kapasitas momen lentur balok beton dengan mengatasi kelemahan beton dalam hal kekuatan tarik. Selain itu, CFRP juga berfungsi untuk meningkatkan gaya geser pada struktur balok maupun kolom dengan menambahkan material CFRP pada bagian yang membutuhkan daerah geser serta dapat meningkatkan kapasitas beban aksial pada struktur kolom dengan menambahkan material CFRP pada bagian yang dibutuhkan (Hirwo & Rozak, 2022).

Oleh karena itu, pada tugas akhir ini penulis melakukan evaluasi terhadap elemen struktur balok dan kolom pada bangunan gedung hotel di Ngampilan, Yogyakarta yang dievaluasi melalui analisis struktur menggunakan perangkat lunak

ETABS. Analisis elemen balok berupa gaya – gaya dalam yang terjadi pada struktur bangunan gedung hotel yaitu kapasitas lentur dan geser. Sedangkan analisis elemen kolom berupa gaya – gaya dalam yang bekerja pada bangunan gedung hotel yaitu kapasitas aksial, lentur dan geser. Hasil kapasitas elemen struktur bangunan gedung hotel yang diperoleh kemudian dievaluasi untuk menentukan perlu atau tidaknya penambahan perkuatan stuktur. Evaluasi tersebut didasarkan pada nilai rasio kapasitas elemen struktur. Rasio kapasitas merupakan perbandingan antara momen atau gaya ultimit yang terjadi pada suatu elemen struktur dengan kapasitas nominal elemen tersebut yang telah dikalikan faktor reduksi sesuai standar yang berlaku. Elemen balok maupun kolom dinyatakan mampu menahan gaya – gaya dalam yang bekerja pada elemen tersebut ketika memiliki nilai rasio kapasitas kurang dari satu ($R < 1$). Akan tetapi, jika nilai rasio kapasitas lebih dari satu ($R > 1$) dinyatakan tidak mampu sehingga memerlukan penambahan perkuatan struktur berupa CFRP yang sesuai dengan SNI 8971:2021.

Berdasarkan hal tersebut, menjadikan bahan pertimbangan penulis untuk melakukan penelitian tentang evaluasi dan perkuatan bangunan gedung eksisting menggunakan *Carbon Fiber Reinforced Polymer* (CFRP). Tujuan penelitian ini adalah untuk mengevaluasi kapasitas kekuatan elemen struktur balok dan kolom pada bangunan gedung hotel di Ngampilan, Yogyakarta yang mengalami penambahan beban serta menilai pengaruh penggunaan CFRP sebagai perkuatan dalam meningkatkan kapasitas kekuatan elemen struktur yang sesuai dengan standar yang berlaku.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang di atas, beberapa masalah yang menjadi fokus dalam penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Bagaimana kemampuan kapasitas kekuatan elemen struktur balok dan kolom pada bangunan gedung hotel di Ngampilan, Yogyakarta akibat penambahan beban karena penambahan lantai?

2. Bagaimana pengaruh perkuatan menggunakan CFRP terhadap peningkatan kapasitas kekuatan elemen struktur balok dan kolom pada bangunan gedung hotel di Ngampilan, Yogyakarta?

1.3 Tujuan Penelitian

Berdasarkan pada rumusan masalah di atas, tujuan dilakukannya penelitian adalah sebagai berikut.

1. Mengetahui kemampuan kapasitas kekuatan elemen struktur balok dan kolom pada bangunan gedung hotel di Ngampilan, Yogyakarta akibat penambahan beban karena pertambahan lantai.
2. Mengetahui pengaruh perkuatan menggunakan CFRP terhadap peningkatan kapasitas kekuatan elemen struktur balok dan kolom pada bangunan gedung hotel di Ngampilan, Yogyakarta.

1.4 Manfaat Penelitian

Berdasarkan tujuan penelitian yang telah di rumuskan, maka diperoleh manfaat penelitian yang dilakukan adalah sebagai berikut.

1. Memberikan wawasan dan ilmu pengetahuan tentang kemampuan kapasitas kekuatan kolom dan balok pada bangunan gedung eksisting, serta pentingnya evaluasi struktur setelah dilakukan penambahan beban.
2. Menambah ilmu dan pemahaman akan manfaat dan efektivitas penggunaan CFRP dalam meningkatkan kapasitas kekuatan elemen struktur.

1.5 Batasan Penelitian

Batasan penelitian yang dilakukan untuk memberikan suatu parameter batas dan acuan agar sesuai dengan tujuan penelitian yang dilakukan. Adapun batasan penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Objek penelitian adalah bangunan gedung eksisting yang berfungsi sebagai hotel yang terletak di Ngampilan, Yogyakarta
2. Standar dan peraturan yang digunakan pada penelitian ini adalah sebagai berikut.

- a. SNI 1726:2019, Tata cara perencanaan ketahanan gempa untuk struktur bangunan gedung dan non gedung.
 - b. SNI 1727:2020, Beban desain minimum dan kriteria terkait untuk bangunan gedung dan struktur lain.
 - c. SNI 2847:2019, Persyaratan beton struktural untuk bangunan gedung dan penjelasan.
 - d. SNI 8971:2021, Panduan perancangan dan pelaksanaan sistem lembaran serat berpolimer terlekat eksternal untuk perkuatan struktur beton.
 - e. Peraturan Pembebanan Indonesia Untuk Gedung 1983
3. Analisis dilakukan pada struktur atas bangunan gedung yaitu kolom dan balok.
 4. Perkuatan hanya menggunakan *Carbon Fiber Reinforced Polymer* (CFRP) tanpa membandingkannya dengan metode perkuatan lainnya.
 5. Perangkat lunak yang digunakan dalam analisis adalah ETABS.
 6. Tangga tidak dimodelkan tetapi dihitung sebagai beban merata pada balok
 7. Dinding tidak dimodelkan tetapi dihitung sebagai beban merata pada balok terluar. Untuk dinding bagian dalam diasumsikan sebagai beban partisi pada pelat lantai
 8. Analisis elemen struktur beton bertulang hanya mencakup kapasitas lentur dan geser pada balok serta beban aksial, lentur dan geser pada kolom, sedangkan torsi tidak diperhitungkan.
 9. Gedung dimodelkan mulai dari lantai satu hingga lantai tujuh, yang terdiri atas enam lantai eksisting dan satu lantai tambahan yang direncanakan mengikuti konfigurasi lantai enam.
 10. Kondisi struktur bangunan bawah (*basement*) dan pondasi tidak ditinjau.
 11. Rencana Anggaran Biaya (RAB) tidak diperhitungkan.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitian Terdahulu

Penelitian tentang perkuatan elemen struktur bangunan gedung eksisting menggunakan *Carbon Fiber Reinforced Polymer* (CFRP) telah dilakukan dan dikaji menggunakan metode terkait oleh banyak peneliti sebelumnya. Hal tersebut dapat digunakan sebagai referensi dalam melakukan penelitian ini. Berikut ini merupakan beberapa referensi dari penelitian terdahulu dan penelitian yang dilakukan.

1. Pengaruh Pendekatan Pemodelan FE terhadap Kerentanan Bangunan Sekolah RC dan Usulan Intervensi *Retrofitting* CFRP (Valentina et al., 2019)

Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi kerentanan seismik bangunan sekolah dan menilai efektivitas intervensi perkuatan menggunakan CFRP pada sambungan balok – kolom. Pada penelitian ini diterapkan tiga model numerik berbeda yaitu model platisitas terpusat, model platisitas terdistribusi dan model elemen hingga 3D. Analisis statis non linier (*pushover*) dilakukan untuk menilai perilaku seismik global struktur.

Hasil yang diperoleh dalam penelitian ini adalah model platisitas terdistribusi kurang cocok untuk mempresentasikan masalah geser, sedangkan model platisitas terpusat lebih mendekati kenyataan meskipun tidak mempertimbangkan interaksi antara gaya. Model elemen hingga 3D memberikan representasi paling akurat untuk menggambarkan mekanisme kompleks yang terjadi di panel sambungan. Intervensi perkuatan CFRP terbukti meningkatkan kapasitas perpindahan struktur dan dapat meningkatkan kinerja seismik tanpa mengubah kekakuan struktural secara signifikan.

2. Kinerja Seismik Bangunan RC dengan Sambungan Balok – Kolom yang Ditingkatkan Menggunakan Laminasi FRP (Alhaddad et al., 2021)

Penelitian ini bertujuan untuk menyelidiki efek perkuatan CFRP pada sambungan balok-kolom terhadap respon dinamik bangunan yang mengalami defisiensi seismik. Pada penelitian ini dilakukan analisis riwayat waktu *pushover* dan non linear dengan bantuan program SAP 2000 digunakan untuk mengevaluasi kinerja seismik bangunan yang diperkuat dengan CFRP. Model bangunan dibuat dengan elemen rangka non linear yang memiliki engsel plastis. Hasil yang diperoleh dalam penelitian ini menunjukkan bahwa sambungan balok – kolom yang diperkuat dengan CFRP dapat menunda pembentukan engsel plastis dan secara signifikan meningkatkan kinerja seismik bangunan. Perkuatan CFRP berhasil mengontrol deformasi inelastis pada lokasi engsel plastis yang kritis tanpa mempengaruhi respon dinamik keseluruhan bangunan. Penelitian ini merekomendasikan penggunaan CFRP sebagai metode efektif untuk rehabilitasi seismik bangunan yang kurang kuat.

3. Analisis dan Desain *Retrofitting* Struktur Gedung Apartemen *The Conexio LRT Superblock* Menggunakan Material *Carbon Fiber Reinforced Polymer* Akibat Pembebanan Gempa SNI 1726-201X (Hannanto, 2020)

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis kekuatan struktur gedung terhadap pembebanan gempa baru dan merencanakan *retrofitting* menggunakan CFRP jika diperlukan pada balok, kolom dan dinding geser. Pada penelitian ini dilakukan pengumpulan data gedung untuk menganalisis struktur dan menentukan kekuatan struktur eksisting dengan bantuan program ETABS V.16. Kemudian, dilakukan perbandingan antara desain struktur eksisting dan desain baru berdasarkan SNI 1726-201X.

Hasil yang diperoleh dalam penelitian ini menunjukkan bahwa struktur eksisting tidak mampu menahan beban gempa sesuai dengan peraturan terbaru. Perkuatan menggunakan CFRP diperlukan pada bagian – bagian tertentu dari struktur untuk meningkatkan kapasitas dan keamanan gedung. Penelitian ini memberikan rekomendasi untuk implementasi *retrofitting* sebagai solusi untuk meningkatkan ketahanan seismik gedung.

4. Analisis dan Desain Bangunan Bertingkat yang Diperkuat dengan *Carbon Fiber Reinforced Polymer* (Natraj et al., 2022)

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis bangunan dengan dan tanpa sistem penahan lateral (dinding geser) dan mengevaluasi kinerja elemen struktur yang telah ditingkatkan dengan CFRP. Pada penelitian ini analisis dilakukan dengan membungkus balok dan kolom yang mengalami defisiensi menggunakan CFRP *sheet*. Pemodelan struktur dilakukan dengan dan tanpa dinding geser untuk membandingkan kinerja dengan bantuan program ETABS.

Hasil yang diperoleh dalam penelitian ini menunjukkan bahwa perpindahan maksimum pada bangunan tanpa dinding geser melebihi batas yang diizinkan, sedangkan dengan dinding geser, perpindahan maksimum dapat dibatasi hingga nilai yang aman. Penggunaan CFRP sebagai perkuatan menunjukkan peningkatan signifikan dalam kapasitas dukung dan kekuatan lateral struktur. Penelitian ini menyimpulkan bahwa perkuatan dengan CFRP dan penambahan dinding geser sangat efektif dalam meningkatkan kinerja seismik bangunan bertingkat.

5. Analisis Perkuatan Struktur Balok Menggunakan *Carbon Fiber Reinforced Polymer* (CFRP) pada Bangunan Villa PT. Bangun Karya Filadelfia di Kota Denpasar – Bali (Yulianto, 2024)

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis dan mengevaluasi struktur balok yang mengalami kerusakan dan menentukan jumlah penampang yang perlu diperkuat serta jumlah CFRP yang dibutuhkan untuk memenuhi kebutuhan pada struktur yang tidak aman. Pada penelitian dilakukan analisis kuantitatif terhadap struktur eksisting menggunakan metode Sistem Rangka Pemikul Momen Khusus (SRPMK). Pengumpulan data melalui pengukuran di lapangan dan analisis menggunakan program ETABS.

Hasil yang diperoleh dalam penelitian ini menunjukkan bahwa struktur balok yang dianalisis menunjukkan rasio yang melebihi ketentuan, sehingga memerlukan perkuatan. Penggunaan CFRP terbukti efektif dalam meningkatkan kekuatan tarik elemen struktur, dengan spesifikasi CFRP yang

digunakan memiliki kekuatan tarik hingga 3400 MPa. Setelah perkuatan, balok yang sebelumnya tidak memenuhi kriteria menjadi aman untuk digunakan Kembali.

2.2 Perbandingan Penelitian Terdahulu dan Penelitian Sekarang

Berdasarkan penelitian terdahulu baik bersumber dari tugas akhir, jurnal nasional hingga jurnal internasional, yang nantinya akan dibandingkan dengan penelitian yang dilakukan oleh penulis. Adapun perbandingan penelitian dengan penelitian yang akan dilakukan, dapat dilihat pada Tabel 2.1 berikut

Tabel 2. 1 Perbandingan Penelitian Terdahulu dan Penelitian Sekarang

Penulis Parameter	G. Valentina, Marina Poiani, Francesco Clementi, Giuseppe Pace, Stefano Lenci (2019)	Mohammad S. Alhaddad, Abobaker S. Yahya, Mohammed Al Rubaidi, Aref A. Abadel (2020)	Alifiandi Hannanto (2020)	K. Natraj, Elavenil S, S Ragavendra (2022)	Udien Yulianto (2024)	Zulfika (2026)
Judul Penelitian	Pengaruh Pendekatan Pemodelan FE terhadap Kerentanan Bangunan Sekolah RC dan Usulan Intervensi <i>Retrofitting</i> CFRP.	Kinerja Seismik Bangunan RC dengan Sambungan Balok – Kolom yang Ditingkatkan Menggunakan Laminasi FRP.	Analisis dan Desain <i>Retrofitting</i> Struktur Gedung Apartemen <i>The Conexio LRT Superblock</i> Menggunakan Material <i>Carbon Fiber Reinforced Polymer</i> Akibat Pembebanan Gempa SNI 1726-201X.	Analisis dan Desain Bangunan Bertingkat yang Diperkuat dengan <i>Carbon Fiber Reinforced Polymer</i> .	Analisis Perkuatan Struktur Balok Menggunakan <i>Carbon Fiber Reinforced Polymer</i> (CFRP) pada Bangunan Villa PT. Bangun Karya Filadelfia di Kota Denpasar – Bali.	Evaluasi dan Perkuatan Elemen Struktur Balok dan Kolom Bangunan Hotel Di Yogyakarta dengan Menggunakan <i>Carbon Fiber Reinforced Polymer</i> (CFRP).
Tujuan Penelitian	Untuk mengevaluasi kerentanan seismik bangunan sekolah dan menilai efektivitas intervensi perkuatan menggunakan CFRP pada sambungan balok – kolom.	Untuk menyelidiki efek perkuatan CFRP pada sambungan balok-kolom terhadap respon dinamik bangunan yang mengalami defisiensi seismik.	Untuk menganalisis kekuatan struktur Gedung terhadap pembebanan gempa baru dan merencanakan <i>retrofitting</i> menggunakan CFRP jika diperlukan pada balok, kolom dan dinding geser.	Untuk menganalisis bangunan dengan dan tanpa sistem penahan lateral (dinding geser) dan mengevaluasi kinerja elemen struktur yang telah ditingkatkan dengan CFRP.	Untuk menganalisis dan mengevaluasi struktur balok yang mengalami kerusakan dan menentukan jumlah penampang yang perlu diperkuat serta jumlah CFRP yang dibutuhkan untuk memenuhi kebutuhan pada struktur yang tidak aman.	Untuk mengevaluasi kapasitas kekuatan elemen struktur balok dan kolom pada bangunan hotel di Yogyakarta yang mengalami penambahan beban serta menilai pengaruh penggunaan CFRP sebagai perkuatan dalam meningkatkan kapasitas kekuatan elemen struktur yang sesuai dengan standar terbaru.

Lanjutan Tabel 2.1 Perbandingan Penelitian Terdahulu dan Penelitian Sekarang

Penulis Parameter	G. Valentina, Marina Poiani, Francesco Clementi, Giuseppe Pace, Stefano Lenci (2019)	Mohammad S. Alhaddad, Abobaker S. Yahya, Mohammed Al Rubaidi, Aref A. Abadel (2020)	Alifiandi Hannanto (2020)	K. Natraj, Elavenil S, S Ragavendra (2022)	Udien Yulianto (2024)	Zulfika (2026)
Metode Penelitian	Menerapkan tiga model numerik berbeda yaitu model platisitas terpusat, model platisitas terdistribusi dan model elemen hingga 3D. Analisis statis non linear (<i>pushover</i>) dilakukan untuk menilai perilaku seismik global struktur.	Analisis riwayat waktu <i>pushover</i> dan non linear dengan bantuan program SAP 2000 digunakan untuk mengevaluasi kinerja seismik bangunan yang diperkuat dengan CFRP. Model bangunan dibuat dengan elemen rangka non linear yang memiliki engsel platis.	Pengumpulan data Gedung untuk menganalisis struktur dan menentukan kekuatan struktur eksisting dengan bantuan program ETABS V.16. Kemudian, dilakukan perbandingan antara desain struktur eksisting dan desain baru berdasarkan SNI 1726-201X.	Analisis dilakukan dengan membungkus balok dan kolom yang mengalami defisiensi menggunakan CFRP <i>sheet</i> . Pemodelan struktur dilakukan dengan dan tanpa dinding geser untuk membandingkan kinerja dengan bantuan program ETABS.	Analisis kuantitatif terhadap struktur eksisting menggunakan metode Sistem Rangka Pemikul Momen Khusus (SRPMK). Pengumpulan data melalui pengukuran di lapangan dan analisis menggunakan program ETABS.	Analisis dilakukan dengan menggunakan bantuan program ETABS untuk mengetahui kapasitas <i>ultimate</i> elemen struktur. Selain itu, dilakukan perhitungan kapasitas nominal elemen struktur yang mengacu pada SNI 2847:2019. Kemudian dilakukan evaluasi sehingga dapat mengidentifikasi elemen struktur yang membutuhkan perkuatan. Perkuatan struktur dilakukan dengan menggunakan CFRP sesuai dengan SNI 9871-2021.

Lanjutan Tabel 2.1 Perbandingan Penelitian Terdahulu dan Penelitian Sekarang

Penulis Parameter	G. Valentina, Marina Poiani, Francesco Clementi, Giuseppe Pace, Stefano Lenci (2019)	Mohammad S. Alhaddad, Abobaker S. Yahya, Mohammed Al Rubaidi, Aref A. Abadel (2020)	Alifiandi Hannanto (2020)	K. Natraj, Elavenil S, S Ragavendra (2022)	Udien Yulianto (2024)	Zulfika (2026)
Hasil Penelitian	Model platisitas terdistribusi kurang cocok untuk mempresentasikan masalah geser, sedangkan model platisitas terpusat lebih mendekati kenyataan meskipun tidak mempertimbangkan interaksi antara gaya. Model elemen hingga 3D memberikan representasi paling akurat untuk menggambarkan mekanisme kompleks yang terjadi di panel sambungan. Intervensi perkuatan CFRP terbukti meningkatkan kapasitas perpindahan struktur dan dapat meningkatkan kinerja seismik tanpa mengubah kekakuan struktural secara signifikan.	Menunjukkan bahwa sambungan balok – kolom yang diperkuat dengan CFRP dapat menunda pembentukan engsel plastis dan secara signifikan meningkatkan kinerja seismik bangunan. Perkuatan CFRP berhasil mengontrol deformasi inelastis pada Lokasi engsel plastis yang kritis tanpa mempengaruhi respon dinamik keseluruhan bangunan. Penelitian ini merekomendasikan penggunaan CFRP sebagai metode efektif untuk rehabilitasi seismik bangunan yang kurang kuat.	Menunjukkan bahwa struktur eksisting tidak mampu menahan beban gempa sesuai dengan peraturan terbaru. Perkuatan menggunakan CFRP diperlukan pada bagian – bagian tertentu dari struktur untuk meningkatkan kapasitas dan keamanan gedung. Penelitian ini memberikan rekomendasi untuk implementasi <i>retrofitting</i> sebagai solusi untuk meningkatkan ketahanan seismik gedung.	Menunjukkan bahwa perpindahan maksimum pada bangunan tanpa dinding geser melebihi batas yang diizinkan, sedangkan dengan dinding geser, perpindahan maksimum dapat dibatasi hingga nilai yang aman. Penggunaan CFRP sebagai perkuatan menunjukkan peningkatan signifikan dalam kapasitas dukung dan kekuatan lateral struktur. Penelitian ini menyimpulkan bahwa perkuatan dengan CFRP dan penambahan dinding geser sangat efektif dalam meningkatkan kinerja seismik bangunan bertingkat.	Menunjukkan bahwa struktur balok yang dianalisis menunjukkan rasio yang melebihi ketentuan, sehingga memerlukan perkuatan. Penggunaan CFRP terbukti efektif dalam meningkatkan kekuatan tarik elemen struktur, dengan spesifikasi CFRP yang digunakan memiliki kekuatan tarik hingga 3400 MPa. Setelah perkuatan, balok yang sebelumnya tidak memenuhi kriteria menjadi aman untuk digunakan kembali.	-

2.3 Keaslian Penelitian

Berdasarkan penelitian – penelitian terdahulu yang telah diuraikan, penelitian mengenai evaluasi dan perkuatan bangunan gedung eksisting sudah cukup banyak dilakukan, namun untuk penelitian tentang evaluasi dan perkuatan bangunan gedung eksisting menggunakan *Carbon Fiber Reinforced Polymer* (CFRP) masih sangat jarang dilakukan.

Adapun detail bukti penelitian yang dilakukan merupakan karya asli dan bukan bentuk dari karya plagiasi adalah sebagai berikut.

1. Data yang digunakan merupakan gambar denah berdasarkan *as built drawing* bangunan gedung hotel di Ngampilan, Yogyakarta.
2. Perbedaan penelitian yang dilakukan dengan penelitian – penelitian yang terdahulu adalah model gedung yang dianalisis, lokasi gedung yang dianalisis yaitu di Ngampilan, Kota Yogyakarta, fungsi bangunan sebagai gedung hotel dengan total jumlah tujuh lantai yang terdiri atas enam lantai eksisting dan satu lantai tambahan yang direncanakan mengikuti konfigurasi lantai enam.
3. Analisis dilakukan dengan menggunakan bantuan program ETABS yang digunakan untuk mengetahui kapasitas *ultimate* elemen struktur. Selain itu, dilakukan perhitungan kapasitas nominal elemen struktur yang mengacu pada SNI 2847:2019. Kemudian dilakukan evaluasi sehingga dapat mengidentifikasi elemen struktur yang membutuhkan perkuatan. Perkuatan struktur dilakukan dengan menggunakan CFRP sesuai dengan SNI 8971-2021.

Berdasarkan detail bukti di atas maka dapat dikatakan bahwa penelitian yang dilakukan dapat dipertanggungjawabkan keasliannya.

BAB III

LANDASAN TEORI

3.1 Standar dan Peraturan yang digunakan

Perhitungan analisis desain bangunan gedung akan berfokus kepada dua elemen struktur beton bertulang yaitu balok dan kolom. Analisis bangunan gedung dalam tugas akhir ini mengacu pada standar dan peraturan yang berlaku sebagai berikut.

1. SNI 2847:2019
Persyaratan beton struktural untuk bangunan gedung dan penjelasan. Standar ini digunakan untuk menganalisis batas ultimit elemen beton bertulang.
2. SNI 1726:2019
Tata cara perencanaan ketahanan gempa untuk struktur bangunan gedung dan non gedung. Standar ini digunakan untuk memperhitungkan beban gempa pada bangunan gedung.
3. SNI 1727:2020
Beban desain minimum dan kriteria terkait untuk bangunan gedung dan struktur lain. Standar ini digunakan untuk memperhitungkan analisis pembebanan.
4. SNI 8971:2021
Panduan perancangan dan pelaksanaan sistem lembaran serat berpolimer terlekat eksternal untuk perkuatan struktur beton. Standar ini digunakan untuk mendesain beton menggunakan perkuatan struktur *Fiber Reinforced Polymer* (FRP).
5. Peraturan Pembebanan Indonesia Untuk Gedung 1983
Peraturan ini digunakan sebagai acuan dalam beban sendiri dan komponen gedung dari bahan – bahan bangunan.

3.2 Pembebanan Struktur

Pembebanan struktur merupakan faktor penting dalam perencanaan gedung, karena kesalahan dalam penilaian beban dapat berdampak signifikan terhadap keamanan bangunan. Oleh karena itu, struktur yang dirancang harus memenuhi standar yang berlaku serta memiliki kapasitas untuk menahan seluruh jenis beban yang akan bekerja pada gedung tersebut. Dengan demikian, keamanan konstruksi bangunan dapat terjamin. Beban yang bekerja pada struktur meliputi beban gravitasi, yaitu beban mati dan beban hidup, serta beban gempa.

3.2.1 Beban Mati

Berdasarkan SNI 1727:2020, beban mati merupakan berat seluruh bahan konstruksi bangunan gedung yang terpasang termasuk dinding, lantai, atap, plafon, tangga, dinding partisi tetap, *finishing*, klading gedung dan komponen arsitektural dan struktural lainnya. Beban mati pada suatu struktur gedung dapat dihitung dengan berat sendiri bahan bangunan dan berat sendiri komponen gedung yang dapat dilihat pada Tabel 3.1 dan Tabel 3.2 sebagai berikut.

Tabel 3.1 Berat Sendiri Bahan Bangunan

Komponen	Beban	Satuan
Baja	7850	kg/m ³
Batu alam	2600	kg/ m ³
Batu belah, batu bulat, batu gunung (berat bertumpuk)	1500	kg/ m ³
Batu karang (berat tumpuk)	700	kg/m ³
Batu pecah	1450	kg/m ³
Besi tuang	7250	kg/m ³
Beton	2200	kg/m ³
Beton bertulang	2400	kg/m ³
Kayu (kelas 1)	1000	kg/m ³
Kerikil, koral (kering udara sampai lembap, tanpa diayak)	1650	kg/m ³
Pasangan batu belah, batu bulat, batu gung	2200	kg/m ³
Pasangan batu cetak	2200	kg/m ³
Pasangan batu karang	1450	kg/m ³
Pasir (kering udara sampai lembap)	1600	kg/m ³
Pasir (jenuh air)	1800	kg/m ³
Pasir kerikil, koral (kering udara sampai lembap)	1850	kg/m ³

(Sumber : PPIUG tahun 1983)

Lanjutan Tabel 3.1 Berat Sendiri Bahan Bangunan

Komponen	Beban	Satuan
Tanah, lempung dan lanau (kering udara sampai lembap)	1700	kg/m ³
Tanah, lempung dan lanau (basah)	2000	kg/m ³
Timah hitam (timbang)	1140	kg/m ³

(Sumber : PPIUG tahun 1983)

Tabel 3. 2 Berat Sendiri Komponen Gedung

Komponen	Beban	Satuan
Adukan per cm tebal:		
– Dari semen	21	kg/m ²
– Dari kapur, semen merah atau tras	17	
Aspal, termasuk bahan – bahan mineral penambah, per cm tebal	14	kg/m ²
Dinding pasangan bata merah:		
– Satu batu	450	kg/m ²
– Setengah batu	250	
Dinding pasangan batako		
– Berlubang		
• Tebal dinding 20 cm (HB 20)	200	
• Tebal dinding 10 cm (HB 10)	120	kg/m ²
– Tidak Berlubang		
• Tebal dinding 15 cm	300	
• Tebal dinding 10 cm	200	
Langit – langit dan dinding (termasuk rusuk rusuknya, tanpa penggantung langit – langit atau paku), terpadu dari		
– Semen asbes (eternity dan bahan lain sejenis), dengan tebal maksimum 4 mm	11	kg/m ²
– Kaca, dengan tebal 3-4 mm	10	
Penggantung langit – langit (dari kayu), dengan bentang maksimum 5 m dan jarak s.k.s. minimum 0,80 m	7	kg/m ²
Penutup atap genting dengan reng dan usuk/kaso, per m2 bidang atap	50	kg/m ²
Penutup atap sirap dengan reng dan usuk/kaso, per m2 bidang atap	40	kg/m ²
Penutup atap seng gelombang (BWG 24) tanpa gording	10	kg/m ²
Penutup lantai dari ubin semen Portland, teraso dan beton, tanpa adukan, per cm tebal	21	kg/m ²
Semen asbes gelombang (tebal 5 mm)	11	kg/m ²
Ducting AC dan penerangan	30,6	kg/m ²

(Sumber : PPIUG tahun 1983)

3.2.2 Beban Hidup

Berdasarkan SNI 1727:2020, beban hidup merupakan beban yang diakibatkan oleh pengguna dan penghuni bangunan gedung atau struktur lain yang tidak termasuk beban konstruksi dan beban lingkungan, seperti beban angin, beban hujan, beban gempa, beban banjir, atau beban mati. Beban hidup yang digunakan dalam perancangan bangunan gedung dan struktur lain harus merupakan beban maksimum yang diharapkan terjadi akibat penghunian dan penggunaan bangunan gedung, akan tetapi tidak boleh kurang dari beban merata minimum yang ditetapkan dalam Tabel 4.3-1 SNI 1727:2020. Untuk memastikan analisis yang optimal, beban – beban hidup yang relevan harus diidentifikasi sesuai dengan standar yang berlaku, seperti yang tercantum dalam Tabel 3.3 sebagai berikut.

Tabel 3. 3 Beban Hidup Terdistribusi Merata Minimum L_o dan Beban Hidup Terpusat Minimum

Hunian atau Penggunaan	Merata, L_o psf (kN/m ²)	Terpusat lb (kN)
Apartemen (lihat rumah tinggal)		
Sistem lantai akses		
Ruang Kantor	50 (2,4)	2000 (8,9)
Ruang Komputer	100 (4,79)	2000 (8,9)
Gedung persenjataan dan ruang latihan	150 (7,18)	
Ruang Pertemuan		
Kursi tetap (terikat di lantai)	60 (2,87)	
Lobi	100 (4,79)	
Kursi dapat di pindahkan	100 (4,79)	
Panggung pertemuan	100 (4,79)	
Lantai podium	150 (7,18)	
	100 (4,79)	
Tribun penonton stadion dan arena dengan kursi tetap (terikat di lantai)	60 (2,87)	
Ruang pertemuan lainnya	100 (4,79)	
Balok dan dek	1,5 kali beban hidup untuk daerah yang dilayani. Tidak perlu melebihi 100 psf (4,79 kN/m ²)	
Jalur untuk akses pemeliharaan	40 (1,92)	300 (1,33)
Koridor		
Lantai pertama	100 (4,79)	
Lantai lain	Sama seperti pelayanan hunian kecuali disebutkan lain	
Ruang makan dan restoran	100 (4,79)	
Hunian (lihat rumah tinggal)		
Dudukan mesin elevator (pada area 2 in. × 2 in. [50 mm × 50 mm])		300 (1,33)
Konstruksi pelat lantai <i>finishing</i> ringan (pada area 1 in. × 1 in. [25 mm × 25 mm])		200 (0,89)
Jalur penyelamatan terhadap kebakaran	100 (4,79)	
Hunian satu keluarga saja	40 (1,92)	

(Sumber: SNI 1727:2020)

Lanjutan Tabel 3.3 Beban Hidup Terdistribusi Merata Minimum L_o dan Beban Hidup Terpusat Minimum

Hunian atau Penggunaan	Merata, L_o psf (kN/m ²)	Terpusat lb (kN)
Tangga permanen		Lihat Pasal 4.5.4
Garasi/Parkir (Lihat Pasal 4.10) Mobil penumpang saja Truk dan bus	40 (1,92) Lihat Pasal 4.10.2	Lihat Pasal 4.10.1 Lihat Pasal 4.10.2
Pegangan tangga dan pagar pengaman Batang pegangan	Lihat 4.5.1	Lihat 4.5.1 Lihat 4.5.2
Helipad (Lihat Pasal 4.11) Helikopter dengan berat lepas landas sebesar 3.000 lb (13,35 kN) atau kurang Helikopter dengan berat lepas landas lebih dari 3.000 lb (13,35 kN)	40 (1,92) 60 (2,87)	Lihat Pasal 4.11.2 Lihat Pasal 4.11.2
Rumah sakit Ruang operasi, laboratorium Ruang pasien Koridor diatas lantai pertama	60 (2,87) 40 (1,92) 80 (3,83)	1000 (4,45) 1000 (4,45) 1000 (4,45)
Hotel (lihat rumah tinggal)		
Perpustakaan Ruang baca Ruang penyimpanan Koridor diatas lantai pertama	60 (2,87) 150 (7,18) 80 (3,83)	1000 (4,45) 1000 (4,45) 1000 (4,45)
Pabrik Ringan Berat	125 (6,00) 250 (11,97)	2000 (8,90) 3000 (13,35)
Gedung perkantoran Ruang arsip dan komputer harus dirancang untuk beban yang lebih berat berdasarkan pada perkiraan hunian Lobi dan koridor lantai pertama Kantor Koridor di atas lantai pertama	100 (4,79) 50 (2,40) 80 (3,83)	2000 (8,90) 2000 (8,90) 2000 (8,90)
Lembaga Hukum Blok sel Koridor	40 (1,92) 100 (4,79)	
Tempat rekreasi Tempat bowling, billiard, dan penggunaan sejenis Ruang dansa dan <i>ballroom</i> Gimnasium	75 (3,59) 100 (4,79) 100 (4,79)	
Rumah Tinggal Hunian satu dan dua keluarga Loteng yang tidak dapat dihuni tanpa gudang Loteng yang tidak dapat dihuni dengan gudang Loteng yang dapat dihuni dan ruang tidur Semua ruang kecuali tangga Semua hunian rumah tinggal lainnya Ruang pribadi dan koridornya Ruang publik Koridor ruang publik	10 (0,48) 20 (0,96) 30 (1,44) 40 (1,92) 40 (1,92) 100 (4,79) 100 (4,79)	

(Sumber: SNI 1727:2020)

3.2.3 Beban Gempa

Berdasarkan SNI 1726:2019, gempa rencana ditetapkan sebagai gempa dalam dengan kemungkinan terlampaui besarnya selama umur struktur bangunan 50 tahun

adalah sebesar 2%. Peninjauan beban gempa pada perencanaan struktur bangunan ditinjau menggunakan analisis respons spektrum. Analisis respons spektrum merupakan metode analisis dinamik yang digunakan untuk mengevaluasi respons struktur bangunan terhadap beban. Beban gempa merupakan pergerakan tanah yang diakibatkan karena adanya bencana gempa bumi yang bekerja pada struktur gedung. Ketika bangunan bergetar, muncul gaya – gaya pada struktur gedung karena adanya kecenderungan massa gedung untuk mempertahankan diri dari getaran yang terjadi akibat gempa bumi. Ketentuan – ketentuan dalam perencanaan bangunan terhadap gempa berdasarkan SNI 1726:2019 melibatkan sejumlah parameter yang akan diuraikan sebagai berikut.

1. Kategori risiko struktur bangunan

Kategori risiko bangunan merupakan pengelompokkan bangunan gedung dan nongedung berdasarkan jenis pemanfaatan dari bangunan yang dibagi menjadi 4 kategori. Hal ini bertujuan agar bangunan mampu memikul beban sesuai penggunaannya. Kategori risiko bangunan gedung dan nongedung untuk beban gempa dapat dilihat pada Tabel 3.4 sebagai berikut.

Tabel 3.4 Kategori Risiko Bangunan Gedung dan Nongedung untuk Beban Gempa

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

(Sumber: Tabel 3 SNI 1726:2019)

**Lanjutan Tabel 3.4 Kategori Risiko Bangunan Gedung dan Nongedung
untuk Beban Gempa**

Jenis Pemanfaatan	Kategori Risiko
Gedung dan nongedung yang memiliki risiko tinggi terhadap jiwa manusia pada saat terjadi kegagalan, termasuk, tapi tidak dibatasi untuk: – Bioskop – Gedung pertemuan – Stadion – Fasilitas kesehatan yang tidak memiliki unit bedah dan unit gawat darurat – Fasilitas penitipan anak – Penjara – Bangunan untuk orang jompo Gedung dan nongedung, tidak termasuk kedalam kategori risiko IV, yang memiliki potensi untuk menyebabkan dampak ekonomi yang besar dan/atau gangguan masal terhadap kehidupan masyarakat sehari – hari bila terjadi kegagalan, termasuk, tapi tidak dibatasi untuk: – Pusat pembangkit listrik biasa – Fasilitas penangan air – Fasilitas penangan limbah – Pusat telekomunikasi Gedung dan non gedung yang tidak termasuk dalam kategori risiko IV (termasuk, tetapi tidak dibatasi untuk fasilitas manufaktur, proses, penanganan, penyimpanan, penggunaan atau tempat pembuangan bahan bakar berbahaya, bahan kimia berbahaya, limbah berbahaya, atau bahan yang mudah meledak) yang mengandung bahan beracun atau peledak di mana jumlah kandungan bahannya melebihi nilai batas yang disyaratkan oleh instansi yang berwenang dan cukup menimbulkan bahaya bagi masyarakat jika terjadi kebocoran.	III
Gedung dan nongedung yang dikategorikan sebagai fasilitas yang penting, termasuk, tetapi tidak dibatasi untuk: – Bangunan – bangunan monumental – Gedung sekolah dan fasilitas pendidikan – Rumah ibadah – Rumah sakit dan fasilitas kesehatan lainnya yang memiliki fasilitas bedah dan unit gawat darurat – Fasilitas pemadam kebakaran, ambulans, dan kantor polisi, serta garasi kendaraan darurat – Tempat perlindungan terhadap gempa bumi, tsunami, angin badai, dan tempat perlindungan darurat lainnya – Fasilitas kesiapan darurat, komunikasi, pusat operasi dan fasilitas lainnya untuk tanggap darurat – Pusat pembangkit energi dan fasilitas publik lainnya yang dibutuhkan pada saat keadaan darurat – Struktur tambahan (termasuk menara telekomunikasi, tangka penyimpanan bahan bakar, menara pendingin, struktur stasiun listrik, tangka air pemadam kebakaran atau struktur rumah atau struktur pendukung air atau material atau peralatan pemadam kebakaran) yang disyaratkan untuk beroperasi pada saat keadaan darurat gedung dan nongedung yang dibutuhkan untuk mempertahankan fungsi struktur bangunan lain yang masuk ke dalam kategori risiko IV.	IV

(Sumber: Tabel 3 SNI 1726:2019)

2. Faktor keutamaan gempa (I_e)

Faktor keutamaan gempa merupakan suatu nilai yang digunakan untuk memperbesar gempa rencana agar bangunan dapat memikul beban gempa dengan periode ulang panjang dan tingkat kerusakan yang lebih kecil. Faktor keutamaan gempa digunakan sebagai faktor pengali dalam perhitungan beban gempa dan berbeda – beda untuk setiap kategori risiko bangunan. Faktor keutamaan gempa dapat dilihat pada Tabel 3.5 sebagai berikut.

Tabel 3.5 Faktor Keutamaan Gempa

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

(Sumber: Tabel 4 SNI 1726:2019)

3. Klasifikasi situs

Klasifikasi suatu situs dilakukan untuk memberikan kriteria desain seismik berupa faktor – faktor amplifikasi pada bangunan. Dalam perumusan kriteria desain seismik suatu bangunan di permukaan tanah atau penentuan amplifikasi besaran percepatan gempa puncak dari batuan dasar ke permukaan tanah untuk suatu situs, maka situs tersebut harus diklasifikasikan terlebih dahulu. Klasifikasi situs dapat dilihat pada Tabel 3.6 sebagai berikut.

Tabel 3. 6 Klasifikasi Situs

Kelas Situs	$\bar{v}_s$ (m/detik)	$\bar{N}$ atau $\bar{N}_{ch}$	$\bar{s}_u$ (kPa)
SA (batuan keras)	>1500	N/A	N/A
SB (batuan)	750 sampai 1500	N/A	N/A
SC (tanah keras, sangat padat dan batuan lunak)	350 sampai 750	>50	≥ 100
SD (tanah sedang)	175 sampai 350	15 sampai 50	50 sampai 100
SE (tanah lunak)	<175	<15	<50
	Atau setiap profil tanah yang mengandung lebih dari 3 m tanah dengan karakteristik sebagai berikut. - Indeks plastisitas, $PI > 20$ - Kasar air, $w \geq 40\%$ - Kuat geser niralir, $s_u < 25$ kPa		

(Sumber: Tabel 5 SNI 1726:2019)

Lanjutan Tabel 3.6 Klasifikasi Situs

Kelas Situs	$\bar{v}_s$ (m/detik)	$\bar{N}$ atau $\bar{N}_{ch}$	$\bar{s}_u$ (kPa)
SF (tanah khusus yang membutuhkan investigasi geoteknik spesifik dan analisis respons spesifik situs yang mengikuti 0)	Setiap profil lapisan tanah yang memiliki salah satu atau lebih dari karakteristik berikut. – Rawan dan berpotensi gagal atau runtuh akibat beban gempa seperti mudah likuifaksi, lempung sangat sensitif, tanah tersementasi lemah – Lempung sangat organis dan/atau gambut (ketebalan $H > 3$ m) – Lempung berplastisitas sangat tinggi (ketebalan $H > 7,5$ m dengan indeks plastisitas $PI > 75$) Lapisan lempung lunak/setengah teguh dengan ketebalan $H > 35$ m dengan $\bar{s}_u < 50$ kPa		

(Sumber: Tabel 5 SNI 1726:2019)

4. Parameter respons spektral

Peristiwa gempa yang terjadi mengakibatkan parameter respons spektral memiliki nilai yang berbeda-beda pada tiap wilayahnya. Parameter respons spektral yang sesuai dengan peta pergerakan tanah seismik yaitu pergerakan batuan dasar pada periode pendek (S_s) dan percepatan batuan dasar pada periode 1 detik (S_1) dimana parameter tersebut diperlukan dalam perencanaan beban gempa. Untuk penentuan respons spektral percepatan gempa MCE_R di permukaan tanah, diperlukan suatu faktor amplifikasi seismik pada periode 0,2 detik dan periode 1 detik, meliputi faktor amplifikasi getaran terkait percepatan mewakili getaran periode pendek (F_a) dan faktor amplifikasi getaran terkait percepatan mewakili getaran periode 1,0 detik (F_v). Adapun parameter respons spektral percepatan yang terdiri dari dua yakni terdapat pada periode pendek (S_{MS}) dan periode 1 detik (S_{M1}). Kedua parameter tersebut disesuaikan dengan klasifikasi situs dan harus ditentukan dengan Persamaan 3.1 dan Persamaan 3.2 berikut.

$$S_{MS} = F_a S_s \quad (3.1)$$

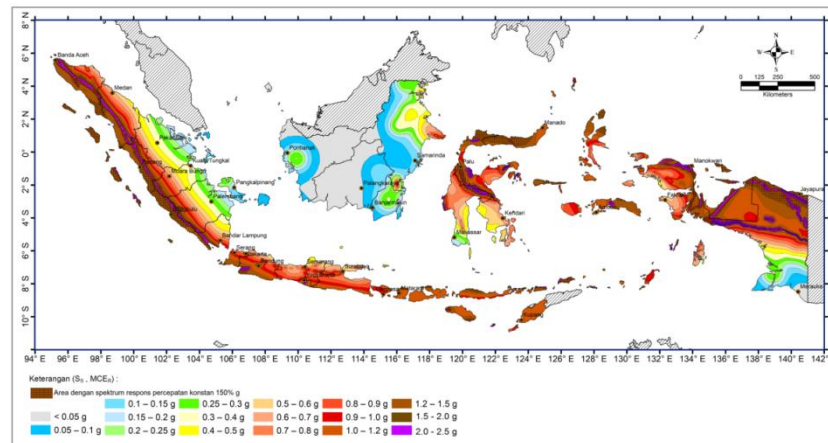
$$S_{M1} = F_v S_1 \quad (3.2)$$

dengan :

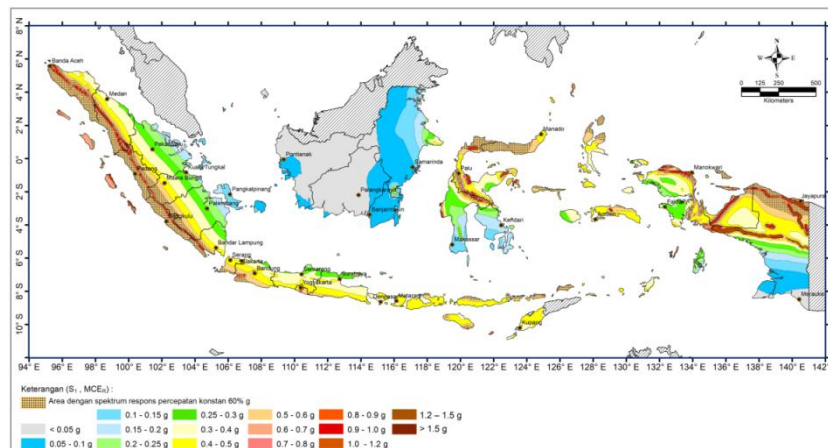
S_{MS} : Parameter respons spektral percepatan gempa MCE_R terpetakan untuk periode pendek

S_{M1} : Parameter respons spektral percepatan gempa MCE_R terpetakan untuk periode 1,0 detik

Parameter respons spektral percepatan gempa MCE_R terpetakan pada periode pendek (S_s) dan periode 1 detik (S_1) seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.1 dan Gambar 3.2 sebagai berikut.



Gambar 3.1 Parameter Gerak Tanah S_s , Gempa Maksimum yang Dipertimbangkan Risiko-Tertarget (MCE_R) Wilayah Indonesia Untuk Spektrum Respons 0,2 Detik (Redaman Kritis 5%)
(Sumber: SNI 1726:2019)



Gambar 3.2 Parameter Gerak Tanah S_1 , Gempa Maksimum yang Dipertimbangkan Risiko-Tertarget (MCE_R) Wilayah Indonesia Untuk Spektrum Respons 0,2 Detik (Redaman Kritis 5%)
(Sumber: SNI 1726:2019)

5. Koefisien situs

Koefisien situs untuk parameter faktor amplifikasi getaran terkait percepatan pada getaran periode pendek (F_a) dan faktor amplifikasi getaran terkait percepatan mewakili getaran periode 1,0 detik (F_v) dapat dilihat pada Tabel 3.7 dan Tabel 3.8 sebagai berikut.

Tabel 3.7 Koefisien Situs, F_a

Kelas Situs	Parameter Respon spektral Percepatan Gempa Maksimum yang Dipertimbangkan Risiko-Tertarget (MCE_R) Terpetakan pada Periode Pendek, $T = 0,2$ Detik, S_s					
	$S_s \leq 0,25$	$S_s = 0,5$	$S_s = 0,75$	$S_s = 1,0$	$S_s = 1,25$	$S_s \geq 1,5$
SA	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
SB	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9
SC	1,3	1,3	1,2	1,2	1,2	1,2
SD	1,6	1,4	1,2	1,1	1,0	1,0
SE	2,4	1,7	1,3	1,1	0,9	0,8
SF	SS ^(a)					

(Sumber: SNI 1726:2019)

Tabel 3.8 Koefisien Situs, F_v

Kelas Situs	Parameter Respon spektral Percepatan Gempa Maksimum yang Dipertimbangkan Risiko-Tertarget (MCE_R) Terpetakan pada Periode Pendek 1 Detik, S_1					
	$S_1 \leq 0,1$	$S_1 = 0,2$	$S_1 = 0,3$	$S_1 = 0,4$	$S_1 = 0,5$	$S_1 \geq 0,6$
SA	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
SB	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
SC	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,4
SD	2,4	2,2	2,0	1,9	1,8	1,7
SE	4,2	3,3	2,8	2,4	2,2	2,0
SF	SS ^(a)					

(Sumber: SNI 1726:2019)

6. Parameter percepatan spektral desain

Penentuan parameter percepatan spektral desain untuk periode pendek, S_{DS} dan pada periode 1 detik, S_{D1} , harus ditentukan melalui Persamaan 3.3 dan Persamaan 3.4 berikut.

$$S_{DS} = \frac{2}{3} S_{MS} \quad (3.3)$$

$$S_{D1} = \frac{2}{3} S_{M1} \quad (3.4)$$

dengan :

S_{DS} : Percepatan respons spektral percepatan desain periode pendek

S_{D1} : Percepatan respons spektral percepatan desain periode 1 detik

7. Spektrum respons desain

Bila spektrum respons desain diperlukan oleh tata cara ini dan prosedur gerak tanah dari spesifik situs tidak digunakan, maka kurva spektrum respons desain harus dikembangkan dan mengikuti ketentuan di bawah ini:

- a. Untuk periode yang lebih kecil dari T_0 , spektrum respons percepatan desain, S_a , harus diambil dari Persamaan 3.5 berikut.

$$S_a = S_{DS} \left(0,4 + 0,6 \frac{T}{T_0} \right) \quad (3.5)$$

- b. Untuk periode lebih besar dari atau sama dengan T_0 dan lebih kecil dari atau sama dengan T_s spektrum respons percepatan desain, S_a sama dengan S_{DS} ,

- c. Untuk periode lebih besar dari T_s tetapi lebih kecil dari atau sama dengan T_L respons spektral percepatan desain, S_a , diambil berdasarkan Persamaan 3.6 berikut.

$$S_a = \frac{S_{D1}}{T} \quad (3.6)$$

- d. Untuk periode lebih besar dari T_L , respons spektral percepatan desain, S_a , diambil berdasarkan Persamaan 3.7 berikut.

$$S_a = \frac{S_{D1} T_L}{T^2} \quad (3.7)$$

- e. Untuk nilai waktu getar T_0 dan T_s diperoleh berdasarkan Persamaan 3.8 dan Persamaan 3.9 berikut

$$T_0 = 0,2 \frac{S_{D1}}{S_{DS}} \quad (3.8)$$

$$T_s = \frac{S_{D1}}{S_{DS}} \quad (3.9)$$

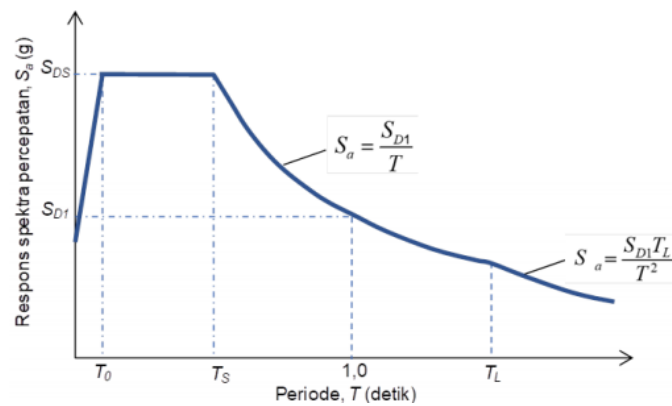
dengan :

S_{DS} : Percepatan respons spektral percepatan desain periode pendek

S_{D1} : Percepatan respons spektral percepatan desain periode 1 detik

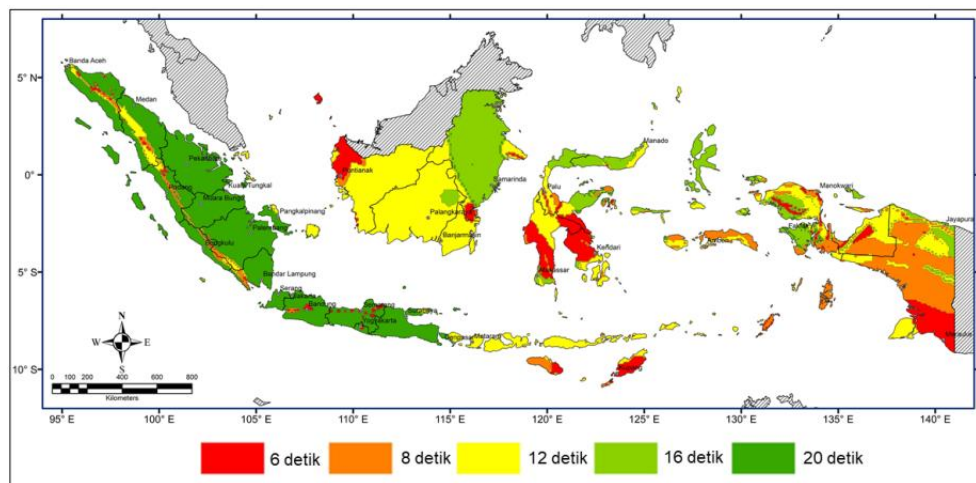
T : Periode getar fundamental struktur

T_L : Peta transisi periode panjang yang ditunjukkan pada Gambar 3.3 yang nilainya diambil dari Gambar 3.4.



Gambar 3.3 Spektrum Respons Desain

(Sumber: SNI 1726:2019)



Gambar 3.4 Peta Transisi Periode Panjang, T_L Wilayah Indonesia

(Sumber: SNI 1726:2019)

8. Kategori desain seismik

Suatu struktur harus memiliki kategori desain seismik dengan kategori risiko I, II atau III yang berlokasi dimana parameter respons spektral percepatan pada periode 1 detik (S_1), lebih besar atau sama dengan dari 0,75 yang ditetapkan sebagai struktur dengan kategori desain seismik E. Kemudian, struktur berkategori risiko IV yang memiliki respons spektral percepatan periode 1 (S_1) lebih besar atau sama dengan dari 0,75 harus ditetapkan sebagai kategori desain seismik F. Untuk semua struktur lainnya yang tidak disebutkan sebelumnya dapat disesuaikan berdasarkan kategori risiko dan parameter respon spektral desain pada Tabel 3.9 dan 3.10 berikut.

Tabel 3.9 Kategori Desain Seismik Berdasarkan Parameter Respons Percepatan Pada Periode Pendek

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

(Sumber: SNI 1726:2019)

Tabel 3.10 Kategori Desain Seismik Berdasarkan Parameter Respons Percepatan Pada Periode 1 Detik

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

(Sumber: SNI 1726:2019)

9. Sistem struktur

Pemilihan sistem struktur harus dilakukan untuk dapat menentukan koefisien yang berguna dalam perencanaan struktur beban gempa. Struktur elemen yang digunakan harus sesuai dengan batasan ketinggian struktur (h_n) dan batasan sistem struktur yang terlampir. Selain itu, dalam penentuan geser

dasar, gaya desain elemen dan simpangan antra tingkat desain dibutuhkan koefisien modifikasi respons (R), faktor kuat lebih sistem (Ω_0) dan faktor pembesaran simpangan lateral (C_d) yang dapat dilihat pada Tabel 3.11 sebagai berikut.

Tabel 3.11 Faktor R , C_d dan Untuk Sistem Pemikul Gaya Seismik

Sistem Pemikul Gaya Seismik	Koefisien Modifikasi Respons, R^a	Faktor Kuat Lebih Sistem, Ω_0^b	Faktor Pembesaran Defleksi, C_d^c	Betasan Sistem Struktur dan Batasan Tinggi Struktur, h_n (m) ^d				
				Kategori Desain Seismik				
				B	C	D	E	F
C. Sistem rangka pemikul momen								
Rangka beton bertulang pemikul momen khusus	8	3	$5^{1/2}$	TB	TB	TB	TB	TB
Rangka beton bertulang pemikul momen menengah	5	3	$4^{1/2}$	TB	TB	TI	TI	TI
Rangka beton bertulang pemikul momen biasa	3	3	$2^{1/2}$	TB	TI	TI	TI	TI

(Sumber: SNI 1726:2019)

3.2.4 Kombinasi Beban

Struktur bangunan memiliki komponen – komponen elemen struktur atas dan elemen struktur bawah yang harus didesain sedemikian rupa hingga kuat rencananya sama atau melebihi pengaruh beban terfaktor dengan kombinasi pembebanan. Adapun kombinasi pembebanan yang digunakan adalah sebagai berikut.

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

Semua elemen struktur harus didesain menggunakan pengaruh beban seismik. Pengaruh beban seismik (E) adalah gaya – gaya elemen aksial, geser dan

lentur yang dihasilkan dari penerapan gaya seismik horizontal dan vertikal. Pengaruh beban seismik harus ditentukan sesuai dengan berikut ini.

1. Untuk penggunaan dalam kombinasi 5, E harus ditentukan sesuai dengan Persamaan 3.10 berikut.

$$E = E_h + E_v \quad (3.10)$$

2. Untuk penggunaan dalam kombinasi 7, E harus ditentukan sesuai dengan Persamaan 3.11 berikut.

$$E = E_h - E_v \quad (3.11)$$

dengan :

E : Pengaruh beban seismik

E_h : Pengaruh beban seismik horizontal

E_v : Pengaruh beban seismik vertikal

3. Pengaruh beban seismik horizontal (E_h) harus ditentukan sesuai dengan Persamaan 3.12 berikut.

$$E_h = \rho Q_E \quad (3.12)$$

dengan :

ρ : Faktor reduksi struktur

Q_E : Pengaruh gaya seismik horizontal

4. Pengaruh beban seismik vertikal (E_v) harus ditentukan sesuai dengan Persamaan 3.13 berikut.

$$E_v = 0,25 S_{DS} D \quad (3.13)$$

dengan :

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

D : Pengaruh dari beban mati

3.2.5 Faktor Redudansi (ρ)

Berdasarkan Pasal 7.3.4.2 SNI 1726:2019, untuk struktur dengan kategori seismik D yang memiliki ketidakberaturan torsi berlebihan, Tipe 1b maka nilai ρ harus sebesar 1,3. Kategori seismik desain E dan F tidak diizinkan memiliki ketidakberaturan torsi berlebihan. Struktur dengan desain seismik D, E, atau F harus menggunakan nilai ρ sebesar 1,3. Apabila pada struktur tersebut jika satu dari dua kondisi berikut dipenuhi maka nilai ρ sebesar 1,0. Adapun kondisi tersebut adalah sebagai berikut ini.

1. Masing – masing tingkat yang menahan lebih dari 35% geser dasar dalam arah yang ditinjau harus sesuai dengan Tabel 3.12.
2. Struktur dengan denah beraturan di semua Tingkat dengan sistem pemikul gaya seismik terdiri dari paling sedikit dua bentang perimeter pemikul gaya seismik yang merangka pada masing – masing sisi struktur dalam masing – masing arah orthogonal di setiap tingkat yang menahan lebih dari 35% geser dasar. Jumlah bentang untuk dinding geser harus dihitung sebagai panjang dinding geser dibagi dengan tinggi tingkat atau dua kali panjang dinding geser dibagi dengan tinggi tingkat (h_{sx}) untuk konstruksi rangka ringan.

Tabel 3.12 Persyaratan Untuk Masing – Masing Tingkat Yang Menahan Lebih Dari 35% Gaya Geser Dasar

Elemen Pemikul Gaya Lateral	Persyaratan
Rangka dengan bresing	Penghilangan suatu bresing individu atau sambungan yang terhubung, tidak akan mengakibatkan reduksi kekuatan tingkat lebih dari 33% dan tidak akan menghasilkan sistem dengan ketidakberaturan torsi yang berlebihan (ketidakberaturan struktur horizontal Tipe 1b)
Rangka pemikul momen	Kehilangan tahanan momen di sambungan balok – kolom dikedua ujung suatu balok tunggal tidak akan mengakibatkan reduksi kekuatan tingkat lebih dari 33% dan tidak akan menghasilkan sistem dengan ketidakberaturan torsi yang berlebihan (ketidakberaturan struktur horizontal Tipe 1b)
Dinding geser atau pilar dinding dengan rasio tinggi terhadap panjang lebih besar dari 1,0	Penghilangan suatu dinding geser atau pilar dinding dengan rasio tinggi terhadap panjang lebih besar dari 1,0 di sebarang tingkat atau sambungan kolektor yang terhubung, tidak akan mengakibatkan reduksi kekuatan tingkat lebih dari 33% dan tidak akan menghasilkan sistem dengan ketidakberaturan torsi yang berlebihan (ketidakberaturan struktur horizontal Tipe 1b)
Kolom kantilever	Kehilangan tahanan momen di sambungan dasar pada sebarang kolom kantilever tunggal tidak akan mengakibatkan reduksi kekuatan tingkat lebih dari 33% dan tidak akan menghasilkan sistem dengan ketidakberaturan torsi yang berlebihan (ketidakberaturan struktur horizontal Tipe 1b)
Lainnya	Tidak ada persyaratan

(Sumber: SNI 1726:2019)

3.2.6 Periode Fundamental Struktur

Berdasarkan Pasal 7.8.2 SNI 1726:2019, periode fundamental struktur (T) harus tetap dibawah hasil perkalian antara koefisien batasan atas pada periode yang dihitung (C_u) dengan periode fundamental pendekatan (T_a), yang dihitung menggunakan Persamaan 3.14 dan Persamaan 3.15 berikut.

$$T_{max} = C_u \times T_a \quad (3.14)$$

$$T_a = C_t \times h_n^x \quad (3.15)$$

dengan :

T_a : Periode fundamental pendekatan

C_t : Koefisien periode pendekatan

h_n : Ketinggian struktur (m)

Adapun nilai parameter koefisien batas atas (C_u) dan parameter periode pendekatan (C_t) serta (x) seperti yang ditunjukkan pada Tabel 3.13 dan Tabel 3.14 sebagai berikut.

Tabel 3.13 Koefisien Untuk Batas Atas Pada Periode Yang Dihitung

Parameter Percepatan Respon Spektral Desain Pada 1 Detik, S_{D1}	Koefisien C_u
$\geq 0,4$	1,4
0,3	1,4
0,2	1,5
0,15	1,6
$\leq 0,1$	1,7

(Sumber: SNI 1726:2019)

Tabel 3.14 Nilai Parameter Periode Pendekatan C_t dan x

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

(Sumber: SNI 1726:2019)

3.2.7 Penskalaan Gaya

Berdasarkan Pasal 7.9.1.4.1 SNI 1726:2019, apabila periode fundamental hasil analisis lebih besar dari $C_u T_a$ pada suatu arah tertentu, maka periode struktur T harus diambil sebesar $C_u T_a$. Apabila kombinasi respons untuk gaya geser dasar hasil analisis ragam (V_t) kurang dari 100% dari gaya geser (V) yang dihitung melalui metode statik ekuivalen, maka gaya tersebut harus dikalikan dengan $\frac{V}{V_t}$, dimana V adalah gaya geser dasar statik ekuivalen dan V_t adalah gaya geser dasar yang didapatkan dari hasil analisis kombinasi ragam.

3.2.8 Partisipasi Massa Ragam

Berdasarkan Pasal 7.9.1.1 SNI 1726:2019, analisis harus menyertakan jumlah ragam yang cukup untuk mendapatkan partisipasi massa ragam terkombinasi sebesar 100% dari massa struktur. Untuk mencapai ketentuan ini, untuk ragam satu badan kaku (*single rigid body*) dengan periode 0,05 detik, diizinkan untuk mengambil semua ragam dengan periode di bawah 0,05 detik. Sebagai alternatif, analisis diizinkan memasukkan jumlah ragam minimum untuk mencapai massa ragam terkombinasi yaitu 90% dari massa aktual masing – masing horizontal orthogonal.

3.2.9 Gaya Geser Dasar Seismik

Berdasarkan SNI 1726:2019 pasal 7.8.1, perhitungan gaya dasar seismik (V) adalah total gaya lateral akibat gempa yang menjadi beban struktur pada bangunan yang tertuang pada rumus Persamaan 3.16 dan 3.17 berikut.

$$V = C_s W \quad (3.16)$$

$$C_s = \frac{S_{DS}}{\frac{R}{I_e}} \quad (3.17)$$

Adapun nilai C_s yang dihitung sesuai Persamaan 3.17 tidak perlu melebihi dari:

Untuk $T \leq T_L$

$$C_s = \frac{S_{D1}}{T \left(\frac{R}{I_e} \right)} \quad (3.18)$$

Untuk $T > T_L$

$$C_s = \frac{S_{D1} T_L}{T^2 \left(\frac{R}{I_e} \right)} \quad (3.19)$$

C_s harus tidak kurang dari

$$C_s = 0,044 S_{D1} I_e \geq 0,01 \quad (3.20)$$

Untuk struktur yang berlokasi di daerah di mana S_1 sama dengan atau lebih besar dari 0,6g, maka C_s harus tidak kurang dari

$$C_s = \frac{0,5 S_1}{\frac{R}{I_e}} \quad (3.21)$$

3.2.10 Gaya Seismik Lateral

Gaya seismik lateral (F_x) merupakan gaya seismic yang didistribusikan secara horixzontal terhadap struktur yang dianalisis pada setiap tingkatnya. Nilai F_x didapatkan dengan mengalikan nilai gaya geser seismik (V_x) dengan faktor distribusi vertikal (C_{vx}) berikut persamaanya sesuai SNI 1726:2019.

$$F_x = C_{vx} \times V \quad (3.22)$$

$$F_x = \frac{w_x h_x^k}{\sum_{i=1}^n w_i h_i^k} \quad (3.23)$$

dengan:

C_{vx} : Faktor distribusi vertikal

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

- w : Bagian berat seismic efektif total struktur (W) yang ditempatkan atau dikenakan pada tingkat i atau x
 h : Tinggi dari dasar sampai tingkat i atau x
 k : Eksponen yang terkait dengan periode struktur dengan nilai sebagai berikut
 Untuk struktur bangunan dengan $T \leq 0,5$ detik. $k = 1$
 Untuk struktur bangunan dengan $T \geq 2,5$ detik. $k = 2$
 Untuk struktur bangunan dengan $0,5 < T < 2,5$ detik. $k = 2$ atau dapat dengan interpolasi nilai 1 atau 2

3.3 Balok

Balok merupakan elemen struktur yang penting dalam menahan beban lateral. Balok dirancang untuk dapat memikul serta mendistribusikan beban horizontal khususnya menuju struktur kolom penopang. Beban horizontal adalah beban akibat gempa dan beban angin. Selain menjadi penopang beban horizontal, balok juga sebagai pendukung beban vertikal. Beban vertikal adalah beban mati dan beban hidup yang diterima dari pelat lantai dan akibat berat sendiri dan berat dinding yang ada di atasnya. Balok juga berfungsi sebagai pengikat. Balok memiliki fungsi untuk menjaga kestabilan bangunan bertingkat atau gedung terhadap gaya ke samping. Balok menghasilkan gaya – gaya dalam yang terdiri dari momen lentur dan gaya geser.

3.3.1 Momen Lentur Balok

Momen lentur balok merupakan momen yang terjadi pada elemen balok akibat gaya – gaya eksternal yang menyebabkan balok mengalami lendutan. Momen ini menghasilkan tegangan lentur pada penampang balok, dimana bagian atas penampang biasanya mengalami tekanan, sedangkan bagian bawah mengalami tarik. Besarnya momen lentur pada balok dapat dihitung berdasarkan gaya – gaya dalam yang bekerja pada balok, yang diperoleh dari analisis keseimbangan gaya dan momen pada elemen balok tersebut. Berdasarkan SNI 2847:2019, berikut merupakan tahapan dalam analisis terhadap momen lentur balok.

1. Penentuan pembatasan struktur rangka pemikul momen khusus (SRPMK) balok sesuai Pasal R18.6.1 SNI 2847:2019 dapat dilihat pada Persamaan 3.24 berikut.

$$P_u < \frac{A_g f'c}{10} \quad (3.24)$$

dengan :

P_u : Gaya aksial terfaktor (N)

A_g : Luas penampang beton (mm²)

$f'c$: Kekuatan tekan beton (MPa)

2. Penentuan batasan dimensi yang sesuai dengan ketentuan SRMPK balok sesuai Pasal 18.6.2.1 SNI 2847:2019 dapat dilihat pada Persamaan 3.25 sampai Persamaan 3.28 berikut.

$$l_n > 4d \quad (3.25)$$

$$\frac{b}{h} > 0,3 \quad (3.26)$$

$$b > 250 \text{ mm} \quad (3.27)$$

$$b < c_2 + 0,75c_1 \quad (3.28)$$

dengan :

l_n : Panjang bentang bersih yang diukur muka ke muka tumpuan (mm)

b : Lebar (mm)

h : Tinggi (mm)

d : Jarak dari serat tekan terjauh ke pusat tulangan tarik longitudinal (mm)

c_1 : Dimensi kolom persegi yang diukur dalam arah bentang dimana momen ditentukan (mm)

c_2 : Dimensi kolom persegi yang diukur dalam arah tegak lurus terhadap c_1 (mm)

3. Penentuan nilai distribusi tegangan beton (β_1) sesuai Tabel 22.2.2.4.3 SNI 2847:2019 dapat dilihat pada Persamaan 3.29 sampai Persamaan 3.31 berikut.

Untuk $17 \leq f'c \leq 28 \text{ MPa}$

$$\beta_1 = 0,85 \quad (3.29)$$

Untuk $28 \leq f'c \leq 55 \text{ MPa}$

$$\beta_1 = 0,85 - \frac{0,05}{7}(f'c - 28) \quad (3.30)$$

Untuk $f'c \geq 55 \text{ MPa}$

$$\beta_1 = 0,65 \quad (3.31)$$

dengan :

β_1 : Nilai distribusi tegangan beton

$f'c$: Kekuatan tekan beton (MPa)

4. Penentuan faktor reduksi (ϕ) sesuai Tabel 21.2.1 SNI 2847:2019 dapat dilihat pada Tabel 3.15 berikut.

Tabel 3. 15 Faktor Reduksi Kekuatan (ϕ)

Gaya atau elemen struktur		ϕ	Pengecualian
a)	Momen, gaya aksial, atau kombinasi momen dan gaya aksial	0,65 – 0,90 sesuai 21.2.2	Di dekat ujung komponen pratarik (<i>pretension</i>) dimana <i>strand</i> belum sepenuhnya bekerja, ϕ harus sesuai dengan 21.2.3
b)	Geser	0,75	Persyaratan tambahan untuk struktur tahan gempa terdapat pada 21.2.4
c)	Torsi	0,75	-
d)	Rumpu (<i>bearing</i>)	0,65	-
e)	Zona angkur pascatarik (<i>post-tension</i>)	0,85	-
f)	<i>Bracket</i> dan korbel	0,75	-
g)	<i>Strut, ties</i> , zona nodal, dan daerah tumpuan yang dirancang dengan <i>strut and tie</i> di Pasal 23	0,75	-
h)	Komponen sambungan beton pracetak terkontrol leleh oleh elemen baja dalam tarik	0,90	-
i)	Beton polos	0,60	-
j)	Angkur dalam elemen beton	0,45 – 0,75 sesuai Pasal 17	-

(Sumber: SNI 2847:2019)

5. Penentuan luas tulangan minimum ($A_{s\ min}$) sesuai Pasal 9.6.1.2 SNI 2847:2019 pada Persamaan 3.32 dan Persamaan 3.33 berikut.

$$A_{s\ min,1} = \frac{0,25\sqrt{f'c}}{f_y} b_w d \quad (3.32)$$

$$A_{s\ min,2} = \frac{1,4}{f_y} b_w d \quad (3.33)$$

dengan :

$A_{s\ min}$: Luas tulangan minimum (mm²)

$f'c$: Kekuatan tekan beton (MPa)

f_y : Kekuatan leleh tulangan yang disyaratkan (MPa)

b_w : Lebar (mm)

d : Jarak dari serat tekan terjauh ke pusat tulangan tarik longitudinal (mm)

6. Penentuan letak garis netral (C_b) sesuai Pasal 22.2.2.4.1 SNI 2847:2019 dapat dilihat pada Persamaan 3.34 berikut.

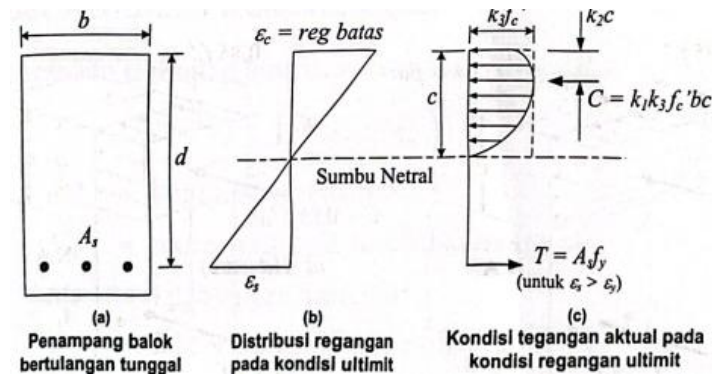
$$C_b = \frac{0,003d}{0,003 + \varepsilon_y} \quad (3.34)$$

dengan :

C_b : Letak garis netral (mm)

ε_y : Regangan

d : Jarak dari serat tekan terjauh ke pusat tulangan tarik longitudinal (mm)



Gambar 3.5 Distribusi Regangan dan Tegangan Penampang Balok

(Sumber: Buku Perencanaan Dasar Struktur Beton Bertulang)

7. Penentuan kapasitas momen nominal lentur (M_n) dapat dilihat pada Persamaan 3.35 berikut.

$$M_n = 0,85(A_s - A'_s)f_y d + A'_s f_y (d - d') \quad (3.35)$$

Kapasitas momen nominal (M_n) balok kemudian dibandingkan dengan kapasitas *ultimate* (M_u) balok pada ETABS V.22 dapat dilihat pada Persamaan 3.36 berikut.

$$\phi M_n > M_u \quad (3.36)$$

8. Penentuan rasio kapasitas momen lentur balok dapat dilihat pada Persamaan 3.37 berikut.

$$R = \frac{M_u}{\phi M_n} < 1 \quad (3.37)$$

3.3.2 Gaya Geser Balok

Gaya geser balok adalah gaya yang bekerja tegak lurus terhadap sumbu memanjang balok dan merupakan salah satu gaya dalam utama yang harus diperhitungkan dalam perencanaan struktur khususnya pada balok beton bertulang. Gaya ini muncul akibat beban yang diterima balok, baik beban terpusat maupun beban merata dan umumnya bervariasi sepanjang bentang balok. Berdasarkan SNI 2847:2019, berikut merupakan tahapan dalam analisis terhadap gaya geser balok.

1. Penentuan *probable momen capacities* (M_{pr}) sesuai Pasal 18.7.6 SNI 2847:2019 dapat dilihat pada Persamaan 3.38 berikut.

$$M_{pr} = 1,25 \times A_s \times f_y \times \left(d - \frac{a_{pr}}{2}\right) \quad (3.38)$$

Nilai a_{pr} dapat dihitung berdasarkan Persamaan 3.39 berikut.

$$a_{pr} = \frac{1,25 \times A_s \times f_y}{0,85 \times f_c' \times b} \quad (3.39)$$

dengan :

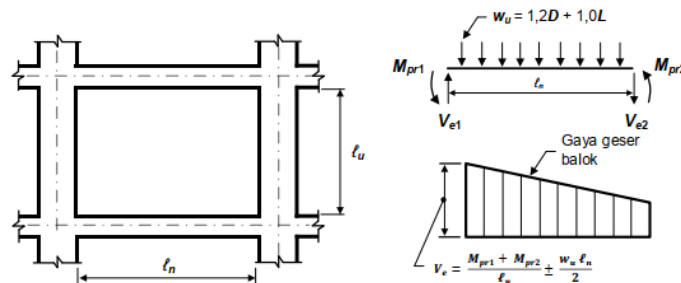
M_{pr} : Momen kapasitas (Nmm)

A_s : Luas tulangan t (mm^2)

a_{pr} : Luas penampang efektif (mm^2)

2. Penentuan kapasitas gaya geser desain rencana (V_e) sesuai Pasal 18.6.5 SNI 2847:2019 yang ditentukan melalui peninjauan gaya statis pada bagian komponen struktur antar *joint* dengan asumsi momen yang bekerja pada tiap muka *joint* berlawanan arah dengan kekuatan lentur yang bekerja (M_n) pada tiap muka *joint*. Hal tersebut dapat dilihat pada Persamaan 3.40 dan Gambar 3.6 berikut.

$$V_e = \frac{M_{pr1} + M_{pr2}}{l_n} \pm \frac{w_u l_n}{2} \quad (3.40)$$



Gambar 3. 6 Gaya Geser Desain Balok

(Sumber: SNI 2847:2019)

3. Persyaratan tulangan transversal balok SRPMK berdasarkan Pasal 18.6.5.2 SNI 2847:2019, penentuan kuat geser diasumsikan tidak ada apabila dua kondisi terpenuhi dapat dilihat pada Persamaan 3.41 dan Persamaan 3.42 berikut.

$$V_e > 0,5V_u \quad (3.41)$$

$$P_u < \frac{A_g f' c}{20} \quad (3.42)$$

dengan :

V_e : Gaya geser desain untuk kombinasi pembebanan termasuk pengaruh gempa (N)

V_u : Gaya geser terfaktor penampang (N)

4. Penentuan kuat geser tekan beton (V_c) sesuai Pasal 22.5.6.1 SNI 2847:2019 dapat dilihat pada Persamaan 3.43 berikut.

$$V_c = 0,17 \left(1 + \frac{V_s}{14A_g} \right) \lambda \sqrt{f' c} b_w d \quad (3.43)$$

dengan :

V_c : Kekuatan geser nominal yang disediakan oleh beton (N)

V_s : Kekuatan geser nominal yang diberikan oleh penulangan geser (N)

λ : Faktor modifikasi terhadap jenis beton

5. Penentuan kuat geser tulangan pasang (V_s) dapat dilihat pada Persamaan 3.44 berikut.

$$V_s = \frac{A_v f_y d}{S} \quad (3.44)$$

dengan :

A_v : Luas tulangan geser (mm²)

S : Spasi tulangan (mm)

6. Batasan dimensi penampang sesuai Pasal 22.5.1.2 SNI 2847:2019 dapat dilihat pada Persamaan 3.45 berikut.

$$V_u \leq \phi(V_c + 0,066\sqrt{f'_c}b_wd) \quad (3.45)$$

7. Kontrol jarak antar tulangan sengkang minimum sesuai Pasal 18.6.4.4 SNI 2847:2019 dapat dilihat pada Persamaan 3.46 sampai Persamaan 3.48 berikut.

$$S_{min,1} = \frac{d}{4} \quad (3.46)$$

$$S_{min,2} = 6d_b \quad (3.47)$$

$$S_{min,3} = 150 \text{ mm} \quad (3.48)$$

8. Penentuan kapasitas geser nominal (V_n) sesuai Pasal 22.5.1.1 SNI 2847:2019 dapat dilihat pada Persamaan 3.49 berikut.

$$V_n = V_c + V_s \quad (3.49)$$

9. Penentuan rasio kapasitas gaya geser balok dapat dilihat pada Persamaan 3.50 berikut.

$$R = \frac{V_u}{\phi V_n} < 1 \quad (3.50)$$

3.4 Kolom

Kolom merupakan elemen struktur vertikal yang berfungsi menyalurkan beban dari struktur di atasnya ke pondasi di bawahnya, kolom juga berfungsi menjaga kestabilan dan mendistribusikan beban secara merata. Kolom menghasilkan gaya – gaya dalam yang terdiri dari gaya aksial, momen lentur dan gaya geser.

3.4.1 Faktor Kelangsingan

Faktor kelangsingan dibutuhkan untuk dapat menahan beban aksial. Adanya suatu beban aksial dapat membuat kolom rusak atau patah karena terjadi tekuk, bila beban aksial tersebut bernilai sama atau lebih besar dari kapasitas kritik kolom.

Kondisi tersebut dinamakan kolom langsing, begitupun terjadi sebaliknya dinamakan kolom pendek. Untuk dapat menghindari kerusakan tersebut dilakukan indikasi parameter tekuk dengan cara memodifikasi perpaduan luas penampang dan panjang bentang kolom. Berdasarkan SNI 2847:2019 Pasal 6.2.5, faktor kelangsingan dapat diabaikan apabila syarat kondisi terpenuhi, yakni

1. Untuk struktur kolom yang tidak ditahan terhadap goyangan samping dapat dilihat pada Persamaan 3.51 berikut.

$$\frac{kl_c}{r} \leq 22 \quad (3.51)$$

dengan :

k : Faktor panjang efektif untuk komponen struktur tekan

l_u : Panjang tak tertumpu komponen struktur tekan (mm)

r : Radius girasi penampang komponen struktur tekan (mm)

2. Untuk struktur kolom yang ditahan terhadap goyangan samping dapat dilihat pada Persamaan 3.52 dan 3.53 berikut.

$$\frac{kl_u}{r} \leq 34 + 12 \left(\frac{M_1}{M_2} \right) \quad (3.52)$$

$$\frac{kl_u}{r} \leq 40 \quad (3.53)$$

dengan $\frac{M_1}{M_2}$ bernilai negatif jika kolom melentur dalam kurvatur tunggal, dan bernilai positif jika struktur melentur dalam kurvatur ganda. Berdasarkan SNI 2847:2019, radius girasi (r) dapat dihitung berdasarkan Persamaan 3.54 berikut.

$$r = \sqrt{\frac{I_g}{A_g}} \quad (3.54)$$

dengan :

r : Radius girasi penampang komponen struktur tekan (mm)

I_g : Momen inersia penampang beton (mm⁴)

3.4.2 Gaya Aksial dan Momen Lentur Kolom

Gaya aksial dan momen lentur pada kolom adalah dua gaya dalam utama yang bekerja secara bersamaan pada elemen kolom dalam struktur bangunan. Berdasarkan SNI 2847:2019, berikut merupakan tahapan dalam analisis terhadap gaya aksial dan momen lentur kolom.

1. Penentuan persyaratan struktur rangka pemikul momen khusus (SRPMK) kolom sesuai Pasal 18.7.5.6 SNI 2847:2019 dapat dilihat pada Persamaan 3.55 berikut

$$P_u < \frac{A_g f'_c}{10} \quad (3.55)$$

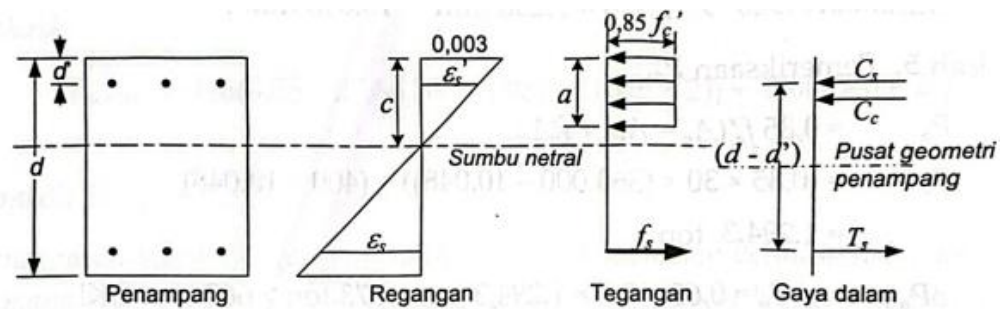
2. Penentuan batasan dimensi yang sesuai dengan ketentuan SRMPK kolom sesuai Pasal 18.7.2 SNI 2847:2019 dapat dilihat pada Persamaan 3.56 dan Persamaan 3.57 berikut.

$$\text{Dimensi terkecil} > 300 \text{ mm} \quad (3.56)$$

$$\frac{b}{h} > 0,4 \quad (3.57)$$

3. Penentuan nilai distribusi tegangan beton (β_1) sesuai Tabel 22.2.2.4.3 SNI 2847:2019 dapat dilihat pada Persamaan 3.28 sampai Persamaan 3.30.
4. Penentuan jarak serat tekan terjauh (a) sesuai Pasal 22.2.2.4.1 SNI 2847:2019 dapat dilihat pada Persamaan 3.58 berikut.

$$a = \beta_1 c \quad (3.58)$$



Gambar 3. 7 Distribusi Regangan dan Tegangan Penampang Kolom

(Sumber: Buku Perencanaan Dasar Struktur Beton Bertulang)

5. Penentuan faktor reduksi (ϕ) sesuai Tabel 21.2.1 SNI 2847:2019 dapat dilihat pada Tabel 3.15.
6. Perhitungan rasio tulangan terpasang (ρ) dapat dilihat pada Persamaan 3.58 berikut.

$$\rho = \frac{A_g}{A_{sc}} \quad (3.58)$$

dengan :

ρ : Rasio tulangan terpasang

A_{sc} : Luas tulangan tarik (mm^2)

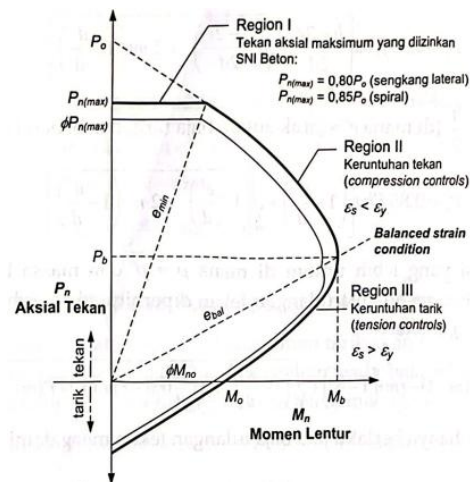
Berdasarkan Pasal 18.7.4 SNI 2847:2019, ditentukan persyaratan rasio tulangan minimum dapat dilihat pada Persamaan 3.59 berikut.

$$1\% < \rho \quad (3.59)$$

7. Penentuan kekuatan tekan aksial nominal sesuai Pasal 22.4.2.2 SNI 2847:2019 dapat dilihat pada Persamaan 3.60 berikut.

$$\phi P_n = \phi [0.85 f'_c (A_g - A_{st}) + f_y A_{st}] \quad (3.60)$$

8. Penggambaran diagram interaksi kolom, dimana kurva interaksi antara kapasitas beton bertulang dalam menahan gaya kombinasi aksial dan momen lentur. Contoh gambar diagram interaksi dapat dilihat seperti Gambar 3.10 berikut.



Gambar 3. 8 Diagram Interaksi

(Sumber: Buku Perencanaan Dasar Struktur Beton Bertulang)

3.4.3 Kekuatan Lentur Minimum Kolom

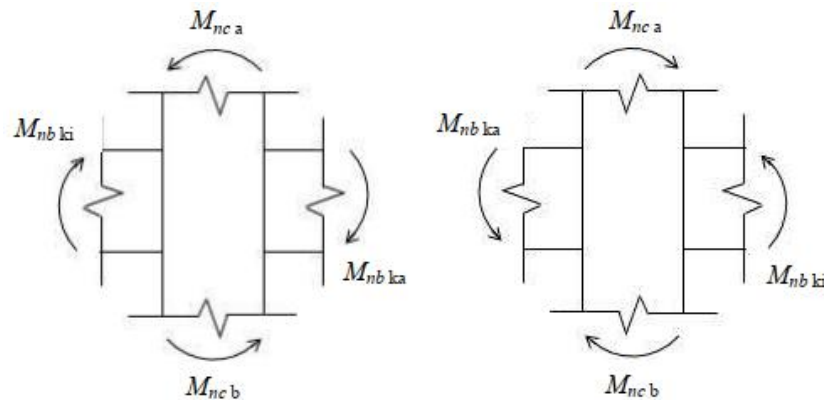
Berdasarkan Pasal 18.7.3 SNI 2847:2019, tujuan dari kekuatan lentur minimum kolom adalah untuk mengurangi kemungkinan leleh pada kolom yang dianggap sebagai bagian dari sistem pemikul gaya seismik, sehingga kolom mampu memikul gaya yang terjadi. Hal ini dikarenakan jika struktur yang diterima oleh kolom lebih kuat akan mengakibatkan inelastik dan berpotensi mengalami kelelahan lentur pada kedua ujung kolom yang dapat menghasilkan kegagalan struktur penyebab keruntuhan bangunan. Kekuatan lentur kolom harus memenuhi persyaratan pada Persamaan 3.61 berikut.

$$\sum M_{nc} \geq 1,2 \sum M_{nb} \quad (3.61)$$

Keterangan :

$\sum M_{nc}$: Jumlah kekuatan lentur nominal kolom – kolom yang merangka ke dalam *joint*, yang dievaluasi di muka – muka *joint*.

$\sum M_{nb}$: Jumlah kekuatan lentur nominal balok yang merangka ke dalam *joint*, yang dievaluasi di muka – muka *joint*.



Gambar 3.9 Konsep Kolom Kuat – Balok Lemah

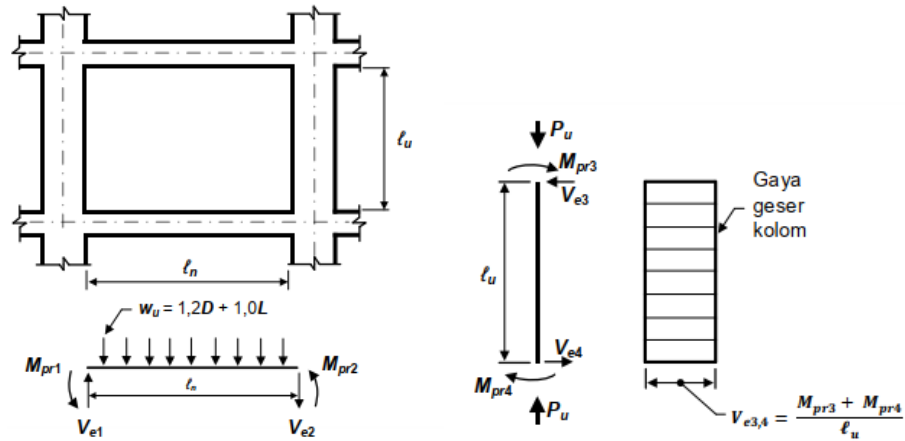
(Sumber: Buku Perencanaan Dasar Struktur Beton Bertulang)

3.4.4 Gaya Geser Kolom

Gaya geser pada kolom merupakan gaya yang bekerja tegak lurus terhadap sumbu panjang kolom dan muncul akibat beban lateral seperti gempa yang menyebabkan kolom mengalami gaya geser yang signifikan, terutama struktur yang mengalami pembebanan dinamis. Berdasarkan SNI 2847:2019, berikut merupakan tahapan dalam analisis terhadap gaya geser kolom.

1. Penentuan *probable momen capacities* (M_{pr}) sesuai Pasal 18.7.6.1.1 dan Gambar R18.6.5 SNI 2847:2019, ditentukan gaya geser desain rencana untuk memperhitungkan gaya – gaya desain rencana untuk memperhitungkan gaya – gaya yang terjadi pada *joint* balok – kolom dengan tegangan baja tulangan sebesar $1,25f_y$ dan faktor reduksi kekuatan (ϕ) sebesar 1. Adapun perhitungan gaya geser desain rencana dapat dilihat pada Persamaan 3.62 dan Gambar 3.14 berikut.

$$V_e = \frac{M_{pr} + M_{pr}}{l_c} \quad (3.62)$$



Gambar 3.10 Gaya Geser Desain Kolom

(Sumber: SNI 2847:2019)

Gaya geser rencana kolom tidak perlu melebihi nilai gaya geser rencana balok yang merangka pada hubungan kolom balok. Adapun perhitungan gaya geser desain rencana dapat dilihat pada Persamaan 3.63 berikut.

$$V_e = \frac{DF(\sum M_{pr} + \sum M_{pr})}{l_c} \quad (3.63)$$

2. Persyaratan Panjang (l_0) sesuai Pasal 18.7.5.1 SNI 2847:2019, harus dipenuhi persyaratan yang dapat dilihat pada Persamaan 3.64 sampai Persamaan 3.66 berikut.

$$h_{kolom} = l_0 \quad (3.64)$$

$$\frac{1}{6} \times l_c = l_0 \quad (3.65)$$

$$450 \text{ mm} = l_0 \quad (3.66)$$

3. Persyaratan tulangan transversal untuk SRPMK kolom sesuai Pasal 18.7.6.2.2 SNI 2847:2019, penentuan kuat geser diasumsikan tidak ada apabila dua kondisi terpenuhi dapat dilihat pada Persamaan 3.67 dan Persamaan 3.68 berikut.

$$V_e > 0,5V_u \quad (3.67)$$

$$P_u < \frac{A_g f'_c}{20} \quad (3.68)$$

4. Penentuan kuat geser tekan beton (V_c) sesuai Pasal 22.5.6.1 SNI 2847:2019 dapat dilihat pada Persamaan 3.69 berikut.

$$V_c = 0,17 \left(1 + \frac{P_u}{14A_g} \right) \lambda \sqrt{f'_c} b_w d \quad (3.69)$$

Pada persyaratan tulangan transversal kolom dalam dua kondisi terpenuhi, maka penentuan kuat geser tekan beton perlu diperhitungkan. Maka gaya geser yang bekerja pada beton yang sebagian ditahan oleh beton dan sisanya ditahan oleh tulangan geser.

5. Penentuan kuat geser tulangan pasang (V_s) dapat dilihat pada Persamaan 3.70 berikut

$$V_s = \frac{A_v f_y d}{S} \quad (3.70)$$

6. Persyaratan jarak Sengkang minimum sesuai Pasal 18.7.5.3 SNI 2847:2019 dapat dilihat pada Persamaan 3.71 sampai Persamaan 3.73 berikut.

$$S_{min,1} = \frac{d}{4} \quad (3.71)$$

$$S_{min,2} = 6d_b \quad (3.72)$$

$$S_{min,3} = 150 \text{ mm} \quad (3.73)$$

7. Penentuan kapasitas geser nominal (V_n) sesuai Pasal 22.5.1.1 SNI 2847:2019 dapat dilihat pada Persamaan 3.74 berikut.

$$V_n = V_c + V_s \quad (3.74)$$

8. Penentuan rasio kapasitas gaya geser balok dapat dilihat pada Persamaan 3.75 berikut.

$$R = \frac{V_u}{\phi V_n} < 1 \quad (3.75)$$

3.5 Perkuatan Elemen Struktur

Fiber Reinforced Polymer (FRP) adalah salah satu dari material penyusun komposit buatan yang terbuat dari matriks atau pengikat resin sebagai penguatnya guna memperkuat kapasitas dari struktur bangunan. Material komposit ini dapat meningkatkan kapasitas dari gaya momen lentur pada struktur balok beton dengan menambahkannya pada kelemahan sifat beton yaitu pada bagian tarik dan dapat meningkatkan gaya geser pada struktur balok maupun kolom dengan menambahkan material ini pada bagian yang membutuhkan daerah geser. Selain itu, dapat meningkatkan kapasitas gaya beban aksial pada struktur kolom dengan menambahkan material ini pada bagian yang membutuhkannya. Material FRP memiliki beberapa jenis serat sebagai material penyusunnya. Beberapa jenis serat yang terkenal sebagai perkuatan struktur yaitu *Carbon Fiber Reinforced Polymer* (CFRP), *Glass Fiber Reinforced Polymer* (GFRP), dan *Aramid Fiber Reinforced Polymer* (AFRP).

Perkuatan struktur dapat dilaksanakan apabila terjadi kerusakan di waktu yang akan mendatang. Dari kerusakan tersebut dapat menimbulkan penurunan kekuatan, stabilitas, ketahanan dan kekakuan. Dilakukan pemilihan metode perkuatan harus berdasarkan beberapa aspek seperti biaya, waktu, tenaga kerja, bahan material dan aspek estetika.

FRP dibuat beberapa jenis, salah satunya dalam bentuk pelat berupa lembaran tipis sehingga dapat menyesuaikan bentuk dengan elemen yang diperkuat. Terdapat beberapa faktor keunggulan dari penggunaan FRP, diantaranya:

1. Memiliki kuat tarik yang sangat tinggi melebihi baja.
2. Memiliki massa jenis yang ringan (1,4 – 2,4 gr/cm³).
3. Memiliki aspek pekerjaan yang cepat dan mudah.
4. Tidak memerlukan area pekerjaan yang begitu luas.
5. Tidak akan berkarat.

Sementara untuk kekurangannya, di antaranya:

1. Kurang dapat menahan suhu yang tinggi.
2. Kurang dapat menahan sinar ultraviolet, tetapi dapat diatasi dengan adanya proteksi berupa pelapisan dengan material lain.
3. Memiliki aspek biaya yang cukup mahal.

3.5.1 Perkuatan Pada Balok

Perkuatan pada balok dilakukan menggunakan CFRP. Perkuatan CFRP pada balok merupakan metode penguatan struktur dengan menempelkan lembaran atau serat karbon yang diperkuat polimer secara eksternal pada permukaan balok untuk meningkatkan kapasitas lentur dan geser pada balok.

1. Momen Lentur

Berdasarkan SNI 8971:2021, penggunaan perkuatan struktur FRP pada struktur balok dapat meningkatkan kekuatan lentur hingga sebesar 40%. Dengan penempatan komponen material serat yang diaplikasikan sepanjang batang balok pada bagian bawah atau bagian tarik maka akan terjadi peningkatan kekuatan lentur sehingga kenaikan nilai tersebut merupakan angka yang wajar.

Berdasarkan SNI 8971:2021, digunakan faktor reduksi (C_E) lingkungan terhadap sesuai dengan masing – masing jenis seratnya. Nilai faktor reduksi dapat dilihat pada Tabel 3.16 berikut.

Tabel 3. 16 Faktor Reduksi Lingkungan Untuk Sistem FRP dan Jenis Paparannya (Exposure)

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

(Sumber: SNI 8971:2021)

Berdasarkan Tabel 3.18 diatas, jenis serat karbon memiliki nilai faktor reduksi yang tinggi pada tiap kondisi lingkungan manapun dibandingkan dari jenis serat FRP lainnya. Berdasarkan Tabel 16.3c SNI 8971:2021, berikut merupakan tahapan dalam analisis terhadap perkuatan struktur lentur balok.

- a. Perhitungan perkuatan struktur diawali dengan menghitung sifat material desain dari sistem dari sistem FRP. Berdasarkan nilai faktor reduksi (C_E) dari Tabel 3.19, nilai faktor reduksi dikalikan dengan tegangan ultimit (f_{fu}^*) dari material FRP sendiri. Dari perkalian tersebut dapat dihasilkan kuat tarik ultimit (f_{fu}) yang akan dijadikan sebagai dasar perencanaan sekaligus analisis perhitungan perkuatan struktur. Demikian untuk regangan, kurang lebih sama dengan tegangan yang dapat dilihat pada Persamaan 3.76 dan Persamaan 3.77 berikut.

$$f_{fu} = C_E f_{fu}^* \quad (3.76)$$

$$\varepsilon_{fu} = C_E \varepsilon_{fu}^* \quad (3.77)$$

dengan :

C_E : Faktor reduksi lingkungan

f_{fu} : Kekuatan tarik ultimit rencana FRP (MPa)

f_{fu}^* : Kekuatan tarik ultimit material FRP berdasarkan keterangan manufaktur (MPa)

ε_{fu} : Regangan runtuh pada tulangan FRP (mm/mm)

ε_{fu}^* : Regangan runtuh ultimit pada tulangan FRP (mm/mm)

Karena komponen material dari FRP bersifat elastis hingga terjadi patah atau runtuh, maka nilai modulus elastisitas (E_f) dapat dihitung menggunakan hukum hooke yang pada umumnya tidak terpengaruh oleh lingkungan. Persamaan 3.78 dapat dilihat sebagai berikut.

$$E_f = \frac{f_{fu}}{\varepsilon_{fu}} \quad (3.78)$$

dengan :

E_f : Modulus elastisitas tarik FRP (MPa)

- b. Perhitungan properties dari beton, baja tulangan dan ikatan eksternal tulangan FRP yang terdapat pada Persamaan 3.79 sampai Persamaan 3.81. berikut.

$$E_c = 4700\sqrt{f'_c} \quad (3.79)$$

$$A_s = n \frac{1}{4} \pi D^2 \quad (3.80)$$

$$A_f = n t_f w_f \quad (3.81)$$

dengan :

A_s : Luas tulangan baja (mm²)

A_f : Luas perkuatan eksternal FRP (mm²)

n : Jumlah tulangan / jumlah lapisan

t_f : Tebal nominal satu lapis perkuatan FRP (mm)

w_f : Lebar tulangan FRP per lapisan (mm)

- c. Penentuan kondisi regangan yang terdapat pada sisi bawah balok yang terdapat pada Persamaan 3.82 berikut.

$$\varepsilon_{bi} = \frac{M_{DL}(d_f - kd)}{I_{cr}E_c} \quad (3.82)$$

dengan :

ε_{bi} : Regangan subtract beton saat pemasangan tulangan FRP (mm/mm)

M_{DL} : Momen beban mati (Nmm)

d_f : Tinggi efektif perkuatan lentur FRP (mm)

k : Rasio antara tinggi sumbu netral terhadap tinggi tulangan diukur dari serat tekan terdalam

d : Jarak dari serat tekan terjauh ke titik pusat tulangan tarik (mm)

I_{cr} : Momen inersia penampang retak yang ditransfer ke beton (mm⁴)

- d. Penentuan regangan desain pada system FRP. Penentuan tersebut ditentukan dengan memperhitungkan pola kegagalan lekatan yang terdapat pada Persamaan 3.83 berikut.

$$\varepsilon_{fd} = 0,41 \sqrt{\frac{f'_c}{nE_f t_f}} \leq 0,9\varepsilon_{fu} \quad (3.83)$$

dengan :

ε_{fd} : Regangan letakan tulangan FRP eksternal (mm/mm)

- e. Memperkirakan kedalaman ke sumbu netral, (c). hal tersebut guna mencegah kegagalan debonding akibat retak antara. Nilai c disesuaikan setelah dilakukan pengecekan keseimbangan. Lalu, perkiraan awal yang masuk akal terhadap nilai c dapat dilihat pada Persamaan 3.84 berikut.

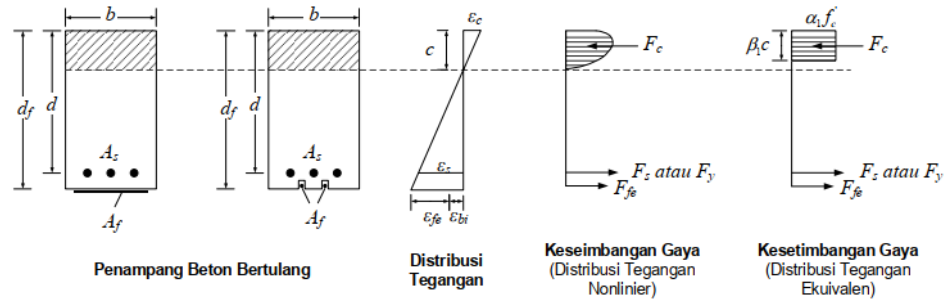
$$c = 0,20d \quad (3.84)$$

- f. Penentuan tingkat regangan efektif dalam perkuatan struktur FRP untuk mempertimbangkan kegagalan yang dapat dilihat pada Persamaan 3.85 berikut.

$$\varepsilon_{fe} = 0,003 \frac{(d_f - c)}{c} - \varepsilon_{bi} \leq \varepsilon_{fd} \quad (3.85)$$

dengan :

ε_{fe} : Regangan efektif tulangan FRP saat runtuh (mm/mm)



Gambar 3.11 Perkuatan Struktur Balok dengan Perkuatan Lentur

(Sumber: SNI 8971:2021)

- g. Perhitungan perhitungan terhadap regangan pada baja tulangan non – tekan yang ada dan tegangan pada baja tulangan serta FRP yang dapat dilihat pada Persamaan 3.86 sampai Persamaan 3.88 berikut.

$$\varepsilon_c = (\varepsilon_{fe} + \varepsilon_{bi}) \left(\frac{c}{d_f - c} \right) \quad (3.86)$$

$$f_s = E_s \varepsilon_s \leq f_y \quad (3.87)$$

$$f_{fe} = E_f \varepsilon_{fe} \quad (3.88)$$

dengan :

ε_c : Regangan beton (mm/mm)

ε_s : Regangan tulangan non prategang (mm/mm)

f_s : Tegangan tulangan baja non prategang (MPa)

f_{fe} : Tegangan efektif di dalam FRP (MPa)

E_s : Modulus elastisitas baja (MPa)

- h. Perhitungan komponen kekuatan lentur terhadap baja dan FRP yang dapat dilihat pada Persamaan 3.89 dan Persamaan 3.90 berikut.

$$M_{ns} = A_s f_s \left(d - \frac{\beta_1 c}{2} \right) \quad (3.89)$$

$$M_{nf} = A_f f_{fe} \left(d_f - \frac{\beta_1 c}{2} \right) \quad (3.90)$$

dengan :

M_{ns} : Kontribusi tulangan baja terhadap kekuatan lentur nominal (Nmm)

M_{nf} : Kontribusi perkuatan FRP terhadap kekuatan lentur nominal (Nmm)

- i. Perhitungan kekuatan lentur desain dengan tambahan kekuatan faktor reduksi (Ψ_f) pada Tabel 3.20 faktor reduksi tambahan yang dapat dilihat pada Persamaan 3.91 dan Persamaan 3.92 berikut.

$$M_u \leq \phi M_n \quad (3.91)$$

$$\phi M_n = \phi [M_{ns} + \Psi_f M_{nf}] \quad (3.92)$$

dengan :

M_u : Momen terfaktor penampang (Nmm)

M_n : Kekuatan lentur nominal (Nmm)

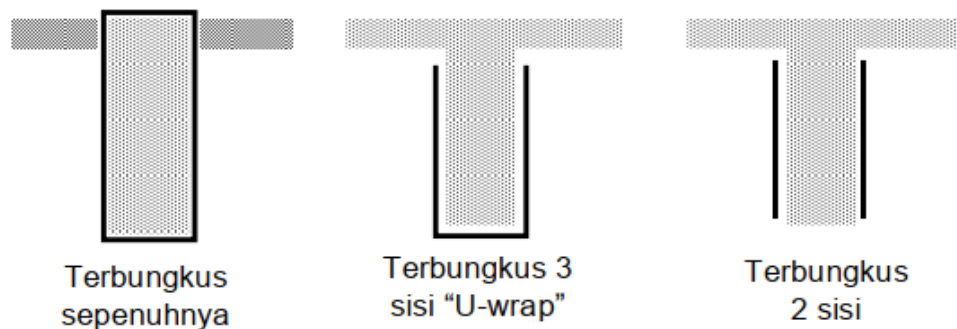
M_{ns} : Kontribusi tulangan baja terhadap kekuatan lentur nominal (Nmm)

Ψ_f : Faktor reduksi kekuatan tulangan FRP

ϕ : Faktor reduksi kekuatan

2. Gaya Geser

Berdasarkan SNI 8971:2021 berikut merupakan tahapan dalam analisis perkuatan terhadap geser balok.



Gambar 3.12 Skema Lilitan Pembungkusan

(Sumber: SNI 8971:2021)

Tabel 3.17 Faktor Reduksi Tambahan yang Direkomendasikan Untuk Penulangan Geser FRP

Ψ_f	
0,95	Komponen – komponen yang terbungkus sepenuhnya
0,85	Skema dua sisi berlawanan dan tiga sisi

(Sumber: SNI 8971:2021)

- Menghitung perkuatan geser adalah menghitung sifat material desain dari sistem FRP yang digunakan. Digunakan kembali faktor reduksi lingkungan beserta variabel komponen dari FRP yang dapat dilihat pada Persamaan 3.76 dan Persamaan 3.77.
- Menghitung tingkat regangan efektif pada perkuatan geser FRP. Dalam tahap ini digunakan skema lilitan U atau tiga sisi dan dua sisi dalam pembungkusan elemen balok yang dapat dilihat pada Persamaan 3.93 sampai Persamaan 3.98 berikut.

$$\varepsilon_{fe} = k_v \varepsilon_{fu} \leq 0,004 \quad (3.93)$$

$$L_e = \frac{2500}{(n t_f E_f)^{0,58}} \quad (3.94)$$

$$k_1 = \left(\frac{f'_c}{4000} \right)^{2/3} \quad (3.95)$$

$$k_2 = \frac{d_{fe} - L_e}{d_{fv}} \quad \text{untuk pembungkusan tiga sisi} \quad (3.96)$$

$$k_2 = \frac{d_{fe} - 2L_e}{d_{fv}} \quad \text{untuk pembungkusan dua sisi} \quad (3.97)$$

$$k_v = \frac{k_1 k_2 L_e}{468 \varepsilon_{fu}} \quad (3.98)$$

dengan :

L_e : Panjang lekatan aktif laminasi FRP (mm)

k_1 : Faktor modifikasi untuk k_v , dengan memperhitungkan kekuatan tekan beton

k_2 : Faktor modifikasi untuk k_v , dengan memperhitungkan skema pembungkusan

- c. Menghitung suatu kontribusi perkuatan FRP terhadap kekuatan geser balok. Kontribusi yang dimaksud dapat diperoleh dari luas penampang FRP dan tegangan efektif FRP yang dapat dilihat pada Persamaan 3.99 sampai Persamaan 3.101 berikut

$$V_f = A_{fv} \times f_{fe} \times \frac{d_{fv}}{s_f} \quad (3.99)$$

$$A_{fv} = 2nt_f w_f \quad (3.100)$$

$$f_{fe} = E_f \varepsilon_{fe} \quad (3.101)$$

- d. Langkah keempat adalah dihitung kekuatan geser penampang elemen beton yang diperkuat FRP pada Persamaan 3.102 berikut.

$$\phi V_n = \phi (V_c + V_s + \Psi_f V_f) \quad (3.102)$$

- e. Langkah terakhir adalah membandingkan antara nilai kekuatan geser yang diperkuat dengan FRP dengan nilai kekuatan geser yang diperlukan, dimana nilai kekuatan geser yang diperkuat FRP harus lebih besar dari nilai kekuatan geser yang diperlukan yang dapat dilihat pada Persamaan 3.103 berikut.

$$\phi V_n \geq V_u \quad (3.103)$$

3.5.2 Perkuatan Pada Kolom

Perkuatan pada kolom dilakukan menggunakan CFRP. Perkuatan CFRP pada kolom merupakan metode penguatan struktur dengan menempelkan lembaran atau serat karbon yang diperkuat polimer secara eksternal pada permukaan kolom untuk meningkatkan kapasitas lentur, aksial dan geser pada kolom.

1. Gaya Aksial dan Momen Lentur

Berdasarkan SNI 8971:2021 berikut merupakan tahapan dalam analisis kekuatan terhadap aksial dan lentur kolom.

- a. Perhitungan diagram interaksi P-M untuk kolom bukan lingkaran yang diperkuat ($n=0$). Hasil diagram interaksi kolom yang belum diperkuat akan dibandingkan dengan diagram interaksi yang sudah diperkuat. Dari perbandingan tersebut dianalisis penambahan kekuatan strukturnya.

Berdasarkan SNI 8971:2021, diagram interaksi momen beban aksial (P-M) dapat dikembangkan dengan memenuhi kompatibilitas regangan dan keseimbangan gaya menggunakan model untuk perilaku tegangan regangan untuk beban bertulang yang terkekang FRP. Untuk penyederhanaan, bagian dari diagram P-M beton bertulang yang terkekang dan tidak terkekang keruntuhan akibat kontrol tekan dapat direduksi menjadi dua kurva bilinear yang melewati titik – titik berikut.

- 1) Titik A (tekan murni) pada regangan tekan aksial seragam beton terkekang ε_{ccu} .
- 2) Titik B dengan distribusi regangan yang bersesuai dengan regangan nol pada lapisan tulangan baja longitudinal terdekat dengan permukaan tarik, dan regangan tekan ε_{ccu} pada permukaan tekan.
- 3) Titik C dengan distribusi regangan yang sesuai dengan kegagalan berimbang dengan regangan tekan maksimum ε_{ccu} dan regangan tarik leleh ε_{sy} pada lapisan tulangan longitudinal terdekat dengan permukaan tarik.

Untuk beton terkekang, nilai ϕP_n yang sesuai dengan Tarik A ($\phi M_n = 0$) diberikan dalam Persamaan 3.104 sampai 3.114 berikut.

$$\phi P_{n(A)} = \phi 0,8(0,85f'_{cc}(A_g - A_{st}) + f_y A_{st}) \quad (3.104)$$

$$\phi M_{n(A)} = 0 \quad (3.105)$$

$$E_2 = \frac{f'_{cc} - f'_c}{\varepsilon_{ccu}} \quad (3.106)$$

$$\varepsilon'_t = \frac{2f'_c}{E_c - E_2} \quad (3.107)$$

$$f_c = E_c \varepsilon_c - \frac{(E_c - E_2)^2}{4f'_c}, 0 \leq \varepsilon_c \leq \varepsilon'_t \quad (3.108)$$

$$f_c = f'_c + E_2 \varepsilon_c, \varepsilon'_t \leq \varepsilon_c \leq \varepsilon_{c,max} \quad (3.109)$$

$$f'_{cc} = f'_c + \Psi_f 3,3 k_a f_l \quad (3.110)$$

$$\varepsilon_{ccu} = \varepsilon'_c \left(1,50 + 1,2 k_b \frac{f_l}{f'_c} \left(\frac{\varepsilon_{fe}}{\varepsilon'_c} \right)^{0,45} \right) \quad (3.111)$$

$$f_l = \frac{2E_f n t_{fe}}{\sqrt{b^2 + h^2}} \quad (3.112)$$

$$\varepsilon_{c,max} \leq \varepsilon_{ccu} \leq 0,01 \quad (3.113)$$

$$\varepsilon_{fe} = 0,004 \leq k_2 \varepsilon_{fu} \quad (3.114)$$

dengan :

E_2 : Kemiringan bagian lurus dari model tegangan regangan untuk beton terkekang FRP (MPa)

E_c : Modulus elastisitas beton (MPa)

f'_{cc} : Kekuatan tekan beton terkekang (MPa)

f_c : Tegangan tekan beton (MPa)

f_l : Tekanan kekangan maksimum karena selubung FRP (MPa)

ε'_t : Ragangan transisi pada kurva tegangan – regangan tulangan FRP (mm/mm)

ε_c : Regangan beton (mm/mm)

ε_{ccu} : Regangan tekan aksial ultimit beton

Selanjutnya dicari titik B dan C dapat dilihat pada Persamaan 3.115 dan 3.116 berikut.

$$\emptyset P_{n(B,C)} = \emptyset [A(y_t)^3 + B(y_t)^2 + C(y_t) + D + \sum A_{si} f_{si}] \quad (3.115)$$

$$\emptyset M_{n(B,C)} = \emptyset [E(y_t)^4 + F(y_t)^3 + G(y_t)^2 + H(y_t) + I + \sum A_{si} f_{si} d_i] \quad (3.116)$$

Dimana dari persamaan diatas dijabarkan menjadi koefisien A, B, C, D, E, F, G, H, I yang dapat dilihat pada Persamaan 3.117 sampai 3.125 berikut.

$$A = \frac{-b(E_c - E_2)^2}{12f'_c} \left(\frac{\varepsilon_{ccu}}{c} \right)^2 \quad (3.117)$$

$$B = \frac{b(E_c - E_2)}{2} \left(\frac{\varepsilon_{ccu}}{c} \right) \quad (3.118)$$

$$C = -bf'_c \quad (3.119)$$

$$D = bcf'_c + \frac{bcE_2}{2} (\varepsilon_{ccu}) \quad (3.120)$$

$$E = \frac{-b(E_c - E_2)^2}{16f'_c} \left(\frac{\varepsilon_{ccu}}{c} \right)^2 \quad (3.121)$$

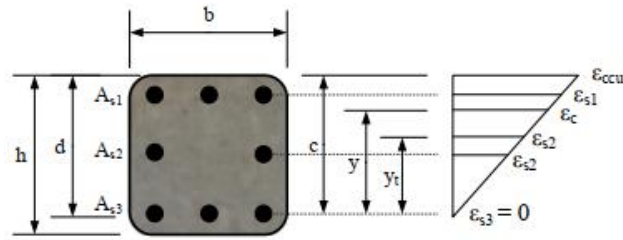
$$F = \left[b \left(c - \frac{h}{2} \right) \frac{-b(E_c - E_2)^2}{12f'_c} \left(\frac{\varepsilon_{ccu}}{c} \right)^2 + \frac{b(E_c - E_2)}{2} \left(\frac{\varepsilon_{ccu}}{c} \right) \right] \quad (3.122)$$

$$G = \left[\frac{b}{2} f'_c + b \left(c - \frac{h}{2} \right) \frac{b(E_c - E_2)}{2} \left(\frac{\varepsilon_{ccu}}{c} \right) \right] \quad (3.123)$$

$$H = bf'_c \left(c - \frac{h}{2} \right) \quad (3.124)$$

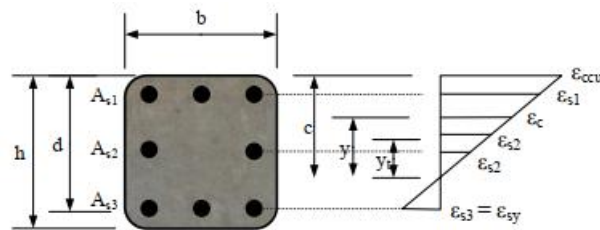
$$I = \left[\frac{bc^2}{2} f'_c - bcf'_c \left(c - \frac{h}{2} \right) + \frac{bc^2 E_2}{3} (\varepsilon_{ccu}) - \frac{bcE_2}{2} \left(c - \frac{h}{2} \right) (\varepsilon_{ccu}) \right] \quad (3.125)$$

Dari persamaan – persamaan diatas, distribusi regangan untuk titik B dan C terhadap diagram interaksi dapat disederhanakan menjadi Gambar 3.13 dan Gambar 3.14 dibawah ini.



Gambar 3.13 Distribusi Regangan di titik B

(Sumber: SNI 8971:2021)



Gambar 3.14 Distribusi Regangan di titik C

(Sumber: SNI 8971:2021)

Pada Persamaan 3.117 sampai Persamaan 3.125 diatas, nilai c adalah suatu jarak dari regangan baja tulangan ekstrim $\varepsilon(s = 0)$ ke sumbu netral yang sesuai ditunjukkan pada Gambar 3.12 dan Gambar 3.13 diatas beserta dihitung berdasarkan Persamaan 3.126 dan Persamaan 3.127 parameter y_t

menunjukkan jarak sumbu netral ke regangan transisi yang sesuai ditunjukkan pada Gambar 3.17 dan Gambar 3.18 dan dihitung berdasarkan Persamaan 3.28.

$$c = d, \text{ untuk titik B} \quad (3.126)$$

$$c = d \frac{\varepsilon_{ccu}}{\varepsilon_{sy} + \varepsilon_{ccu}}, \text{ untuk titik C} \quad (3.127)$$

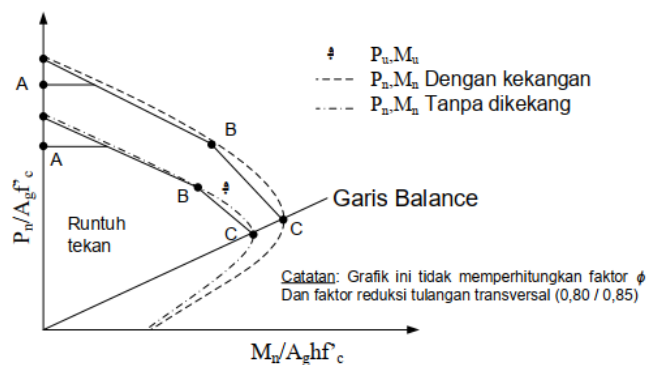
$$y_t = c \frac{\varepsilon'_c}{\varepsilon_{ccu}} \quad (3.128)$$

Faktor bentuk k_a dalam Persamaan 3.119 dan k_b dalam Persamaan 3.120 tergantung pada dua parameter yaitu area penampang beton yang efektif terkekang (A_e), dan aspek rasio $\frac{b}{h}$, seperti ditunjukkan masing – masing dalam Persamaan 3.129 dan Persamaan 3.130 di bawah ini.

$$k_a = \frac{A_e}{A_c} \left(\frac{b}{h} \right)^2 \quad (3.129)$$

$$k_b = \frac{A_e}{A_c} \left(\frac{b}{h} \right)^{0,5} \quad (3.130)$$

- b. Pembuatan perbandingan antara diagram interaksi kolom yang belum diperkuat dan diagram interaksi yang sudah diperkuat menggunakan FRP. Contoh diagram interaksi dapat ditunjukan seperti Gambar 3.15 berikut.



Gambar 3.15 Diagram Interaksi

(Sumber: SNI 8971:2021)

2. Gaya Geser

Berdasarkan SNI 8971:2021 berikut merupakan tahapan dalam analisis perkuatan terhadap geser kolom.

- a. Dalam perhitungan perkuatan struktur kolom terhadap gaya geser, tetap digunakan faktor reduksi lingkungan (C_E) yang sesuai pada Tabel 3.20 Faktor Reduksi.
- b. Perhitungan desain material properti sistem FRP seperti pada Persamaan 3.76 dan Persamaan 3.77.
- c. Perhitungan Tingkat regangan efektif untuk perkuatan FRP. Berdasarkan SNI 8971:2021, Tingkat regangan dibatasi sebesar 0,4% dan apabila regangan efektif lebih besar maka diambil nilai 0,4% yang dapat dilihat pada Persamaan 3.131 berikut.

$$\varepsilon_{fe} = 0,004 \leq 0,75\varepsilon_{fu} \quad (3.131)$$

- d. Perhitungan antara kebutuhan gaya geser yang diperlukan dari perkuatan FRP dapat dihitung berdasarkan dengan peningkatan kekuatan geser yang dibutuhkan (ΔV_u), faktor reduksi dari kekuatan terhadap geser ϕ dan digunakan faktor reduksi parsial ψ_f sebesar 0,95 untuk seluruh penampang yang dibungkus oleh FRP yang dapat dilihat pada Persamaan 3.132 berikut.

$$V_{f,reqd} = \frac{\Delta V_u}{\phi(\psi_f)} \quad (3.132)$$

dengan :

V_f : Kekuatan geser nominal oleh sitrup FRP (N)

- e. Penentuan luasan dari perkuatan FRP yang dibutuhkan yang dapat dilihat pada Persamaan 3.133 berikut.

$$A_{fV,reqd} = \frac{V_{f,reqd} S_f}{\varepsilon_{fe} E_f (\sin \alpha + \cos \alpha) d_f} \quad (3.133)$$

- f. Menentukan jumlah lapisan dan lebar strip beserta jarak yang dapat dilihat pada Persamaan 3.134 berikut.

$$n = \frac{A_{f,reqd}}{2t_f w_f} \quad (3.134)$$

BAB IV

METODE PENELITIAN

4.1 Objek Penelitian

Objek penelitian ini adalah sebuah bangunan gedung eksisting yang difungsikan sebagai hotel dan berlokasi di Ngampilan, Yogyakarta. Gedung hotel tersebut telah berdiri sejak tahun 2012 dan memiliki 6 lantai. Seiring dengan kebutuhan operasional, saat ini terdapat rencana untuk melakukan penambahan satu lantai pada bangunan tersebut.

4.2 Program Yang Digunakan

Pada pelaksanaan penelitian ini digunakan beberapa program untuk membantu dalam proses berjalannya analisis dengan tujuan guna mempermudah dalam menyelesaikan permasalahan yang ada. Program yang digunakan dalam membantu pelaksanaan penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. ETABS, program ini akan digunakan dalam pemodelan dari struktur bangunan dan digunakan untuk membantu menganalisis struktur dari bangunan.
2. *SP Column*, program ini akan digunakan untuk menghitung kapasitas elemen kolom beton bertulang terhadap kombinasi beban aksial dan momen lentur.
3. *AutoCad*, program ini digunakan untuk menggambar detail perkuatan.
4. *Microsoft Excel*, program ini akan digunakan dalam menghitung dan menganalisis data hasil luaran yang didapat dari program ETABS.

4.3 Tahapan Penelitian

Perencanaan penelitian dilakukan agar mempermudah untuk mencapai tujuan penelitian, maka disusun langkah-langkah penelitian sebagai berikut.

1. Studi literatur

Untuk mendukung penelitian ini dilakukan studi literatur yang mengacu pada tugas akhir, jurnal serta buku – buku yang berhubungan dengan evaluasi dan

perkuatan bangunan gedung eksisting menggunakan *Carbon Fiber Reinforced Polymer* (CFRP). Selain itu, digunakan acuan peraturan dan standar dalam studi literatur ini adalah sebagai berikut.

- a. SNI 1726:2019, Tata cara perencanaan ketahanan gempa untuk struktur bangunan gedung dan non gedung.
- b. SNI 1727:2020, Beban desain minimum dan kriteria terkait untuk bangunan gedung dan struktur lain.
- c. SNI 2847:2019, Persyaratan beton struktural untuk bangunan gedung dan penjelasan.
- d. SNI 8971:2021, Panduan perancangan dan pelaksanaan sistem lembaran serat berpolimer terlekat eksternal untuk perkuatan struktur beton.
- e. Peraturan Pembebanan Indonesia Untuk Gedung 1983

2. Pengumpulan Data.

Data yang digunakan merupakan data sekunder yang diperoleh dari konsultan atau kontraktor. Data – data yang berkaitan dengan penelitian ini merupakan data yang diperoleh dari *as built drawing* sebagai berikut.

- a. Lokasi bangunan : Ngampilan, Yogyakarta
- b. Fungsi bangunan : Gedung Hotel
- c. Konstruksi bangunan : Beton bertulang
- d. Tinggi total gedung : 23,1 meter
- e. Jumlah lantai : 7 (tujuh) lantai yang terdiri dari 6 (enam) lantai eksisting dan 1 (satu) lantai tambahan
- f. Tinggi per lantai : 3,3 meter
- g. Mutu beton, f'_c : 25 MPa
- h. Mutu baja tulangan f_y : 400 MPa
- i. Dimensi elemen struktur

1) Kolom

Adapun tipe dan dimensi kolom dapat dilihat pada Tabel 4.1 sebagai berikut.

Tabel 4. 1 Tipe dan Dimensi Kolom

No	Tipe	Lantai	Dimensi	
			B (mm)	H (mm)
1	K1	M	800	800
		L2-A	400	800
2	K2	M-A	400	800
3	K4	M-A	400	700
4	K5	M-A	400	600
5	K6	M-A	200	600
6	K7	M-A	200	600
7	K8	M-A	400	800

(Sumber : *as built drawing* hotel di area Ngampilan, Yogyakarta)

2) Balok

Adapun tipe dan dimensi balok dapat dilihat pada Tabel 4.2 sebagai berikut.

Tabel 4. 2 Tipe dan Dimensi Balok

No	Tipe	Dimensi	
		B (mm)	H (mm)
1	B1	600	1200
2	B2	400	600
3	B3	400	600
4	B4	400	600
5	B5	400	600
6	B6	200	600
7	B7	300	600
8	B8	400	700
9	B9	250	500
10	B10	400	600
11	B11	400	700
12	B12	250	300

(Sumber : *as built drawing* hotel di area Ngampilan, Yogyakarta)

3) Pelat

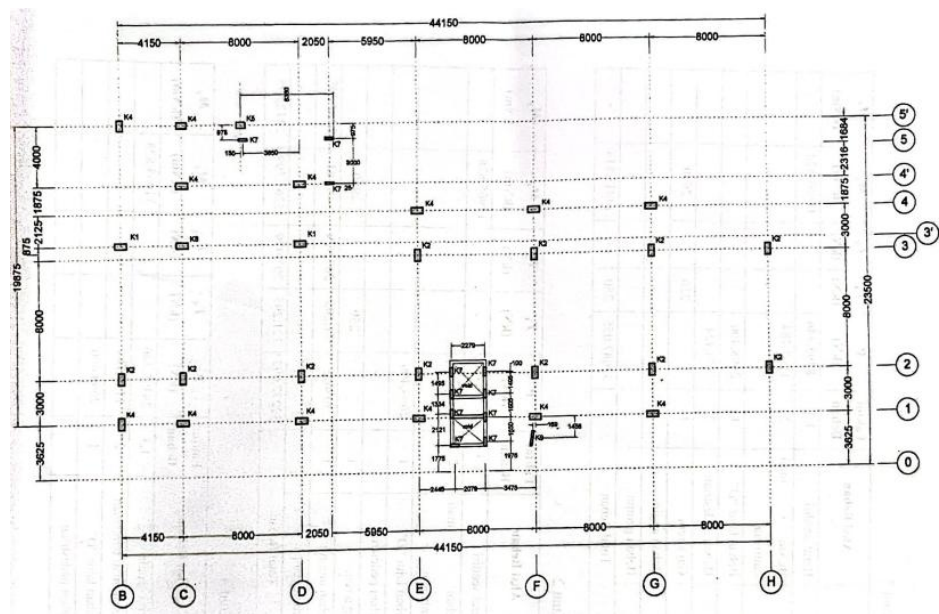
Adapun tipe dan tebal pelat dapat dilihat pada Tabel 4.2 sebagai berikut.

Tabel 4. 3 Tipe dan Dimensi Balok

No	Tipe	Tebal (mm)
1	P1	140
2	P2	120
3	P3	120
4	P4	140

(Sumber : *as built drawing* hotel di area Ngampilan, Yogyakarta)

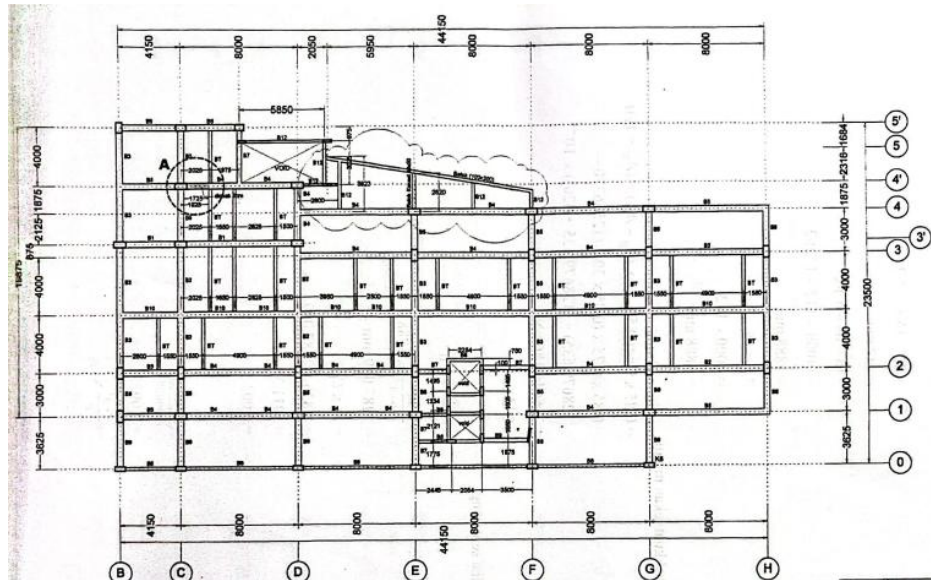
j. Denah kolom



Gambar 4. 1 Denah Kolom

(Sumber : *as built drawing* hotel di area Ngampilan, Yogyakarta)

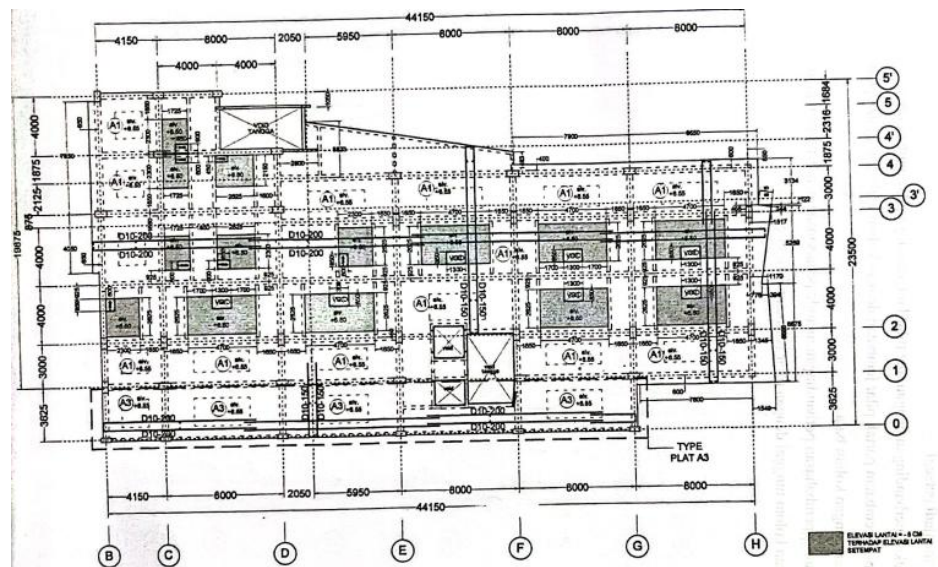
k. Denah balok



Gambar 4. 2 Denah Kolom

(Sumber : *as built drawing* hotel di area Ngampilan, Yogyakarta)

l. Denah pelat lantai



Gambar 4. 3 Denah Pelat Lantai

(Sumber : *as built drawing* hotel di area Ngampilan, Yogyakarta)

m. Detail kolom

KOLOM K1		KOLOM K2		KOLOM K3		KOLOM K4	
TUMPUAN	LAPANGAN	TUMPUAN	LAPANGAN	TUMPUAN	LAPANGAN	TUMPUAN	LAPANGAN
20 D25 D10 - 100	20 D25 D10 - 150	24 D25 D10 - 100	24 D25 D10 - 150	14 D19 D10 - 100	14 D19 D10 - 150	18 D19 D10 - 100	18 D19 D10 - 150
800 X 800		400 X 800				400 X 700	
20 D25 D10 - 100	20 D25 D10 - 150	20 D25 D10 - 100	20 D25 D10 - 150	14 D19 D10 - 100	14 D19 D10 - 150	18 D19 D10 - 100	18 D19 D10 - 150
800 X 800		400 X 800				400 X 700	
20 D25 D10 - 100	20 D25 D10 - 150	20 D25 D10 - 100	20 D25 D10 - 150			18 D19 D10 - 100	18 D19 D10 - 150
800 X 800		400 X 800				400 X 700	
20 D25 D10 - 100	20 D25 D10 - 150	20 D25 D10 - 100	20 D25 D10 - 150			18 D19 D10 - 100	18 D19 D10 - 150
800 X 800		400 X 800				400 X 700	
20 D25 D10 - 100	20 D25 D10 - 150	12 D25 D10 - 100	12 D25 D10 - 150			12 D19 D10 - 100	12 D19 D10 - 150
400 X 800		400 X 800		400 X 800		400 X 700	

Gambar 4. 4 Detail Kolom

(Sumber : as built drawing hotel di area Ngampilan, Yogyakarta)

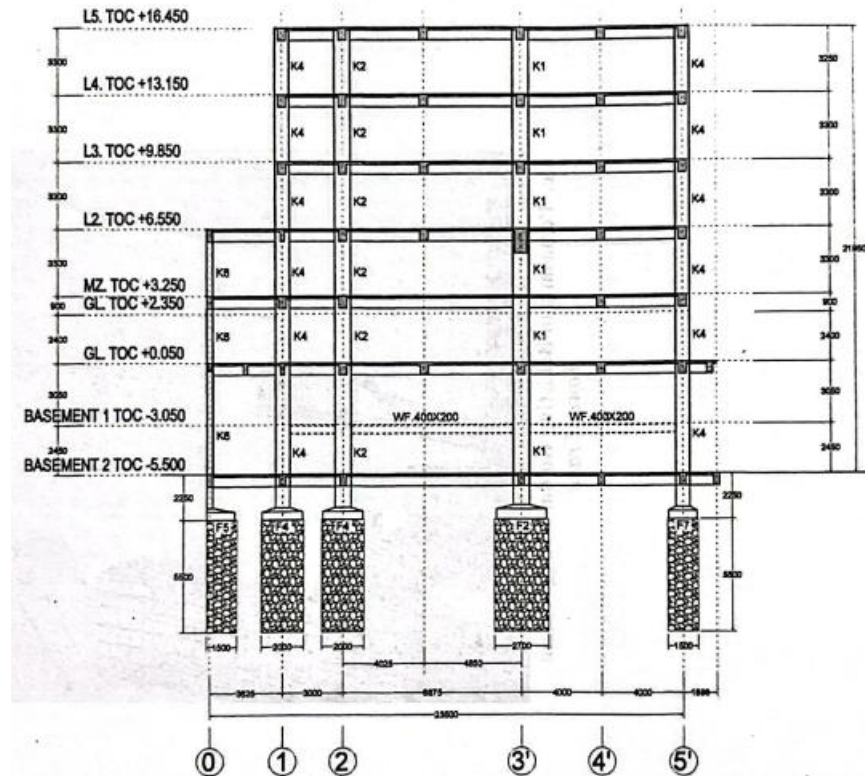
n. Detail balok

BALOK B1 (800 x 1500)			TYPE	BALOK B2 (400 x 800)			TYPE	BALOK B3 (400 x 800)			TYPE
TUMPUAN	LAPANGAN	TUMPUAN	POKOK	TUMPUAN	LAPANGAN	TUMPUAN	POKOK	TUMPUAN	LAPANGAN	TUMPUAN	POKOK
			POKOK				POKOK				POKOK
12 D25 12 D25 - 100	8 D25 12 D25 - 150	12 D25 12 D25 - 100	12 D25 12 D25 - 100	8 D25 12 D25 - 100	8 D25 12 D25 - 100	8 D25 12 D25 - 100	8 D25 12 D25 - 100	8 D25 12 D25 - 100	8 D25 12 D25 - 100	8 D25 12 D25 - 100	8 D25 12 D25 - 100
BALOK B4 (400 x 800)			TYPE	BALOK B5 (400 x 800)			TYPE	BALOK B6 (200 x 800)			TYPE
TUMPUAN	LAPANGAN	TUMPUAN	POKOK	TUMPUAN	LAPANGAN	TUMPUAN	POKOK	TUMPUAN	LAPANGAN	TUMPUAN	POKOK
			POKOK				POKOK				POKOK
8 D25 12 D25 - 100	8 D25 12 D25 - 150	8 D25 12 D25 - 100	8 D25 12 D25 - 100	8 D25 12 D25 - 100	8 D25 12 D25 - 100	8 D25 12 D25 - 100	8 D25 12 D25 - 100	8 D25 12 D25 - 100	8 D25 12 D25 - 100	8 D25 12 D25 - 100	8 D25 12 D25 - 100
BALOK B7 (300 x 800)			TYPE	BALOK B8 (400 x 700)			TYPE	BALOK B9 (200 x 800)			TYPE
TUMPUAN	LAPANGAN	TUMPUAN	POKOK	TUMPUAN	LAPANGAN	TUMPUAN	POKOK	TUMPUAN	LAPANGAN	TUMPUAN	POKOK
			POKOK				POKOK				POKOK
8 D25 12 D25 - 100	8 D25 12 D25 - 150	8 D25 12 D25 - 100	8 D25 12 D25 - 100	8 D25 12 D25 - 100	8 D25 12 D25 - 100	8 D25 12 D25 - 100	8 D25 12 D25 - 100	8 D25 12 D25 - 100	8 D25 12 D25 - 100	8 D25 12 D25 - 100	8 D25 12 D25 - 100

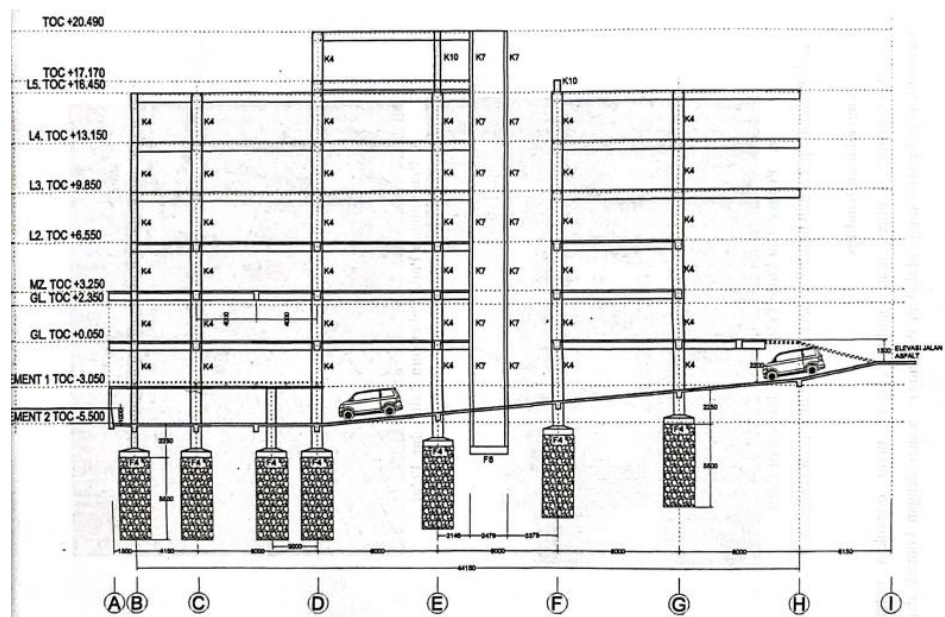
Gambar 4. 5 Detail Balok

(Sumber : as built drawing hotel di area Ngampilan, Yogyakarta)

o. Potongan portal



Gambar 4. 6 Potongan Portal Arah X
(Sumber : *as built drawing* hotel di area Ngampilan, Yogyakarta)

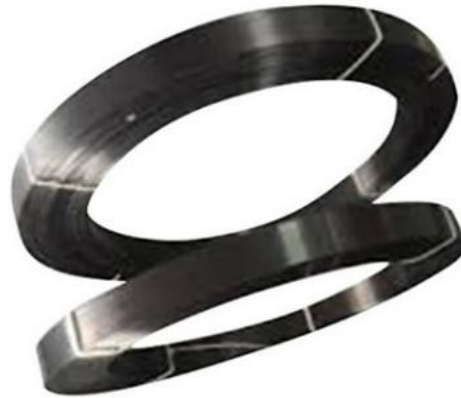


Gambar 4. 7 Potongan Portal Arah Y
(Sumber : *as built drawing* hotel di area Ngampilan, Yogyakarta)

p. Data Material CFRP

Adapun data material CFRP yang digunakan pada penelitian ada dua adalah sebagai berikut.

1) CFRP *Laminate Tape*

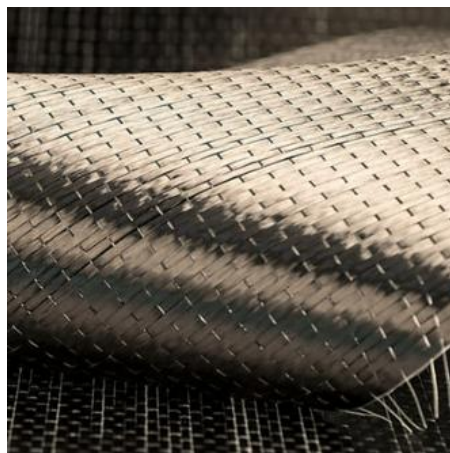


Gambar 4. 8 CFRP *Laminate Tape*

(Sumber : Katalog SIKA *Carbodur* S1012)

Nama produk	=	SIKA <i>Carbodur</i> S1012
Ketebalan 1 lapis CFRP, t_f	=	1,2 mm
Kekuatan tarik CFRP, f_{fu}^*	=	2800 MPa
Ragangan putus CFRP, ε_{fu}^*	=	0,17
Modulus elastisitas CFRP, E_f	=	165000 MPa

2) CFRP *Wrap*



Gambar 4. 9 CFRP *Wrap*

(Sumber : Katalog SIKA *Wrap* 600C)

Nama produk	=	SIKA <i>Wrap</i> 600C
Ketebalan 1 lapis CFRP, t_f	=	0,33 mm
Kekuatan tarik CFRP, f_{fu}^*	=	4000 MPa
Ragangan putus CFRP, ε_{fu}^*	=	0,021
Modulus elastisitas CFRP, E_f	=	230000 MPa

5. Pembebanan Struktur

Pembebanan yang diperhitungkan adalah beban gravitasi yang terdiri dari beban mati dan beban hidup mengacu pada SNI 1727:2020, serta beban gempa mengacu pada SNI 1726:2019.

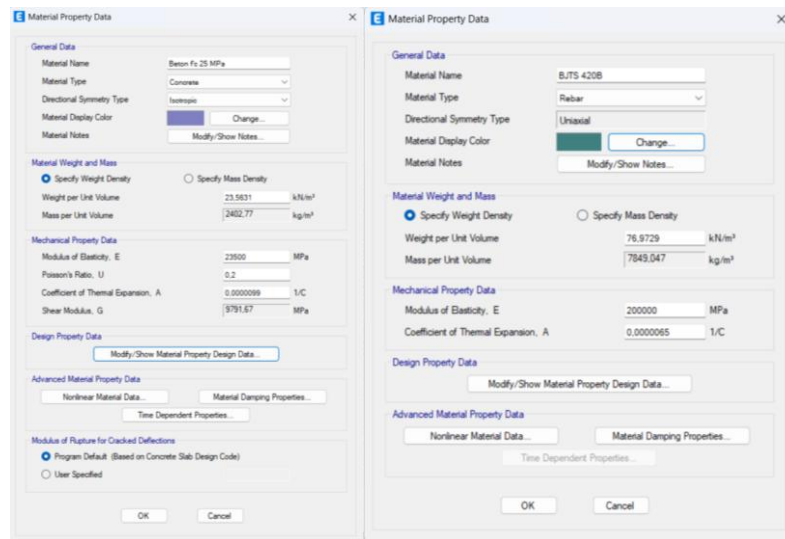
6. Pemodelan Struktur

Pemodelan struktur yang dilakukan mencakup struktur eksisting dan struktur lantai tambahan. Pemodelan ini dilakukan pemodelan rangka terbuka (*open frame*) tiga dimensi (3D) dengan bantuan program ETABS. Kemudian setiap model struktur dilakukan penginputan beban – beban yang diperhitungkan ke dalam pemodelan 3D.

Struktur yang akan dimodelkan adalah bangunan gedung 7 lantai. Pemodelan yang dilakukan berdasarkan *as built drawing* serta mengacu pada standar dan peraturan yang berlaku. Adapun langkah-langkah yang perlu diperhatikan adalah sebagai berikut.

a. Pendefinisian material struktur

Pendefinisian material struktur dilakukan sesuai dengan karakteristik bangunan yang dianalisis. Pada pemodelan ini digunakan material beton dengan kuat tekanan rencana $f'_c = 25$ MPa serta material mutu baja tulangan sebesar $f_y = 400$ MPa yang dapat dilihat pada Gambar 4.10 sebagai berikut.

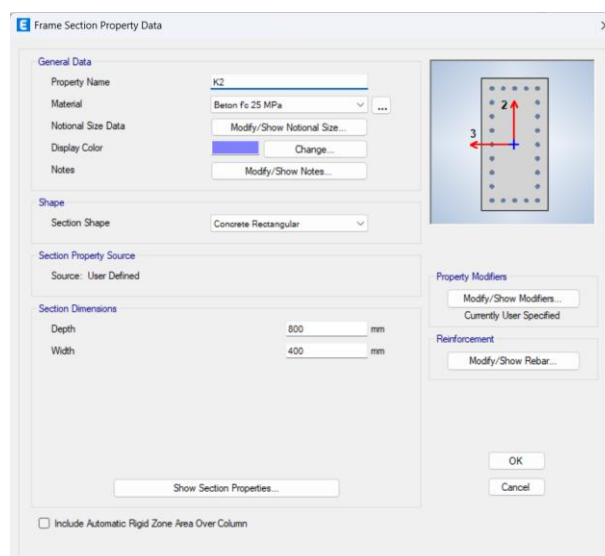


Gambar 4. 10 Material Struktur

(Sumber : Software ETABS)

b. Pendefinisian penampang struktur

Setiap elemen pada bangunan harus didefinisikan dengan profil ukuran penampang dan materialnya. Material yang digunakan yaitu struktur beton bertulang. Setelah tiap elemen dapat didefinisikan, maka dapat dilakukan perhitungan analisis. Pada ETABS, elemen kolom dan balok didefinisikan menjadi elemen frame. Pendefinisian penampang struktur dapat dilihat pada Gambar 4.11 sebagai berikut.

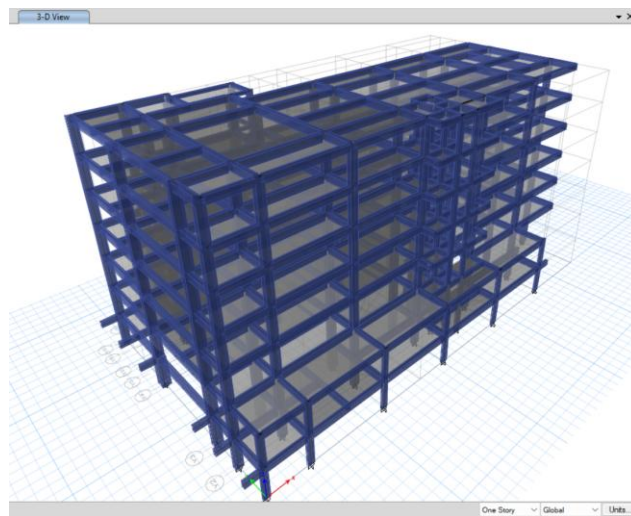


Gambar 4. 11 Penampang Struktur

(Sumber : Software ETABS)

c. Pemodelan struktur

Dalam tahap ini, pemodelan struktur dilakukan dengan penyesuaian gambar *as built drawing* hotel. Gedung dimodelkan mulai dari lantai satu hingga lantai tujuh, yang terdiri atas enam lantai eksisting dan satu lantai tambahan yang direncanakan mengikuti konfigurasi lantai enam. Pemodelan struktur dapat dilihat pada Gambar 4.12 sebagai berikut.

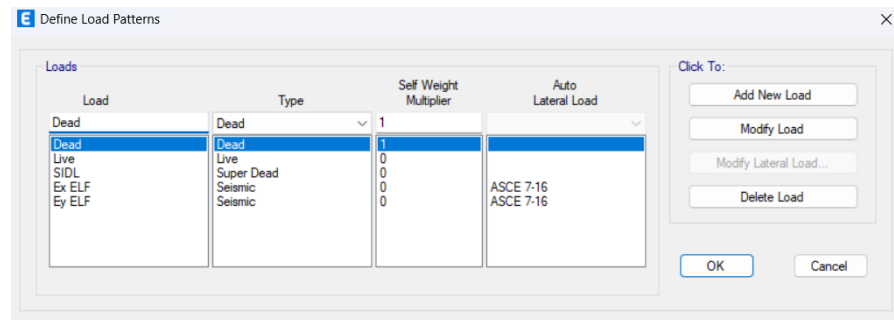


Gambar 4. 12 Pemodelan Struktur

(Sumber : *Software ETABS*)

d. Pembebanan struktur

Pada tahap ini dilakukan pemasukan beberapa model beban yang bekerja pada model struktur bangunan tersebut mulai dari beban mati, beban hidup, dan beban gempa. Khusus untuk beban gempa dilakukan analisis respons spektrum dan perhitungan manual untuk memeriksa gaya geser dinamik yang disesuaikan dengan peraturan yang berlaku berikut dimasukkan beberapa variasi pembebanan yang dapat dilihat pada Gambar 4.13 sebagai berikut.



Gambar 4. 13 Pembebanan Struktur

(Sumber : *Software ETABS*)

7. Analisis Struktur

Analisis dilakukan dengan menggunakan bantuan program ETABS yang digunakan untuk mengetahui kapasitas *ultimate* elemen struktur. Selain itu, dilakukan perhitungan kapasitas nominal elemen struktur yang mengacu pada SNI 2847:2019. *Output* dari analisis struktur ini merupakan gaya – gaya dalam pada elemen balok dan kolom yang terdiri dari lentur, geser dan aksial.

8. Evaluasi Struktur

Kapasitas kekuatan elemen struktur eksisting yang telah dihitung kemudian dibandingkan dengan gaya – gaya dalam maksimum dari hasil analisa struktur. Apabila gaya – gaya dalam yang bekerja pada elemen balok dan kolom memiliki rasio kapasitas kurang dari satu ($R < 1$) maka elemen struktur masih kuat. Akan tetapi, jika hasil rasio kapasitas lebih dari satu ($R > 1$) maka elemen struktur tidak kuat dan membutuhkan perkuatan.

9. Perkuatan Struktur

Setelah dilakukan evaluasi kekuatan elemen struktur eksisting, maka didapatkan elemen – elemen struktur eksisting yang masih kuat dan elemen struktur eksisting yang membutuhkan perkuatan. Pada elemen yang masih kuat tidak perlu dilakukan perkuatan. Tetapi pada elemen struktur yang tidak kuat dilakukan perhitungan perkuatan struktur dengan menggunakan CFRP sesuai dengan SNI 8971-2021.

10. Pembahasan

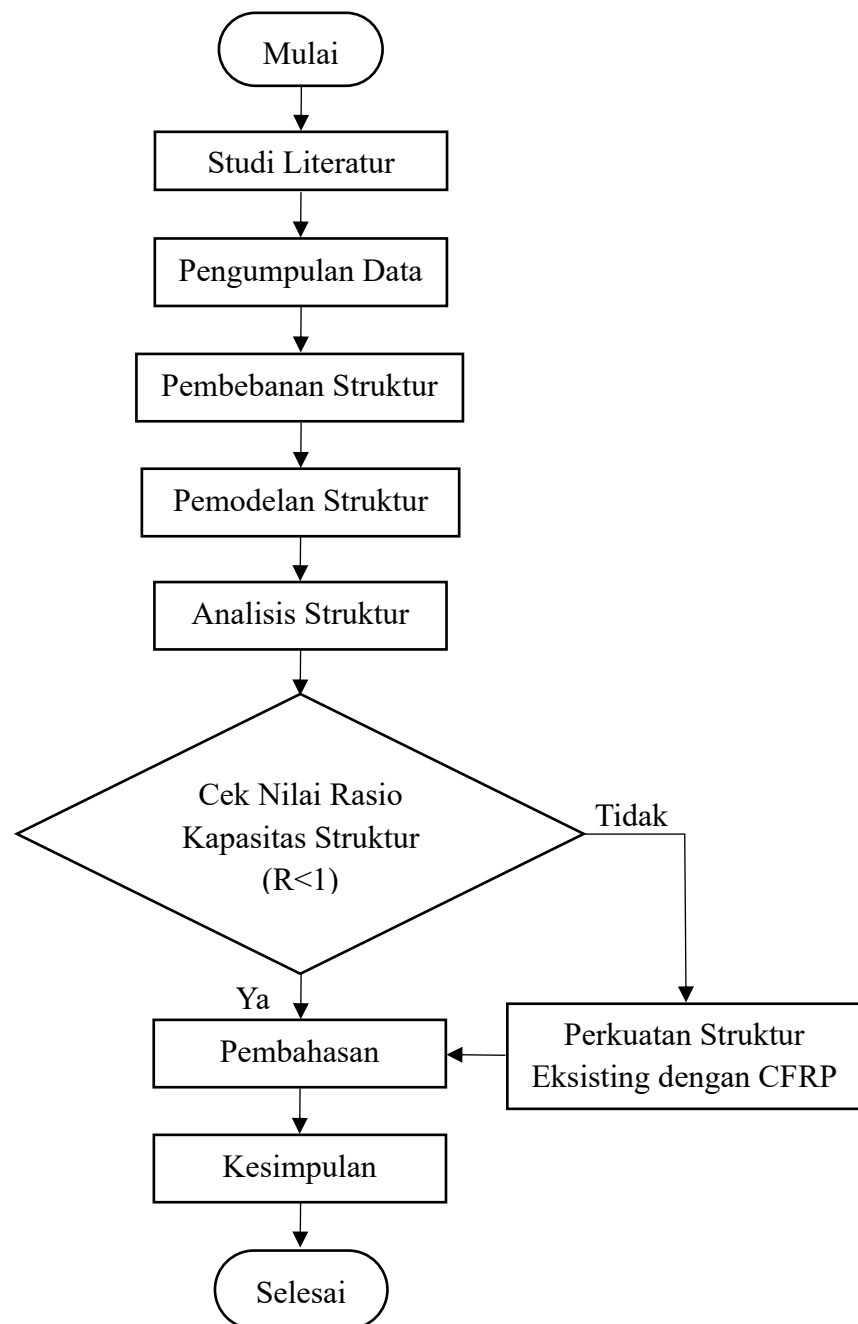
Pembahasan dilakukan dengan menguraikan hasil evaluasi kapasitas elemen struktur eksisting serta perkuatan menggunakan CFRP.

11. Kesimpulan

Setelah dilakukan evaluasi terhadap penambahan perkuatan struktur, maka dilakukan penarikan kesimpulan dari penelitian tersebut.

4.4 Bagan Alir Penelitian

Proses penelitian secara lengkap diilustrasikan dalam bagan alir yang terdapat pada Gambar 4.1 berikut.



Gambar 4. 14 Bagan Alir Penelitian

BAB V

HASIL DAN PEMBAHASAN

5.1 Pembebanan Struktur

Pembebanan struktur yang digunakan berdasarkan SNI 1727:2020 tentang beban desain minimum dan kriteria terkait untuk bangunan gedung dan struktur lain. Pada bangunan gedung hotel di area Ngampilan, Yogyakarta dengan tinggi 7 lantai ini pembebanan yang diperhitungkan terdiri dari beban mati berat sendiri, beban mati tambahan, dan beban hidup. Sedangkan analisis beban gempa dihitung berdasarkan SNI 1726:2019 tentang tata cara perancangan ketahanan gempa untuk struktur bangunan gedung dan non gedung.

5.1.1 Beban Mati

Beban mati merupakan berat seluruh komponen elemen struktural bangunan yang terdiri atas balok dan kolom pada bangunan gedung hotel ini. Beban mati akan dihitung secara otomatis oleh *software* ETABS. Berat bangunan gedung itu sendiri sebesar 2400 kg/m³. Adapun beban mati tambahan merupakan berat komponen nonstruktural seperti arsitektural dan MEP yang terdapat pada struktur bangunan gedung hotel ini. Beban mati tambahan yang akan digunakan dalam pemodelan bangunan gedung hotel dapat dilihat pada Tabel 5.1 sebagai berikut.

Tabel 5. 1 Beban Mati

No	Komponen	Beban	Satuan
1	Beton bertulang	2400	kg/m ³
2	Partisi	0,72	kN/m ²
3	Pasir	1600	kg/ m ³
4	Spesi	2100	kg/m ³
5	Keramik	21	kg/m ²
6	Plafon	11	kg/m ²
7	Rangka Plafon	7	kg/m ²
8	MEP	30	kg/m ²

Adapun langkah-langkah perhitungan beban mati tambahan pada pelat lantai dan pelat atap adalah sebagai berikut.

1. Beban mati tambahan pada pelat lantai

$$\begin{aligned}
 \text{Pasir} &= \text{Beban} \times \text{tebal} \\
 &= 1600 \times 0,03 \\
 &= 48 \text{ kg/m}^2 \\
 &= 0,471 \text{ kN/m}^2 \\
 \text{Spesi} &= \text{Beban} \times \text{tebal} \\
 &= 2100 \times 0,02 \\
 &= 42 \text{ kg/m}^2 \\
 &= 0,412 \text{ kN/m}^2 \\
 \text{Keramik} &= 21 \text{ kg/m}^2 \\
 &= 0,206 \text{ kN/m}^2 \\
 \text{Plafon} &= 11 \text{ kg/m}^2 \\
 &= 0,108 \text{ kN/m}^2 \\
 \text{Rangka plafon} &= 7 \text{ kg/m}^2 \\
 &= 0,069 \text{ kN/m}^2 \\
 \text{MEP} &= 30 \text{ kg/m}^2 \\
 &= 0,294 \text{ kN/m}^2 \\
 \text{Partisi} &= 0,72 \text{ kN/m}^2
 \end{aligned}$$

Rekapitulasi hasil perhitungan beban mati tambahan pada pelat lantai dapat dilihat pada Tabel 5.2 berikut.

Tabel 5. 2 Beban Tambahan Pelat Lantai

No	Komponen	Q (kN/m ²)
1	Partisi	0,72
2	Pasir	0,471
3	Spesi	0,412
4	Keramik	0,206
5	Plafon	0,108
6	Rangka plafon	0,069
7	MEP	0,294
Total Q_{SIDL PL}		1,985

2. Beban mati tambahan pada pelat atap

$$\begin{aligned}
 \text{Spesi} &= \text{Beban} \times \text{tebal} \\
 &= 2100 \times 0,02 \\
 &= 42 \text{ kg/m}^2 \\
 &= 0,412 \text{ kN/m}^2 \\
 \text{Waterproofing} &= \text{Beban} \times \text{tebal} \\
 &= 2100 \times 0,02 \\
 &= 42 \text{ kg/m}^2 \\
 &= 0,412 \text{ kN/m}^2 \\
 \text{Plafon} &= 11 \text{ kg/m}^2 \\
 &= 0,108 \text{ kN/m}^2 \\
 \text{Rangka plafon} &= 7 \text{ kg/m}^2 \\
 &= 0,069 \text{ kN/m}^2 \\
 \text{MEP} &= 30 \text{ kg/m}^2 \\
 &= 0,294 \text{ kN/m}^2
 \end{aligned}$$

Rekapitulasi hasil perhitungan beban mati tambahan pada pelat atap dapat dilihat pada Tabel 5.3 berikut.

Tabel 5. 3 Beban Mati Tambahan Pelat Atap

No	Komponen	Q (kN/m ²)
1	Spesi	0,412
2	<i>Waterproofing</i>	0,412
3	Plafond	0,108
4	Rangka plafond	0,069
5	MEP	0,294
Total Q_{SIDL PA}		1,295

3. Beban mati tambahan pada dinding

Pada pemodelan struktur bangunan hotel dengan menggunakan ETABS, dinding dimodelkan berupa beban merata pada balok yang berada dibagian luar. Beban merata tersebut merupakan beban dari dinding pasangan bata merah setengah batu. Untuk komponen nonstruktural seperti jendela dan

pintu dianggap memiliki berat yang sama seperti dinding. Berikut contoh perhitungan beban merata dinding pada balok B3.

$$\begin{aligned}
 \text{Bata merah setengah batu} &= 250 \text{ kg/m}^2 \\
 &= 2,453 \text{ kN/m}^2 \\
 \text{Tinggi kolom (H}_{\text{kolom}}) &= 3,3 \text{ m} \\
 \text{Tinggi balok B3 (H}_{\text{B3}}) &= 0,6 \text{ m} \\
 \text{Tinggi dinding} &= H_{\text{kolom}} - H_{\text{B3}} \\
 &= 3,3 - 0,6 \\
 &= 2,7 \text{ m} \\
 \text{Beban merata} &= 2,453 \times 2,7 \\
 &= 6,622 \text{ kN/m}
 \end{aligned}$$

Rekapitulasi hasil perhitungan beban mati tambahan pada dinding dapat dilihat pada Tabel 5.4 berikut.

Tabel 5. 4 Beban Merata Dinding

Kode Balok	H _B (m)	H _K - H _B (m)	Q (kN/m)
	Tinggi Balok	Tinggi dinding	Beban Merata
B3	0,6	2,7	6,622
B4	0,6	2,7	6,622
B5	0,6	2,7	6,622
B6	0,6	2,7	6,622
B7	0,6	2,7	6,622
B8	0,7	2,6	6,377
B9	0,5	2,8	6,867
B12	0,3	3	7,358

4. Beban mati tambahan pada tangga
 Pada pemodelan struktur bangunan hotel dengan menggunakan ETABS v.22, tangga dimodelkan berupa beban merata pada balok yang berada di daerah bukaan untuk tangga. Beban merata tersebut merupakan perolehan perkalian dari berat tangga dan lebar tangga. Berikut perhitungan beban merata tangga pada balok.

$$\begin{aligned}
 \text{Pasir} &= \text{Beban} \times \text{tebal} \\
 &= 1600 \times 0,015
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &= 24 \text{ kg/m}^2 \\
 &= 0,235 \text{ kN/m}^2 \\
 \text{Spesi} &= \text{Beban} \times \text{tebal} \\
 &= 2100 \times 0,01 \\
 &= 21 \text{ kg/m}^2 \\
 &= 0,206 \text{ kN/m}^2 \\
 \text{Keramik} &= 21 \text{ kg/m}^2 \\
 &= 0,206 \text{ kN/m}^2 \\
 \text{Beban tangga} &= \text{pasir} + \text{spesi} + \text{keramik} \\
 &= 0,235 + 0,206 + 0,206 \\
 &= 0,647 \text{ kN/m}^2 \\
 \text{Lebar tangga 1 (b}_{\text{tangga, 1}}) &= 3,025 \text{ m} \\
 \text{Lebar tangga 2 (b}_{\text{tangga, 2}}) &= 3,5 \text{ m} \\
 \text{Beban merata tangga 1 (b}_{\text{tangga, 1}}) &= \text{Beban tangga} \times \text{b}_{\text{tangga, 1}} \\
 &= 0,647 \times 3,025 \\
 &= 1,959 \text{ kN/m} \\
 \text{Beban merata tangga 2 (b}_{\text{tangga, 2}}) &= \text{Beban tangga} \times \text{b}_{\text{tangga, 2}} \\
 &= 0,647 \times 3,5 \\
 &= 2,266 \text{ kN/m}
 \end{aligned}$$

Rekapitulasi hasil perhitungan beban mati tambahan pada dinding dapat dilihat pada Tabel 5.5 berikut.

Tabel 5. 5 Beban Merata Tangga

Kode Tangga	b (mm)	Q (kN/m)
	Lebar Balok	Beban Merata
Tangga 1	3,025	1,959
Tangga 2	3,5	2,266

5.1.2 Beban Hidup

Pada pemodelan struktur bangunan hotel dengan menggunakan ETABS, beban hidup dimodelkan sebagai beban merata pada area pelat sesuai dengan fungsi ruangan pada bangunan gedung hotel yang dapat dilihat pada Tabel 5.6 berikut.

Tabel 5. 6 Beban Hidup

No	Komponen	Q_L
		kN/m^2
1	Ruang pribadi dan koridornya	1,92
2	Ruang pertemuan	4,79
3	Atap	0,96

5.1.3 Beban Gempa

Analisis beban gempa pada bangunan gedung hotel ini menggunakan analisis respons spektrum berdasarkan SNI 1726:2019. Adapun langkah-langkah dalam menghitung respons spektrum desain adalah sebagai berikut.

1. Kategori risiko struktur bangunan

Bangunan gedung hotel merupakan bangunan bertingkat dengan fungsi hunian sementara untuk akomodasi atau tempat tinggal dalam jangka waktu tertentu. Berdasarkan Tabel 3.4, bangunan gedung hotel yang ditinjau pada penelitian ini termasuk ke dalam kategori risiko tingkat II.

2. Faktor keutamaan gempa

Tingkat kategori risiko bangunan gedung hotel ini adalah tingkat II, sehingga berdasarkan Tabel 3.5 hotel ini memiliki nilai faktor keutamaan gempa (I_e) sebesar 1,0.

3. Klasifikasi situs

Kelas situs ditentukan melalui kondisi tanah lokasi bangunan gedung. Bangunan gedung hotel ini berada di Yogyakarta dan dikarenakan penulis tidak mendapatkan data tanah, sehingga diasumsikan sebagai tanah sedang atau SD.

4. Parameter percepatan gempa

Nilai parameter ini ditentukan melalui *website* <https://rsa.ciptakarya.pu.go.id/2021/> dengan memasukkan nama kota dari lokasi bangunan gedung hotel yaitu Kota Yogyakarta, sehingga diperoleh nilai parameter percepatan gempa sebagai berikut.

$$S_s = 1,122 \text{ g}$$

$$S_1 = 0,510 \text{ g}$$

5. Koefisien situs

Penentuan koefisien situs (F_a), ditentukan berdasarkan parameter kelas situs dan nilai S_s yang disesuaikan dengan Tabel 3.7. Begitupun pada penentuan koefisien situs (F_v), ditentukan berdasarkan kelas situs dan nilai S_1 yang disesuaikan dengan Tabel 3.8. Sehingga diperoleh nilai koefisien situs sebagai berikut.

$$F_a = 1,051$$

$$F_v = 1,790$$

6. Parameter respons spektrum

Hubungan koefisien – koefisien situs dan parameter respons spektrum diperhitungkan dengan menggunakan Persamaan 3.1 sampai Persamaan 3.2 sebagai berikut.

$$\begin{aligned} S_{MS} &= F_a \times S_s \\ &= 1,051 \times 1,122 \\ &= 1,179 \text{ g} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} S_{M1} &= F_v \times S_1 \\ &= 0,510 \times 1,790 \\ &= 0,913 \text{ g} \end{aligned}$$

7. Parameter percepatan spektral desain

Parameter percepatan spektral desain untuk periode pendek dan pada periode 1 detik diperhitungkan dengan menggunakan Persamaan 3.3 sampai Persamaan 3.4 sebagai berikut.

$$\begin{aligned} S_{DS} &= \frac{2}{3} \times S_{MS} \\ &= \frac{2}{3} \times 1,180 \\ &= 0,786 \text{ g} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} S_{D1} &= \frac{2}{3} \times S_{M1} \\ &= \frac{2}{3} \times 0,913 \\ &= 0,609 \text{ g} \end{aligned}$$

8. Desain respons spektrum

Berdasarkan hasil perolehan nilai S_{DS} dan S_{D1} , maka dapat diperoleh nilai waktu getar T_0 dan T_s yang sesuai dengan Persamaan 3.8 dan Persamaan 3.9 sebagai berikut.

$$\begin{aligned} T_0 &= 0,2 \frac{S_{D1}}{S_{DS}} \\ &= 0,2 \times \frac{0,609}{0,786} \\ &= 0,155 \text{ detik} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} T_s &= \frac{S_{D1}}{S_{DS}} \\ &= \frac{0,609}{0,786} \\ &= 0,774 \text{ detik} \end{aligned}$$

$$T_L = 6 \text{ detik}$$

Untuk $T < T_0$

$$\begin{aligned} S_a &= S_{DS} \left(0,4 + 0,6 \frac{T}{T_0} \right) \\ &= 0,786 \times \left(0,4 + 0,6 \times \frac{0}{0,155} \right) \\ &= 0,315 \text{ g} \end{aligned}$$

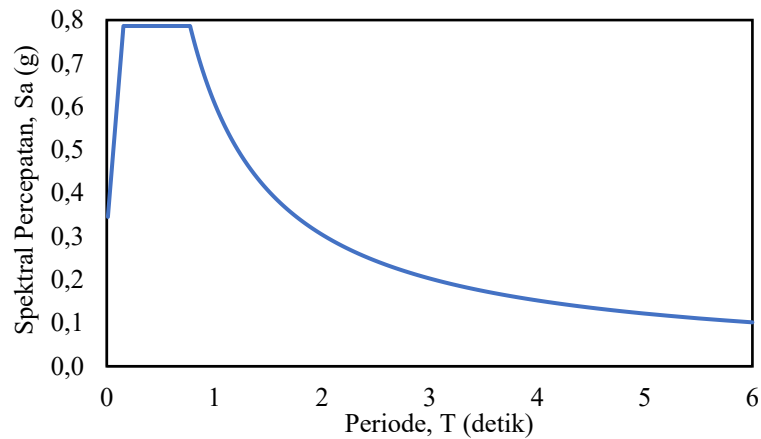
Untuk $T_0 \leq T \leq T_s$

$$\begin{aligned} S_a &= S_{DS} \\ &= 0,786 \text{ g} \end{aligned}$$

Untuk $T \geq T_s$

$$\begin{aligned} S_a &= \frac{S_{D1}}{T} \\ &= \frac{0,609}{0,8} \\ &= 0,761 \text{ g} \end{aligned}$$

Berdasarkan hasil perhitungan dengan parameter – parameter diatas diperoleh grafik respons spektrum yang dapat dilihat pada Gambar 5.1 berikut.



Gambar 5. 1 Kurva Respons Spektrum Desain

9. Kategori desain seismik

Berdasarkan Tabel 3.9 dan Tabel 3.10 beserta parameter lainnya seperti kategori risiko, hasil parameter percepatan spektral desain periode pendek (S_{DS}) sebesar 0,786 g dan percepatan spektral desain pada periode 1 detik (S_{D1}) sebesar 0,609 g, maka struktur bangunan gedung hotel yang ditinjau pada penelitian ini dapat dikategorikan ke dalam kategori desain seismik D.

10. Sistem struktur

Gedung hotel ini setingkat 7 lantai ini termasuk ke dalam Sistem Rangka Pemikul Momen Khusus (SRPMK) yang sesuai dengan Tabel 3.11, diperoleh nilai faktor yang disesuaikan antara sistem struktur bangunan sebagai berikut.

Koefisien modifikasi respons, $R = 8$

Faktor kuat lebih sistem, $\Omega_0 = 3$

Faktor pembesaran defleksi, $C_d = 5,5$

5.2 Kombinasi Beban

Kombinasi beban yang digunakan dalam analisis dinamik metode respons spektrum menggunakan ETABS berdasarkan SNI 1726:2019 pada bangunan hotel ini dapat dilihat pada Tabel 5.7 sebagai berikut.

Tabel 5. 7 Kombinasi Pembebanan

No	Nama Kombinasi	Pembebanan				
		DL	SIDL	LL	Ex	Ey
1	Comb 1	1,4	1,4			
2	Comb 2	1,2	1,2	1,6		
3	Comb 3	1,36	1,36	1	1,3	0,39
4	Comb 4	1,36	1,36	1	1,3	-0,39
5	Comb 5	1,36	1,36	1	-1,3	0,39
6	Comb 6	1,36	1,36	1	-1,3	-0,39
7	Comb 7	1,36	1,36	1	0,39	1,3
8	Comb 8	1,36	1,36	1	-0,39	1,3
9	Comb 9	1,36	1,36	1	0,39	-1,3
10	Comb 10	1,36	1,36	1	-0,39	-1,3
11	Comb 11	0,74	0,74		1,3	0,39
12	Comb 12	0,74	0,74		1,3	-0,39
13	Comb 13	0,74	0,74		-1,3	0,39
14	Comb 14	0,74	0,74		-1,3	-0,39
15	Comb 15	0,74	0,74		0,39	1,3
16	Comb 16	0,74	0,74		-0,39	1,3
17	Comb 17	0,74	0,74		0,39	-1,3
18	Comb 18	0,74	0,74		-0,39	-1,3

5.3 Analisis Struktur Bangunan

Dalam perancangan tugas akhir ini berupa pemodelan bangunan gedung hotel eksisting setinggi 6 lantai dan penambahan 1 lantai, sehingga total 7 lantai yang dilakukan beberapa analisa persyaratan struktur yang dapat diketahui pada langkah-langkah di bawah ini.

5.3.1 Periode Fundamental Struktur

Adapun langkah-langkah dalam penentuan periode fundamental struktur sebagai berikut.

1. Periode fundamental pendekatan (T_a)

Berdasarkan Tabel 3.15 maka diperoleh C_t sebesar 0,0466 dan nilai x sebesar 0,9. Oleh karena itu, nilai periode fundamental pendekatan dapat ditentukan dengan perumusan berikut.

$$T_a = C_t \times h_n^x$$

$$= 0,0466 \times 23,1^{0,9}$$

$$= 0,786 \text{ `detik}$$

2. Periode fundamental maksimum (T_{max})

Nilai periode fundamental struktur (T) harus lebih kecil dari nilai T_{max} .

Berikut menentukan nilai T_{max} , yang dimana nilai percepatan respons spektral desain pada 1 detik (S_{D1}) sebesar 0,609 g

Sehingga nilai koefisien batas atas periode (C_u) sebesar 1,4.

$$\begin{aligned} T_{max} &= C_u \times T_a \\ &= 1,4 \times 0,7864 \\ &= 1,101 \text{ detik} \end{aligned}$$

3. Periode hasil ETABS V.22 (T_c)

Dalam pemodelan ETABS, diperoleh nilai periode struktur (T_c) untuk arah X sebesar 1,481 detik dan untuk arah Y sebesar 1,515 detik.

Berdasarkan hasil perhitungan diatas nilai periode fundamental struktur dapat ditentukan melalui ketentuan berikut ini.

- a. Jika $T_c < T_a$, maka dipakai $T = T_a$
- b. Jika $T_c > T_{max}$, maka dipakai $T = T_{max}$
- c. Jika $T_a < T_c < T_{max}$, maka dipakai $T = T_c$

Berdasarkan syarat diatas yang dalam hal ini $T_c > T_{max}$, maka dapat disimpulkan bahwa periode fundamental struktur yang dipakai yaitu T_{max} sebesar 1,101 detik.

5.3.2 Partisipasi Massa

Berdasarkan sub-bab 3.2.8, disebutkan bahwa analisis harus menyertakan jumlah ragam yang cukup untuk mendapatkan partisipasi massa ragam terkombinasi sebesar paling sedikit 90% dari masa aktual dalam masing – masing arah horizontal orthogonal dari respons yang ditinjau. Untuk partisipasi massa dapat dilihat pada Tabel 5.8 berikut.

Tabel 5. 8 Partisipasi Massa

<i>Output Case</i>	<i>Mode</i>	<i>Periode (detik)</i>	<i>Sum Ux</i>	<i>Sum Uy</i>
Modal	1	1,515	0,022	0,494
Modal	2	1,481	0,839	0,512
Modal	3	1,307	0,840	0,837
Modal	4	0,477	0,933	0,841
Modal	5	0,46	0,942	0,896
Modal	6	0,416	0,943	0,941
Modal	7	0,296	0,943	0,941
Modal	8	0,26	0,968	0,941
Modal	9	0,245	0,968	0,946
Modal	10	0,235	0,968	0,958
Modal	11	0,224	0,968	0,968
Modal	12	0,193	0,968	0,969

Berdasarkan Tabel 5.8 menunjukkan bahwa sudah terjadi lebih dari 90% partisipasi massa ragam pada modal ke-6, maka dapat disimpulkan bangunan gedung hotel ini memiliki partisipasi massa ragam yang cukup aman.

5.3.3 Gaya Geser Dasar Seismik

Dalam mencari nilai gaya geser dasar seismik (V), perlu memperhitungkan nilai koefisien respon seismik (C_S). Adapun parameter yang perlu ditentukan sebagai berikut.

1. Koefisien respons seismik (C_S)

$$T = 1,101 \text{ detik}$$

Nilai koefisien respons seismik (C_S), diperoleh sebagai berikut.

$$\begin{aligned}
 C_S &= \frac{S_{DS}}{\left(\frac{R}{I_e}\right)} \\
 &= \frac{0,786}{\left(\frac{8}{1}\right)} \\
 &= 0,098
 \end{aligned}$$

Dari nilai C_S diatas tidak harus melebihi nilai berikut ini.

a. Untuk $T_x \leq T_L$

$$\begin{aligned} C_{Smax} &= \frac{S_{D1}}{T \times \left(\frac{R}{I_e}\right)} \\ &= \frac{0,609}{1,101 \times \left(\frac{8}{1}\right)} \\ &= 0,069 \end{aligned}$$

b. Untuk $T \geq T_L$, maka tidak perlu melebihi nilai C_{Smax}

$$\begin{aligned} C_S &= \frac{S_{D1} T_L}{T^2 \left(\frac{R}{I_e}\right)} \\ &= \frac{0,609 \times 6}{1,101^2 \times \left(\frac{8}{1}\right)} \\ &= 0,376 \end{aligned}$$

c. C_S harus tidak kurang dari

$$\begin{aligned} C_{Smin} &= 0,044 \times S_{DS} \times I_e \\ &= 0,044 \times 0,786 \times 1 \\ &= 0,346 \geq 0,01 \text{ (Memenuhi)} \end{aligned}$$

Dikarenakan nilai C_S tidak perlu melebihi nilai C_{Smax} dan harus tidak kurang dari C_{Smin} , maka nilai koefisien respons seismik (C_S) sebesar 0,098.

2. Gaya geser dasar seismik

Berdasarkan nilai C_S sebesar 0,098 maka dapat ditentukan nilai V sebagai berikut.

$$\begin{aligned} V &= C_S \times W \\ &= 0,098 \times 45558,376 \\ &= 4477,576 \text{ kN} \end{aligned}$$

3. Gaya seismik lateral

Nilai gaya seismik lateral (F_i) ditentukan dengan mengalikan nilai gaya geser seismik (V) dengan faktor distribusi vertikal (C_{vi}). Perhitungan nilai k untuk $T = 1,101$ detik dimana $0,5 < T < 2,5$, maka dapat digunakan interpolasi sehingga didapatkan nilai k sebesar 1,3.

Selanjutnya dihitung nilai gaya seismik lateral (F_i)

$$F_i = C_{vi} \times V$$

$$F_i = \frac{w_i h_i^k}{\sum_{i=1}^n w_i h_i^k}$$

Hasil perhitungan distribusi gaya seismik lateral berdasarkan beban gempa yang mengacu pada SNI 1726:2019 dapat dilihat pada Tabel 5.9 berikut.

Tabel 5. 9 Nilai Gaya Seismik Lateral

Lantai	w_i (kN)	h (m)	h^k (m)	$w_i h_i^k$	C_{vi}	F_i
L7	5544,27	23,1	59,34	328989,94	0,24	1055,48
L6	7077,13	19,8	48,56	343663,07	0,25	1102,55
L5	7060,57	16,5	38,31	270484,85	0,19	867,78
L4	7060,57	13,2	28,66	202355,15	0,15	649,20
L3	7055,20	9,9	19,71	139092,69	0,10	446,24
L2	7961,71	6,6	11,64	92640,32	0,07	297,21
M	3798,92	3,3	4,72	17946,22	0,01	57,58
Total	45558,38			1395172,24		4476,05

5.3.4 Kontrol Gaya Geser Dasar

Nilai gaya geser dasar dinamik harus lebih besar dari gaya geser dasar statik. Jika nilai gaya geser dinamik kurang dari gaya geser statik, maka perlu dilakukan penskalaan gaya. Nilai skala awal (SF) dapat dilihat pada perhitungan dibawah ini.

$$SF = \frac{g}{\frac{R}{I}}$$

$$= \frac{9,81}{\frac{8}{1}}$$

$$= 1,226 \text{ m/s}^2$$

Nilai gaya geser dasar yang diperoleh dari skala awal pada pada ETABS v.22 dapat dilihat pada Tabel 5.10 berikut.

Tabel 5. 10 Hasil Gaya Geser Dasar Skala Awal

	V_{statik} (kN)	$V_{dinamik}$ (kN)	Cek
Arah X	4476,048	2028,553	Tidak Memenuhi
Arah Y	4476,048	1722,483	Tidak Memenuhi

Berdasarkan hasil pada Tabel 5.10 yang dimana gaya geser dasar dinamik ($V_{dinamik}$) kurang dari gaya geser dasar statik (V_{statik}), maka perlu dilakukan penskalaan gaya, berikut ini adalah tahapan dalam menghitung penskalaan gaya yang baru.

$$\begin{aligned}
 \text{Skala X} &= \frac{V_{statik}}{V_{dinamik}} \\
 &= \frac{4476,048}{2028,553} \\
 &= 2,207 \\
 \text{Skala Y} &= \frac{V_{statik}}{V_{dinamik}} \\
 &= \frac{4476,048}{1722,483} \\
 &= 2,599
 \end{aligned}$$

Setelah diperoleh skala gaya yang baru diatas, kemudian skala tersebut di *input* dalam mendefinisikan respons spektrum pada *software* ETABS. Selanjutnya dilakukan analisis kembali untuk mendapatkan hasil $V_{dinamik}$ yang nantinya akan dibandingkan lagi dengan V_{statik} . Adapun nilai gaya geser yang diperoleh dari penskalaan gaya yang baru pada ETABS dapat dilihat pada Tabel 5.11 berikut.

Tabel 5. 11 Hasil Gaya Geser Dasar Skala Baru

	V_{statik} (kN)	$V_{dinamik}$ (kN)	Cek
Arah X	4476,048	4476,048	Memenuhi
Arah Y	4476,048	4476,048	Memenuhi

Berdasarkan hasil gaya geser dasar pada Tabel 5.11 diperoleh gaya geser dasar dinamik ($V_{dinamik}$) lebih besar atau sama dengan gaya geser dasar statik (V_{statik}), oleh karena itu telah memenuhi syarat berdasarkan SNI 1726:2019.

5.3.5 Analisis Balok

Penambahan lantai pada bangunan gedung hotel menyebabkan peningkatan beban struktur yang berpengaruh terhadap besarnya gaya dalam pada elemen balok. Analisis momen ultimit pada daerah tumpuan dan lapangan dilakukan melalui pemodelan struktur menggunakan *software* ETABS. Respons struktur hasil analisis

digunakan sebagai dasar evaluasi kapasitas penampang balok, yang meliputi kapasitas lentur dan kapasitas geser, untuk menilai kemampuan balok dalam menahan beban tambahan akibat penambahan lantai.

Evaluasi kapasitas balok mengacu pada ketentuan SNI 1726:2019 dan SNI 2847:2019. Analisis kapasitas lentur dilakukan momen positif dan momen negatif pada daerah tumpuan dan lapangan, sedangkan analisis kapasitas geser dilakukan dengan mengevaluasi kemampuan balok dalam menahan gaya geser pada daerah sendi plastis dan di luar sendi plastis.

5.3.5.1 Analisis Kapasitas Lentur Balok

Analisis kapasitas lentur balok disajikan melalui contoh perhitungan pada balok tipe B2 yang dipilih sebagai balok representatif. Adapun skema penampang balok yang dianalisis ditunjukkan pada Gambar 5.2 berikut.

BALOK B2 (400 x 600)		
TUMP. KIRI	LAPANGAN	TUMP. KANAN
8 D25	8 D25	8 D25
4 D10	4 D10	4 D10

Gambar 5. 2 Balok Tipe B2
(Sumber : *as built drawing*)

1. Data balok B2

Data balok B2 adalah sebagai berikut.

Panjang balok, L	=	8000 mm
Lebar balok, b	=	400 mm
Tinggi balok, h	=	600 mm
Diameter tulangan longitudinal, d_p	=	25 mm
Diameter tulangan sengkang, d_s	=	10 mm
Selimut beton, s_b	=	40 mm

$$\text{Kuat tekan beton, } f'_c = 25 \text{ MPa}$$

$$\text{Kuat leleh tulangan longitudinal, } f_y = 400 \text{ MPa}$$

$$\text{Faktor reduksi, } \beta_1 = 0,85$$

$$\text{Modulus elastisitas baja, } E_s = 200000 \text{ MPa}$$

Gaya-gaya dalam pada daerah tumpuan dan lapangan pada balok B2 yang diperoleh dari ETABS yang digunakan untuk analisis kapasitas lentur balok B2 adalah sebagai berikut.

$$\text{Gaya aksial } (P_u) = 214,510 \text{ kN}$$

$$\text{Momen negatif tumpuan } (M_{u,tump}^-) = 592,250 \text{ kNm}$$

$$\text{Momen positif tumpuan } (M_{u,tump}^+) = 185,312 \text{ kNm}$$

$$\text{Momen negatif lapangan } (M_{u,lap}^-) = 289,884 \text{ kNm}$$

$$\text{Momen positif lapangan } (M_{u,lap}^+) = 374,844 \text{ kNm}$$

2. Analisis momen nominal negatif pada daerah tumpuan

Langkah-langkah analisis momen nominal negatif tumpuan pada daerah tumpuan adalah sebagai berikut.

a. Menghitung luas tulangan

Tulangan tarik

$$n_1 = 5 \text{ tulangan}$$

$$A_{s,1} = n_1 \times \frac{1}{4} \times \pi \times d_p^2$$

$$= 5 \times \frac{1}{4} \times \pi \times 25^2$$

$$= 2454,369 \text{ mm}^2$$

$$n_2 = 3 \text{ tulangan}$$

$$A_{s,2} = n_2 \times \frac{1}{4} \times \pi \times d_p^2$$

$$= 3 \times \frac{1}{4} \times \pi \times 25^2$$

$$= 1472,622 \text{ mm}^2$$

Luas total tulangan tarik

$$A_s = A_{s,1} + A_{s,2}$$

$$= 2454,369 + 1472,622$$

$$= 3926,991 \text{ mm}^2$$

Tulangan tekan

$$n = 3 \text{ tulangan}$$

$$A_s' = n \times \frac{1}{4} \times \pi \times d_p^2$$

$$= 3 \times \frac{1}{4} \times \pi \times 25^2$$

$$= 1472,622 \text{ mm}^2$$

b. Menghitung tinggi efektif balok B2

$$y_1 = s_b + d_s + \left(\frac{d_p}{2}\right)$$

$$= 40 + 10 + \left(\frac{25}{2}\right)$$

$$= 62,5 \text{ mm}$$

$$y_2 = s_b + d_b + d_p + 25 + \left(\frac{d_p}{2}\right)$$

$$= 40 + 10 + 25 + 25 + \left(\frac{25}{2}\right)$$

$$= 112,5 \text{ mm}$$

$$d_s = \frac{n_1 \times y_1 + n_2 \times y_2}{n_1 + n_2}$$

$$= \frac{5 \times 62,5 + 3 \times 112,5}{5 + 3}$$

$$= 81,25 \text{ mm}$$

$$d = h - d_s$$

$$= 600 - 81,25$$

$$= 518,75 \text{ mm}$$

$$d' = s_b + d_s + \left(\frac{d_p}{2}\right)$$

$$= 40 + 10 + \left(\frac{25}{2}\right)$$

$$= 62,5 \text{ mm}$$

c. Menghitung luas tulangan minimum

$$\begin{aligned}
 A_{s,min1} &= \frac{0,25 \sqrt{f'_c}}{f_y} \times b_w \times d \\
 &= \frac{0,25 \sqrt{25}}{400} \times 400 \times 518,75 \\
 &= 648,438 \text{ mm}^2 \\
 A_{s,min2} &= \frac{1,4}{f_y} \times b_w \times d \\
 &= \frac{1,4}{400} \times 400 \times 518,75 \\
 &= 726,250 \text{ mm}^2 \\
 A_{s,min} &= 726,250 \text{ mm}^2
 \end{aligned}$$

Berdasarkan hasil perhitungan, diperoleh luas tulangan minimum ($A_{s,min}$) sebesar 726,250 mm², sedangkan luas tulangan tarik ($A_{s,tarik}$) sebesar 3926,991 mm² dan luas tulangan tekan ($A_{s,tekan}$) sebesar 1472,622 mm². Nilai tulangan yang digunakan lebih besar dari tulangan minimum, sehingga telah memenuhi.

d. Menentukan tinggi dari serat balok terhadap garis netral

$$\begin{aligned}
 T_s &= C_c + C_s \\
 A_s \times f_y &= (0,85 \times f'_c \times c \times \beta_1 \times b) + \left(A_s' \times \left(\varepsilon_c \times \left(\frac{c - d_s'}{c} \right) \times E_s \right) \right)
 \end{aligned}$$

Berdasarkan persamaan diatas, nilai c dihitung dengan persamaan kuadrat rumus ABC. Maka didapatkan nilai c sebesar 147,084 mm.

$$\begin{aligned}
 a &= c \times \beta_1 \\
 &= 147,084 \times 0,85 \\
 &= 125,021 \text{ mm}
 \end{aligned}$$

e. Kontrol regangan

Regangan beton

$$\varepsilon_c = 0,003$$

Regangan leleh baja tulangan

$$\varepsilon_y = 0,002$$

Regangan leleh baja tulangan tarik

$$\begin{aligned}
 \varepsilon_s &= \varepsilon_c \times \frac{d - c}{c} \\
 &= 0,003 \times \frac{518,750 - 147,084}{147,084} \\
 &= 0,008 > \varepsilon_y = 0,002 \text{ (Sudah Leleh)}
 \end{aligned}$$

Regangan leleh baja tulangan tekan

$$\begin{aligned}
 \varepsilon_s' &= \varepsilon_c \times \frac{c - d'}{c} \\
 &= 0,003 \times \frac{147,084 - 62,5}{147,084} \\
 &= 0,0017 < \varepsilon_y = 0,002 \text{ (Belum Leleh)}
 \end{aligned}$$

Nilai $\varepsilon_s' < \varepsilon_y$ yang menandakan tulangan baja tekan belum leleh, maka nilai tegangan tekan baja (f_s') dapat dihitung menggunakan persamaan berikut.

$$\begin{aligned}
 f_s' &= \varepsilon_s' \times E_s \\
 &= 0,0017 \times 200000 \\
 &= 345,043 \text{ MPa}
 \end{aligned}$$

f. Menghitung momen nominal lentur balok B2

$$\begin{aligned}
 M_{n1} &= \left(0,85 \times f'_c \times c \times \beta_1 \times b + \left(d - \frac{a}{2} \right) \right) \\
 &= \left(0,85 \times 25 \times 147,084 \times 0,85 \times 400 + \left(518,750 - \frac{125,021}{2} \right) \right) \\
 &= 484835999 \text{ Nmm} \\
 &= 484,836 \text{ kNm} \\
 M_{n2} &= (A_s' \times f_s') \times (d - d') \\
 &= (1472,622 \times 345,043) \times (518,750 - 62,5) \\
 &= 231828652,8 \text{ Nmm} \\
 &= 231,829 \text{ kNm} \\
 M_{n,tump}^- &= M_{n1} + M_{n2} \\
 &= 484,836 + 231,829 \\
 &= 716,665 \text{ kNm}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\phi &= 0,9 \\ \phi M_{n,tump}^- &= 0,9 \times 716,665 \\ &= 644,998 \text{ kNm}\end{aligned}$$

g. Menghitung kapasitas rasio lentur balok B2

$$\begin{aligned}R_{tump}^- &= \frac{M_{u,tump}^-}{\phi M_{n,tump}^-} \\ &= \frac{592,250}{644,998} \\ &= 0,918 < 1 \text{ (Memenuhi)}\end{aligned}$$

3. Analisis momen nominal positif pada daerah tumpuan

Langkah-langkah analisis momen nominal negatif tumpuan pada daerah tumpuan adalah sebagai berikut.

a. Menghitung luas tulangan

Tulangan tarik

$$\begin{aligned}n &= 3 \text{ tulangan} \\ A_s &= n \times \frac{1}{4} \times \pi \times d_p^2 \\ &= 3 \times \frac{1}{4} \times \pi \times 25^2 \\ &= 1472,622 \text{ mm}^2\end{aligned}$$

Tulangan tekan

$$\begin{aligned}n_1 &= 5 \text{ tulangan} \\ A_{s,1}' &= n_1 \times \frac{1}{4} \times \pi \times d_p^2 \\ &= 5 \times \frac{1}{4} \times \pi \times 25^2 \\ &= 2454,369 \text{ mm}^2 \\ n_2 &= 3 \text{ tulangan} \\ A_{s,2}' &= n_2 \times \frac{1}{4} \times \pi \times d_p^2 \\ &= 3 \times \frac{1}{4} \times \pi \times 25^2 \\ &= 1472,622 \text{ mm}^2\end{aligned}$$

Luas total tulangan tekan

$$\begin{aligned} A_s' &= A_{s,1}' + A_{s,2}' \\ &= 2454,369 + 1472,622 \\ &= 3926,991 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

b. Menghitung tinggi efektif balok B2

$$\begin{aligned} d_s' &= s_b + d_s + \left(\frac{d_p}{2}\right) \\ &= 40 + 10 + \left(\frac{25}{2}\right) \\ &= 62,5 \text{ mm} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} d &= h - d_s' \\ &= 600 - 62,5 \\ &= 537,5 \text{ mm} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} y_1 &= s_b + d_s + \left(\frac{d_p}{2}\right) \\ &= 40 + 10 + \left(\frac{25}{2}\right) \\ &= 62,5 \text{ mm} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} y_2 &= s_b + d_s + d_p + 25 + \left(\frac{d_p}{2}\right) \\ &= 40 + 10 + 25 + 25 + \left(\frac{25}{2}\right) \\ &= 112,5 \text{ mm} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} d' &= \frac{n_1 \times y_1 + n_2 \times y_2}{n_1 + n_2} \\ &= \frac{5 \times 62,5 + 3 \times 112,5}{5 + 3} \\ &= 81,25 \text{ mm} \end{aligned}$$

c. Menghitung luas tulangan minimum

$$\begin{aligned} A_{s,min 1} &= \frac{0,25 \sqrt{f'_c}}{f_y} \times b_w \times d \\ &= \frac{0,25 \sqrt{25}}{400} \times 400 \times 537,50 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &= 671,875 \text{ mm}^2 \\
 A_{s,min2} &= \frac{1,4}{f_y} \times b_w \times d \\
 &= \frac{1,4}{400} \times 400 \times 537,50 \\
 &= 752,5 \text{ mm}^2 \\
 A_{s,min} &= 752,5 \text{ mm}^2
 \end{aligned}$$

Berdasarkan hasil perhitungan, diperoleh luas tulangan minimum ($A_{s,min}$) sebesar 752,5 mm², sedangkan luas tulangan tarik ($A_{s,tarik}$) sebesar 1472,622 mm² dan luas tulangan tekan ($A_{s,tekan}$) sebesar 3926,991 mm². Nilai tulangan yang digunakan lebih besar dari tulangan minimum, sehingga telah memenuhi.

d. Menentukan tinggi blok tekan

$$\begin{aligned}
 T_s &= C_c + C_s \\
 A_s \times f_y &= (0,85 \times f'_c \times c \times \beta_1 \times b) + \left(A_s' \times \left(\varepsilon_c \times \left(\frac{c - d_s'}{c} \right) \times E_s \right) \right)
 \end{aligned}$$

Berdasarkan persamaan diatas, nilai c dihitung dengan persamaan kuadrat rumus ABC. Maka didapatkan nilai c sebesar 81,306 mm.

$$\begin{aligned}
 a &= c \times \beta_1 \\
 &= 81,306 \times 0,85 \\
 &= 69,110 \text{ mm}
 \end{aligned}$$

e. Kontrol regangan

Regangan beton

$$\varepsilon_c = 0,003$$

Regangan leleh baja tulangan

$$\varepsilon_y = 0,002$$

Regangan leleh baja tulangan tarik

$$\begin{aligned}
 \varepsilon_s &= \frac{d - c}{c} \times \varepsilon_c \\
 &= \frac{537,5 - 81,306}{81,306} \times 0,003
 \end{aligned}$$

$$= 0,017 > \varepsilon_y = 0,002 \text{ (Sudah Leleh)}$$

Regangan leleh baja tulangan tekan

$$\begin{aligned}\varepsilon_s' &= \frac{c - d'}{c} \times \varepsilon_c \\ &= \frac{81,306 - 81,25}{81,306} \times 0,003 \\ &= 0,000002 < \varepsilon_y = 0,002 \text{ (Belum Leleh)}\end{aligned}$$

Nilai $\varepsilon_s' < \varepsilon_y$ yang menandakan tulangan baja tekan belum leleh, maka nilai tegangan tekan baja (f_s') dapat dihitung menggunakan persamaan berikut.

$$\begin{aligned}f_s' &= \varepsilon_s' \times E_s \\ &= 0,000002 \times 200000 \\ &= 0,411 \text{ MPa}\end{aligned}$$

f. Menghitung momen nominal lentur balok B2

$$\begin{aligned}M_{n1} &= \left(0,85 \times f_c' \times c \times \beta_1 \times b + \left(d - \frac{a}{2} \right) \right) \\ &= \left(0,85 \times 25 \times 81,306 \times 0,85 \times 400 + \left(537,5 - \frac{69,110}{2} \right) \right) \\ &= 295446952,4 \text{ Nmm} \\ &= 295,447 \text{ kNm} \\ M_{n2} &= (A_s' \times f_s') \times (d - d') \\ &= (3926,991 \times 0,411) \times (537,5 - 81,25) \\ &= 736744,91 \text{ Nmm} \\ &= 0,737 \text{ kNm} \\ M_{n,tump}^+ &= M_{n1} + M_{n2} \\ &= 295,447 + 0,737 \\ &= 296,184 \text{ kNm} \\ \phi &= 0,9 \\ \phi M_{n,tump}^+ &= 0,9 \times 296,184 \\ &= 266,565 \text{ kNm}\end{aligned}$$

g. Menghitung kapasitas rasio lentur balok B2

$$\begin{aligned}
 R_{tump}^+ &= \frac{M_{u,tump}^+}{\phi M_{n,tump}^+} \\
 &= \frac{185,312}{266,565} \\
 &= 0,695 > 1 \text{ (Memenuhi)}
 \end{aligned}$$

4. Analisis momen nominal negatif pada daerah lapangan

Langkah-langkah analisis momen nominal negatif pada daerah lapangan adalah sebagai berikut.

a. Menghitung luas tulangan

Tulangan tarik

$$\begin{aligned}
 n &= 3 \text{ tulangan} \\
 A_s &= n \times \frac{1}{4} \times \pi \times d_p^2 \\
 &= 3 \times \frac{1}{4} \times \pi \times 25^2 \\
 &= 1472,622 \text{ mm}^2
 \end{aligned}$$

Tulangan tekan

$$\begin{aligned}
 n_1 &= 5 \text{ tulangan} \\
 A_{s,1}' &= n_1 \times \frac{1}{4} \times \pi \times d_p^2 \\
 &= 5 \times \frac{1}{4} \times \pi \times 25^2 \\
 &= 2454,369 \text{ mm}^2 \\
 n_2 &= 3 \text{ tulangan} \\
 A_{s,2}' &= n_2 \times \frac{1}{4} \times \pi \times d_p^2 \\
 &= 3 \times \frac{1}{4} \times \pi \times 25^2 \\
 &= 1472,622 \text{ mm}^2
 \end{aligned}$$

Luas total tulangan tekan

$$\begin{aligned}
 A_s' &= A_{s,1} + A_{s,2} \\
 &= 2454,369 + 1472,622
 \end{aligned}$$

$$= 3926,991 \text{ mm}^2$$

b. Menghitung tinggi efektif balok B2

$$\begin{aligned} d_s &= s_b + d_s + \left(\frac{d_p}{2}\right) \\ &= 40 + 10 + \left(\frac{25}{2}\right) \\ &= 62,5 \text{ mm} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} d &= h - d_s' \\ &= 600 - 62,5 \\ &= 537,5 \text{ mm} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} y_1 &= s_b + d_s + \left(\frac{d_p}{2}\right) \\ &= 40 + 10 + \left(\frac{25}{2}\right) \\ &= 62,5 \text{ mm} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} y_2 &= s_b + d_b + d_p + 25 + \left(\frac{d_p}{2}\right) \\ &= 40 + 10 + 25 + 25 + \left(\frac{25}{2}\right) \\ &= 112,5 \text{ mm} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} d' &= \frac{n_1 \times y_1 + n_2 \times y_2}{n_1 + n_2} \\ &= \frac{5 \times 62,5 + 3 \times 112,5}{5 + 3} \\ &= 81,25 \text{ mm} \end{aligned}$$

c. Menghitung luas tulangan minimum

$$\begin{aligned} A_{s,min1} &= \frac{0,25 \sqrt{f'_c}}{f_y} \times b_w \times d \\ &= \frac{0,25 \sqrt{25}}{400} \times 400 \times 537,50 \\ &= 671,875 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

$$A_{s,min2} = \frac{1,4}{f_y} \times b_w \times d$$

$$\begin{aligned}
&= \frac{1,4}{400} \times 400 \times 537,50 \\
&= 752,5 \text{ mm}^2 \\
A_{s,min} &= 752,5 \text{ mm}^2
\end{aligned}$$

Berdasarkan hasil perhitungan, diperoleh luas tulangan minimum ($A_{s,min}$) sebesar 752,5 mm², sedangkan luas tulangan tarik ($A_{s,tarik}$) sebesar 1472,622 mm² dan luas tulangan tekan ($A_{s,tekan}$) sebesar 3926,991 mm². Nilai tulangan yang digunakan lebih besar dari tulangan minimum, sehingga telah memenuhi.

d. Menentukan tinggi blok tekan

$$\begin{aligned}
T_s &= C_c + C_s \\
A_s \times f_y &= (0,85 \times f'_c \times c \times \beta_1 \times b) + \left(A_s' \times \left(\varepsilon_c \times \left(\frac{c - d_s'}{c} \right) \times E_s \right) \right)
\end{aligned}$$

Berdasarkan persamaan diatas, nilai c dihitung dengan persamaan kuadrat rumus ABC. Maka didapatkan nilai c sebesar 81,306 mm.

$$\begin{aligned}
a &= c \times \beta_1 \\
&= 81,306 \times 0,85 \\
&= 69,110 \text{ mm}
\end{aligned}$$

e. Kontrol regangan

Regangan beton

$$\varepsilon_c = 0,003$$

Regangan leleh baja tulangan

$$\varepsilon_y = 0,002$$

Regangan leleh baja tulangan tarik

$$\begin{aligned}
\varepsilon_s &= \frac{d - c}{c} \times \varepsilon_c \\
&= \frac{537,5 - 81,306}{81,306} \times 0,003 \\
&= 0,017 > \varepsilon_y = 0,002 \text{ (Sudah Leleh)}
\end{aligned}$$

Regangan leleh baja tulangan tekan

$$\varepsilon_s' = \frac{c - d'}{c} \times \varepsilon_c$$

$$\begin{aligned}
&= \frac{81,306 - 81,25}{81,306} \times 0,003 \\
&= 0,000002 < \varepsilon_y = 0,002 \text{ (Belum Leleh)}
\end{aligned}$$

Nilai $\varepsilon_s' < \varepsilon_y$ yang menandakan tulangan baja tekan belum leleh, maka nilai tegangan tekan baja (f_s') dapat dihitung menggunakan persamaan berikut.

$$\begin{aligned}
f_s' &= \varepsilon_s' \times E_s \\
&= 0,000002 \times 200000 \\
&= 0,411 \text{ MPa}
\end{aligned}$$

f. Menghitung momen nominal lentur balok B2

$$\begin{aligned}
M_{n1} &= \left(0,85 \times f_c' \times c \times \beta_1 \times b + \left(d - \frac{a}{2} \right) \right) \\
&= \left(0,85 \times 25 \times 81,306 \times 0,85 \times 400 + \left(537,5 - \frac{69,110}{2} \right) \right) \\
&= 295446952,4 \text{ Nmm} \\
&= 295,447 \text{ kNm} \\
M_{n2} &= (A_s' \times f_s') \times (d - d') \\
&= (3926,991 \times 0,411) \times (537,5 - 81,25) \\
&= 736744,91 \text{ Nmm} \\
&= 0,737 \text{ kNm} \\
M_{n,lap}^- &= M_{n1} + M_{n2} \\
&= 295,447 + 0,737 \\
&= 296,184 \text{ kNm} \\
\phi &= 0,9 \\
\phi M_{n,lap}^- &= 0,9 \times 296,184 \\
&= 266,565 \text{ kNm}
\end{aligned}$$

g. Menghitung kapasitas rasio lentur balok B2

$$\begin{aligned}
R_{lap}^- &= \frac{M_{u,lap}^-}{\phi M_{n,lap}^-} \\
&= \frac{289,884}{266,565}
\end{aligned}$$

$$= 1,087 < 1 \text{ (Tidak Memenuhi)}$$

5. Analisis momen nominal positif pada daerah lapangan

Langkah-langkah analisis momen nominal positif pada daerah lapangan adalah sebagai berikut.

a. Menghitung luas tulangan

Tulangan tarik

$$\begin{aligned} n_1 &= 5 \text{ tulangan} \\ A_{s,1} &= n_1 \times \frac{1}{4} \times \pi \times d_p^2 \\ &= 5 \times \frac{1}{4} \times \pi \times 25^2 \\ &= 2454,369 \text{ mm}^2 \\ n_2 &= 3 \text{ tulangan} \\ A_{s,2} &= n_2 \times \frac{1}{4} \times \pi \times d_p^2 \\ &= 3 \times \frac{1}{4} \times \pi \times 25^2 \\ &= 1472,622 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

Luas total tulangan tarik

$$\begin{aligned} A_s &= A_{s,1} + A_{s,2} \\ &= 2454,369 + 1472,622 \\ &= 3926,991 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

Tulangan tekan

$$\begin{aligned} n &= 3 \text{ tulangan} \\ A_s' &= n \times \frac{1}{4} \times \pi \times d_p^2 \\ &= 3 \times \frac{1}{4} \times \pi \times 25^2 \\ &= 1472,622 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

b. Menghitung tinggi efektif balok B2

$$y_1 = s_b + d_s + \left(\frac{d_p}{2} \right)$$

$$\begin{aligned}
&= 40 + 10 + \left(\frac{25}{2}\right) \\
&= 62,5 \text{ mm} \\
y_2 &= s_b + d_s + d_p + 25 + \left(\frac{d_p}{2}\right) \\
&= 40 + 10 + 25 + 25 + \left(\frac{25}{2}\right) \\
&= 112,5 \text{ mm} \\
d_s &= \frac{n_1 \times y_1 + n_2 \times y_2}{n_1 + n_2} \\
&= \frac{5 \times 62,5 + 3 \times 112,5}{5 + 3} \\
&= 81,25 \text{ mm} \\
d &= h - d_s \\
&= 600 - 81,25 \\
&= 518,75 \text{ mm} \\
d' &= s_b + d_s + \left(\frac{d_p}{2}\right) \\
&= 40 + 10 + \left(\frac{25}{2}\right) \\
&= 62,5 \text{ mm}
\end{aligned}$$

c. Menghitung luas tulangan minimum

$$\begin{aligned}
A_{s,min1} &= \frac{0,25 \sqrt{f'_c}}{f_y} \times b_w \times d \\
&= \frac{0,25 \sqrt{25}}{400} \times 400 \times 518,75 \\
&= 648,438 \text{ mm}^2 \\
A_{s,min2} &= \frac{1,4}{f_y} \times b_w \times d \\
&= \frac{1,4}{400} \times 400 \times 518,75 \\
&= 726,250 \text{ mm}^2 \\
A_{s,min} &= 726,250 \text{ mm}^2
\end{aligned}$$

Berdasarkan hasil perhitungan, diperoleh luas tulangan minimum ($A_{s,min}$) sebesar 726,250 mm², sedangkan luas tulangan tarik ($A_{s,tarik}$) sebesar 3926,991 mm² dan luas tulangan tekan ($A_{s,tekan}$) sebesar 1472,622 mm². Nilai tulangan yang digunakan lebih besar dari tulangan minimum, sehingga telah memenuhi.

- d. Menentukan tinggi dari serat balok terhadap garis netral

$$T_s = C_c + C_s$$

$$A_s \times f_y = (0,85 \times f'_c \times c \times \beta_1 \times b) + \left(A_s' \times \left(\varepsilon_c \times \left(\frac{c - d_s'}{c} \right) \times E_s \right) \right)$$

Berdasarkan persamaan diatas, nilai c dihitung dengan persamaan kuadrat rumus ABC. Maka didapatkan nilai c sebesar 147,084 mm.

$$\begin{aligned} a &= c \times \beta_1 \\ &= 147,084 \times 0,85 \\ &= 125,021 \text{ mm} \end{aligned}$$

- e. Kontrol regangan

Regangan beton

$$\varepsilon_c = 0,003$$

Regangan leleh baja tulangan

$$\varepsilon_y = 0,002$$

Regangan leleh baja tulangan tarik

$$\begin{aligned} \varepsilon_s &= \frac{d - c}{c} \times \varepsilon_c \\ &= \frac{518,750 - 147,084}{147,084} \times 0,003 \\ &= 0,008 > \varepsilon_y = 0,002 \text{ (Sudah Leleh)} \end{aligned}$$

Regangan leleh baja tulangan tekan

$$\begin{aligned} \varepsilon_s' &= \frac{c - d'}{c} \times \varepsilon_c \\ &= \frac{147,084 - 62,5}{147,084} \times 0,003 \\ &= 0,0017 < \varepsilon_y = 0,002 \text{ (Belum Leleh)} \end{aligned}$$

Nilai $\varepsilon_s' < \varepsilon_y$ yang menandakan tulangan baja tekan belum leleh, maka nilai tegangan tekan baja (f_s') dapat dihitung menggunakan persamaan berikut.

$$\begin{aligned} f_s' &= \varepsilon_s' \times E_s \\ &= 0,0017 \times 200000 \\ &= 345,043 \text{ MPa} \end{aligned}$$

f. Menghitung momen nominal lentur balok B2

$$\begin{aligned} M_{n1} &= \left(0,85 \times f_c' \times c \times \beta_1 \times b + \left(d - \frac{a}{2} \right) \right) \\ &= \left(0,85 \times 25 \times 147,084 \times 0,85 \times 400 + \left(518,750 - \frac{125,021}{2} \right) \right) \\ &= 484835999 \text{ Nmm} \\ &= 484,836 \text{ kNm} \\ M_{n2} &= (A_s' \times f_s') \times (d - d') \\ &= (1472,622 \times 345,043) \times (518,750 - 62,5) \\ &= 231828652,8 \text{ Nmm} \\ &= 231,829 \text{ kNm} \\ M_{n,lap}^+ &= M_{n1} + M_{n2} \\ &= 484,836 + 231,829 \\ &= 716,665 \text{ kNm} \\ \phi &= 0,9 \\ \phi M_{n,lap}^+ &= 0,9 \times 716,665 \\ &= 644,998 \text{ kNm} \end{aligned}$$

g. Menghitung kapasitas rasio lentur balok B2

$$\begin{aligned} R_{lap}^+ &= \frac{M_{u,lap}^+}{\phi M_{n,lap}^+} \\ &= \frac{374,844}{644,998} \\ &= 0,581 < 1 \text{ (Memenuhi)} \end{aligned}$$

6. Analisis momen *probable* positif pada daerah tumpuan

Langkah-langkah analisis momen *probable* positif pada daerah tumpuan adalah sebagai berikut.

a. Menghitung luas tulangan

Tulangan tarik

$$A_s = 1472,622 \text{ mm}^2$$

Tulangan tekan

$$A_s' = 3926,991 \text{ mm}^2$$

b. Menghitung tinggi efektif balok B2

$$d = 537,5 \text{ mm}$$

$$d' = 81,25 \text{ mm}$$

c. Menentukan tinggi blok tekan

$$T_s = C_c + C_s$$

$$A_s \times f_u = (0,85 \times f'_c \times c \times \beta_1 \times b) + \left(A_s' \times \left(\varepsilon_c \times \left(\frac{c - d_s'}{c} \right) \times E_s \right) \right)$$

$$A_s \times 1,25f_y = (0,85 \times f'_c \times c \times \beta_1 \times b) + \left(A_s' \times \left(\varepsilon_c \times \left(\frac{c - d_s'}{c} \right) \times E_s \right) \right)$$

Berdasarkan persamaan diatas, nilai c dihitung dengan persamaan kuadrat rumus ABC. Maka didapatkan nilai c sebesar 85,543 mm.

$$\begin{aligned} a &= c \times \beta_1 \\ &= 85,543 \times 0,85 \\ &= 72,712 \text{ mm} \end{aligned}$$

d. Regangan beton

$$\varepsilon_c = 0,003$$

e. Regangan leleh baja tulangan

$$\varepsilon_y = 0,002$$

f. Regangan leleh baja tulangan tarik

$$\begin{aligned} \varepsilon_s &= \frac{d - c}{c} \times \varepsilon_c \\ &= \frac{537,5 - 85,543}{85,543} \times 0,003 \end{aligned}$$

$$= 0,016 > \varepsilon_y = 0,002 \text{ (Sudah Leleh)}$$

g. Regangan leleh baja tulangan tarik

$$\begin{aligned}\varepsilon_s' &= \frac{c - d'}{c} \times \varepsilon_c \\ &= \frac{85,543 - 81,25}{85,543} \times 0,003 \\ &= 0,0002 \leq \varepsilon_y = 0,002 \text{ (Belum Leleh)}\end{aligned}$$

Nilai $\varepsilon_s' < \varepsilon_y$ yang menandakan tulangan baja tekan belum leleh, maka nilai tegangan tekan baja (f_s') dapat dihitung menggunakan persamaan berikut.

$$\begin{aligned}f_s' &= \varepsilon_s' \times E_s \\ &= 0,0002 \times 200000 \\ &= 30,114 \text{ MPa}\end{aligned}$$

h. Menghitung momen *probable* positif tumpuan balok B2

$$\begin{aligned}M_{pr1} &= \left(0,85 \times f_c' \times c \times \beta_1 \times b + \left(d - \frac{a}{2} \right) \right) \\ &= \left(0,85 \times 25 \times 85,543 \times 0,85 \times 400 + \left(537,5 - \frac{72,712}{2} \right) \right) \\ &= 309732914 \text{ Nmm} \\ &= 309,733 \text{ kNm} \\ M_{pr2} &= (A_s' \times f_s') \times (d - d') \\ &= (3926,991 \times 30,114) \times (537,5 - 81,25) \\ &= 53955703 \text{ Nmm} \\ &= 53,956 \text{ kNm} \\ M_{pr}^+ &= M_{pr1} + M_{pr2} \\ &= 309,733 + 53,956 \\ &= 363,689 \text{ kNm}\end{aligned}$$

7. Analisis momen *probable* negatif pada daerah tumpuan

Langkah-langkah analisis momen *probable* negatif pada daerah tumpuan adalah sebagai berikut.

a. Menghitung luas tulangan

Tulangan tarik

$$A_s = 3926,991 \text{ mm}^2$$

Tulangan tekan

$$A_s' = 1472,622 \text{ mm}^2$$

b. Menghitung tinggi efektif balok B2

$$d = 518,125 \text{ mm}$$

$$d' = 62,5 \text{ mm}$$

c. Menentukan tinggi blok tekan

$$T_s = C_c + C_s$$

$$A_s \times f_u = (0,85 \times f'_c \times c \times \beta_1 \times b) + \left(A_s' \times \left(\varepsilon_c \times \left(\frac{c - d_s'}{c} \right) \times E_s \right) \right)$$

$$A_s \times 1,25f_y = (0,85 \times f'_c \times c \times \beta_1 \times b) + \left(A_s' \times \left(\varepsilon_c \times \left(\frac{c - d_s'}{c} \right) \times E_s \right) \right)$$

Berdasarkan persamaan diatas, nilai c dihitung dengan persamaan kuadrat rumus ABC. Maka didapatkan nilai c sebesar 189,751 mm.

$$\begin{aligned} a &= c \times \beta_1 \\ &= 189,751 \times 0,85 \\ &= 161,289 \text{ mm} \end{aligned}$$

d. Regangan beton

$$\varepsilon_c = 0,003$$

e. Regangan leleh baja tulangan

$$\varepsilon_y = 0,002$$

f. Regangan leleh baja tulangan tarik

$$\begin{aligned} \varepsilon_s &= \frac{d - c}{c} \times \varepsilon_c \\ &= \frac{518,750 - 189,751}{189,751} \times 0,003 \\ &= 0,005 > \varepsilon_y = 0,002 \text{ (Sudah Leleh)} \end{aligned}$$

g. Regangan leleh baja tulangan tarik

$$\varepsilon_s' = \frac{c - d'}{c} \times \varepsilon_c$$

$$\begin{aligned}
&= \frac{189,751 - 62,5}{189,751} \times 0,003 \\
&= 0,00201 \geq \varepsilon_y = 0,002 \text{ (Sudah Leleh)}
\end{aligned}$$

Nilai $\varepsilon_s' < \varepsilon_y$ yang menandakan tulangan baja tekan sudah leleh, maka nilai tegangan tekan baja (f_s') = f_y

$$\begin{aligned}
f_s' &= f_y \\
&= 400 \text{ MPa}
\end{aligned}$$

h. Menghitung momen *probable* negatif tumpuan balok B2

$$\begin{aligned}
M_{pr1} &= \left(0,85 \times f'_c \times c \times \beta_1 \times b + \left(d - \frac{a}{2} \right) \right) \\
&= \left(0,85 \times 25 \times 189,751 \times 0,85 \times 400 + \left(518,750 - \frac{161,289}{2} \right) \right) \\
&= 600622166 \text{ Nmm} \\
&= 600,622 \text{ kNm} \\
M_{pr2} &= (A_s' \times f_s') \times (d - d') \\
&= (1472,622 \times 400) \times (518,750 - 62,5) \\
&= 268753434 \text{ Nmm} \\
&= 268,753 \text{ kNm} \\
M_{pr}^- &= M_{pr1} + M_{pr2} \\
&= 600,622 + 268,753 \\
&= 869,376 \text{ kNm}
\end{aligned}$$

Analisis kapasitas lentur pada tipe balok lainnya dilakukan dengan langkah – langkah perhitungan yang sama seperti pada balok tipe B2. Rekapitulasi hasil analisis kapasitas lentur balok untuk seluruh tipe balok disajikan pada Tabel 5.12 berikut.

Tabel 5. 12 Rekapitulasi Kapasitas Lentur Balok

Kode Balok	Letak	Kapasitas Lentur Momen Positif				Kapasitas Lentur Momen Negatif			
		M_u^+ (kNm)	ϕM_n^+ (kNm)	R	Ket	M_u^- (kNm)	ϕM_n^- (kNm)	R	Ket
B1	Tumpuan	2277,325	1875,470	1,214	TM	2560,038	2406,709	1,064	TM
	Lapangan	1841,007	2748,798	0,670	M	642,464	968,221	0,664	M
B2	Tumpuan	185,312	266,565	0,695	M	592,250	644,998	0,918	M
	Lapangan	374,844	644,998	0,581	M	289,884	266,565	1,087	TM
B3	Tumpuan	202,439	266,314	0,760	M	616,031	506,035	1,217	TM
	Lapangan	310,537	576,717	0,538	M	282,674	266,363	1,061	TM
B4	Tumpuan	244,493	266,678	0,917	M	561,222	350,549	1,601	TM
	Lapangan	372,016	266,712	1,395	TM	326,377	266,712	1,224	TM
B5	Tumpuan	513,214	266,712	1,924	TM	608,914	266,712	2,283	TM
	Lapangan	558,160	266,712	2,093	TM	546,741	266,712	2,050	TM
B6	Tumpuan	207,585	154,057	1,347	TM	200,398	154,057	1,301	TM
	Lapangan	102,483	154,057	0,665	M	117,847	154,057	0,765	M
B7	Tumpuan	234,586	157,268	1,492	TM	248,455	157,268	1,580	TM
	Lapangan	237,173	157,268	1,508	TM	250,109	157,268	1,590	TM

Lanjutan Tabel 5.12 Rekapitulasi Kapasitas Lentur Balok

Kode Balok	Letak	Kapasitas Lentur Momen Positif				Kapasitas Lentur Momen Negatif			
		M_u^+ (kNm)	ϕM_n^+ (kNm)	R	Ket	M_u^- (kNm)	ϕM_n^- (kNm)	R	Ket
B8	Tumpuan	89,553	319,664	0,280	M	380,415	521,782	0,729	M
	Lapangan	47,812	319,664	0,150	M	196,575	521,782	0,377	M
B9	Tumpuan	112,142	125,092	0,896	M	150,684	125,092	1,205	TM
	Lapangan	71,376	125,092	0,571	M	48,671	125,092	0,389	M
B10	Tumpuan	85,547	182,337	0,469	M	90,913	350,252	0,260	M
	Lapangan	137,752	182,337	0,755	M	158,783	350,252	0,453	M
B11	Tumpuan	190,069	218,756	0,869	M	602,421	609,016	0,989	M
	Lapangan	415,172	319,327	1,300	TM	292,750	709,253	0,413	M
B12	Tumpuan	58,677	71,179	0,824	M	62,505	71,179	0,878	M
	Lapangan	67,229	71,179	0,945	M	67,392	71,179	0,947	M

dengan :

M : Memenuhi

TM : Tidak Memenuhi

Hasil analisis kapasitas momen lentur balok pada bangunan gedung hotel di Ngampilan, Yogyakarta yang mengalami penambahan satu lantai sehingga mengalami peningkatan beban struktur yang menyebabkan bertambahnya momen ultimit yang bekerja pada elemen balok daerah tumpuan maupun lapangan. Evaluasi kapasitas momen lentur dilakukan berdasarkan SNI 2847:2019 dengan membandingkan momen ultimit yang bekerja (M_u) terhadap momen nominal tereduksi (ϕM_n) sehingga diperoleh nilai rasio kapasitas (R). Elemen struktur dinyatakan memenuhi apabila nilai rasio kapasitas lentur kurang dari satu ($R < 1$), sedangkan nilai rasio kapasitas lentur lebih dari satu ($R > 1$) menunjukkan bahwa elemen struktur tidak memenuhi persyaratan. Pada contoh perhitungan balok tipe B2, kapasitas lentur pada daerah tumpuan untuk momen positif menghasilkan rasio sebesar 0,695, sedangkan momen negatif sebesar 0,918. Pada daerah lapangan, nilai rasio momen positif sebesar 0,581 dan nilai rasio momen negatif sebesar 1,087. Hasil tersebut menunjukkan bahwa sebagian besar kondisi pada balok B2 telah memenuhi persyaratan kapasitas lentur, kecuali pada momen negatif daerah lapangan yang tidak memenuhi persyaratan.

Berdasarkan rekapitulasi hasil analisis seluruh tipe balok pada Tabel 5.12, diperoleh bahwa beberapa balok masih tidak memenuhi persyaratan kapasitas lentur, terutama pada balok tipe B1, B2, B3, B4, B5, B6, B7, B9 dan B11. Sedangkan pada balok tipe B8, B10 dan B12 telah memenuhi persyaratan kapasitas lentur balok. Hasil evaluasi menunjukkan bahwa terdapat beberapa balok yang memerlukan peningkatan kapasitas lentur agar mampu memenuhi persyaratan SNI 2847:2019. Oleh karena itu, diperlukan perkuatan struktur dengan menggunakan *Carbon Fiber Reinforced Polymer* (CFRP) yang dapat meningkatkan kapasitas lentur balok yang tidak memenuhi persyaratan SNI 2847:2019.

5.3.5.2 Analisis Kapasitas Geser Balok

Analisis kapasitas geser balok menggunakan balok tipe B2 sebagai contoh perhitungan yang ditunjukkan pada Gambar 5.2.

1. Data balok B2

Data balok B2 adalah sebagai berikut.

$$\text{Panjang balok, } L = 8000 \text{ mm}$$

Lebar balok, b	= 400 mm
Tinggi balok, h	= 600 mm
Diameter tulangan longitudinal, d_p	= 25 mm
Diameter tulangan sengkang, d_s	= 10 mm
Selimut beton, s_b	= 40 mm
Kuat tekan beton, f'_c	= 25 MPa
Kuat leleh tulangan longitudinal, f_y	= 400 MPa
Faktor reduksi, β_1	= 0,85
Modulus elastisitas baja, E	= 200000 MPa
Lebar kolom kanan, $b_{k,kanan}$	= 400 mm
Lebar kolom kiri, $b_{k,kiri}$	= 400 mm
Panjang bentang bersih balok, L_n	= 7600 mm

Gaya-gaya dalam pada daerah sendi plastis dan daerah luar sendi plastis pada balok B2 yang diperoleh dari ETABS yang digunakan untuk analisis kapasitas geser balok B2 adalah sebagai berikut.

Gaya aksial (P_u)	= 214,510 kN
Gaya geser sendi plastis ($V_{u,sendi\ plastis}$)	= 399,950 kN
Gaya geser luar sendi plastis ($V_{u,luar\ sendi\ plastis}$)	= 271,937 kN

Nilai momen *probable* diperoleh dari perhitungan analisis kapasitas lentur sehingga didapatkan nilai – nilai sebagai berikut.

Momen <i>probable</i> negatif (M_{pr}^-)	= 869,376 kNm
Momen <i>probable</i> positif (M_{pr}^+)	= 363,689 kNm

2. Analisis gaya geser balok B2 daerah sendi plastis

Langkah-langkah analisis gaya geser balok B2 daerah sendi plastis adalah sebagai berikut.

a. Menentukan nilai gaya geser desain ($V_u\ sendi\ plastis$)

Diperoleh *output* dari ETABS v.22 yaitu gaya geser akibat beban gravitasi (V_g).

$$V_g = 306,469 \text{ kN}$$

Menghitung gaya geser *probable* (V_{pr})

$$\begin{aligned} V_{pr} &= \frac{M_{pr}^{-} + M_{pr}^{+}}{L_n} \\ &= \frac{869,376 + 363,689}{7,6} \\ &= 162,245 \text{ kN} \end{aligned}$$

Menghitung gaya geser terfaktor

$$\begin{aligned} V_{e1} &= V_{pr} + V_g \\ &= 162,245 + 306,469 \\ &= 468,715 \text{ kN} \\ V_{e2} &= V_{pr} - V_g \\ &= 162,245 - 306,469 \\ &= -144,224 \text{ kN} \end{aligned}$$

Maka nilai gaya geser terfaktor (V_e) yang digunakan sebesar 495,313 kN.

$$\begin{aligned} V_e &= 468,715 \text{ kN} \\ V_{u \text{ sendi plastis}} &= V_e \\ &= 468,715 \text{ kN} \end{aligned}$$

b. Menentukan tahanan geser beton

Berdasarkan pasal 18.6.5.2 SNI 2847:2019, penentuan kuat geser beton (V_c) = 0 kN apabila dua kondisi berikut terpenuhi.

$$\begin{aligned} \frac{V_e}{2} &\geq V_u \\ \frac{468,715}{2} &\geq 399,950 \text{ kN} \\ 234,357 \text{ kN} &\leq 399,950 \text{ kN (Tidak Memenuhi)} \\ P_u &\leq \frac{A_g \times f'_c}{20} \\ 214,510 \text{ kN} &\leq \frac{(400 \times 600) \times 25}{20} \\ 214,510 \text{ kN} &\leq 300 \text{ kN (Memenuhi)} \end{aligned}$$

Karena salah satu syarat diatas tidak terpenuhi, maka V_c diperhitungkan.

c. Menentukan kuat geser tekan beton

$$\begin{aligned}
 V_c &= 0,17 \times \sqrt{f'_c} \times b \times d \\
 &= 0,17 \times \sqrt{25} \times 400 \times 518,75 \\
 &= 176375 \text{ N} \\
 &= 176,375 \text{ kN}
 \end{aligned}$$

d. Menentukan kuat geser tulangan sengkang

Jumlah kaki sengkang

$$n = 3 \text{ kaki}$$

Jarak kaki sengkang

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

Menghitung luas tulangan yang terpasang

$$\begin{aligned}
 A_s &= n \times \frac{1}{4} \times \pi \times d_s^2 \\
 &= 3 \times \frac{1}{4} \times \pi \times 10^2 \\
 &= 235,619 \text{ mm}^2
 \end{aligned}$$

Menghitung gaya geser tulangan sengkang

$$\begin{aligned}
 V_s &= \frac{A_s \times f_y \times d}{S} \\
 &= 235,619 \times 400 \times \frac{518,75}{100} \\
 &= 488910 \text{ N} \\
 &= 488,910 \text{ kN}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Batas } V_s &= 0,66 \times \sqrt{f'_c} \times b_w \times d \\
 &= 0,66 \times \sqrt{25} \times 400 \times 518,75 \\
 &= 684750 \text{ N} \\
 &= 684,750 \text{ kN} > V_s = 488,910 \text{ kN (Memenuhi)}
 \end{aligned}$$

e. Mengecek jarak antar tulangan sengkang minimum

$$S_{pakai} = 100 \text{ mm}$$

$$S_{min,1} = \frac{d}{4}$$

$$\begin{aligned}
&= \frac{518,75}{4} \\
&= 129,688 \text{ mm} \\
S_{min,2} &= 6d_p \\
&= 6 \times 25 \\
&= 150 \text{ mm} \\
S_{min,3} &= 150 \text{ mm} \\
S_{pakai} &< S_{min} \\
100 \text{ mm} &< 129,688 \text{ mm (Memenuhi)}
\end{aligned}$$

f. Menghitung kapasitas geser nominal

$$\begin{aligned}
V_n &= V_c + V_s \\
&= 176,375 + 488,910 \\
&= 665,285 \text{ kN} \\
\phi &= 0,75 \\
\phi V_n &= 0,75 \times 665,285 \\
&= 498,964 \text{ kN}
\end{aligned}$$

g. Menghitung nilai rasio kapasitas geser

$$\begin{aligned}
R &= \frac{V_{u,sendi plastis}}{\phi V_n} \\
&= \frac{468,715}{498,964} \\
&= 0,939 < 1 \text{ (Memenuhi)}
\end{aligned}$$

3. Analisis geser balok B2 daerah luar sendi plastis

a. Menghitung gaya geser desain

Diperoleh nilai gaya geser terfaktor $V_{e,1}$ sebesar 468,715 kN dan $V_{e,2}$ sebesar -144,224 kN . Kemudian dihitung nilai gaya geser desain pada daerah luar sendi plastis dengan jarak dari daerah sendi plastis sebesar $2h_b$ yaitu 1,2 m.

$$V_{e,luar sendi plastis} = V_1 + \frac{X}{L_n} \times V_2 - V_1$$

$$\begin{aligned}
&= 468,715 + \frac{1,2}{7,6} \times (-144,224) - 468,715 \\
&= 371,935 \text{ kN}
\end{aligned}$$

Maka nilai $V_{u, \text{luar sendi plastis}}$ sebesar 371,935 kN

b. Menentukan tahanan geser beton

$$\begin{aligned}
V_c &= 0,17 \times \sqrt{f'_c} \times b \times d \\
&= 0,17 \times \sqrt{25} \times 400 \times 518,75 \\
&= 176375 \text{ N} \\
&= 176,375 \text{ kN}
\end{aligned}$$

c. Menghitung luas tulangan sengkang

$$\begin{aligned}
n &= 2 \text{ kaki} \\
A_v &= n \times \frac{1}{4} \times \pi \times d_s^2 \\
&= 2 \times \frac{1}{4} \times \pi \times 10^2 \\
&= 157,080 \text{ mm}^2
\end{aligned}$$

d. Cek spasi

$$\begin{aligned}
s_{pakai} &= 150 \text{ mm} \\
s_{max} &= \frac{d}{2} \\
&= \frac{518,75}{2} \\
&= 259,375 \text{ mm} \\
s_{pakai} &< s_{max} \\
150 \text{ mm} &< 259,375 \text{ mm (Memenuhi)}
\end{aligned}$$

e. Menghitung tahanan geser baja

$$\begin{aligned}
V_s &= A_v \times f_{yv} \times \frac{d}{s} \\
&= 157,080 \times 400 \times \frac{518,75}{150} \\
&= 217293 \text{ N} \\
&= 217,293 \text{ kN}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Batas } V_s &= 0,66 \times \sqrt{f'_c} \times b_w \times d \\
 &= 0,66 \times \sqrt{25} \times 400 \times 518,75 \\
 &= 684750 \text{ N} \\
 &= 684,750 \text{ kN} > V_s = 217,293 \text{ kN (Memenuhi)}
 \end{aligned}$$

Maka tahanan geser yang digunakan sebesar 221,220 kN.

f. Menghitung kapasitas geser balok B2

$$\begin{aligned}
 V_n &= V_c + V_s \\
 &= 176,375 + 217,293 \\
 &= 393,668 \text{ kN} \\
 \phi &= 0,75 \\
 \phi V_n &= 0,75 \times 393,668 \\
 &= 295,251 \text{ kN}
 \end{aligned}$$

g. Menghitung rasio geser balok B2 daerah luar sendi plastis

$$\begin{aligned}
 R &= \frac{V_{u, \text{luar sendi plastis}}}{\phi V_n} \\
 &= \frac{371,935}{295,251} \\
 &= 1,260 > 1 \text{ (Tidak Memenuhi)}
 \end{aligned}$$

Analisis kapasitas geser pada tipe balok lainnya dilakukan dengan menggunakan prosedur perhitungan yang sama. Rekapitulasi hasil analisis kapasitas geser balok untuk seluruh tipe balok disajikan pada Tabel 5.13 berikut.

Tabel 5. 13 Rekapitulasi Kapasitas Geser Balok

Kode Balok	Letak	Kapasitas Geser			
		V_u (kN)	ϕV_n (kN)	R	Ket
B1	Sendi plastis	1552,648	1752,815	0,886	M
	Luar sendi plastis	1063,340	1752,815	0,607	M
B2	Sendi plastis	468,715	498,964	0,939	M
	Luar sendi plastis	371,935	295,251	1,260	TM
B3	Sendi plastis	341,228	384,301	0,888	M
	Luar sendi plastis	277,642	301,180	0,922	M

Lanjutan Tabel 5.13 Rekapitulasi Kapasitas Geser Balok

Kode Balok	Letak	Kapasitas Geser			
		V_u (kN)	ϕV_n (kN)	R	Ket
B4	Sendi plastis	424,989	390,353	1,089	TM
	Luar sendi plastis	326,014	305,923	1,066	TM
B5	Sendi plastis	285,285	390,353	0,731	M
	Luar sendi plastis	225,635	305,923	0,738	M
B6	Sendi plastis	72,515	323,618	0,224	M
	Luar sendi plastis	67,226	238,717	0,282	M
B7	Sendi plastis	110,849	358,075	0,310	M
	Luar sendi plastis	93,780	273,174	0,343	M
B8	Sendi plastis	281,475	462,977	0,608	M
	Luar sendi plastis	233,865	462,977	0,505	M
B9	Sendi plastis	148,775	277,785	0,536	M
	Luar sendi plastis	124,143	208,592	0,595	M
B10	Sendi plastis	123,549	390,353	0,317	M
	Luar sendi plastis	114,852	263,708	0,436	M
B11	Sendi plastis	465,878	456,925	1,020	TM
	Luar sendi plastis	348,997	308,681	1,131	TM
B12	Sendi plastis	60,363	149,771	0,403	M
	Luar sendi plastis	54,775	93,811	0,584	M

dengan :

M : Memenuhi

TM : Tidak Memenuhi

Hasil analisis kapasitas geser balok pada bangunan gedung hotel di Ngampilan, Yogyakarta yang mengalami penambahan satu lantai sehingga mengalami peningkatan beban struktur yang menyebabkan bertambahnya gaya geser ultimit yang bekerja pada elemen balok daerah sendi plastis maupun daerah luar sendi plastis. Evaluasi kapasitas geser dilakukan berdasarkan SNI 2847:2019 dengan membandingkan gaya geser ultimit yang bekerja (V_u) terhadap gaya geser nominal tereduksi (ϕV_n) sehingga diperoleh nilai rasio kapasitas (R). Elemen

struktur dinyatakan memenuhi apabila nilai rasio kapasitas geser kurang dari satu ($R < 1$), sedangkan nilai rasio kapasitas geser lebih dari satu ($R > 1$) menunjukkan bahwa elemen struktur tidak memenuhi persyaratan. Pada contoh perhitungan balok tipe B2, kapasitas geser sebesar 0,939 pada daerah sendi plastis sehingga telah memenuhi persyaratan. Namun, pada daerah luar sendi plastis diperoleh nilai rasio sebesar 1,260 yang menunjukkan bahwa kapasitas geser balok tidak memenuhi persyaratan.

Berdasarkan rekapitulasi hasil analisis seluruh tipe balok pada Tabel 5.13, diperoleh bahwa beberapa balok masih tidak memenuhi persyaratan kapasitas geser, terutama pada balok tipe B2, B4 dan B11. Sedangkan pada balok tipe B1, B3, B5, B6, B7, B8, B9, B10 dan B12 telah memenuhi persyaratan kapasitas geser balok. Hasil evaluasi menunjukkan bahwa terdapat beberapa balok yang memerlukan peningkatan kapasitas geser agar mampu memenuhi persyaratan SNI 2847:2019. Oleh karena itu, diperlukan perkuatan struktur dengan menggunakan *Carbon Fiber Reinforced Polymer* (CFRP) yang dapat meningkatkan kapasitas geser balok yang tidak memenuhi persyaratan.

5.3.6 Analisis Kolom

Penambahan lantai pada bangunan gedung hotel di Ngampilan, Yogyakarta menyebabkan peningkatan beban struktur yang berpengaruh langsung terhadap kinerja elemen kolom. Sebagai elemen struktur utama yang menyalurkan beban dari balok dan pelat ke fondasi, kolom harus memiliki kapasitas yang memadai untuk menahan gaya aksial, lentur, dan geser akibat penambahan beban tersebut.

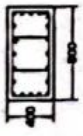
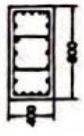
Dalam penelitian ini, evaluasi kemampuan kapasitas kolom eksisting dilakukan sebagai tahap awal sebelum perencanaan perkuatan menggunakan *Carbon Fiber Reinforced Polymer* (CFRP). Analisis gaya dalam kolom diperoleh melalui pemodelan struktur menggunakan perangkat lunak ETABS. Gaya-gaya dalam yang dihasilkan selanjutnya digunakan untuk mengevaluasi kapasitas penampang kolom yang meliputi kapasitas aksial, lentur, dan geser.

Evaluasi kapasitas kolom mengacu pada ketentuan SNI 1726:2019 dan SNI 2847:2019 untuk menilai kemampuan kolom dalam memikul beban tambahan akibat penambahan lantai. Hasil evaluasi ini menjadi dasar dalam menentukan

kebutuhan perkuatan kolom menggunakan CFRP apabila kapasitas kolom tidak memenuhi persyaratan kekuatan struktur.

5.3.6.1 Analisis Kapasitas Aksial dan Lentur Kolom

Analisis kapasitas aksial dan lentur kolom dilakukan dengan menggunakan kolom tipe K2(M) sebagai contoh perhitungan, dengan skema penampang kolom yang ditunjukkan pada Gambar 5.3 berikut.

KOLOM K2	
TUMPUAN	LAPANGAN
	
20 D25	20 D25
D10 - 100	D10 - 150
400 X 800	

Gambar 5. 3 Kolom Tipe K2(M)

(Sumber : *as built drawing*)

1. Data Kolom K2(M)

Data kolom K2(M) adalah sebagai berikut.

Tinggi kolom, L	= 3300 mm
Lebar kolom, b	= 400 mm
Tinggi kolom, h	= 800 mm
Diameter tulangan longitudinal, d_p	= 25 mm
Diameter tulangan sengkang, d_s	= 10 mm
Selimut beton, s_b	= 40 mm
Kuat tekan beton, f'_c	= 25 MPa
Kuat leleh tulangan, f_y	= 400 MPa
Faktor reduksi, β_1	= 0,85
Modulus elastisitas baja, E	= 200000 MPa
Lebar balok kanan, $b_{b,kanan}$	= 600 mm
Lebar balok kiri, $b_{b,kiri}$	= 600 mm

Panjang bersih kolom, $L_n = 2700 \text{ mm}$

Gaya-gaya dalam kolom K2(M) yang diperoleh dari ETABS yang digunakan untuk analisis kapasitas aksial-lentur kolom K2(M) dapat dilihat pada Tabel 5.14 dan Tabel 5.15 berikut.

Tabel 5. 14 Gaya Aksial – Momen Lentur Kolom K2(M) Arah X

Kondisi	P_u	$M_{u,x}$
	kN	kNm
$P_{u \max}$	1360,664	152,344
$P_{u \min}$	5026,480	-928,750
$M_{u,x \max}$	2152,543	1358,479
$M_{u,x \min}$	2833,140	-1281,220

Tabel 5. 15 Gaya Aksial – Momen Lentur Kolom K2(M) Arah Y

Kondisi	P_u	$M_{u,y}$
	kN	kNm
$P_{u \max}$	1360,664	29,953
$P_{u \min}$	5026,480	-176,766
$M_{u,y \max}$	2088,077	374,253
$M_{u,y \min}$	3424,216	-369,212

2. Analisis kapasitas aksial–lentur kolom

Langkah-langkah analisis kapasitas aksial-lentur kolom K2(M) adalah sebagai berikut.

a. Pengecekan syarat rasio tulangan

Luas tulangan longitudinal

$$\begin{aligned}
 A_b &= \frac{1}{4} \times \pi \times d_p^2 \\
 &= \frac{1}{4} \times 3,14 \times 25^2 \\
 &= 490,874 \text{ mm}^2 \\
 A_s &= n \times A_b \\
 &= 20 \times 490,874
 \end{aligned}$$

$$= 9817,477 \text{ mm}^2$$

Luas penampang

$$\begin{aligned} A_g &= b \times h \\ &= 400 \times 800 \\ &= 320000 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

Rasio tulangan

$$\begin{aligned} \rho &= \frac{A_s}{A_g} \\ &= \frac{9817,477}{320000} \\ &= 3,068 \% \end{aligned}$$

Rasio tulangan memenuhi syarat $1\% < 3,068 \% < 6\%$ (Memenuhi)

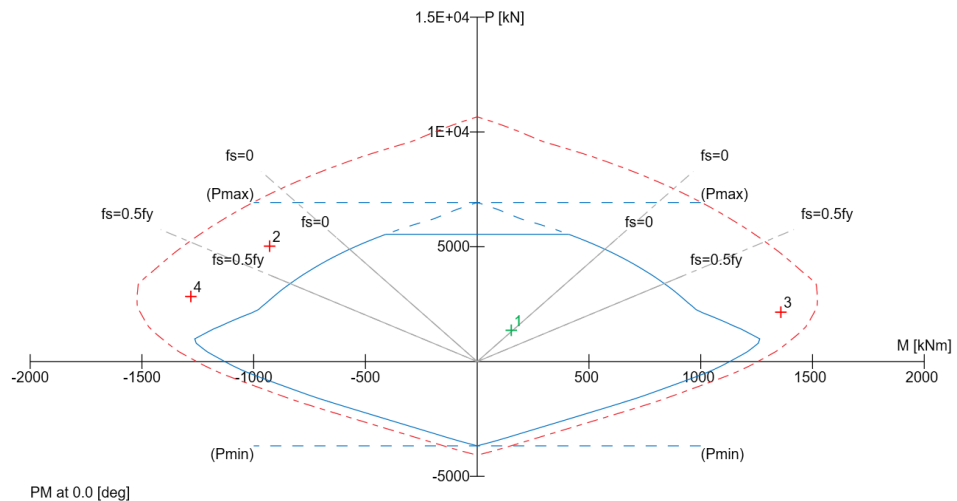
b. Diagram interaksi kolom

Analisis kapasitas aksial dan lentur kolom menggunakan kolom tipe K2(M) sebagai contoh perhitungan dengan gaya dalam yang diperoleh dari hasil pemodelan struktur menggunakan ETABS. Kemudian data penampang kolom dan gaya dalam kolom K2(M) di *input* ke dalam *software spColumn* sehingga diperoleh gambar diagram interaksi kolom serta nilai kapasitas aksial nominal, kapasitas momen nominal arah X dan arah Y pada kolom K2(M). Nilai – nilai yang diperoleh dari *spColumn* dapat dilihat pada Tabel 5.16 berikut.f

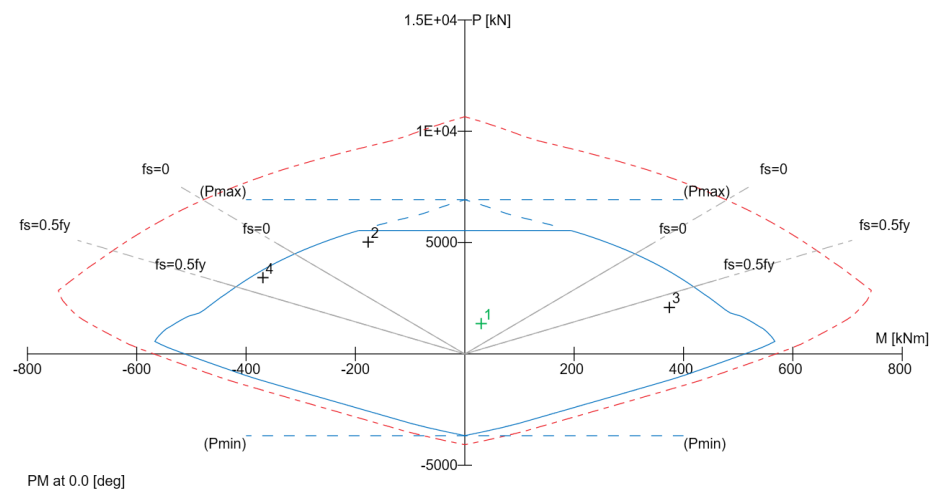
Tabel 5.16 Rekapitulasi Kapasitas Aksial dan Lentur Kolom K2(M)

Kondisi	Kapasitas Aksial		Momen Nominal			
	ϕP_n (kN)	P_n (kN)	ϕM_{nx} (kNm)	M_{nx} (kNm)	ϕM_{ny} (kNm)	M_{ny} (kNm)
Tekan Murni	6929,5	10660,8	0	0	0	0
Tekan Izin	5543,6	8528,6	409,27	629,6	194,37	299,0
$f_s = 0$	4893,5	7528,5	571,11	878,6	311,26	478,9
$f_s = 0,5 f_y$	3396,3	5225,1	836,92	1287,6	418,54	643,9
Titik Seimbang	2207,1	3395,5	985,25	1515,8	483,21	743,4
Kontrol Tarik	932,7	1036,3	1274,16	1415,7	567,32	630,4
Lentur murni	0,0	0	1129,37	1254,9	511,81	568,7
Tarik Maksimum	-3669,7	-4077,4	0	0	0	0

Gambar diagram interaksi kolom K2(M) arah-X dan arah-Y yang dapat dilihat pada Gambar 5.4 dan Gambar 5.5 berikut.



Gambar 5. 4 Diagram Interaksi Kolom K2(M) Arah-X
(Sumber : *sP Column*)



Gambar 5. 5 Diagram Interaksi Kolom K2(M) Arah-Y
(Sumber : *SP Column*)

Untuk gambar diagram interaksi tipe kolom lainnya dapat dilihat pada Lampiran 3.

Diagram interaksi kolom merupakan grafik yang menunjukkan hubungan antara kapasitas gaya aksial (P) dan momen lentur (M) yang dapat ditahan oleh suatu kolom beton bertulang. Diagram ini digunakan untuk mengevaluasi kemampuan kolom dalam menahan kombinasi gaya tekan,

gaya tarik dan momen lentur yang bekerja secara bersamaan pada penampang kolom. Pada diagram interaksi, sumbu vertikal menunjukkan besar gaya aksial dalam satuan kN, sedangkan sumbu horizontal menunjukkan besar momen lentur dalam satuan kNm. Kurva pada diagram menggambarkan batas kapasitas maksimum penampang kolom terhadap kombinasi gaya aksial dan momen tertentu. Kurva merah putus – putus menggambarkan kapasitas nominal maksimum kolom, sedangkan kurva biru menunjukkan kapasitas desain setelah memperhitungkan faktor reduksi kekuatan (ϕ). Suatu kondisi pembebanan dinyatakan aman apabila titik kombinasi gaya dalam berada di dalam kurva biru, sedangkan titik kombinasi gaya dalam yang berada di luar kurva biru menunjukkan bahwa kapasitas penampang kolom tidak aman.

Berdasarkan gambar diagram interaksi kolom K2(M) arah X menunjukkan bahwa terdapat titik pembebanan yang ditandai dengan angka 1 yang berada di dalam kurva biru yang menandakan aman, sedangkan titik yang ditandai dengan angka 2, 3 dan 4 berada di luar kurva biru yang menandakan tidak aman sehingga tidak memenuhi persyaratan SNI 2847:2019. Pada gambar diagram interaksi kolom K2(M) arah Y menunjukkan bahwa semua titik pembebanan berada di dalam kurva biru yang menandakan aman dan memenuhi persyaratan. Untuk tipe kolom lainnya yang tidak memenuhi persyaratan berdasarkan gambar diagram interaksi arah X adalah K2(L2-L3), K2(L4-A) dan K4, sedangkan untuk arah Y adalah tipe kolom K1(L2), K1(L3-A), K2(L2-L3), K4, K5, K6, K7, K8(L3) dan K8(L4-A).

3. Pengecekan syarat kolom kuat – balok lemah (*Strong Column Weak Beam* (SCWB))

Syarat kolom kuat – balok lemah (*Strong Column Weak Beam* (SCWB)) dilakukan untuk memastikan bahwa mekanisme keruntuhan struktur akibat gempa terjadi terlebih dahulu pada balok dibandingkan kolom. Konsep ini merupakan salah satu prinsip utama dalam perencanaan struktur tahan gempa sesuai ketentuan SNI 2847:2019, dimana kolom harus memiliki jumlah momen nominal ($\sum M_{nc}$) yang lebih besar dibandingkan 1,2 kali jumlah

momen nominal balok ($\sum M_{nb}$) agar keruntuhan yang terjadi bersifat duktail dan tidak menyebabkan keruntuhan tingkat.

Pengecekan SCWB dilakukan pada kolom K2(M) sebagai contoh perhitungan. Nilai momen nominal kolom diperoleh dari hasil diagram interaksi kolom pada kondisi gaya aksial minimum (P_{min}) menggunakan *spColumn*. Sedangkan momen nominal balok diperoleh dari hasil analisis kapasitas lentur balok pada daerah tumpuan arah X dan arah Y. Berikut merupakan perhitungan SCWB kolom K2(M).

Momen nominal pada kolom arah X, $M_{nc,X}$ lantai

atas = 965,651 kNm

Momen nominal pada kolom arah Y, $M_{nc,Y}$ lantai

atas = 417,902 kNm

Momen nominal pada kolom arah X, $M_{nc,X}$ lantai

yang ditinjau = 1177,139 kNm

Momen nominal pada kolom arah Y, $M_{nc,Y}$ lantai

yang ditinjau = 515,598 kNm

Momen nominal tumpuan (-) balok arah Y, $M_{nb,Y}^-$ = 562,262 kNm

Momen nominal tumpuan (+) balok arah Y, $M_{nb,Y}^+$ = 296,347 kNm

Momen nominal tumpuan (-) balok arah X, $M_{nb,X}^-$ = 389,499 kNm

Momen nominal tumpuan (+) balok arah X, $M_{nb,X}^+$ = 296,309 kNm

Cek syarat kolom kuat balok lemah $\sum M_{nc} \geq 1,2 \sum M_{nb}$

a. Arah X

$$\sum M_{nc,x} = M_{nc,x} \text{ lantai yang ditinjau} + M_{nc,x} \text{ lantai atas}$$

$$= 1177,139 + 965,651$$

$$= 2142,790 \text{ kNm}$$

$$1,2 \sum M_{nb} = 1,2 \times (562,262 + 296,347)$$

$$= 1030,330 \text{ kNm}$$

$$\sum M_{nc,Y} \geq 1,2 \sum M_{nb}$$

$$2142,790 \text{ kNm} \geq 1030,330 \text{ kNm (Memenuhi)}$$

b. Arah Y

$$\begin{aligned}
 \sum M_{nc,y} &= M_{nc,y} \text{ lantai yang ditinjau} + M_{nc,y} \text{ lantai atas} \\
 &= 515,598 + 417,902 \\
 &= 933,500 \text{ kNm} \\
 1,2 \sum M_{nb} &= 1,2 \times (389,499 + 296,309) \\
 &= 822,970 \text{ kNm} \\
 \sum M_{nc,x} &\geq 1,2 \sum M_{nb} \\
 933,500 \text{ kNm} &\geq 822,970 \text{ kNm (Memenuhi)}
 \end{aligned}$$

Berdasarkan hasil perhitungan pada kolom K2 arah X, diperoleh jumlah momen nominal kolom sebesar 2142,790 kNm, sedangkan nilai 1,2 kali jumlah momen nominal balok sebesar 1030,330 kNm. Hal tersebut menunjukkan bahwa kapasitas lentur kolom lebih besar dibandingkan kapasitas lentur balok, sehingga syarat SCWB pada arah X dinyatakan memenuhi. Pada kolom K2(M) arah Y, diperoleh diperoleh jumlah momen nominal kolom sebesar 933,500 kNm, sedangkan nilai 1,2 kali jumlah momen nominal balok sebesar 822,970 kNm. Hal tersebut menunjukkan bahwa kapasitas lentur kolom lebih besar dibandingkan kapasitas lentur balok, sehingga syarat SCWB pada arah Y dinyatakan memenuhi. Hasil pengecekan SCWB kolom K2(M) menunjukkan bahwa struktur bangunan gedung hotel di Ngampilan, Yogyakarta masih memenuhi prinsip kolom kuat – balok lemah sesuai ketentuan SNI 2847:2019.

5.3.6.2 Analisis Kapasitas Geser Kolom

Analisis kapasitas geser kolom dilakukan dengan menggunakan kolom tipe K2 sebagai contoh perhitungan yang ditunjukkan pada Gambar 5.3.

1. Data kolom K2(M)

Data kolom K2(M) adalah sebagai berikut.

$$\begin{aligned}
 \text{Tinggi kolom, } L &= 3300 \text{ mm} \\
 \text{Lebar kolom, } b &= 400 \text{ mm} \\
 \text{Tinggi kolom, } h &= 800 \text{ mm} \\
 \text{Diameter tulangan longitudinal, } d_p &= 25 \text{ mm}
 \end{aligned}$$

Diameter tulangan sengkang, d_s	= 10 mm
Selimut beton, s_b	= 40 mm
Kuat tekan beton, f'_c	= 25 MPa
Kuat leleh tulangan, f_y	= 400 MPa
Faktor reduksi, β_1	= 0,85
Modulus elastisitas baja, E	= 200000 MPa
Lebar balok kanan, $b_{b,kanan}$	= 600 mm
Lebar balok kiri, $b_{b,kiri}$	= 600 mm
Panjang bersih kolom, L_n	= 2700 mm

Gaya-gaya dalam pada daerah sendi plastis dan luar daerah sendi plastis pada kolom K2(M) yang diperoleh dari ETABS yang digunakan untuk analisis kapasitas geser kolom K2 adalah sebagai berikut.

Gaya aksial (P_u)	= 1360,664 kN
Gaya geser arah x ($V_{u,x}$)	= 482,072 kNm
Gaya geser arah y ($V_{u,y}$)	= 181,840 kN

2. Analisis kapasitas geser kolom daerah sendi plastis

Langkah-langkah analisis kapasitas geser kolom K2 adalah sebagai berikut.

a. Persyaratan panjang (l_0) pada daerah sendi plastis

Menentukan daerah pemasangan tulangan sengkang diperlukan sepanjang l_0 dari ujung – ujung kolom dengan nilai l_0 merupakan nilai terbesar dari

$$\begin{aligned}
 l_{0,1} &= h_{kolom} \\
 &= 800 \text{ mm} \\
 l_{0,2} &= \frac{1}{6} L_n \\
 &= \frac{1}{6} \times 2700 \\
 &= 450 \text{ mm} \\
 l_{0,3} &= 450 \text{ mm}
 \end{aligned}$$

Maka, jarak l_0 sebesar 800 mm

b. Menentukan nilai gaya geser desain (V_u sendi plastis)

Analisis gaya geser V_e diperoleh 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 tegangan baja tulangan sebesar $1,25f_y$ yang diperoleh dari *SpColumn*.

Gaya geser yang berhubungan dengan sendi plastis di kedua ujung kolom

$$M_{pr,X} = 1202,595 \text{ kNm}$$

$$M_{pr,Y} = 508,668 \text{ kNm}$$

Menghitung gaya geser *probable* (V_{prc})

$$\begin{aligned} V_{prc,X} &= \frac{2 \times M_{prc,X}}{L_n} \\ &= \frac{2 \times 1202,595}{2,7} \\ &= 890,811 \text{ kN} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} V_{prc,Y} &= \frac{2 \times M_{prc,Y}}{L_n} \\ &= \frac{2 \times 508,668}{2,7} \\ &= 376,791 \text{ kN} \end{aligned}$$

Sehingga nilai gaya geser (V_e) yang digunakan sumbu X sebesar 890,811 kN dan sumbu Y sebesar 376,791 kN.

c. Menentukan tahanan geser beton

Berdasarkan pasal 18.6.5.2 SNI 2847:2019, penentuan kuat geser beton (V_c) = 0 kN apabila dua kondisi berikut terpenuhi.

$$\frac{V_{eX}}{2} \geq V_u$$

$$\frac{890,811}{2} \geq 482,072 \text{ kN}$$

$$445,406 \text{ kN} \leq 482,07 \text{ kN (Tidak Memenuhi)}$$

$$\frac{V_{eY}}{2} \geq V_u$$

$$\frac{376,791}{2} \geq 181,840 \text{ kN}$$

$$188,396 \text{ kN} \geq 125,157 \text{ kN (Memenuhi)}$$

$$P_u \leq \frac{A_g \times f'_c}{20}$$

$$1360,664 \text{ kN} \leq \frac{(400 \times 800) \times 25}{20}$$

$$1360,664 \text{ kN} \geq 400 \text{ kN (Tidak Memenuhi)}$$

Karena kedua syarat diatas tidak memenuhi, maka V_c diperhitungkan

Kapasitas geser beton sumbu X

$$\begin{aligned} V_{c,X} &= 0,17 \times \left(\frac{N_u}{14 \times A_g} \right) \times \sqrt{f'_c} \times b \times d_x \\ &= 0,17 \times \left(\frac{100747}{14 \times 320000} \right) \times \sqrt{25} \times 400 \times \left(800 - 40 - 10 - \frac{25}{2} \right) \\ &= 256389 \text{ N} \end{aligned}$$

Kapasitas geser beton sumbu Y

$$\begin{aligned} V_{c,Y} &= 0,17 \times \left(\frac{N_u}{14 \times A_g} \right) \times \sqrt{f'_c} \times b \times d_y \\ &= 0,17 \times \left(\frac{100747}{14 \times 320000} \right) \times \sqrt{25} \times 400 \times \left(400 - 40 - 10 - \frac{25}{2} \right) \\ &= 117331 \text{ N} \end{aligned}$$

d. Menentukan kuat geser tulangan sengkang

Jumlah kaki sengkang

$$n_X = 2 \text{ kaki}$$

$$n_Y = 4 \text{ kaki}$$

Jarak kaki sengkang

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

Menghitung luas tulangan yang terpasang

$$\begin{aligned} A_{v,X} &= n \times \frac{1}{4} \times \pi \times d_s^2 \\ &= 2 \times \frac{1}{4} \times \pi \times 10^2 \\ &= 157,080 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 A_{v,Y} &= n \times \frac{1}{4} \times \pi \times d_s^2 \\
 &= 4 \times \frac{1}{4} \times \pi \times 10^2 \\
 &= 314,159 \text{ mm}^2
 \end{aligned}$$

Menghitung gaya geser tulangan sengkang

$$\begin{aligned}
 V_{s,X} &= \frac{A_{vs,X} \times f_y \times d_x}{s_s} \\
 &= \frac{157,080 \times 400 \times \left(800 - 40 - 10 - \frac{25}{2}\right)}{100} \\
 &= 463385 \text{ N} \\
 V_{s,Y} &= \frac{A_{vs,Y} \times f_y \times d_y}{s_s} \\
 &= \frac{314,159 \times 400 \times \left(400 - 40 - 10 - \frac{25}{2}\right)}{100} \\
 &= 424115 \text{ N}
 \end{aligned}$$

e. Mengecek jarak antar tulangan sengkang

$$\begin{aligned}
 s_{min,1} &= \frac{1}{4} \times b_k \\
 &= \frac{1}{4} \times 400 \\
 &= 100 \text{ mm} \\
 s_{min,2} &= 6d_b \\
 &= 6 \times 25 \\
 &= 150 \text{ mm} \\
 s_{min,3} &= 100 + \left(\frac{350 - h_x}{3}\right) \\
 &= 100 + \left(\frac{350 - 350}{3}\right) \\
 &= 100 \text{ mm} \\
 s_{terpasang} &\leq s_{min} \\
 100 \text{ mm} &\leq 100 \text{ mm (Memenuhi)}
 \end{aligned}$$

f. Menghitung kapasitas geser nominal

$$\begin{aligned}
 V_{n,X} &= V_{c,X} + V_{s,X} \\
 &= 256389 + 463385 \\
 &= 719774 \text{ N} \\
 &= 719,774 \text{ kN}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 V_{n,Y} &= V_{c,Y} + V_{s,Y} \\
 &= 117331 + 424115 \\
 &= 541446 \text{ N} \\
 &= 541,446 \text{ kN}
 \end{aligned}$$

$$\phi = 0,75$$

$$\begin{aligned}
 \phi V_{n,X} &= 0,75 \times 719,774 \\
 &= 539,830 \text{ kN}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \phi V_{n,Y} &= 0,75 \times 541,446 \\
 &= 406,084 \text{ kN}
 \end{aligned}$$

g. Menghitung nilai rasio kapasitas geser

$$\begin{aligned}
 R_X &= \frac{V_{u,X}}{\phi V_{n,X}} \\
 &= \frac{890,811}{539,830} \\
 &= 1,650 > 1 \text{ (Tidak Memenuhi)}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 R_Y &= \frac{V_{u,Y}}{\phi V_{n,Y}} \\
 &= \frac{376,791}{406,084} \\
 &= 0,928 < 1 \text{ (Memenuhi)}
 \end{aligned}$$

3. Analisis geser kolom daerah luar sendi plastis

a. Menentukan nilai gaya geser desain ($V_{u, \text{luar sendi plastis}}$)

Diperoleh nilai gaya geser terfaktor $V_{e,X}$ sebesar 890,811 kN dan $V_{e,Y}$ sebesar 376,791 kN . Kemudian dihitung nilai gaya geser desain pada daerah luar sendi plastis dengan jarak dari daerah sendi plastis sebesar l_o yaitu 0,8 m.

Nilai gaya geser desain sumbu X

$$\begin{aligned}
 V_{e,luar\ sendi\ plastis\ X} &= V_{e1,X} + \frac{X}{L_n} \times V_{e2,X} - V_{e1,X} \\
 &= 890,811 + \frac{0,8}{2,7} \times 0 - 890,811 \\
 &= 626,867 \text{ kN}
 \end{aligned}$$

Maka nilai $V_{u,luar\ sendi\ plastis,X}$ sebesar 626,867 kN

Nilai gaya geser desain sumbu Y

$$\begin{aligned}
 V_{e,luar\ sendi\ plastis\ Y} &= V_{e1,Y} + \frac{X}{L_n} \times V_{e2,Y} - V_{e1,Y} \\
 &= 376,791 + \frac{0,8}{2,7} \times 0 - 376,791 \\
 &= 265,149 \text{ kN}
 \end{aligned}$$

Maka nilai $V_{u,luar\ sendi\ plastis,Y}$ sebesar 265,149 kN

b. Menentukan tahanan geser beton

Kapasitas geser beton sumbu X

$$V_{c,X} = 256389 \text{ N}$$

Kapasitas geser beton sumbu Y

$$V_{c,Y} = 117331 \text{ N}$$

c. Menentukan kuat geser tulangan sengkang

Jumlah kaki sengkang

$$n_X = 2 \text{ kaki}$$

$$n_Y = 4 \text{ kaki}$$

Jarak kaki sengkang

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

Menghitung luas tulangan yang terpasang

$$A_{v,X} = 157,080 \text{ mm}^2$$

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

Menghitung gaya geser tulangan sengkang

$$V_{s,X} = \frac{A_{vs,X} \times f_y \times d_x}{s_s}$$

$$\begin{aligned}
&= \frac{157,080 \times 400 \times \left(800 - 40 - 10 - \frac{25}{2}\right)}{150} \\
&= 308923 \text{ N} \\
V_{s,Y} &= \frac{A_{vs,Y} \times f_y \times d_y}{s_s} \\
&= \frac{314,159 \times 400 \times \left(400 - 40 - 10 - \frac{25}{2}\right)}{150} \\
&= 282743 \text{ N}
\end{aligned}$$

d. Mengecek jarak antar tulangan sengkang

$$\begin{aligned}
s_{max,1} &= 150 \text{ mm} \\
s_{max,2} &= 6d_p \\
&= 6 \times 25 \\
&= 150 \text{ mm} \\
s_{terpasang} &\leq s_{max} \\
150 \text{ mm} &\leq 150 \text{ mm (Memenuhi)}
\end{aligned}$$

e. Menghitung kapasitas geser nominal

$$\begin{aligned}
V_{n,X} &= V_{c,X} + V_{s,X} \\
&= 256389 + 308923 \\
&= 565312 \text{ N} \\
&= 565,312 \text{ kN} \\
V_{n,Y} &= V_{c,Y} + V_{s,Y} \\
&= 117331 + 282743 \\
&= 400074 \text{ N} \\
&= 400,074 \text{ kN} \\
\phi &= 0,75 \\
\phi V_{n,X} &= 0,75 \times 565,312 \\
&= 423,984 \text{ kN} \\
\phi V_{n,Y} &= 0,75 \times 400,074 \\
&= 300,055 \text{ kN}
\end{aligned}$$

f. Menghitung nilai rasio kapasitas geser

$$\begin{aligned}
 R_X &= \frac{V_{u,X}}{\phi V_{n,X}} \\
 &= \frac{626,867}{423,984} \\
 &= 1,479 > 1 \text{ (Tidak Memenuhi)} \\
 R_Y &= \frac{V_{u,Y}}{\phi V_{n,Y}} \\
 &= \frac{265,149}{300,055} \\
 &= 0,884 < 1 \text{ (Memenuhi)}
 \end{aligned}$$

4. Menentukan luas sengkang minimum / *confinement*

Luas penampang kolom

$$\begin{aligned}
 A_g &= b \times h \\
 &= 400 \times 800 \\
 &= 320000 \text{ mm}^2
 \end{aligned}$$

Lebar penampang inti beton

$$\begin{aligned}
 b_c &= b - 2c_c \\
 &= 400 - 2 \times 40 \\
 &= 320 \text{ mm}
 \end{aligned}$$

Panjang penampang inti beton

$$\begin{aligned}
 h_c &= h - 2c_c \\
 &= 800 - 2 \times 40 \\
 &= 720 \text{ mm}
 \end{aligned}$$

Luas penampang inti beton

$$\begin{aligned}
 A_{ch} &= b_c \times h_c \\
 &= 320 \times 720 \\
 &= 230400 \text{ mm}^2
 \end{aligned}$$

Luas tulangan terpasang

$$A_{v,X} = n \times \frac{1}{4} \times \pi \times d_s^2$$

$$\begin{aligned}
&= 2 \times \frac{1}{4} \times \pi \times 10^2 \\
&= 157,080 \text{ mm}^2 \\
A_{v,Y} &= n \times \frac{1}{4} \times \pi \times d_s^2 \\
&= 4 \times \frac{1}{4} \times \pi \times 10^2 \\
&= 314,159 \text{ mm}^2
\end{aligned}$$

Luas penampang total tulangan transversal (A_{sh})

Sisi pendek atau sumbu lemah (X)

$$\begin{aligned}
A_{sh1} &= 0,3 \times \left(b_c \times s \times \frac{f'_c}{f_{yt}} \right) \times \left(\frac{A_g}{A_{ch}} - 1 \right) \\
&= 0,3 \times \left(320 \times 100 \times \frac{25}{400} \right) \times \left(\frac{320000}{230400} - 1 \right) \\
&= 233,333 \text{ mm}^2
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
A_{sh2} &= 0,09 \times \left(b_c \times s \times \frac{f'_c}{f_{yt}} \right) \\
&= 0,09 \times \left(320 \times 100 \times \frac{25}{400} \right) \\
&= 180 \text{ mm}^2
\end{aligned}$$

$$A_{sh,pakai} = 233,333 \text{ mm}^2$$

Berdasarkan hasil perhitungan, diperoleh luas penampang total tulangan transversal ($A_{sh,X}$) sebesar 233,333 mm², sedangkan luas tulangan terpasang ($A_{v,X}$) sebesar 157,080 mm². Nilai tulangan terpasang lebih kecil dari tulangan minimum, sehingga tidak memenuhi.

Sisi panjang atau sumbu kuat (Y)

$$\begin{aligned}
A_{sh1} &= 0,3 \times \left(h_c \times s \times \frac{f'_c}{f_{yt}} \right) \times \left(\frac{A_g}{A_{ch}} - 1 \right) \\
&= 0,3 \times \left(720 \times 100 \times \frac{25}{400} \right) \times \left(\frac{320000}{230400} - 1 \right) \\
&= 525 \text{ mm}^2
\end{aligned}$$

$$A_{sh2} = 0,09 \times \left(h_c \times s \times \frac{f'_c}{f_{yt}} \right)$$

$$\begin{aligned}
 &= 0,09 \times \left(720 \times 100 \times \frac{25}{400} \right) \\
 &= 405 \text{ mm}^2
 \end{aligned}$$

$$A_{sh,pakai} = 525 \text{ mm}^2$$

Berdasarkan hasil perhitungan, diperoleh luas penampang total tulangan transversal ($A_{sh,Y}$) sebesar 525 mm², sedangkan luas tulangan terpasang ($A_{v,Y}$) sebesar 314,159 mm². Nilai tulangan terpasang lebih kecil dari tulangan minimum, sehingga tidak memenuhi.

Analisis kapasitas geser pada tipe kolom lainnya dilakukan dengan menggunakan prosedur perhitungan yang sama. Rekapitulasi hasil analisis kapasitas geser kolom untuk seluruh tipe kolom disajikan pada Tabel 5.17 berikut

Tabel 5. 17 Rekapitulasi Kapasitas Geser Kolom

Kode Kolom	Lantai	Letak	Kapasitas GeserArah X				Kapasitas GeserArah Y			
			$V_{u,X}$ (kN)	$\phi V_{n,X}$ (kN)	R	Ket	$V_{u,Y}$ (kN)	$\phi V_{n,Y}$ (kN)	R	Ket
K1	M	Sendi plastis	1361,123	1081,401	1,259	TM	1365,593	1081,401	1,263	TM
		Luar sendi plastis	957,827	849,708	1,127	TM	960,973	849,708	1,131	TM
K1	L2	Sendi plastis	1035,951	545,768	1,898	TM	419,821	408,801	1,027	TM
		Luar sendi plastis	729,003	429,922	1,696	TM	295,430	302,773	0,976	M
K1	L3-A	Sendi plastis	697,005	540,586	1,289	TM	298,386	406,430	0,734	M
		Luar sendi plastis	490,485	424,739	1,155	TM	209,975	300,401	0,699	M
K2	M	Sendi plastis	890,811	539,830	1,650	TM	376,791	406,084	0,928	M
		Luar sendi plastis	626,867	423,984	1,479	TM	265,149	300,055	0,884	M
K2	L2-L3	Sendi plastis	825,235	535,833	1,540	TM	299,759	404,255	0,742	M
		Luar sendi plastis	580,721	419,986	1,383	TM	210,941	298,226	0,707	M
K2	L4-A	Sendi plastis	616,018	535,793	1,150	TM	285,768	404,237	0,707	M
		Luar sendi plastis	433,494	419,947	1,032	TM	201,096	298,208	0,674	M
K4	M-A	Sendi plastis	477,187	465,180	1,026	TM	231,964	407,754	0,569	M
		Luar sendi plastis	353,472	364,571	0,970	M	171,826	300,783	0,571	M

Lanjutan Tabel 5.17 Rekapitulasi Kapasitas Geser Kolom

Kode Kolom	Lantai	Letak	Kapasitas GeserArah X				Kapasitas GeserArah Y			
			$V_{u,X}$ (kN)	$\phi V_{n,X}$ (kN)	R	Ket	$V_{u,Y}$ (kN)	$\phi V_{n,Y}$ (kN)	R	Ket
K5	M-A	Sendi plastis	373,261	392,591	0,951	M	209,917	247,322	0,849	M
		Luar sendi plastis	290,314	307,690	0,944	M	163,269	193,836	0,842	M
K6	M-A	Sendi plastis	228,196	323,668	0,705	M	109,302	84,136	1,299	TM
		Luar sendi plastis	177,485	238,766	0,743	M	85,013	62,066	1,370	TM
K7	M-A	Sendi plastis	210,631	323,619	0,651	M	36,705	84,123	0,436	M
		Luar sendi plastis	168,505	238,718	0,706	M	29,364	62,053	0,473	M
K8	L2	Sendi plastis	1111,727	535,601	2,076	TM	504,835	404,149	1,249	TM
		Luar sendi plastis	782,326	419,755	1,864	TM	355,254	298,120	1,192	TM
K8	L3	Sendi plastis	958,025	542,446	1,766	TM	369,017	407,281	0,906	M
		Luar sendi plastis	674,166	426,600	1,580	TM	259,679	301,252	0,862	M
K8	L4-A	Sendi plastis	775,859	535,685	1,448	TM	320,938	404,187	0,794	M
		Luar sendi plastis	545,975	419,839	1,300	TM	225,845	298,159	0,757	M

dengan :

M : Memenuhi

TM : Tidak Memenuhi

Hasil analisis kapasitas geser kolom pada bangunan gedung hotel di Ngampilan, Yogyakarta yang mengalami penambahan satu lantai sehingga mengalami peningkatan beban struktur yang menyebabkan bertambahnya gaya geser ultimit yang bekerja pada elemen kolom daerah sendi plastis maupun daerah luar sendi plastis. Evaluasi kapasitas geser dilakukan berdasarkan SNI 2847:2019 dengan membandingkan gaya geser ultimit yang bekerja (V_u) terhadap gaya geser nominal tereduksi (ϕV_n) sehingga diperoleh nilai rasio kapasitas (R). Elemen struktur dinyatakan memenuhi apabila nilai rasio kapasitas geser kurang dari satu ($R < 1$), sedangkan nilai rasio kapasitas geser lebih dari satu menunjukkan bahwa elemen struktur tidak memenuhi persyaratan. Pada contoh perhitungan kolom tipe K2(M) menunjukkan bahwa daerah sendi plastis arah X memiliki nilai rasio kapasitas sebesar 1,650, sedangkan daerah luar sendi plastis sebesar 1,479. Kondisi ini menunjukkan bahwa kapasitas geser kolom arah X tidak mampu menahan gaya geser ultimit yang bekerja akibat peningkatan beban struktur setelah penambahan lantai. Sedangkan pada arah Y diperoleh nilai rasio kapasitas sebesar 0,982 pada daerah sendi plastis dan 0,884 pada daerah luar sendi plastis, sehingga memenuhi persyaratan kapasitas geser kolom.

Berdasarkan rekapitulasi hasil analisis seluruh tipe kolom pada Tabel 5.17, diperoleh bahwa beberapa balok masih tidak memenuhi persyaratan kapasitas geser, terutama pada kolom arah X dengan tipe kolom K1(M), K1(L2), K1(L3-A), K2(M), K2(L2-L3), K2(L4-A), K4, K8(L2), K8(L3) dan K8(L4-A). Sedangkan arah Y adalah tipe kolom K1(M), K1(L2), K6 dan K8(L2). Hasil evaluasi menunjukkan bahwa terdapat beberapa kolom yang memerlukan peningkatan kapasitas geser agar mampu memenuhi persyaratan SNI 2847:2019. Oleh karena itu, diperlukan perkuatan struktur dengan menggunakan *Carbon Fiber Reinforced Polymer* (CFRP) yang dapat meningkatkan kapasitas geser kolom yang tidak memenuhi persyaratan.

5.4 Analisis Perkuatan Struktur

Bangunan gedung hotel sebagai fasilitas publik memerlukan kinerja struktur yang andal untuk menjamin keselamatan selama masa layan bangunan. Oleh karena itu, dilakukan evaluasi terhadap elemen struktur utama, khususnya balok dan kolom,

guna memastikan kapasitas struktur eksisting masih memenuhi persyaratan yang berlaku.

Hasil evaluasi struktur bangunan gedung hotel di Ngampilan, Yogyakarta menunjukkan bahwa beberapa elemen balok dan kolom tidak memenuhi kapasitas kekuatan terhadap momen lentur, gaya geser, dan gaya aksial. Kondisi ini menunjukkan perlunya perkuatan struktur untuk meningkatkan kapasitas elemen. Salah satu metode perkuatan yang digunakan adalah *Carbon Fiber Reinforced Polymer* (CFRP).

Perencanaan perkuatan dilakukan mengacu pada SNI 8971:2021, dengan mempertimbangkan gaya dalam hasil analisis struktur. Perkuatan diterapkan pada balok dan kolom yang tidak memenuhi kapasitas, dengan tujuan meningkatkan kinerja struktur sehingga memenuhi persyaratan kapasitas dan meningkatkan keandalan bangunan.

5.4.1 Analisis Perkuatan Balok

Analisis perkuatan balok pada bangunan gedung hotel di Ngampilan, Yogyakarta dilakukan untuk meninjau pengaruh penerapan *Carbon Fiber Reinforced Polymer* (CFRP) terhadap peningkatan kapasitas kekuatan balok dalam menahan gaya lentur dan geser. Hasil evaluasi struktur eksisting menunjukkan bahwa beberapa elemen balok memiliki nilai rasio kapasitas lebih besar dari satu ($R > 1$), yang menandakan bahwa +gaya ultimit telah melampaui kapasitas rencana sehingga tidak memenuhi persyaratan SNI 2847:2019. Oleh karena itu, diperlukan perkuatan struktur menggunakan CFRP sebagai metode perkuatan eksternal guna meningkatkan kapasitas balok agar memenuhi ketentuan kekuatan dan keselamatan struktur.

5.4.1.1 Analisis Perkuatan Terhadap Kapasitas Lentur Balok

Analisis perkuatan struktur balok dilakukan untuk meningkatkan kapasitas lentur balok terhadap momen ultimit yang bekerja. Balok tipe B2 dipilih sebagai contoh perhitungan karena pada elemen tersebut kapasitas lentur terhadap momen negatif di daerah lapangan tidak memenuhi persyaratan kapasitas.

1. Data balok B2

Data balok B2 adalah sebagai berikut.

Panjang balok, L	=	8000 mm
Lebar balok, b	=	400 mm
Tinggi balok, h	=	600 mm
Selimut beton, s_b	=	40 mm
Diameter tulangan longitudinal, d_b	=	25 mm
Diameter tulangan sengkang, d_s	=	10 mm
Kuat tekan beton, f'_c	=	25 MPa
Kuat leleh tulangan, f_y	=	400 MPa
Faktor material beton, β_1	=	0,85
Modulus elastisitas baja, E	=	200000 MPa
Momen beban mati (M_{DL})	=	306,784 kNm
Momen negatif lapangan ($M_{u,lap}^-$)	=	289,884 kNm

2. Data CFRP

Data CFRP yang digunakan pada perkuatan terhadap lentur pada balok adalah sebagai berikut.

Nama bahan	=	SIKA Carbodur S1012
Tipe	=	CFRP <i>Laminate Tape</i>
Jumlah lapis CFRP, n_l	=	1 lapisan
Ketebalan 1 lapis CFRP, t_f	=	1,2 mm
Kekuatan tarik CFRP, f_{fu}^*	=	2800 MPa
Ragangan putus CFRP, ε_{fu}^*	=	0,017
Modulus elastisitas CFRP, E_f	=	165000 MPa
Faktor reduksi lingkungan CFRP, C_E	=	0,95
Lebar tiap lembaran CFRP, w_f	=	100 mm

3. Analisis perkuatan terhadap kapasitas lentur balok B2

Langkah-langkah analisis perkuatan kapasitas lentur balok B2 terhadap momen negatif pada daerah lapangan adalah sebagai berikut.

a. Menghitung sifat material desain system CFRP

Kekuatan tarik CFRP desain

$$\begin{aligned} f_{fu} &= C_E \times f_{fu}^* \\ &= 0,95 \times 2800 \\ &= 2660 \text{ MPa} \end{aligned}$$

Regangan putus CFRP desain

$$\begin{aligned} \varepsilon_{fu} &= C_E \times \varepsilon_{fu}^* \\ &= 0,95 \times 0,17 \\ &= 0,016 \end{aligned}$$

b. Statis momen dan inersia retak

Luas tulangan balok

$$\begin{aligned} A_s &= 1472,622 \text{ mm}^2 \\ A_s' &= 3926,991 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

Tinggi efektif balok

$$\begin{aligned} d &= 537,5 \text{ mm} \\ d' &= 81,25 \text{ mm} \end{aligned}$$

Rasio luas tulangan

$$\begin{aligned} \rho_s &= \frac{A_s}{b \times d} \\ &= \frac{1472,622}{400 \times 537,5} \\ &= 0,68 \% \\ \rho_s' &= \frac{A_s'}{b \times d} \\ &= \frac{3926,991}{400 \times 537,5} \\ &= 1,83 \% \end{aligned}$$

Modulus elastisitas beton

$$\begin{aligned} E_c &= 4700 \times \sqrt{f'_c} \\ &= 4700 \times \sqrt{25} \\ &= 23500 \text{ MPa} \end{aligned}$$

Rasio modulus

$$\begin{aligned} n_s &= \frac{E_s}{E_c} \\ &= \frac{200000}{23500} \\ &= 8,511 \end{aligned}$$

Luas CFRP

$$\begin{aligned} A_f &= n_l \times t_f \times w_f \\ &= 1 \times 1,2 \times 100 \\ &= 120 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

Lokasi CFRP dari serat tekan balok

$$\begin{aligned} d_f &= h + \frac{t_f}{2} \\ &= 600 + \frac{1,2}{2} \\ &= 601 \text{ mm} \end{aligned}$$

Rasio luas CFRP

$$\begin{aligned} \rho_f &= \frac{A_f}{b \times d_f} \\ &= \frac{480}{400 \times 601} \\ &= 0,05 \% \end{aligned}$$

Rasio modulus CFRP

$$\begin{aligned} n_f &= \frac{E_f}{E_c} \\ &= \frac{165000}{23500} \\ &= 7,021 \end{aligned}$$

Garis netral penampang retak

$$\begin{aligned} k &= 0,477 \\ y_{cr} &= k \times d \\ &= 0,477 \times 537,5 \\ &= 256,595 \text{ mm} \end{aligned}$$

Momen inersia retak penampang transformasi

$$\begin{aligned}
 I_{cr} &= \frac{1}{3} \times b \times y_{cr}^3 + n_s \times A_s \times (d - y_{cr})^2 + n_s \times A_s' \times (d' - y_{cr})^2 + \\
 &\quad n_f \times A_f \times (d_f - y_{cr})^2 \\
 &= \frac{1}{3} \times 400 \times 256,595^3 + 8,511 \times 1472,622 \times (537,5 - 256,595)^2 + \\
 &\quad 8,511 \times 3926,991 \times (81,25 - 256,595)^2 + 7,021 \times 2880 \times \\
 &\quad (601 - 256,595)^2 \\
 &= 4,368 \times 10^9
 \end{aligned}$$

Kondisi regangan yang ada pada sisi bawah balok

$$\begin{aligned}
 \varepsilon_{bi} &= M_{DL} \times \frac{d_f - y_{cr}}{I_{cr} \times E_c} \\
 &= 306,784 \times 10^6 \times \frac{601 - 256,595}{4,368 \times 10^9 \times 23500} \\
 &= 0,001
 \end{aligned}$$

Regangan CFRP desain

$$\begin{aligned}
 \varepsilon_{fd} &= 0,41 \times \sqrt{\frac{f'_c}{n_l \times E_f \times t_f}} \\
 &= 0,41 \times \sqrt{\frac{25}{1 \times 165000 \times 1,2}} \\
 &= 0,005
 \end{aligned}$$

Asumsi garis netral

$$c_{asumsi} = 103,036 \text{ mm}$$

Regangan efektif CFRP

$$\begin{aligned}
 \varepsilon_{fe} &= 0,003 \times \frac{d_f - c_{asumsi}}{c_{asumsi}} - \varepsilon_{bi} \\
 &= 0,003 \times \frac{601 - 103,036}{103,036} - 0,001 \\
 &= 0,013 \\
 \varepsilon_{fe} &= 0,005
 \end{aligned}$$

Maka nilai regangan efektif CFRP yang digunakan sebesar 0,005

Regangan beton

$$\begin{aligned}
\varepsilon_c &= \varepsilon_{fe} + \varepsilon_{bi} \times \frac{c_{asumsi}}{d_f - c_{asumsi}} \\
&= 0,005 + 0,001 \times \frac{103,036}{601 - 103,036} \\
&= 0,001 \leq 0,003 \text{ (Memenuhi)}
\end{aligned}$$

Regangan baja tulangan

$$\begin{aligned}
\varepsilon_s &= \varepsilon_{fe} + \varepsilon_{bi} \times \frac{d - c_{asumsi}}{d_f - c_{asumsi}} \\
&= 0,005 + 0,001 \times \frac{537,5 - 103,036}{601 - 103,036} \\
&= 0,005 > 0,002 \text{ (Sudah Leleh)} \\
\varepsilon_s' &= \varepsilon_{fe} \times \frac{d' - c_{asumsi}}{d_f - c_{asumsi}} \\
&= 0,005 \times \frac{103,036 - 81,25}{601 - 103,036} \\
&= 0,0002 < \varepsilon_y = 0,002 \text{ (Belum Leleh)}
\end{aligned}$$

Nilai $\varepsilon_s' < \varepsilon_y$ yang menandakan tulangan baja tekan belum leleh, maka nilai tegangan baja tulangan tekan dapat dihitung menggunakan persamaan berikut

$$\begin{aligned}
f_s' &= \varepsilon_s' \times E_s \\
&= 0,0002 \times 200000 \\
&= 40,345 \text{ MPa}
\end{aligned}$$

Tegangan CFRP

$$\begin{aligned}
f_{fe} &= \varepsilon_{fe} \times E_f \\
&= 0,005 \times 165000 \\
&= 760,160 \text{ MPa}
\end{aligned}$$

c. Perhitungan garis netral kesetimbangan

Regangan saat f'_c

$$\begin{aligned}
\varepsilon'_c &= \frac{1,7 \times f'_c}{E_c} \\
&= \frac{1,7 \times 25}{23500}
\end{aligned}$$

$$= 0,002$$

Faktor blok tegangan beton

$$\begin{aligned}\beta_1 &= \frac{4 \times \varepsilon'_c - \varepsilon_c}{6 \times \varepsilon'_c - 2 \times \varepsilon_c} \\ &= \frac{4 \times 0,002 - 0,001}{6 \times 0,002 - 2 \times 0,001} \\ &= 0,712\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\alpha_1 &= \frac{3 \times \varepsilon'_c \times \varepsilon_c - \varepsilon_c^2}{3 \times \beta_1 \times \varepsilon'^2_c} \\ &= \frac{3 \times 0,002 \times 0,001 - 0,001^2}{3 \times 0,712 \times 0,002^2} \\ &= 0,711\end{aligned}$$

Garis netral beton

$$\begin{aligned}c_{hitung} &= \frac{A_s \times f_s + A_f \times f_{fe} - A_s' \times f_s}{\alpha_1 \times f'_c \times \beta_1 \times b} \\ &= \frac{1472,622 \times 400 + 120 \times 760,160 - 3926,991 \times 40,345}{0,711 \times 25 \times 0,712 \times 400} \\ &= 103,036 \text{ mm}\end{aligned}$$

$$c = 0$$

$$c_{asumsi} - c_{hitung} = 0$$

$$103,036 - 103,036 = 0$$

d. Menghitung perkuatan terhadap kapasitas lentur balok

Momen kontribusi baja tulangan

$$\begin{aligned}M_{ns1} &= A_s \times f_s \times \left(d - \frac{\beta_1 c}{2}\right) \\ &= 1472,622 \times 400 \times \left(537,5 - \frac{0,712 \times 103,036}{2}\right) \\ &= 294996589 \text{ Nmm} \\ &= 294,997 \text{ kNm}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}M_{ns2} &= A_s' \times f_s' \times (d - d') \\ &= 3926,991 \times 40,345 \times (537,5 - 81,25) \\ &= 72285753 \text{ Nmm}\end{aligned}$$

$$= 72,286 \text{ kNm}$$

Momen kontribusi CFRP

$$\begin{aligned} M_{nf} &= A_f \times f_{fe} \times \left(d_f - \frac{\beta_1 c}{2} \right) \\ &= 120 \times 760,160 \times \left(601 - \frac{0,712 \times 103,036}{2} \right) \\ &= 51438691 \text{ Nmm} \\ &= 51,439 \text{ kNm} \end{aligned}$$

Faktor reduksi CFRP

$$\psi = 0,85$$

Faktor reduksi lentur

$$\phi = 0,9$$

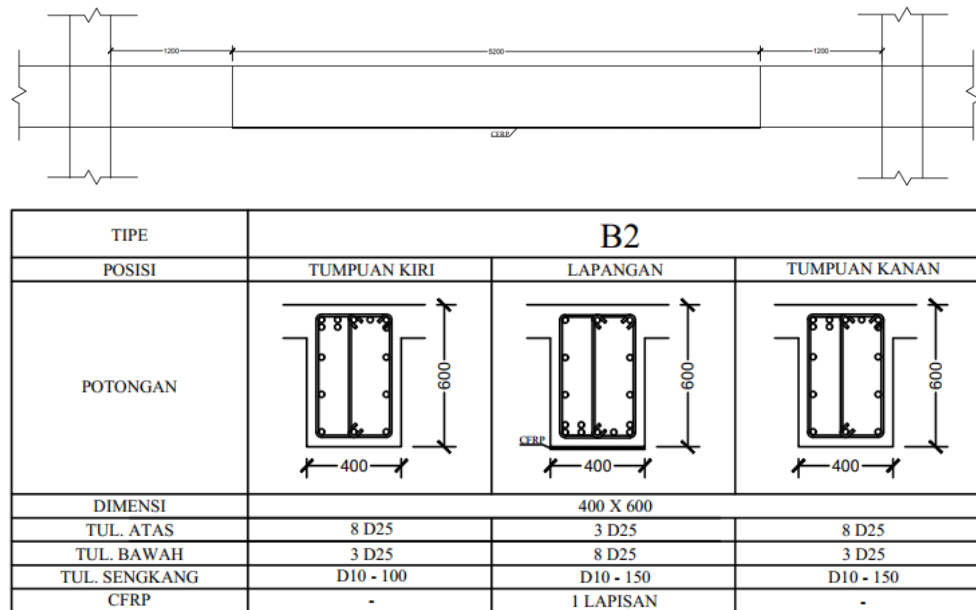
Kapasitas momen lentur tereduksi

$$\begin{aligned} \phi M_{n,CFRP} &= \phi (M_{ns1} + M_{ns2} + \psi \times M_{nf}) \\ &= 0,9 \times (294,997 + 72,286 + 0,85 \times 51,439) \\ &= 369,905 \text{ kNm} \end{aligned}$$

Kapasitas rasio momen nominal negatif balok

$$\begin{aligned} R &= \frac{M_{u,tump}^-}{\phi M_{n,CFRP}} \\ &= \frac{289,884}{369,905} \\ &= 0,784 < 1 (\text{Memenuhi}) \end{aligned}$$

Perkuatan menggunakan CFRP pada balok tipe B2 untuk momen negatif di daerah lapangan ditunjukkan pada Gambar 5.6 berikut.



Gambar 5. 6 Perkuatan Kapasitas Lentur pada Balok B2

Untuk gambar perkuatan terhadap kapasitas lentur balok B2 dan tipe balok lainnya dapat dilihat pada Lampiran 5.

Analisis perkuatan terhadap kapasitas lentur balok pada tipe balok lainnya dilakukan dengan prosedur perhitungan yang sama. Rekapitulasi hasil perkuatan kapasitas lentur balok untuk seluruh tipe balok disajikan pada Tabel 5.18 berikut.

Tabel 5. 18 Rekapitulasi Perkuatan Kapasitas Lentur Balok Setelah Perkuatan

Kode Balok	Letak	Kapasitas Lentur Momen Positif							Kapasitas Lentur Momen Negatif						
		M_u^+ (kNm)	ϕM_n^+ (kNm)	$\phi M_{n,CFRP}^+$ (kNm)	N (Lapisan)	R	Peningkatan (%)	Ket	M_u^- (kNm)	ϕM_n^- (kNm)	$\phi M_{n,CFRP}^-$ (kNm)	N (Lapisan)	R	Peningkatan (%)	Ket
B1	Tumpuan	2277,325	1875,470	2547,991	1	0,894	36%	M	2560,038	2406,709	3132,095	1	0,817	30%	M
B2	Lapangan	-	-	-	-	-	-	-	289,884	266,565	369,905	1	0,784	39%	M
B3	Tumpuan	-	-	-	-	-	-	-	616,031	506,035	650,044	1	0,948	28%	M
	Lapangan	-	-	-	-	-	-	-	282,674	266,363	373,219	1	0,757	40%	M
B4	Tumpuan	-	-	-	-	-	-	-	561,222	350,549	592,448	1	0,947	69%	M
	Lapangan	372,016	266,712	398,929	1	0,933	50%	M	326,377	266,712	352,104	1	0,927	32%	M
B5	Tumpuan	513,214	266,712	538,622	2	0,953	102%	M	608,914	266,712	614,800	2	0,990	131%	M
	Lapangan	558,160	266,712	615,820	2	0,906	131%	M	546,741	266,712	615,820	2	0,888	131%	M
B6	Tumpuan	207,585	154,057	236,933	1	0,876	54%	M	200,398	154,057	236,933	1	0,846	54%	M
B7	Tumpuan	234,586	157,268	270,207	1	0,868	72%	M	248,455	157,268	270,207	1	0,919	72%	M
	Lapangan	237,173	157,268	269,131	1	0,881	71%	M	250,109	157,268	269,131	1	0,929	71%	M
B9	Tumpuan	-	-	-	-	-	-	-	150,684	125,092	185,400	1	0,813	48%	M
B11	Lapangan	292,750	415,172	464,400	1	0,894	45%	M	-	-	-	-	-	-	-

dengan :

M : Memenuhi

Hasil evaluasi kapasitas lentur balok pada bangunan gedung hotel di Ngampilan, Yogyakarta, diketahui bahwa beberapa tipe balok memiliki nilai rasio kapasitas lebih dari satu ($R > 1$), sehingga kapasitas lentur balok tidak memenuhi persyaratan sesuai SNI 2847:2019. Oleh karena itu, dilakukan perkuatan menggunakan CFRP sesuai SNI 8971:2021 untuk meningkatkan kapasitas lentur balok. Analisis perkuatan menggunakan balok tipe B2 sebagai contoh perhitungan karena balok tersebut tidak memenuhi kapasitas lentur momen negatif pada daerah lapangan. Perkuatan dilakukan menggunakan CFRP tipe SIKA *Carbodur* S1012 sebanyak satu lapisan dengan ketebalan 1,2 mm. Hasil analisis menunjukkan bahwa setelah dilakukan perkuatan, kapasitas momen lentur meningkat menjadi 369,905 kNm dengan nilai rasio kapasitas sebesar 0,784 ($R < 1$), sehingga kapasitas lentur balok dinyatakan memenuhi persyaratan. Peningkatan kapasitas lentur terjadi karena CFRP berfungsi sebagai tulangan tambahan pada daerah tarik balok sehingga mampu membantu menahan momen lentur yang bekerja.

Berdasarkan rekapitulasi hasil analisis seluruh tipe balok pada Tabel 5.18, seluruh balok yang sebelumnya tidak memenuhi kapasitas lentur mengalami peningkatan kapasitas setelah dilakukan perkuatan CFRP. Sebagian besar balok menggunakan satu lapisan CFRP, sedangkan balok B5 memerlukan dua lapisan CFRP. Setelah dilakukan perkuatan, seluruh tipe balok memiliki nilai rasio kapasitas kurang dari satu ($R < 1$), sehingga dinyatakan memenuhi persyaratan kapasitas lentur. Hasil analisis menunjukkan bahwa penggunaan CFRP efektif dalam meningkatkan kapasitas lentur balok sebesar 28% hingga 131%. Peningkatan terbesar terjadi pada balok B5, sedangkan peningkatan terkecil terjadi pada balok B3 tanpa menambah dimensi maupun berat struktur secara signifikan. Selain memiliki kuat tarik tinggi, CFRP juga memberikan kemudahan dalam proses pemasangan sehingga sesuai digunakan sebagai metode perkuatan pada bangunan gedung hotel di Ngampilan, Yogyakarta yang mengalami peningkatan beban akibat penambahan lantai.

5.4.1.2 Analisis Perkuatan Terhadap Kapasitas Geser Balok

Analisis perkuatan struktur balok dilakukan untuk meningkatkan kapasitas geser balok. Pada analisis perkuatan ini, balok tipe B2 dipilih sebagai contoh

perhitungan karena pada elemen tersebut kapasitas geser pada daerah luar sendi plastis tidak memenuhi persyaratan kapasitas.

1. Data balok B2

Data balok B2 adalah sebagai berikut.

Panjang bentang balok, L	=	8000 mm
Lebar balok, b	=	400 mm
Tinggi balok, h	=	600 mm
Diameter tulangan longitudinal, d_p	=	25 mm
Diameter tulangan sengkang, d_s	=	10 mm
Selimit beton, s_b	=	40 mm
Kuat tekan beton, f'_c	=	25 MPa
Kuat leleh tulangan, f_y	=	400 MPa
Faktor reduksi, β_1	=	0,85
Modulus elastisitas baja, E	=	200000 MPa
Tinggi efektif balok, d	=	518,750 mm
Lebar kolom kanan, $b_{k,kanan}$	=	400 mm
Lebar kolom kiri, $b_{k,kiri}$	=	400 mm
Panjang bersih balok, L_n	=	7600 mm
Gaya geser ultimit daerah luar sendi plastis ($V_{u,luar sendi plastis}$)	=	371,935 kN

2. Data CFRP

Data CFRP digunakan pada perkuatan terhadap geser balok adalah sebagai berikut.

Nama bahan	=	SIKA Wrap 600C
Tipe	=	CFRP Wrap
Tebal lapisan CFRP, t_f	=	0,331 mm
Kekuatan tarik CFRP, f_{fu}^*	=	4000 MPa
Ragangan putus CFRP, ε_{fu}^*	=	0,021
Modulus elastisitas CFRP, E_f	=	230000 MPa

$$\begin{aligned}
 \text{Faktor reduksi lingkungan, } C_E &= 0,95 \\
 \text{Tebal pelat yang ditumpu balok, } t_p &= 140 \text{ mm} \\
 \text{Tinggi efektif CFRP, } d_{fv} &= 460 \text{ mm}
 \end{aligned}$$

3. Menghitung propertis CFRP

Menghitung desain kuat tarik ultimit CFRP

$$\begin{aligned}
 f_{fu} &= C_E \times f_{fu}^* \\
 &= 0,95 \times 4000 \\
 &= 3800 \text{ MPa}
 \end{aligned}$$

Menghitung desain regangan putus CFRP

$$\begin{aligned}
 \varepsilon_{fu} &= C_E \times \varepsilon_{fu}^* \\
 &= 0,95 \times 0,021 \\
 &= 0,020 \text{ MPa}
 \end{aligned}$$

3. Menghitung Tingkat regangan efektof perkuatan CFRP geser

Menghitung panjang efektif

$$\begin{aligned}
 L_e &= \frac{23300}{(n_f \times t_f \times E_f)^{0,58}} \\
 &= \frac{23300}{(1 \times 0,331 \times 230000)^{0,58}} \\
 &= 34,360 \text{ mm}
 \end{aligned}$$

Menghitung koefisien 1

$$\begin{aligned}
 k_1 &= \left(\frac{f'_c}{27} \right)^{2/3} \\
 &= \left(\frac{25}{27} \right)^{2/3} \\
 &= 0,950
 \end{aligned}$$

Menghitung koefisien 2

$$\begin{aligned}
 k_2 &= \frac{d_{fv} - L_e}{d_{fv}} \\
 &= \frac{460 - 34,360}{460} \\
 &= 0,925
 \end{aligned}$$

Menghitung koefisien reduksi ikatan

$$\begin{aligned}
 k_v &= \frac{k_1 \times k_2 \times L_e}{11,910 \times \varepsilon_{fu}} \\
 &= \frac{0,950 \times 0,925 \times 34,360}{11,910 \times 0,020} \\
 &= 0,127 \leq 0,75 \text{ (Memenuhi)}
 \end{aligned}$$

Untuk kondisi dimana gaya yang bekerja merupakan kombinasi dari gaya geser kolom, maka regangan efektif CFRP ditentukan dengan mengambil nilai terkecil antara $\varepsilon_{fe} = k_v \times \varepsilon_{fu}$ dan $\varepsilon_{fe} = 0,004$

$$\begin{aligned}
 \varepsilon_{fe} &= k_v \times \varepsilon_{fu} \\
 &= 0,127 \times 0,020 \\
 &= 0,003 \leq 0,004 \text{ (Memenuhi)}
 \end{aligned}$$

Maka nilai regangan efektif CFRP yang digunakan sebesar 0,003.

4. Menghitung kontribusi perkuatan CFRP terhadap kekuatan geser balok

Jumlah lapis CFRP

$$n_f = 1 \text{ lapisan}$$

Lebar CFRP

$$w_f = 400 \text{ mm}$$

Spasi antar lembar CFRP

$$s_f = 400 \text{ mm}$$

Luas CFRP

$$\begin{aligned}
 A_{fv} &= 2 \times n \times t_f \times w_f \\
 &= 2 \times 1 \times 0,331 \times 400 \\
 &= 264,8 \text{ mm}^2
 \end{aligned}$$

Kekuatan tarik CFRP untuk desain geser

$$\begin{aligned}
 f_{fe} &= \varepsilon_{fe} \times E_f \\
 &= 0,003 \times 230000 \\
 &= 583,273 \text{ MPa}
 \end{aligned}$$

Kapasitas geser CFRP

$$\begin{aligned}
 V_f &= \frac{A_{fv} \times f_{fe} \times d_f}{s_f} \\
 &= \frac{264,8 \times 583 \times 460}{400} \\
 &= 177618 \text{ N}
 \end{aligned}$$

Kapasitas geser tulangan

$$V_s = 217293 \text{ N}$$

Kapasitas geser beton

$$V_c = 176375 \text{ N}$$

Faktor reduksi CFRP

$$\Psi = 0,85$$

Faktor reduksi geser

$$\emptyset = 0,75$$

Gaya geser nominal

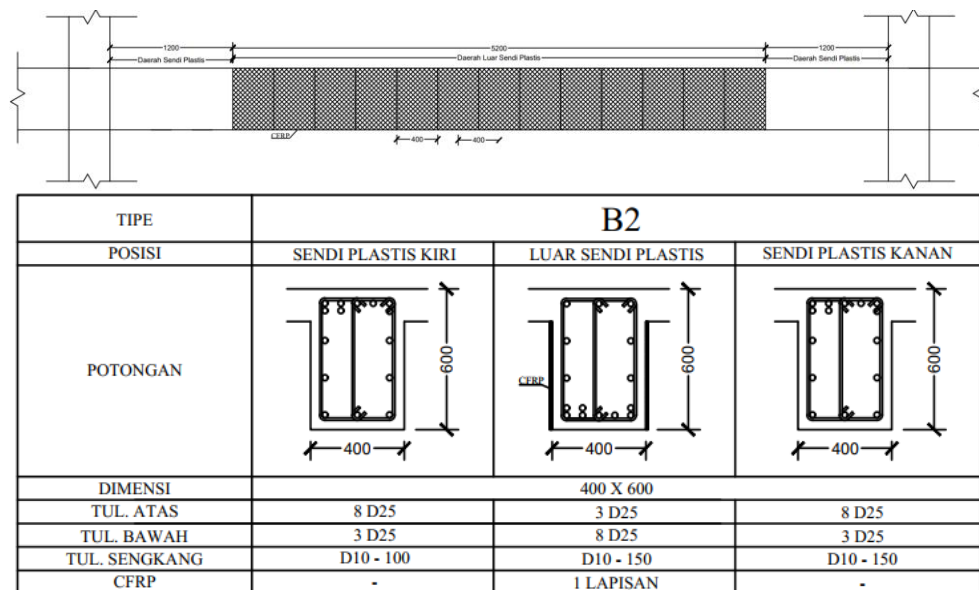
$$\begin{aligned}
 V_n &= V_c + V_s + \Psi_f V_f \\
 &= 176375 + 217293 + 0,85 \times 177618 \\
 &= 544644 \text{ N} \\
 &= 544,644 \text{ kN} \\
 \emptyset V_{n,CFRP} &= 0,75 \times 544,644 \\
 &= 408,483 \text{ kN}
 \end{aligned}$$

5. Menghitung nilai rasio kapasitas geser kolom

Rasio kapasitas geser kolom

$$\begin{aligned}
 R &= \frac{V_{u,plastis}}{\emptyset V_{n,CFRP}} \\
 &= \frac{371,935}{408,483} \\
 &= 0,911 < 1 \text{ (Memenuhi)}
 \end{aligned}$$

Berikut gambar perkuatan CFRP terhadap kapasitas geser Balok B2 dapat dilihat pada Gambar 5.7 dibawah ini.



Gambar 5. 7 Perkuatan Kapasitas Geser pada Balok B2

Untuk gambar perkuatan CFRP terhadap kapasitas geser pada tipe balok lainnya dapat dilihat pada Lampiran 5.

Analisis perkuatan terhadap kapasitas geser pada tipe balok lainnya dilakukan dengan prosedur perhitungan yang sama. Rekapitulasi hasil perkuatan kapasitas geser balok untuk seluruh tipe balok disajikan pada Tabel 5.19 berikut.

Tabel 5. 19 Rekapitulasi Kapasitas Geser Balok Setelah Perkuatan

Kode Balok	Letak	Kapasitas Geser						
		V_u (kN)	ϕV_n (kN)	$\phi V_{n,CFRP}$ (kN)	N (lapisan)	R	Peningkatan (%)	Ket
B2	Luar sendi plastis	371,935	295,251	408,483	1	0,911	38%	M
B4	Sendi plastis	424,989	390,353	503,585	1	0,844	29%	M
	Luar sendi plastis	326,014	305,923	419,155	1	0,778	37%	M
B11	Sendi plastis	465,878	456,925	596,760	1	0,781	31%	M
	Luar sendi plastis	348,997	308,681	448,516	1	0,778	45%	M

dengan :

M : Memenuhi

Hasil evaluasi kapasitas geser balok pada bangunan gedung hotel di Ngampilan, Yogyakarta, diketahui bahwa beberapa tipe balok memiliki nilai rasio kapasitas lebih dari satu ($R > 1$), sehingga kapasitas geser balok tidak memenuhi

persyaratan sesuai SNI 2847:2019. Oleh karena itu, dilakukan perkuatan menggunakan CFRP sesuai SNI 8971:2021 untuk meningkatkan kapasitas geser balok. Analisis perkuatan menggunakan balok tipe B2 sebagai contoh perhitungan karena balok tersebut tidak memenuhi kapasitas geser pada daerah luar sendi plastis. Perkuatan dilakukan menggunakan CFRP tipe SIKA *Wrap* 600C sebanyak satu lapisan dengan ketebalan 0,331 mm. Hasil analisis menunjukkan bahwa setelah dilakukan perkuatan, kapasitas momen geser meningkat menjadi 408,483 kN dengan nilai rasio kapasitas sebesar 0,911 ($R < 1$), sehingga kapasitas geser balok dinyatakan memenuhi persyaratan.

Berdasarkan rekapitulasi hasil analisis seluruh tipe balok pada Tabel 5.19, seluruh balok yang sebelumnya tidak memenuhi kapasitas geser mengalami peningkatan kapasitas setelah dilakukan perkuatan CFRP. Seluruh tipe balok menggunakan satu lapisan CFRP. Setelah dilakukan perkuatan, seluruh tipe balok memiliki nilai rasio kapasitas kurang dari satu ($R < 1$), sehingga dinyatakan memenuhi persyaratan kapasitas geser. Hasil analisis menunjukkan bahwa penggunaan CFRP efektif dalam meningkatkan kapasitas geser balok sebesar 29% hingga 45%. Peningkatan terbesar terjadi pada balok B11, sedangkan peningkatan terkecil terjadi pada balok B4 tanpa menambah dimensi maupun berat struktur secara signifikan sehingga sesuai digunakan sebagai metode perkuatan pada bangunan gedung hotel di Ngampilan, Yogyakarta yang mengalami peningkatan beban akibat penambahan lantai.

5.4.2 Analisis Perkuatan Kolom

Analisis perkuatan kolom dilakukan berdasarkan hasil evaluasi struktur bangunan gedung hotel di Ngampilan, Yogyakarta yang menunjukkan adanya beberapa elemen kolom dengan rasio kapasitas lebih besar dari satu ($R > 1$) terhadap kapasitas aksial, lentur, dan geser. Hal ini menandakan bahwa gaya ultimit yang bekerja telah melampaui kapasitas rencana kolom, sehingga tidak memenuhi persyaratan kekuatan elemen struktur sesuai SNI 2847:2019. Untuk mengatasi kondisi tersebut, diperlukan perkuatan struktur guna meningkatkan kapasitas kolom agar mampu menahan beban yang bekerja. Pada penelitian ini, metode perkuatan

yang digunakan adalah *Carbon Fiber Reinforced Polymer* (CFRP), yang diaplikasikan untuk meningkatkan kapasitas aksial, lentur, dan geser kolom.

5.4.2.1 Analisis Perkuatan Terhadap Kapasitas Aksial dan Lentur Kolom

Analisis perkuatan kolom bertujuan meningkatkan kapasitas aksial dan lentur. Kolom tipe K2(M) dipilih sebagai contoh perhitungan karena tidak memenuhi persyaratan kapasitas aksial dan lentur.

1. Data material dan penampang kolom K2(M)

Data material dan penampang kolom K2(M) adalah sebagai berikut.

Tinggi kolom, L	=	3300 mm
Lebar kolom, b	=	400 mm
Tinggi kolom, h	=	800 mm
Jumlah tulangan, n	=	20 tulangan
Diameter tulangan longitudinal, d_p	=	25 mm
Diameter tulangan transversal, d_s	=	10 mm
Selimut beton, s_b	=	40 mm
Kuat tekan beton, f'_c	=	25 MPa
Kuat leleh baja tulangan, f_y	=	400 MPa
Faktor material beton, β_1	=	0,85
Modulus elastisitas baja, E_s	=	200000 MPa
Jumlah lapis tulangan, n_{lapis}	=	7 lapis

2. Data CFRP

Data CFRP digunakan pada perkuatan terhadap aksial dan momen pada kolom adalah sebagai berikut.

Nama bahan	=	SIKA Wrap 600C
Tipe	=	CFRP Wrap
Jumlah lapisan CFRP, n_f	=	3 lapisan
Tebal lapisan CFRP, t_f	=	0,331 mm
Kekuatan tarik CFRP, f_{fu}^*	=	4000 MPa
Ragangan putus CFRP, ε_{fu}^*	=	0,021

$$\text{Modulus elastisitas CFRP, } E_f = 230000 \text{ MPa}$$

$$\text{Faktor reduksi lingkungan, } C_E = 0,95$$

3. Menghitung propertis kolom

a. Menghitung modulus elastisitas beton

$$\begin{aligned} E_c &= 4700 \times \sqrt{f'_c} \\ &= 23500 \text{ MPa} \end{aligned}$$

b. Menghitung jarak serat tekan lentur ke titik berat tulangan tekan

$$\begin{aligned} d' &= s_b + d_s + \frac{d_p}{2} \\ &= 40 + 10 + \frac{25}{2} \\ &= 62,5 \text{ mm} \end{aligned}$$

c. Menghitung jarak serat tekan lentur ke titik berat tulangan tekan

$$\begin{aligned} d &= h - d' \\ &= 800 - 62,5 \\ &= 737,5 \text{ mm} \end{aligned}$$

d. Menghitung jarak antar tulangan

$$\begin{aligned} d_s &= \frac{d - d'}{n_{lapis} - 1} \\ &= \frac{737,5 - 62,5}{7 - 1} \\ &= 112,5 \text{ mm} \end{aligned}$$

e. Menghitung luas penampang kolom

$$\begin{aligned} A_g &= b \times h \\ &= 400 \times 800 \\ &= 320000 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

f. Menghitung luas tulangan kolom

$$\begin{aligned} A_s &= \frac{1}{4} \times \pi \times d_p^2 \\ &= \frac{1}{4} \times \pi \times 25^2 \end{aligned}$$

$$= 490,874 \text{ mm}^2$$

Luasan tulangan setiap lapisan

$$\text{Lapisan 1, } n_1 = 5 \text{ tulangan}$$

$$\begin{aligned} A_{s1} &= n_1 \times A_s \\ &= 5 \times 490,874 \\ &= 2454,369 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

$$\text{Lapisan 2, } n_2 = 2 \text{ tulangan}$$

$$\begin{aligned} A_{s2} &= n_2 \times A_s \\ &= 2 \times 490,874 \\ &= 981,748 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

$$\text{Lapisan 3, } n_3 = 2 \text{ tulangan}$$

$$\begin{aligned} A_{s3} &= n_3 \times A_s \\ &= 2 \times 490,874 \\ &= 981,748 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

$$\text{Lapisan 4, } n_4 = 2 \text{ tulangan}$$

$$\begin{aligned} A_{s4} &= n_4 \times A_s \\ &= 2 \times 490,874 \\ &= 981,748 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

$$\text{Lapisan 5, } n_5 = 2 \text{ tulangan}$$

$$\begin{aligned} A_{s5} &= n_5 \times A_s \\ &= 2 \times 490,874 \\ &= 981,748 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

$$\text{Lapisan 6, } n_6 = 2 \text{ tulangan}$$

$$\begin{aligned} A_{s6} &= n_6 \times A_s \\ &= 2 \times 490,874 \\ &= 981,748 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

$$\text{Lapisan 7, } n_7 = 5 \text{ tulangan}$$

$$\begin{aligned} A_{s7} &= n_7 \times A_s \\ &= 5 \times 490,874 \\ &= 2454,369 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

Maka luasan total tulangan adalah sebagai berikut.

$$\begin{aligned}
 A_{st} &= A_{s1} + A_{s2} + A_{s3} + A_{s4} + A_{s5} + A_{s6} + A_{s7} \\
 &= 2454,369 + 981,748 + 981,748 + 981,748 + \\
 &\quad 981,748 + 981,748 + 2454,369 \\
 &= 9817,477 \text{ mm}^2
 \end{aligned}$$

g. Menghitung rasio luas tulangan total terhadap penampang kolom

$$\begin{aligned}
 \rho_g &= \frac{A_{st}}{A_g} \\
 &= \frac{9817,477}{320000} \\
 &= 0,031
 \end{aligned}$$

h. Menghitung diameter kolom *noncircular*

$$\begin{aligned}
 D &= \sqrt{b^2 + h^2} \\
 &= \sqrt{400^2 + 800^2} \\
 &= 894,427 \text{ mm}
 \end{aligned}$$

i. Menghitung luas penampang efektif beton terkekang

$$\begin{aligned}
 A_e &= 1 - \frac{\left[\left(\frac{b}{h}\right)(h - 2r_c)^2 + \left(\frac{b}{h}\right)(b - 2r_c)^2\right]}{3A_g} - \rho_g \\
 &= 1 - \frac{\left[\left(\frac{400}{800}\right)(800 - 2 \times 35)^2 + \left(\frac{400}{800}\right)(400 - 2 \times 35)^2\right]}{3 \times 320000} - 0,031 \\
 &= 0,635 \\
 A_c &= 1 - \rho_g \\
 &= 1 - 0,031 \\
 &= 0,969
 \end{aligned}$$

j. Menghitung faktor efisiensi untuk penentuan f'_{cc}

$$\begin{aligned}
 \kappa_a &= \frac{A_e}{A_c} \\
 &= \frac{0,635}{0,969} \\
 &= 0,655
 \end{aligned}$$

k. Menghitung faktor efisiensi untuk penentuan ε_{ccu}

$$\begin{aligned}\kappa_b &= \frac{A_e}{A_c} \\ &= \frac{0,635}{0,969} \\ &= 0,655 \\ \kappa_e &= 0,550\end{aligned}$$

4. Menghitung propertis CFRP

a. Menghitung desain kuat tarik ultimit CFRP

$$\begin{aligned}f_{fu} &= C_E \times f_{fu}^* \\ &= 0,95 \times 4000 \\ &= 3800 \text{ MPa}\end{aligned}$$

b. Menghitung desain regangan putus CFRP

$$\begin{aligned}\varepsilon_{fu} &= C_E \times \varepsilon_{fu}^* \\ &= 0,95 \times 0,021 \\ &= 0,020\end{aligned}$$

5. Analisis terhadap kondisi tekan sentris (A)

a. Menghitung regangan efektif CFRP

Untuk kondisi dimana hanya ada gaya aksial yang bekerja, maka regangan efektif dihitung sebagai berikut.

$$\begin{aligned}\varepsilon_{fe} &= \kappa_e \times \varepsilon_{fu} \\ &= 0,550 \times 0,020 \\ &= 0,011\end{aligned}$$

b. Menghitung batas kuat tekan maksimum akibat CFRP

$$\begin{aligned}f_l &= \frac{2 \times E_f \times n_f \times t_f \times \varepsilon_{fe}}{D} \\ &= \frac{2 \times 230000 \times 3 \times 0,331 \times 0,011}{894,427} \\ &= 5,604 \text{ MPa}\end{aligned}$$

Rasio pengekan minimum harus memenuhi syarat berikut

$$\begin{aligned}\frac{f_l}{f'_c} &= \frac{5,604}{25} \\ &= 0,224 > 0,08 \text{ (Memenuhi)}\end{aligned}$$

c. Menghitung kuat tekan maksimum akibat beton terkekang

$$\begin{aligned}f'_{cc} &= f'_c + \Psi_f \times 3,3 \times \kappa_a \times f_l \\ &= 25 + 0,95 \times 3,3 \times 0,655 \times 5,604 \\ &= 36,509 \text{ MPa}\end{aligned}$$

d. Menghitung regangan beton terkekang

$$\begin{aligned}\varepsilon_{ccu} &= \varepsilon_c \left(1,5 + 12\kappa_b \frac{f_l}{f'_c} \left(\frac{\varepsilon_{fe}}{\varepsilon_c} \right)^{0,45} \right) \\ &= 0,003 \times \left(1,5 + 12 \times 0,655 \times 0,224 \times \left(\frac{0,011}{0,003} \right)^{0,45} \right) \\ &= 0,014\end{aligned}$$

e. Menghitung kapasitas aksial nominal terhadap kondisi tekan sentris (A)

$$\begin{aligned}\phi P_{n(A)} &= \phi 0,8 (0,85 f'_{cc} (A_g - A_{st}) + f_y A_{st}) \\ &= 0,65 \times 0,8 \times (0,85 \times 36,509 \times (320000 - 9817,477) + \\ &= 400 \times 9817,477) \\ &= 7047472 \text{ N} \\ &= 7047,472 \text{ kN}\end{aligned}$$

f. Menghitung kapasitas momen nominal terhadap kondisi tekan sentris (A)

$$\phi M_{n(A)} = 0 \text{ kN}$$

6. Analisis terhadap kondisi tekan dominan (B)

a. Menghitung regangan efektif CFRP

Untuk kondisi dimana gaya yang bekerja merupakan kombinasi dari gaya aksial dan lentur, maka regangan efektif CFRP ditentukan dengan mengambil nilai terkecil antara $\varepsilon_{fe} = \kappa_e \times \varepsilon_{fu}$ dan $\varepsilon_{fe} = 0,004$

$$\begin{aligned}\varepsilon_{fe} &= \kappa_e \times \varepsilon_{fu} \\ &= 0,550 \times 0,020 \\ &= 0,011\end{aligned}$$

$$\varepsilon_{fe} = 0,004$$

Maka nilai regangan efektif CFRP yang digunakan sebesar 0,004.

b. Menghitung batas kuat tekan maksimum akibat CFRP

$$\begin{aligned} f_l &= \frac{2 \times E_f \times n_f \times t_f \times \varepsilon_{fe}}{D} \\ &= \frac{2 \times 230000 \times 3 \times 0,331 \times 0,004}{894,427} \\ &= 2,043 \text{ MPa} \end{aligned}$$

Rasio pengekan minimum harus memenuhi syarat berikut

$$\begin{aligned} \frac{f_l}{f'_c} &= \frac{2,043}{25} \\ &= 0,082 < 0,08 \text{ (Memenuhi)} \end{aligned}$$

c. Menghitung kuat tekan maksimum akibat beton terkekang

$$\begin{aligned} f'_{cc} &= f'_c + \Psi_f \times 3,3 \times \kappa_a \times f_l \\ &= 25 + 0,95 \times 3,3 \times 0,655 \times 2,043 \\ &= 29,196 \text{ MPa} \end{aligned}$$

d. Menghitung regangan beton terkekang

$$\begin{aligned} \varepsilon_{ccu} &= \varepsilon_c \left(1,5 + 12\kappa_b \frac{f_l}{f'_c} \left(\frac{\varepsilon_{fe}}{\varepsilon_c} \right)^{0,45} \right) \\ &= 0,003 \times \left(1,5 + 12 \times 0,655 \times 0,082 \times \left(\frac{0,004}{0,003} \right)^{0,45} \right) \\ &= 0,007 \end{aligned}$$

e. Menghitung kemiringan linier tegangan regangan akibat CFRP

$$\begin{aligned} E_2 &= \frac{f'_{cc} - f'_c}{\varepsilon_{ccu}} \\ &= \frac{29,196 - 25}{0,007} \\ &= 626,821 \text{ MPa} \end{aligned}$$

f. Menghitung regangan transisi akibat CFRP

$$\varepsilon'_t = \frac{2 \times f'_c}{E_c - E_2}$$

$$\begin{aligned}
&= \frac{2 \times 25}{23500 - 626,821} \\
&= 0,002
\end{aligned}$$

g. Menghitung koordinat vertikal dalam daerah tekan

Koordinat vertikal dalam daerah tekan, diukur dari posisi garis netral

$$\begin{aligned}
c &= d \\
&= 737,5 \text{ mm} \\
y_t &= c \frac{\varepsilon'_t}{\varepsilon_{ccu}} \\
&= 737,5 \times \frac{0,002}{0,067} \\
&= 240,851 \text{ mm}
\end{aligned}$$

h. Menghitung gaya yang disumbangkan oleh tulangan

Menghitung regangan tulangan

$$\begin{aligned}
\varepsilon_{s1} &= \frac{d - d'}{d} \varepsilon_{ccu} \\
&= \frac{737,5 - 62,5}{737,5} \times 0,07 \\
&= 0,006 \\
\varepsilon_{s2} &= \frac{d - d' - d_s}{d} \varepsilon_{ccu} \\
&= \frac{737,5 - 62,5 - 112,5}{737,5} \times 0,07 \\
&= 0,005 \\
\varepsilon_{s3} &= \frac{d - d' - 2d_s}{d} \varepsilon_{ccu} \\
&= \frac{737,5 - 62,5 - 2 \times 112,5}{737,5} \times 0,07 \\
&= 0,004 \\
\varepsilon_{s4} &= \frac{d - d' - 3d_s}{d} \varepsilon_{ccu} \\
&= \frac{737,5 - 62,5 - 3 \times 112,5}{737,5} \times 0,07
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&= 0,003 \\
\varepsilon_{s5} &= \frac{d - d' - 4d_s}{d} \varepsilon_{ccu} \\
&= \frac{737,5 - 62,5 - 4 \times 112,5}{737,5} \times 0,07 \\
&= 0,002 \\
\varepsilon_{s6} &= \frac{d - d' - 5d_s}{d} \varepsilon_{ccu} \\
&= \frac{737,5 - 62,5 - 5 \times 112,5}{737,5} \times 0,07 \\
&= 0,001 \\
\varepsilon_{s7} &= \frac{d - d' - 6d_s}{d} \varepsilon_{ccu} \\
&= \frac{737,5 - 62,5 - 6 \times 112,5}{737,5} \times 0,07 \\
&= 0
\end{aligned}$$

Menghitung tegangan tulangan

$$\begin{aligned}
f_{s1} &= \varepsilon_{s1} \times E_s \\
&= 0,006 \times 200000 \\
&= 1225,260 \text{ MPa} \\
&= 400 \text{ MPa} \\
f_{s2} &= \varepsilon_{s2} \times E_s \\
&= 0,005 \times 200000 \\
&= 1021,050 \text{ MPa} \\
&= 400 \text{ MPa} \\
f_{s3} &= \varepsilon_{s3} \times E_s \\
&= 0,004 \times 200000 \\
&= 816,840 \text{ MPa} \\
&= 400 \text{ MPa} \\
f_{s4} &= \varepsilon_{s4} \times E_s \\
&= 0,003 \times 200000 \\
&= 612,630 \text{ MPa}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &= 400 \text{ MPa} \\
 f_{s5} &= \varepsilon_{s5} \times E_s \\
 &= 0,002 \times 200000 \\
 &= 408,420 \text{ MPa} \\
 &= 400 \text{ MPa} \\
 f_{s6} &= \varepsilon_{s6} \times E_s \\
 &= 0,001 \times 200000 \\
 &= 204,210 \text{ MPa} \\
 f_{s7} &= \varepsilon_{s7} \times E_s \\
 &= 0 \times 200000 \\
 &= 0 \text{ MPa}
 \end{aligned}$$

Menghitung gaya aksial yang bekerja akibat tulangan

$$\begin{aligned}
 F_{s1} &= A_{s1} \times f_{s1} \\
 &= 2454,369 \times 400 \\
 &= 981747,704 \text{ N} \\
 F_{s2} &= A_{s2} \times f_{s2} \\
 &= 981,748 \times 400 \\
 &= 392699,082 \text{ N} \\
 F_{s3} &= A_{s3} \times f_{s3} \\
 &= 981,748 \times 400 \\
 &= 392699,082 \text{ N} \\
 F_{s4} &= A_{s4} \times f_{s4} \\
 &= 981,748 \times 400 \\
 &= 392699,082 \text{ N} \\
 F_{s5} &= A_{s5} \times f_{s5} \\
 &= 981,748 \times 400 \\
 &= 392699,082 \text{ N} \\
 F_{s6} &= A_{s6} \times f_{s6} \\
 &= 981,748 \times 204,210 \\
 &= 200482,658 \text{ N}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
F_{s7} &= A_{s7} \times f_{s7} \\
&= 2454,369 \times 0 \\
&= 0 \text{ N} \\
\sum F_s &= F_{s1} + F_{s2} + F_{s3} + F_{s4} + F_{s5} + F_{s6} + F_{s7} \\
&= 981747,704 + 392699,082 + 392699,082 + \\
&\quad 392699,082 + 392699,082 + 200482,658 + 0 \\
&= 2753026,689 \text{ N}
\end{aligned}$$

Menghitung jarak gaya ke titik berat penampang

$$\begin{aligned}
d_1 &= \frac{h}{2} - d' \\
&= \frac{800}{2} - 62,5 \\
&= 337,5 \text{ mm} \\
d_2 &= \frac{h}{2} - d' - d_s \\
&= \frac{800}{2} - 62,5 - 112,5 \\
&= 225 \text{ mm} \\
d_3 &= \frac{h}{2} - d' - d_s \\
&= \frac{800}{2} - 62,5 - 112,5 \\
&= 225 \text{ mm} \\
d_4 &= \frac{h}{2} - d' - d_s \\
&= \frac{800}{2} - 62,5 - 112,5 \\
&= 225 \text{ mm} \\
d_5 &= \frac{h}{2} - d' - d_s \\
&= \frac{800}{2} - 62,5 - 112,5 \\
&= 225 \text{ mm}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 d_6 &= \frac{h}{2} - d' \\
 &= \frac{800}{2} - 62,5 - 112,5 \\
 &= 225 \text{ mm}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 d_7 &= \frac{h}{2} - d' \\
 &= \frac{800}{2} - 62,5 \\
 &= 337,5 \text{ mm}
 \end{aligned}$$

Menghitung momen yang bekerja akibat tulangan

$$\begin{aligned}
 M_{ns1} &= F_{s1} \times d_1 \\
 &= 981747,704 \times 337,5 \\
 &= 331339850,183 \text{ Nmm}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 M_{ns2} &= F_{s2} \times d_2 \\
 &= 392699,082 \times 225 \\
 &= 88357293,382 \text{ Nmm}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 M_{ns3} &= F_{s3} \times d_3 \\
 &= 392699,082 \times 225 \\
 &= 88357293,382 \text{ Nmm}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 M_{ns4} &= F_{s4} \times d_4 \\
 &= 392699,082 \times 225 \\
 &= 88357293,382 \text{ Nmm}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 M_{ns5} &= F_{s5} \times d_5 \\
 &= 392699,082 \times 225 \\
 &= 88357293,382 \text{ Nmm}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 M_{ns6} &= F_{s6} \times d_6 \\
 &= 200482,658 \times 225 \\
 &= 45108598,042 \text{ Nmm}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 M_{ns7} &= F_{s7} \times d_7 \\
 &= 0 \times 337,5 \\
 &= 0 \text{ Nmm}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\Sigma M_{ns} &= M_{ns1} + M_{ns2} + M_{ns3} + M_{ns4} + M_{ns5} + M_{ns6} + M_{ns7} \\
&= 331339850,183 + 88357293,382 + 88357293,382 + \\
&\quad 88357293,382 + 88357293,382 + 45108598,042 + 0 \\
&= 729877621,754 \text{ Nmm}
\end{aligned}$$

i. Menghitung kapasitas aksial nominal terhadap kondisi tekan dominan (B)

Menghitung gaya aksial akibat beton dan kekangan CFRP

$$\phi P_{n(B)} = \phi [A(y_t)^3 + B(y_t)^2 + C(y_t) + D + \Sigma F_s]$$

Dimana,

$$\begin{aligned}
A &= \frac{-b(E_c - E_2)^2}{12f'_c} \left(\frac{\varepsilon_{ccu}}{c} \right)^2 \\
&= \frac{-400 \times (23500 - 626,821)^2}{12 \times 25} \left(\frac{0,007}{737,5} \right)^2 \\
&= -0,057 \text{ N/mm}^3
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
B &= \frac{b(E_c - E_2)}{2} \left(\frac{\varepsilon_{ccu}}{c} \right) \\
&= \frac{400 \times (23500 - 626,821)}{2} \left(\frac{0,007}{737,5} \right) \\
&= 41,519 \text{ N/mm}^2
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
C &= -bf'_c \\
&= -400 \times 25 \\
&= -10000 \text{ Nmm}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
D &= bcf'_c + \frac{bcE_2}{2} (\varepsilon_{ccu}) \\
&= 400 \times 737,5 \times 25 + \frac{400 \times 737,5 \times 626,821}{2} (0,007) \\
&= 7993859,285 \text{ N}
\end{aligned}$$

$$\Sigma F_s = 2753026,689 \text{ N}$$

Maka,

$$\begin{aligned}
\phi P_{n(B)} &= \phi [A(y_t)^3 + B(y_t)^2 + C(y_t) + D + \Sigma F_s] \\
&= 0,65 \times [-0,057 \times (240,851)^3 + 41,519 \times (240,851)^2 - \\
&\quad 10000 \times (240,851) + 7993859,285 + 2753026,689]
\end{aligned}$$

$$= 6463631 \text{ N}$$

$$= 6463,631 \text{ kN}$$

- j. Menghitung kapasitas momen nominal terhadap kondisi tekan dominan
(B)

Menghitung momen akibat beton dan kekangan CFRP

$$\phi M_{n(B)} = \phi [E(y_t)^4 + F(y_t)^3 + G(y_t)^2 + H(y_t) + I + \sum M_{ns}]$$

Dimana,

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

$$= \frac{-400 \times (23500 - 626,821)^2}{16 \times 25} \left(\frac{0,007}{737,5} \right)^2$$

$$= -0,043 \text{ N/mm}^3$$

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

$$= 400 \times \left(737,5 - \frac{800}{2} \right) \times \frac{(23500 - 626,821)^2}{12 \times 25}$$

$$\left(\frac{0,007}{737,5} \right)^2 + \frac{400 \times (23500 - 626,821)}{3} \left(\frac{0,007}{737,5} \right)$$

$$= 47,073 \text{ N/mm}^2$$

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

$$= \frac{400}{2} \times 25 + 400 \times \left(737,5 - \frac{800}{2} \right) \times \frac{(23500 - 626,821)}{2}$$

$$\left(\frac{0,007}{737,5} \right)$$

$$= -19012,793 \text{ N/mm}$$

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

$$= 400 \times 25 \times \left(737,5 - \frac{800}{2} \right)$$

$$= 3375000 \text{ N}$$

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

$$\begin{aligned}
&= \frac{400 \times 737,5^2}{2} \times 25 - 400 \times 737,5 \times 25 \times \left(737,5 - \frac{800}{2}\right) \\
&\quad + \frac{400 \times 737,5^2 \times 626,821}{3} (0,007) - \frac{400 \times 737,5 \times 626,821}{2} \\
&\quad \times \left(737,5 - \frac{800}{2}\right) \times (0,007) \\
&= 325876223 \text{ Nmm} \\
\Sigma M_{ns} &= 729877621,754 \text{ Nmm} \\
\text{Maka,} \\
\phi M_{n(B)} &= \phi [E(y_t)^4 + F(y_t)^3 + G(y_t)^2 + H(y_t) + I + \Sigma M_{ns}] \\
&= 0,65 \times [-0,043 \times (240,851)^4 + 47,073 \times (240,851)^3 \\
&\quad + (-19012,793) \times (240,851)^2 + 3375000 \times (240,851) \\
&\quad + 325876223 + 729877621,754] \\
&= 830940803 \text{ Nmm} \\
&= 830,941 \text{ kNm}
\end{aligned}$$

7. Analisis terhadap kondisi seimbang (C)

a. Menghitung regangan efektif CFRP

Untuk kondisi dimana gaya yang bekerja merupakan kombinasi dari gaya aksial dan lentur, maka regangan efektif CFRP ditentukan dengan mengambil nilai terkecil antara $\varepsilon_{fe} = \kappa_e \times \varepsilon_{fu}$ dan $\varepsilon_{fe} = 0,004$

$$\begin{aligned}
\varepsilon_{fe} &= \kappa_e \times \varepsilon_{fu} \\
&= 0,550 \times 0,020 \\
&= 0,011 \\
\varepsilon_{fe} &= 0,004
\end{aligned}$$

Maka nilai regangan efektif CFRP yang digunakan sebesar 0,004.

b. Menghitung batas kuat tekan maksimum akibat CFRP

$$\begin{aligned}
f_l &= \frac{2 \times E_f \times n_f \times t_f \times \varepsilon_{fe}}{D} \\
&= \frac{2 \times 230000 \times 3 \times 0,331 \times 0,004}{894,427} \\
&= 2,043 \text{ MPa}
\end{aligned}$$

Rasio pengekan minimum harus memenuhi syarat berikut

$$\begin{aligned}\frac{f_l}{f'_c} &= \frac{2,043}{25} \\ &= 0,082 < 0,08 \text{ (Memenuhi)}\end{aligned}$$

c. Menghitung kuat tekan maksimum akibat beton terkekang

$$\begin{aligned}f'_{cc} &= f'_c + \Psi_f \times 3,3 \times \kappa_a \times f_l \\ &= 25 + 0,95 \times 3,3 \times 0,655 \times 2,043 \\ &= 29,196 \text{ MPa}\end{aligned}$$

d. Menghitung regangan beton terkekang

$$\begin{aligned}\varepsilon_{ccu} &= \varepsilon_c \left(1,5 + 12\kappa_b \frac{f_l}{f'_c} \left(\frac{\varepsilon_{fe}}{\varepsilon_c} \right)^{0,45} \right) \\ &= 0,003 \times \left(1,5 + 12 \times 0,655 \times 0,082 \times \left(\frac{0,004}{0,003} \right)^{0,45} \right) \\ &= 0,007\end{aligned}$$

e. Menghitung kemiringan linier tegangan regangan akibat CFRP

$$\begin{aligned}E_2 &= \frac{f'_{cc} - f'_c}{\varepsilon_{ccu}} \\ &= \frac{29,196 - 25}{0,007} \\ &= 626,821 \text{ MPa}\end{aligned}$$

f. Menghitung regangan transisi akibat CFRP

$$\begin{aligned}\varepsilon'_t &= \frac{2 \times f'_c}{E_c - E_2} \\ &= \frac{2 \times 25}{23500 - 626,821} \\ &= 0,002\end{aligned}$$

e. Menghitung koordinat vertikal dalam daerah tekan

Koordinat vertikal dalam daerah tekan, diukur dari posisi garis netral

$$\begin{aligned}c &= d \times \frac{\varepsilon_{ccu}}{\varepsilon_{sy} + \varepsilon_{ccu}} \\ &= 737,5 \times \frac{0,007}{0,002 + 0,007}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&= 567,834 \text{ mm} \\
y_t &= c \frac{\varepsilon'_t}{\varepsilon_{ccu}} \\
&= 567,834 \times \frac{0,002}{0,007} \\
&= 185,442 \text{ mm}
\end{aligned}$$

f. Menghitung gaya yang disumbangkan oleh tulangan

Menghitung regangan tulangan

$$\begin{aligned}
\varepsilon_{s1} &= \frac{c - d'}{c} \varepsilon_{ccu} \\
&= \frac{567,834 - 62,5}{567,834} \times 0,007 \\
&= 0,006 \\
\varepsilon_{s2} &= \frac{c - d' - d_s}{c} \varepsilon_{ccu} \\
&= \frac{567,834 - 62,5 - 112,5}{567,834} \times 0,007 \\
&= 0,005 \\
\varepsilon_{s3} &= \frac{c - d' - 2d_s}{c} \varepsilon_{ccu} \\
&= \frac{567,834 - 62,5 - 2 \times 112,5}{567,834} \times 0,007 \\
&= 0,003 \\
\varepsilon_{s4} &= \frac{c - d' - 3d_s}{c} \varepsilon_{ccu} \\
&= \frac{567,834 - 62,5 - 3 \times 112,5}{567,834} \times 0,007 \\
&= 0,002 \\
\varepsilon_{s5} &= \frac{c - d' - 4d_s}{c} \varepsilon_{ccu} \\
&= \frac{567,834 - 62,5 - 4 \times 112,5}{567,834} \times 0,007 \\
&= 0,001
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\varepsilon_{s6} &= \frac{c - d' - 5d_s}{c} \varepsilon_{ccu} \\
&= \frac{567,834 - 62,5 - 5 \times 112,5}{567,834} \times 0,007 \\
&= -0,0007 \\
\varepsilon_{s7} &= \frac{c - d' - 6d_s}{c} \varepsilon_{ccu} \\
&= \frac{567,834 - 62,5 - 6 \times 112,5}{567,834} \times 0,007 \\
&= -0,002
\end{aligned}$$

Menghitung tegangan tulangan

$$\begin{aligned}
f_{s1} &= \varepsilon_{s1} \times E_s \\
&= 0,006 \times 200000 \\
&= 1191,361 \text{ MPa} \\
&= 400 \text{ MPa} \\
f_{s2} &= \varepsilon_{s2} \times E_s \\
&= 0,005 \times 200000 \\
&= 926,135 \text{ MPa} \\
&= 400 \text{ MPa} \\
f_{s3} &= \varepsilon_{s3} \times E_s \\
&= 0,003 \times 200000 \\
&= 660,908 \text{ MPa} \\
&= 400 \text{ MPa} \\
f_{s4} &= \varepsilon_{s4} \times E_s \\
&= 0,002 \times 200000 \\
&= 395,681 \text{ MPa} \\
&= 400 \text{ MPa} \\
f_{s5} &= \varepsilon_{s5} \times E_s \\
&= 0,001 \times 200000 \\
&= 130,454 \text{ MPa} \\
&= 400 \text{ MPa}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 f_{s6} &= \varepsilon_{s6} \times E_s \\
 &= -0,0007 \times 200000 \\
 &= -134,773 \text{ MPa} \\
 f_{s7} &= \varepsilon_{s7} \times E_s \\
 &= -0,002 \times 200000 \\
 &= -400 \text{ MPa}
 \end{aligned}$$

Menghitung gaya aksial yang bekerja akibat tulangan

$$\begin{aligned}
 F_{s1} &= A_{s1} \times f_{s1} \\
 &= 2454,369 \times 400 \\
 &= 981747,704 \text{ N} \\
 F_{s2} &= A_{s2} \times f_{s2} \\
 &= 981,748 \times 400 \\
 &= 392699,082 \text{ N} \\
 F_{s3} &= A_{s3} \times f_{s3} \\
 &= 981,748 \times 400 \\
 &= 392699,082 \text{ N} \\
 F_{s4} &= A_{s4} \times f_{s4} \\
 &= 981,748 \times 395,681 \\
 &= 388458,641 \text{ N} \\
 F_{s5} &= A_{s5} \times f_{s5} \\
 &= 981,748 \times 130,454 \\
 &= 128072,734 \text{ N} \\
 F_{s6} &= A_{s6} \times f_{s6} \\
 &= 981,748 \times -134,773 \\
 &= -132313,174 \text{ N} \\
 F_{s7} &= A_{s7} \times f_{s7} \\
 &= 2454,369 \times -400 \\
 &= -981747,704 \text{ N} \\
 \Sigma F_s &= F_{s1} + F_{s2} + F_{s3} + F_{s4} + F_{s5} + F_{s6} + F_{s7}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&= 981747,704 + 392699,082 + 392699,082 + \\
&\quad 388458,641 + 128072,734 + (-132313,174) + \\
&\quad (-981747,704) \\
&= 1169616,365 \text{ N}
\end{aligned}$$

Menghitung jarak gaya ke titik berat penampang

$$\begin{aligned}
d_1 &= \frac{h}{2} - d' \\
&= \frac{800}{2} - 62,5 \\
&= 337,5 \text{ mm} \\
d_2 &= \frac{h}{2} - d' - d_s \\
&= \frac{800}{2} - 62,5 - 112,5 \\
&= 225 \text{ mm} \\
d_3 &= \frac{h}{2} - d' - d_s \\
&= \frac{800}{2} - 62,5 - 112,5 \\
&= 225 \text{ mm} \\
d_4 &= \frac{h}{2} - d' - d_s \\
&= \frac{800}{2} - 62,5 - 112,5 \\
&= 225 \text{ mm} \\
d_5 &= \frac{h}{2} - d' - d_s \\
&= \frac{800}{2} - 62,5 - 112,5 \\
&= 225 \text{ mm} \\
d_6 &= \frac{h}{2} - d' - d_s \\
&= \frac{800}{2} - 62,5 - 112,5 \\
&= 225 \text{ mm}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 d_7 &= \frac{h}{2} - d' \\
 &= \frac{800}{2} - 62,5 \\
 &= 337,5 \text{ mm}
 \end{aligned}$$

Menghitung momen yang bekerja akibat tulangan

$$\begin{aligned}
 M_{ns1} &= F_{s1} \times d_1 \\
 &= 981747,704 \times 337,5 \\
 &= 331339850,183 \text{ Nmm}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 M_{ns2} &= F_{s2} \times d_2 \\
 &= 392699,082 \times 225 \\
 &= 88357293,382 \text{ Nmm}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 M_{ns3} &= F_{s3} \times d_3 \\
 &= 392699,082 \times 225 \\
 &= 88357293,382 \text{ Nmm}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 M_{ns4} &= F_{s4} \times d_4 \\
 &= 388458,641 \times 225 \\
 &= 87403194,324 \text{ Nmm}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 M_{ns5} &= F_{s5} \times d_5 \\
 &= 128072,734 \times 225 \\
 &= 28816365,089 \text{ Nmm}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 M_{ns6} &= F_{s6} \times d_6 \\
 &= 132313,174 \times 225 \\
 &= 29770464,147 \text{ Nmm}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 M_{ns7} &= F_{s7} \times d_7 \\
 &= 981747,704 \times 337,5 \\
 &= 331339850,183 \text{ Nmm}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \Sigma M_{ns} &= M_{ns1} + M_{ns2} + M_{ns3} + M_{ns4} + M_{ns5} + M_{ns6} + M_{ns7} \\
 &= 331339850,183 + 88357293,382 + 88357293,382 + \\
 &\quad 87403194,324 + 28816365,089 + 29770464,147 + \\
 &\quad 331339850,183
 \end{aligned}$$

$$= 985384310,690 \text{ Nmm}$$

g. Menghitung kapasitas aksial nominal terhadap kondisi seimbang (C)

Menghitung gaya aksial akibat beton dan kekangan CFRP

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

Dimana,

$$\begin{aligned} A &= \frac{-b(E_c - E_2)^2}{12f'_c} \left(\frac{\epsilon_{ccu}}{c} \right)^2 \\ &= \frac{-400 \times (23500 - 626,821)^2}{12 \times 25} \left(\frac{0,007}{567,834} \right)^2 \\ &= -0,097 \text{ N/mm}^3 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} B &= \frac{b(E_c - E_2)}{2} \left(\frac{\epsilon_{ccu}}{c} \right) \\ &= \frac{400 \times (23500 - 626,821)}{2} \left(\frac{0,007}{567,834} \right) \\ &= 53,925 \text{ N/mm}^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} C &= -bf'_c \\ &= -400 \times 25 \\ &= -10000 \text{ Nmm} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} D &= bcf'_c + \frac{bcE_2}{2} (\epsilon_{ccu}) \\ &= 400 \times 567,834 \times 25 + \frac{400 \times 567,834 \times 626,821}{2} (0,007) \\ &= 6154826,775 \text{ N} \end{aligned}$$

$$\sum F_s = 1169616,365 \text{ N}$$

Maka,

$$\begin{aligned} \phi P_{n(C)} &= \phi [A(y_t)^3 + B(y_t)^2 + C(y_t) + D + \sum F_s] \\ &= 0,65 \times [-0,097 \times (185,442)^3 + 53,925 \times (185,442)^2 \\ &\quad + 6154826,775 + 1169616,365] \\ &= 4359097 \text{ N} \\ &= 4359,097 \text{ kN} \end{aligned}$$

h. Menghitung kapasitas momen nominal terhadap kondisi seimbang (C)

Menghitung momen akibat beton dan kekangan CFRP

$$\phi M_{n(C)} = \phi [E(y_t)^4 + F(y_t)^3 + G(y_t)^2 + H(y_t) + I + \sum M_{ns}]$$

Dimana, =

$$\begin{aligned} E &= \frac{-b(E_c - E_2)^2}{16f'_c} \left(\frac{\varepsilon_{ccu}}{c} \right)^2 \\ &= \frac{-400 \times (23500 - 626,821)^2}{16 \times 25} \left(\frac{0,007}{567,834} \right)^2 \\ &= -0,073 \text{ N/mm}^3 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} F &= \left[b \left(c - \frac{h}{2} \right) \frac{(E_c - E_2)^2}{12f'_c} \left(\frac{\varepsilon_{ccu}}{c} \right)^2 + \frac{b(E_c - E_2)}{3} \left(\frac{\varepsilon_{ccu}}{c} \right) \right] \\ &= 400 \times \left(567,834 - \frac{800}{2} \right) \times \frac{(23500 - 626,821)^2}{12 \times 25} \\ &\quad \left(\frac{0,007}{567,834} \right)^2 + \frac{400 \times (23500 - 626,821)}{3} \left(\frac{0,007}{567,834} \right) \\ &= 52,218 \text{ N/mm}^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} G &= \left[\frac{b}{2} f'_c + b \left(c - \frac{h}{2} \right) \frac{(E_c - E_2)}{2} \left(\frac{\varepsilon_{ccu}}{c} \right) \right] \\ &= \frac{400}{2} \times 25 + 400 \times \left(567,834 - \frac{800}{2} \right) \times \frac{(23500 - 626,821)}{2} \\ &\quad \left(\frac{0,007}{567,834} \right) \\ &= -14050,476 \text{ N/mm} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} H &= bf'_c \left(c - \frac{h}{2} \right) \\ &= 400 \times 25 \times \left(567,834 - \frac{800}{2} \right) \\ &= 1678339,567 \text{ N} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} I &= \left[\frac{bc^2}{2} f'_c - bcf'_c \left(c - \frac{h}{2} \right) + \frac{bc^2 E_2}{3} (\varepsilon_{ccu}) - \frac{bc E_2}{2} \left(c - \frac{h}{2} \right) (\varepsilon_{ccu}) \right] \\ &= \frac{400 \times 567,834^2}{2} \times 25 - 400 \times 567,834 \times 25 \\ &\quad \times \left(567,834 - \frac{800}{2} \right) + \frac{400 \times 567,834^2 \times 626,821}{3} \times (0,007) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& - \frac{400 \times 567,834 \times 626,821}{2} \times \left(567,834 - \frac{800}{2} \right) \times (0,007) \\
& = 759565159,291 \text{ Nmm} \\
\Sigma M_{ns} & = 985384310,690 \text{ Nmm} \\
\text{Maka,} \\
\phi M_{n(c)} & = \phi [E(y_t)^4 + F(y_t)^3 + G(y_t)^2 + H(y_t) + I + \Sigma M_{ns}] \\
& = 0,65 \times [-0,073 \times (185,442)^4 + 52,218 \times (185,442)^3 \\
& \quad + (-14050,476) \times (185,442)^2 + 1678339,567 \\
& \quad \times (185,442) + 759565159,291 + 985384310,690] \\
& = 1183024118 \text{ Nmm} \\
& = 1183,024 \text{ kNm}
\end{aligned}$$

8. Analisis terhadap kondisi tarik dominan (4)

a. Menghitung regangan efektif CFRP

Untuk kondisi dimana gaya yang bekerja merupakan kombinasi dari gaya aksial dan lentur, maka regangan efektif CFRP ditentukan dengan mengambil nilai terkecil antara $\varepsilon_{fe} = \kappa_e \times \varepsilon_{fu}$ dan $\varepsilon_{fe} = 0,004$

$$\begin{aligned}
\varepsilon_{fe} & = \kappa_e \times \varepsilon_{fu} \\
& = 0,550 \times 0,020 \\
& = 0,011 \\
\varepsilon_{fe} & = 0,004
\end{aligned}$$

Maka nilai regangan efektif CFRP yang digunakan sebesar 0,004.

b. Menghitung batas kuat tekan maksimum akibat CFRP

$$\begin{aligned}
f_l & = \frac{2 \times E_f \times n_f \times t_f \times \varepsilon_{fe}}{D} \\
& = \frac{2 \times 230000 \times 3 \times 0,331 \times 0,004}{894,427} \\
& = 2,043 \text{ MPa}
\end{aligned}$$

Rasio pengeang minimum harus memenuhi syarat berikut

$$\begin{aligned}
\frac{f_l}{f'_c} & = \frac{2,043}{25} \\
& = 0,082 < 0,08 \text{ (Memenuhi)}
\end{aligned}$$

c. Menghitung kuat tekan maksimum akibat beton terkekang

$$\begin{aligned} f'_{cc} &= f'_c + \Psi_f \times 3,3 \times \kappa_a \times f_l \\ &= 25 + 0,95 \times 3,3 \times 0,655 \times 2,043 \\ &= 29,196 \text{ MPa} \end{aligned}$$

d. Menghitung regangan beton terkekang

$$\begin{aligned} \varepsilon_{ccu} &= \varepsilon_c \left(1,5 + 12\kappa_b \frac{f_l}{f'_c} \left(\frac{\varepsilon_{fe}}{\varepsilon_c} \right)^{0,45} \right) \\ &= 0,003 \times \left(1,5 + 12 \times 0,655 \times 0,082 \times \left(\frac{0,004}{0,003} \right)^{0,45} \right) \\ &= 0,007 \end{aligned}$$

e. Menghitung koordinat vertikal dalam daerah tekan

Koordinat vertikal dalam daerah tekan, diukur dari posisi garis netral

$$\begin{aligned} c_{asumsi} &< C_b \\ 300 \text{ mm} &< 567,834 \text{ mm} \end{aligned}$$

f. Menghitung gaya akibat beton

Menghitung gaya aksial akibat beton

$$\begin{aligned} C_c &= 0,85 \times f'_{cc} \times b \times c \times \beta_1 \\ &= 0,85 \times 29,196 \times 400 \times 300 \times 0,85 \\ &= 2531263,390 \text{ N} \end{aligned}$$

Menghitung gaya lentur akibat beton

$$\begin{aligned} M_{nc} &= d_c \times C_c \\ &= \frac{800}{2} - \frac{0,85 \times 300}{2} \times 2531263,390 \\ &= 689769273,681 \text{ Nmm} \end{aligned}$$

g. Menghitung gaya yang disumbangkan oleh tulangan

Menghitung regangan tulangan

$$\begin{aligned} \varepsilon_{s1} &= \frac{c - d'}{c} \varepsilon_{ccu} \\ &= \frac{300 - 62,5}{300} \times 0,007 \\ &= 0,005 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\varepsilon_{s2} &= \frac{c - d' - d_s}{c} \varepsilon_{ccu} \\
&= \frac{300 - 62,5 - 112,5}{300} \times 0,007 \\
&= 0,003
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\varepsilon_{s3} &= \frac{c - d' - 2d_s}{c} \varepsilon_{ccu} \\
&= \frac{300 - 62,5 - 2 \times 112,5}{300} \times 0,007 \\
&= 0,0003
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\varepsilon_{s4} &= \frac{c - d' - 3d_s}{c} \varepsilon_{ccu} \\
&= \frac{300 - 62,5 - 3 \times 112,5}{300} \times 0,007 \\
&= -0,002
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\varepsilon_{s5} &= \frac{c - d' - 4d_s}{c} \varepsilon_{ccu} \\
&= \frac{300 - 62,5 - 4 \times 112,5}{300} \times 0,007 \\
&= -0,005
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\varepsilon_{s6} &= \frac{c - d' - 5d_s}{c} \varepsilon_{ccu} \\
&= \frac{300 - 62,5 - 5 \times 112,5}{300} \times 0,007 \\
&= -0,007
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\varepsilon_{s7} &= \frac{c - d' - 6d_s}{c} \varepsilon_{ccu} \\
&= \frac{300 - 62,5 - 6 \times 112,5}{300} \times 0,007 \\
&= -0,010
\end{aligned}$$

Menghitung tegangan tulangan

$$\begin{aligned}
f_{s1} &= \varepsilon_{s1} \times E_s \\
&= 0,005 \times 200000 \\
&= 1059,812 \text{ MPa}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&= 400 \text{ MPa} \\
f_{s2} &= \varepsilon_{s2} \times E_s \\
&= 0,003 \times 200000 \\
&= 557,796 \text{ MPa} \\
&= 400 \text{ MPa} \\
f_{s3} &= \varepsilon_{s3} \times E_s \\
&= 0,0003 \times 200000 \\
&= 55,780 \text{ MPa} \\
f_{s4} &= \varepsilon_{s4} \times E_s \\
&= -0,002 \times 200000 \\
&= -446,237 \text{ MPa} \\
&= -400 \text{ MPa} \\
f_{s5} &= \varepsilon_{s5} \times E_s \\
&= -0,005 \times 200000 \\
&= -948,253 \text{ MPa} \\
&= -400 \text{ MPa} \\
f_{s6} &= \varepsilon_{s6} \times E_s \\
&= -0,007 \times 200000 \\
&= -1450,269 \text{ MPa} \\
&= -400 \text{ MPa} \\
f_{s7} &= \varepsilon_{s7} \times E_s \\
&= -0,010 \times 200000 \\
&= -1952,285 \text{ MPa} \\
&= -400 \text{ MPa}
\end{aligned}$$

Menghitung gaya aksial yang bekerja akibat tulangan

$$\begin{aligned}
F_{s1} &= A_{s1} \times f_{s1} \\
&= 2454,369 \times 400 \\
&= 981747,704 \text{ N} \\
F_{s2} &= A_{s2} \times f_{s2} \\
&= 981,748 \times 400
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&= 392699,082 \text{ N} \\
F_{s3} &= A_{s3} \times f_{s3} \\
&= 981,748 \times 55,780 \\
&= 54761,467 \text{ N} \\
F_{s4} &= A_{s4} \times f_{s4} \\
&= 981,748 \times -400 \\
&= -392699,082 \text{ N} \\
F_{s5} &= A_{s5} \times f_{s5} \\
&= 981,748 \times -400 \\
&= -392699,082 \text{ N} \\
F_{s6} &= A_{s6} \times f_{s6} \\
&= 981,748 \times -400 \\
&= -392699,082 \text{ N} \\
F_{s7} &= A_{s7} \times f_{s7} \\
&= 2454,369 \times -400 \\
&= -981747,704 \text{ N} \\
\sum F_s &= F_{s1} + F_{s2} + F_{s3} + F_{s4} + F_{s5} + F_{s6} + F_{s7} \\
&= 981747,704 + 392699,082 + 54761,467 + \\
&\quad (-392699,082) + (-392699,082) + (-392699,082) + \\
&\quad (-981747,704) \\
&= -730636,697 \text{ N}
\end{aligned}$$

Menghitung jarak gaya ke titik berat penampang

$$\begin{aligned}
d_1 &= \frac{h}{2} - d' \\
&= \frac{800}{2} - 62,5 \\
&= 337,5 \text{ mm} \\
d_2 &= \frac{h}{2} - d' - d_s \\
&= \frac{800}{2} - 62,5 - 112,5 \\
&= 225 \text{ mm}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 d_3 &= \frac{h}{2} - d' - d_s \\
 &= \frac{800}{2} - 62,5 - 112,5 \\
 &= 225 \text{ mm}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 d_4 &= \frac{h}{2} - d' - d_s \\
 &= \frac{800}{2} - 62,5 - 112,5 \\
 &= 225 \text{ mm}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 d_5 &= \frac{h}{2} - d' - d_s \\
 &= \frac{800}{2} - 62,5 - 112,5 \\
 &= 225 \text{ mm}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 d_6 &= \frac{h}{2} - d' - d_s \\
 &= \frac{800}{2} - 62,5 - 112,5 \\
 &= 225 \text{ mm}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 d_7 &= \frac{h}{2} - d' \\
 &= \frac{800}{2} - 62,5 \\
 &= 337,5 \text{ mm}
 \end{aligned}$$

Menghitung momen yang bekerja akibat tulangan

$$\begin{aligned}
 M_{ns1} &= F_{s1} \times d_1 \\
 &= 981747,704 \times 337,5 \\
 &= 331339850,183 \text{ Nmm}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 M_{ns2} &= F_{s2} \times d_2 \\
 &= 392699,082 \times 225 \\
 &= 88357293,382 \text{ Nmm}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 M_{ns3} &= F_{s3} \times d_3 \\
 &= 54761,467 \times 225
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&= 12321330,021 \text{ Nmm} \\
M_{ns4} &= F_{s4} \times d_4 \\
&= 392699,082 \times 225 \\
&= 88357293,382 \text{ Nmm} \\
M_{ns5} &= F_{s5} \times d_5 \\
&= 392699,082 \times 225 \\
&= 88357293,382 \text{ Nmm} \\
M_{ns6} &= F_{s6} \times d_6 \\
&= 392699,082 \times 225 \\
&= 88357293,382 \text{ Nmm} \\
M_{ns7} &= F_{s7} \times d_7 \\
&= 981747,704 \times 337,5 \\
&= 331339850,183 \text{ Nmm} \\
\sum M_{ns} &= M_{ns1} + M_{ns2} + M_{ns3} + M_{ns4} + M_{ns5} + M_{ns6} + M_{ns7} \\
&= 331339850,183 + 88357293,382 + 12321330,021 + \\
&\quad 88357293,382 + 88357293,382 + 88357293,382 + \\
&\quad 331339850,183 \\
&= 1028430203,916 \text{ Nmm}
\end{aligned}$$

h. Menghitung kapasitas aksial nominal terhadap kondisi tarik dominan (4)

$$\begin{aligned}
\phi P_{n(4)} &= \phi [C_c + \sum F_s] \\
&= 0,9 \times [2531263,390 + (-730636,697)] \\
&= 1620564 \text{ N} \\
&= 1620,564 \text{ kN}
\end{aligned}$$

i. Menghitung kapasitas momen nominal terhadap kondisi tarik dominan (4)

$$\begin{aligned}
\phi M_{n(4)} &= \phi [M_{nc} + \sum M_{ns}] \\
&= 0,9 \times [689769273,681 + 1028430203,916] \\
&= 1546379530 \text{ Nmm} \\
&= 1546,380 \text{ kNm}
\end{aligned}$$

9. Analisis terhadap kondisi tarik kosentris (5)

a. Menghitung kapasitas aksial nominal terhadap kondisi tarik kosentris (5)

$$\begin{aligned}
\phi P_{n(5)} &= \phi [C_c - A_{st} \times f_y] \\
&= 0,9 \times [0 - 9817,477 \times 400] \\
&= -3534292 \text{ N} \\
&= -3534,292 \text{ kN}
\end{aligned}$$

b. Menghitung kapasitas momen nominal terhadap kondisi tarik kosentris (5)

$$\phi M_{n(5)} = 0 \text{ kNm}$$

10. Rekapitulasi hasil perhitungan perkuatan CFRP

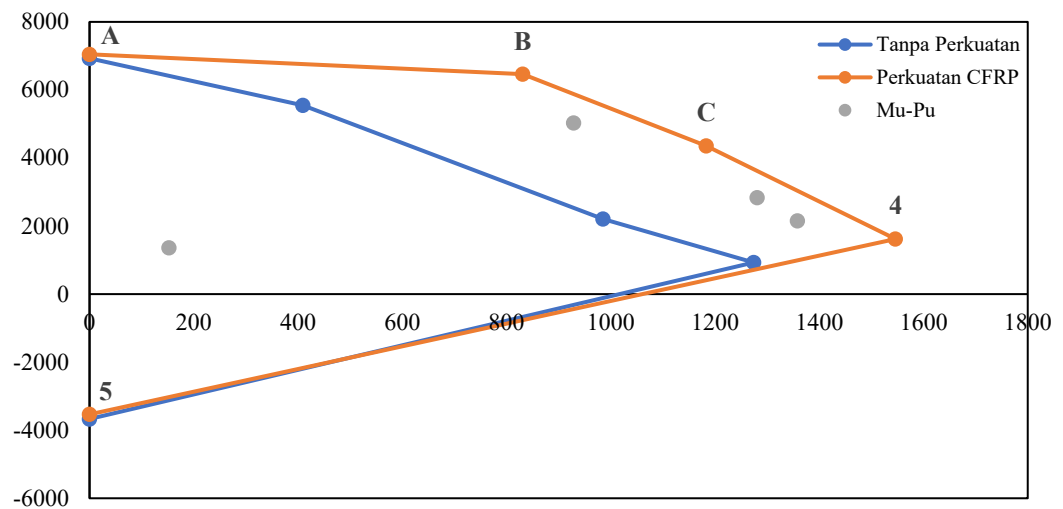
Berikut rekapitulasi hasil perhitungan perkuatan CFRP terhadap kapasitas aksial – lentur kolom K2(M) yang dapat dilihat pada Tabel 5.20.

Tabel 5. 20 Rekapitulasi Hasil Perhitungan Perkuatan CFRP terhadap Kapasitas Aksial – Lentur Kolom K2 (M)

Titik	Sebelum Perkuatan		Setelah Perkuatan (n= 3)		Kenaikan (%)	
	ϕP_n	ϕM_n	ϕP_n	ϕM_n	ϕP_n	ϕM_n
A	6929,500	0	7047,472	0	2%	
B	5543,600	409,270	6463,631	830,941	17%	103%
C	2207,100	985,250	4359,097	1183,024	98%	20%
4	932,700	1274,160	1620,564	1546,380	74%	21%
5	-3669,700	0	-3534,292	0	4%	

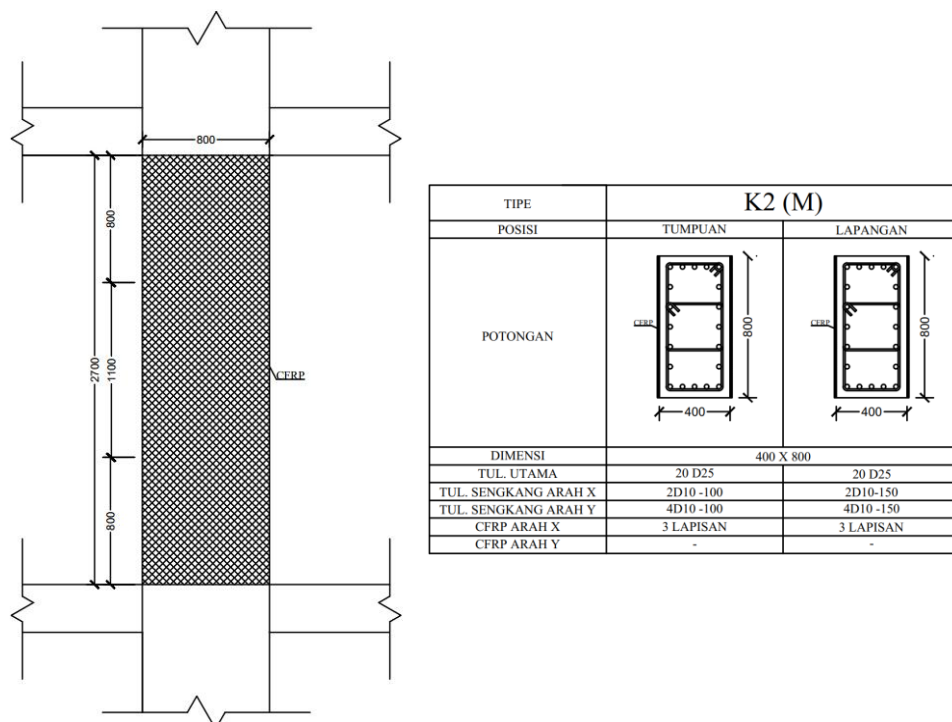
Untuk rekapitulasi hasil perhitungan perkuatan CFRP terhadap kapasitas aksial – lentur kolom tipe lainnya dapat dilihat pada Lampiran 4.

Adapun gambar diagram perkuatan CFRP terhadap beban aksial dan lentur dan gambar perkuatan kolom K2(M) terhadap dapat dilihat pada Gambar 5.8 dan Gambar 5.9 berikut.



Gambar 5. 8 Diagram Interaksi kolom K2(M) arah X setelah Perkuatan

Untuk gambar diagram perkuatan CFRP terhadap beban aksial dan lentur pada tipe kolom lainnya dapat dilihat pada Lampiran 4.



Gambar 5. 9 Gambar Perkuatan CFRP terhadap Kapasitas Aksial – Lentur pada Kolom K2(M) arah X

Untuk gambar perkuatan CFRP terhadap kapasitas aksial dan lentur pada tipe kolom lainnya dapat dilihat pada Lampiran 5.

Hasil evaluasi kapasitas aksial dan lentur kolom pada bangunan gedung hotel di Ngampilan, Yogyakarta berdasarkan diagram interaksi kolom yang berada diluar kurva biru sehingga kapasitas aksial dan lentur kolom tidak memenuhi persyaratan sesuai SNI 2847:2019. Oleh karena itu, dilakukan perkuatan menggunakan CFRP sesuai SNI 8971:2021 untuk meningkatkan kapasitas aksial dan lentur kolom. Analisis perkuatan menggunakan kolom tipe K2(M) sebagai contoh perhitungan karena kolom arah X tersebut terdapat titik yang berada di luar kurva biru diagram interaksi kolom. Perkuatan dilakukan menggunakan CFRP tipe SIKA *Wrap* 600C sebanyak tiga lapisan dengan ketebalan 0,331 mm. Hasil analisis menunjukkan peningkatan kapasitas aksial dan lentur kolom pada kondisi tekan sentris (titik A), kondisi tekan dominan (titik B), kondisi seimbang (C), kondisi tarik dominan (titik 4) dan kondisi tarik konsentris (titik 5) sehingga titik – titik pembebanan yang sebelumnya berada diluar kurva menjadi berada di dalam kurva diagram interaksi setelah perkuatan. Hal ini menunjukkan bahwa penggunaan CFRP efektif dalam meningkatkan kapasitas aksial dan lentur tanpa menambah dimensi maupun berat struktur secara signifikan sehingga sesuai digunakan sebagai metode perkuatan pada bangunan gedung hotel di Ngampilan, Yogyakarta yang mengalami peningkatan beban akibat penambahan lantai.

11. Pengecekan syarat kolom kuat – balok lemah (*Strong Column Weak Beam* (SCWB)) setelah perkuatan struktur

Pengecekan SCWB setelah perkuatan struktur dilakukan pada kolom K2(M) sebagai contoh perhitungan.

Momen nominal pada kolom sumbu X, $M_{nc,X}$ = 1201,114 kNm
lantai atas

Momen nominal pada kolom sumbu Y, $M_{nc,Y}$ lantai atas = 1201,114 kNm

Momen nominal pada kolom sumbu X, $M_{nc,X}$ lantai yang ditinjau = 2046,178 kNm

Momen nominal pada kolom sumbu Y, $M_{nc,Y}$ lantai yang ditinjau = 515,598 kNm

Momen nominal tumpuan (-) balok arah Y, $M_{nb3,Y}^-$ = 722,271 kNm

Momen nominal tumpuan (+) balok arah Y, $M_{nb5,Y}^+$ = 598,469 kNm

Momen nominal tumpuan (-) balok arah X, $M_{nb4,X}^-$ = 658,276 kNm

Momen nominal tumpuan (+) balok arah X, $M_{nb4,X}^+$ = 296,309 kNm

Cek syarat kolom kuat balok lemah $\sum M_{nc} \geq 1,2 \sum M_{nb}$

a. Sumbu-X

$$\begin{aligned}
 \sum M_{nc,x} &= M_{nc,x} \text{ lantai yang ditinjau} + M_{nc,x} \text{ lantai atas} \\
 &= 2046,178 + 1201,114 \\
 &= 3247,292 \text{ kNm} \\
 1,2 \sum M_{nb} &= 1,2 \times (722,271 + 598,469) \\
 &= 1584,888 \text{ kNm} \\
 \sum M_{nc,y} &\geq 1,2 \sum M_{nb} \\
 3247,292 \text{ kNm} &\geq 1584,888 \text{ kNm (Memenuhi)}
 \end{aligned}$$

b. Sumbu-Y

$$\begin{aligned}
 \sum M_{nc,y} &= M_{nc,y} \text{ lantai yang ditinjau} + M_{nc,y} \text{ lantai atas} \\
 &= 515,598 + 1201,114 \\
 &= 1716,712 \text{ kNm} \\
 1,2 \sum M_{nb} &= 1,2 \times (658,276 + 296,309) \\
 &= 1145,503 \text{ kNm} \\
 \sum M_{nc,x} &\geq 1,2 \sum M_{nb} \\
 1716,712 \text{ kNm} &\geq 1145,503 \text{ kNm (Memenuhi)}
 \end{aligned}$$

Berdasarkan hasil pengecekan SCWB pada kolom K2(M) arah X, diperoleh jumlah momen nominal kolom sebesar 3247,292 kNm, sedangkan nilai 1,2 kali jumlah momen nominal balok sebesar 1584,888 kNm. Hal tersebut menunjukkan bahwa kapasitas lentur kolom lebih besar dibandingkan

kapasitas lentur balok, sehingga syarat SCWB pada arah X dinyatakan memenuhi. Pada kolom K2(M) arah Y, diperoleh diperoleh jumlah momen nominal kolom sebesar 1716,712 kNm, sedangkan nilai 1,2 kali jumlah momen nominal balok sebesar 1145,503 kNm. Hal tersebut menunjukkan bahwa kapasitas lentur kolom lebih besar dibandingkan kapasitas lentur balok, sehingga syarat SCWB pada arah Y dinyatakan memenuhi. Terpenuhiya syarat SCWB setelah perkuatan menunjukkan bahwa metode perkuatan yang diterapkan mampu meningkatkan kapasitas elemen struktur tanpa mengubah mekanisme keruntuhan yang diinginkan pada sistem struktur tahan gempa. Perkuatan CFRP yang diterapkan pada kolom memberikan peningkatan kapasitas aksial dan lentur kolom secara signifikan sehingga rasio kapasitas antara kolom dan balok menjadi lebih aman terhadap pengaruh beban gempa. Hasil tersebut juga menunjukkan bahwa peningkatan kapasitas balok akibat perkuatan lentur menggunakan CFRP masih berada dalam batas yang aman dan tidak menyebabkan kapasitas balok melebihi kapasitas kolom. Hasil pengecekan SCWB kolom K2(M) setelah perkuatan CFRP menunjukkan bahwa struktur bangunan gedung hotel di Ngampilan, Yogyakarta masih memenuhi prinsip kolom kuat – balok lemah.

5.4.2.2 Analisis Perkuatan Terhadap Kapasitas Geser Kolom

Analisis perkuatan kolom dilakukan untuk meningkatkan kapasitas geser terhadap gaya geser ultimit. Kolom tipe K2(M) dipilih sebagai contoh perhitungan karena kapasitas geser rencana pada daerah sendi plastis arah X tidak memenuhi ketentuan yang berlaku.

1. Data kolom K2(M)

Data kolom K2(M) adalah sebagai berikut.

Tinggi kolom, L	= 3300 mm
Lebar kolom, b	= 400 mm
Tinggi kolom, h	= 800 mm
Diameter tulangan longitudinal, d_p	= 25 mm
Diameter tulangan sengkang, d_s	= 10 mm

Selimut beton, s_b	=	40 mm
Kuat tekan beton, f'_c	=	25 MPa
Kuat leleh tulangan, f_y	=	400 MPa
Faktor reduksi, β_1	=	0,85
Modulus elastisitas baja, E	=	200000 MPa
Lebar balok kanan, $b_{b,kanan}$	=	600 mm
Lebar balok kiri, $b_{b,kiri}$	=	600 mm
Panjang bersih kolom, L_n	=	2700 mm

2. Data CFRP

Data CFRP digunakan pada perkuatan terhadap aksial dan momen pada kolom adalah sebagai berikut.

Nama bahan	=	SIKA Wrap 600C
Tipe	=	CFRP Wrap
Tebal lapisan CFRP, t_f	=	0,331 mm
Kekuatan tarik CFRP, f_{fu}^*	=	4000 MPa
Ragangan putus CFRP, ε_{fu}^*	=	0,021
Modulus elastisitas CFRP, E_f	=	230000 MPa
Faktor reduksi lingkungan, C_E	=	0,95
Tinggi efektif CFRP, d_{fv}	=	800 mm

3. Menghitung propertis CFRP

Menghitung desain kuat tarik ultimit CFRP

$$\begin{aligned}
 f_{fu} &= C_E \times f_{fu}^* \\
 &= 0,95 \times 4000 \\
 &= 3800 \text{ MPa}
 \end{aligned}$$

Menghitung desain regangan putus CFRP

$$\begin{aligned}
 \varepsilon_{fu} &= C_E \times \varepsilon_{fu}^* \\
 &= 0,95 \times 0,021 \\
 &= 0,020 \text{ MPa}
 \end{aligned}$$

4. Menghitung regangan CFRP geser efektif

Untuk kondisi dimana gaya yang bekerja merupakan kombinasi dari gaya geser kolom, maka regangan efektif CFRP ditentukan dengan mengambil nilai terkecil antara $\varepsilon_{fe} = 0,75 \times \varepsilon_{fu}$ dan $\varepsilon_{fe} = 0,004$

$$\begin{aligned}\varepsilon_{fe} &= 0,75 \times \varepsilon_{fu} \\ &= 0,75 \times 0,020 \\ &= 0,012 \\ \varepsilon_{fe} &= 0,004\end{aligned}$$

Maka nilai regangan efektif CFRP yang digunakan sebesar 0,004.

5. Menghitung kontribusi perkuatan CFRP terhadap kekuatan geser balok

Jumlah lapis CFRP

$$n_f = 2 \text{ lapisan}$$

Lebar CFRP

$$w_f = 400 \text{ mm}$$

Spasi antar lembar CFRP

$$s_f = 400 \text{ mm}$$

Luas CFRP

$$\begin{aligned}A_{fv} &= 2 \times n \times t_f \times w_f \\ &= 2 \times 2 \times 0,331 \times 400 \\ &= 529,6 \text{ mm}^2\end{aligned}$$

Kekuatan tarik CFRP untuk desain geser

$$\begin{aligned}f_{fe} &= \varepsilon_{fe} \times E_f \\ &= 0,004 \times 230000 \\ &= 920 \text{ MPa}\end{aligned}$$

Kapasitas geser CFRP

$$\begin{aligned}V_f &= \frac{A_{fv} \times f_{fe} \times d_f}{s_f} \\ &= \frac{529,6 \times 920 \times 800}{400} \\ &= 974464 \text{ N}\end{aligned}$$

Kapasitas geser tulangan

$$V_s = 463385 \text{ N}$$

Kapasitas geser beton

$$V_c = 256389 \text{ N}$$

Faktor reduksi CFRP

$$\Psi = 0,85$$

Faktor reduksi geser

$$\emptyset = 0,75$$

Gaya geser nominal

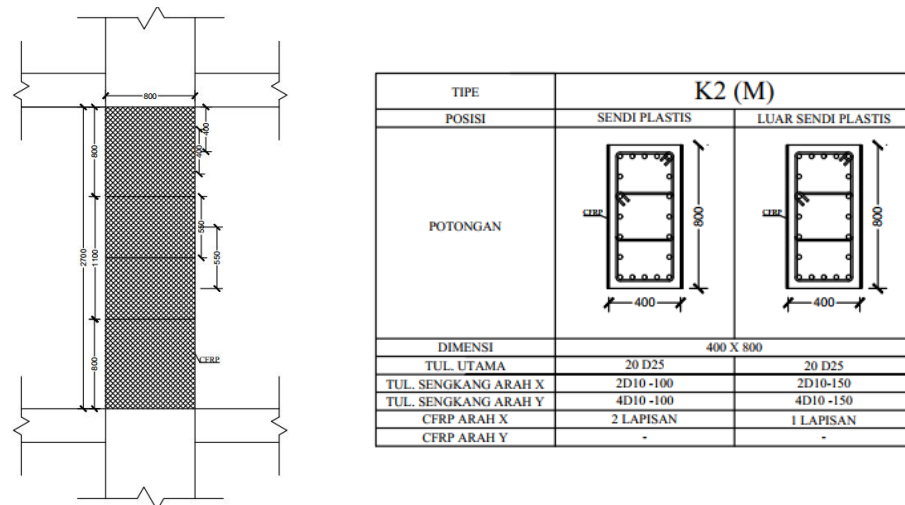
$$\begin{aligned} V_n &= V_c + V_s + \Psi_f V_f \\ &= 256389 + 463385 + 0,85 \times 974464 \\ &= 1548068 \text{ N} \\ &= 1548,068 \text{ kN} \\ \emptyset V_{n,CFRP} &= 0,75 \times 1548,068 \\ &= 1161,051 \text{ kN} \end{aligned}$$

6. Menghitung nilai rasio kapasitas geser kolom

Rasio kapasitas geser kolom

$$\begin{aligned} R &= \frac{V_{u,sendi \text{ plastis}}}{\emptyset V_{n,CFRP}} \\ &= \frac{890,811}{1161,051} \\ &= 0,767 < 1 \text{ (Memenuhi)} \end{aligned}$$

Perkuatan menggunakan CFRP pada kolom tipe K2(M) arah X daerah sendi plastis ditunjukkan pada Gambar 5.10 berikut.



Gambar 5. 10 Gambar Perkuatan CFRP terhadap Kapasitas Geser pada Kolom K2(M) arah X

Untuk gambar perkuatan CFRP terhadap kapasitas geser pada tipe kolom lainnya dapat dilihat pada Lampiran 5.

Analisis perkuatan terhadap kapasitas geser pada tipe kolom lainnya dilakukan dengan prosedur perhitungan yang sama. Rekapitulasi hasil perkuatan kapasitas geser kolom untuk seluruh tipe kolom disajikan pada Tabel 5.21 berikut.

Tabel 5. 21 Rekapitulasi Kapasitas Geser Balok Setelah Perkuatan

Kode Kolom	Lantai	Letak	Kapasitas GeserArah X						
			$V_{u,X}$ (kN)	$\phi V_{n,X}$ (kN)	$\phi V_{n,X CFRP}$ (kN)	N (Lapisan)	R	Peningkatan (%)	Ket
K1	M	Sendi plastis	1361,123	1081,401	1392,011	1	0,978	29%	M
		Luar sendi plastis	957,827	849,708	1160,319	1	0,825	37%	M
K1	L2	Sendi plastis	1035,951	545,768	1042,223	4	0,994	91%	M
		Luar sendi plastis	729,003	429,922	802,263	3	0,909	87%	M
K1	L3-A	Sendi plastis	697,005	540,586	851,196	1	0,819	57%	M
		Luar sendi plastis	490,485	424,739	735,350	1	0,667	73%	M
K2	M	Sendi plastis	890,811	539,830	1161,051	2	0,767	115%	M
		Luar sendi plastis	626,867	423,984	734,595	1	0,853	73%	M
K2	L2-L3	Sendi plastis	825,235	535,833	846,443	1	0,975	58%	M
		Luar sendi plastis	580,721	419,986	730,597	1	0,795	74%	M
K2	L4-A	Sendi plastis	616,018	535,793	846,404	1	0,728	58%	M
		Luar sendi plastis	433,494	419,947	730,558	1	0,593	74%	M
K4	M-A	Sendi plastis	477,187	465,180	736,964	1	0,648	58%	M
K8	L2	Sendi plastis	1111,727	535,601	1156,822	2	0,961	116%	M
		Luar sendi plastis	782,326	419,755	1040,976	2	0,752	148%	M
K8	L3	Sendi plastis	958,025	542,446	1163,667	2	0,823	115%	M
		Luar sendi plastis	674,166	426,600	1047,821	2	0,643	146%	M
K8	L4-A	Sendi plastis	775,859	535,685	846,296	1	0,917	58%	M
		Luar sendi plastis	545,975	419,839	730,450	1	0,747	74%	M

Kode Kolom	Lantai	Letak	Kapabilitas GeserArah Y						
			$V_{u,Y}$ (kN)	$\phi V_{n,Y}$ (kN)	$\phi V_{n,Y CFRP}$ (kN)	N (Lapisan)	R	Peningkatan (%)	Ket
K1	M	Sendi plastis	1365,593	1081,401	1392,011	1	0,981	29%	M
		Luar sendi plastis	960,973	849,708	1160,319	1	0,828	37%	M
K1	L2	Sendi plastis	419,821	408,801	470,858	1	0,892	15%	M
K6	M-A	Sendi plastis	109,302	84,136	161,788	1	0,676	92%	M
		Luar sendi plastis	85,013	62,066	139,719	1	0,608	125%	M
K8	L2	Sendi plastis	504,835	404,149	559,454	1	0,902	38%	M
		Luar sendi plastis	355,254	298,120	453,425	1	0,783	52%	M

dengan :

M : Memenuhi

Hasil evaluasi kapasitas geser kolom pada bangunan gedung hotel di Ngampilan, Yogyakarta, diketahui bahwa beberapa tipe kolom memiliki nilai rasio kapasitas lebih dari satu ($R > 1$), sehingga kapasitas geser kolom tidak memenuhi persyaratan sesuai SNI 2847:2019. Oleh karena itu, dilakukan perkuatan menggunakan CFRP sesuai SNI 8971:2021 untuk meningkatkan kapasitas geser kolom. Analisis perkuatan menggunakan kolom tipe K2(M) arah X sebagai contoh perhitungan karena kolom tersebut tidak memenuhi kapasitas geser pada daerah sendi plastis. Perkuatan dilakukan menggunakan CFRP tipe SIKA *Wrap* 600C sebanyak dua lapisan dengan ketebalan 0,331 mm pada daerah sendi plastis. Hasil analisis menunjukkan bahwa setelah dilakukan perkuatan, kapasitas geser meningkat menjadi 1161,051 kN dengan nilai rasio kapasitas sebesar 0,767 ($R < 1$), sehingga kapasitas geser kolom arah X dinyatakan memenuhi persyaratan.

Berdasarkan rekapitulasi hasil analisis seluruh tipe kolom pada Tabel 5.21, seluruh kolom yang sebelumnya tidak memenuhi kapasitas geser mengalami peningkatan kapasitas setelah dilakukan perkuatan CFRP. Setelah dilakukan perkuatan, seluruh tipe kolom memiliki nilai rasio kapasitas kurang dari satu ($R < 1$), sehingga dinyatakan memenuhi persyaratan kapasitas geser. Hasil analisis menunjukkan bahwa penggunaan CFRP efektif dalam meningkat kapasitas geser kolom sebesar 15% hingga 148% dengan peningkatan terbesar pada kolom K8(L2) arah X dan peningkatan terkecil pada kolom K1 (L2) arah Y pada kolom tanpa menambah dimensi maupun berat struktur secara signifikan sehingga sesuai digunakan sebagai metode perkuatan pada bangunan gedung hotel di Ngampilan, Yogyakarta yang mengalami peningkatan beban akibat penambahan lantai.

BAB VI

KESIMPULAN

6.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisis elemen struktur balok dan kolom terhadap bangunan gedung hotel yang mengalami penambahan lantai yang telah dilakukan, dapat disimpulkan beberapa hal sebagai berikut.

1. Hasil analisis struktur menunjukkan bahwa beberapa elemen balok dan kolom tidak memenuhi standar kapasitas struktur sesuai SNI 2847:2019. Pada elemen balok, tipe balok B1, B2, B3, B4, B5, B6, B7, B9 dan B11 tidak memenuhi kapasitas lentur, sedangkan tipe balok B2, B4 dan B11 tidak memenuhi kapasitas geser. Hal ini ditunjukkan oleh nilai rasio kapasitas yang lebih dari satu ($R > 1$).

Pada elemen kolom, hasil analisis menunjukkan bahwa kolom tidak memenuhi kapasitas aksial – lentur arah X dengan tipe kolom K2(M), K2(L2-L3), K2(L4-A) dan K4, serta untuk arah Y dengan tipe kolom K1(L2), K1(L3-A), K2(L2-L3), K4, K5, K6, K7, K8(L3) dan K8(L4-A). Hal ini menunjukkan beberapa titik pembebanan berada di luar kurva pada diagram interaksi kolom, sehingga kolom tidak mampu menahan beban tambahan akibat penambahan lantai. Sedangkan analisis kapasitas geser kolom menunjukkan bahwa kolom arah X dengan tipe kolom K1(M), K1(L2), K1(L3-A), K2(M), K2(L2-L3), K2(L4-A), K4, K8(L2), K8(L3) dan K8(L4-A), serta arah Y dengan tipe kolom K1(M), K1(L2), K6 dan K8(L2) tidak memenuhi kapasitas geser yang ditunjukkan oleh nilai rasio kapasitas yang lebih dari satu ($R > 1$).

2. Perkuatan struktur menggunakan CFRP mampu meningkatkan kapasitas elemen struktur. Setelah dilakukan perkuatan, kapasitas lentur dan geser balok serta kapasitas aksial, lentur dan geser kolom mengalami peningkatan sehingga nilai rasio kapasitas memenuhi persyaratan struktur yang sesuai SNI 2847:2019, yaitu memiliki nilai rasio kapasitas kurang dari satu ($R < 1$).

Pada elemen balok, perkuatan dengan menggunakan CFRP *Laminate Tape* ketebalan 1,2 mm per lapisan mampu meningkatkan kapasitas lentur balok sebesar 28% hingga 131%. Peningkatan terbesar terjadi pada balok B5, sedangkan peningkatan terkecil terjadi pada balok B3. Selain itu, penggunaan CFRP *Wrap* 600C dengan ketebalan 0,331 mm mampu meningkatkan kapasitas geser balok sebesar 29% hingga 45%. Peningkatan terbesar terjadi pada balok B11, sedangkan peningkatan terkecil terjadi pada balok B4.

Pada elemen kolom, penggunaan CFRP *Wrap* 600C dengan ketebalan 0,331 mm mampu meningkatkan kapasitas aksial-lentur kolom. Peningkatan kapasitas aksial sebesar 0,27% hingga 334% dengan peningkatan yang terbesar pada kolom K7 arah Y dan peningkatan terkecil pada kolom K6 arah Y., sedangkan peningkatan kapasitas momen lentur sebesar 14% hingga 443% dengan peningkatan yang terbesar pada kolom K7 arah Y dan peningkatan terkecil pada kolom K2 (L2-L3). Selain itu, kapasitas geser juga meningkat sebesar 15% hingga 148% dengan peningkatan terbesar pada kolom K8(L2) arah X dan peningkatan terbesar pada kolom K1 (L2) arah Y. Dengan demikian, metode perkuatan menggunakan CFRP dinilai efektif untuk meningkatkan kapasitas kekuatan struktur akibat penambahan beban karena pertambahan lantai tanpa menambah dimensi dan berat struktur secara signifikan.

6.2 Saran

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, beberapa hal yang bisa dijadikan sebagai saran untuk penelitian kedepannya, mengenai perkuatan elemen struktur balok dan kolom adalah sebagai berikut.

1. Untuk melakukan studi perkuatan CFRP dengan berbagai variasi bentuk penampang balok dan kolom, sehingga data diketahui pengaruh perkuatan CFRP terhadap peningkatan kapasitas struktur pada berbagai variasi bentuk elemen struktur.
2. Untuk melakukan analisis biaya atau penyusunan Rencana Anggaran Biaya (RAB) pada pekerjaan perkuatan menggunakan CFRP, sehingga dapat diketahui aspek ekonomi dari penerapan metode perkuatan tersebut.

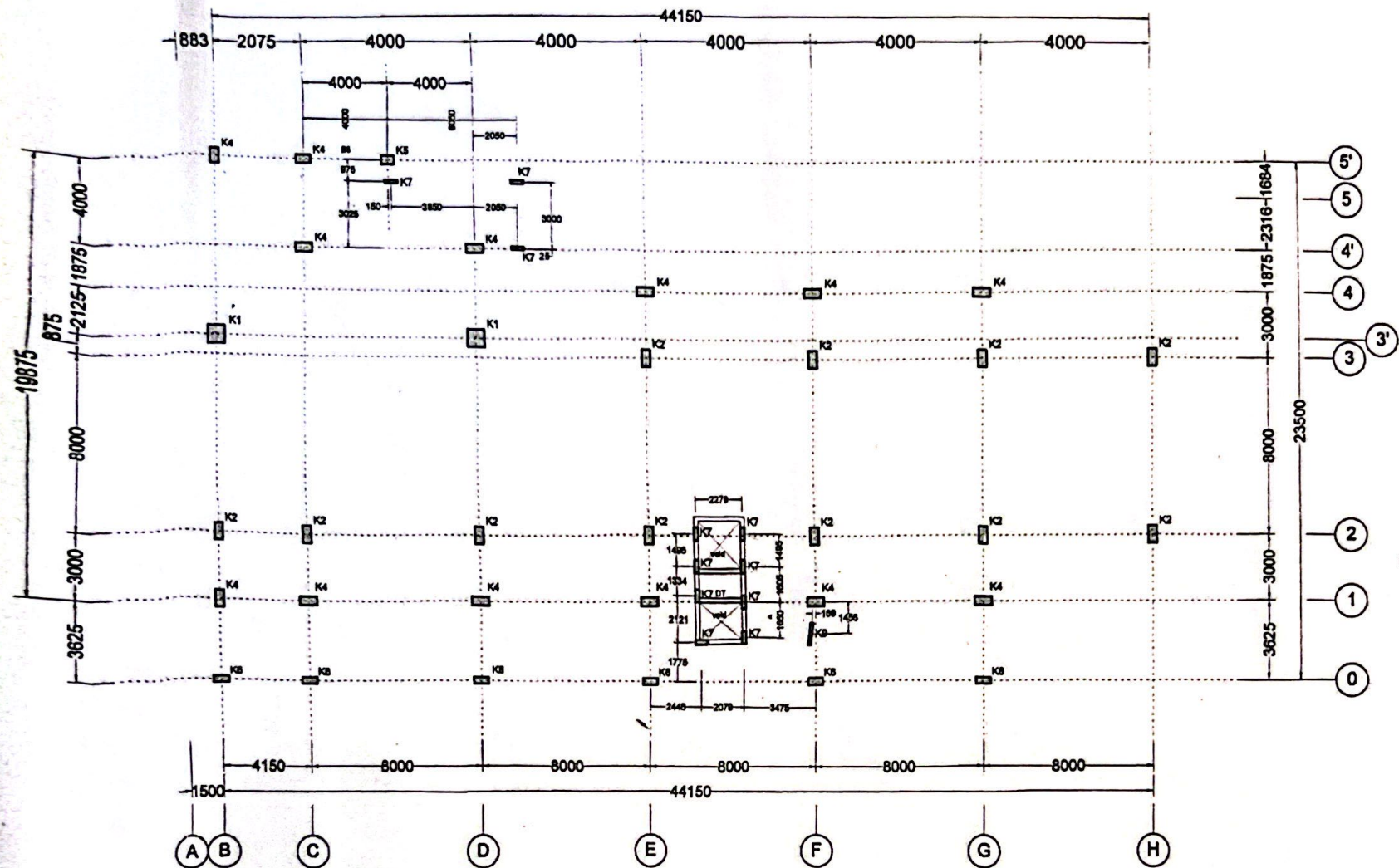
DAFTAR PUSTAKA

- Alhaddad, M. S., Binyahya, A. S., Alrubaidi, M., & Abadel, A. A. (2021). Seismic Performance of R.C Buildings with Beam-Column Joints Upgraded Using FRP Laminates. *Journal of King Saud University - Engineering Sciences*, 33(6), 386–395. <https://doi.org/10.1016/j.jksues.2020.05.008>
- Badan Standardisasi Indonesia. (2020). Beban Desain Minimum Dan Kriteria Terkait Untuk Bangunan Gedung dan Struktur Lain (SNI 1727:2020). *Jakarta*.
- Badan Standarisasi Nasional. (2019a). Persyaratan Beton Struktural Untuk Bangunan Gedung dan Penjelasan (SNI 2847:2019). *Jakarta*.
- Badan Standarisasi Nasional. (2019b). Tata Cara Perencanaan Ketahanan Gempa Untuk Struktur Bangunan Gedung dan Non Gedung (SNI 1726:2019). *Jakarta*.
- Badan Standarisasi Nasional. (2021). Pedoman Perancangan Dan Pelaksanaan Sistem Lembaran Serat Berpolimer Terletak Eksternal Untuk Perkuatan Struktur Beton (SNI 8971:2021). *Jakarta*.
- Departemen Pekerjaan Umum. (1983). PERATURAN PEMBEBANAN INDONESIA UNTUK GEDUNG. *Jakarta*.
- Hannanto, A. (2020). Analisis dan Desain Retrofitting Struktur Gedung Apartemen The Conexio LRT Superblock Menggunakan Material Carbon Fiber Reinforced Polymer Akibat Pembebanan Gempa SNI 1726-201X. *Institut Teknologi Sepuluh Nopember*.
- Hirwo, N., & Rozak, A. (2022). Evaluasi Perkuatan Struktur Menggunakan Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP) Pada Struktur Beton Bertulang Proyek Transformasi Gedung Sarinah Thamrin, Jakarta Pusat. *Jurnal Ismetek*, 14(2), 75–80.
- Iswandi Imran, E. Z. (2019). *Perencanaan Dasar Struktur Beton Bertulang*. ITB Press.
- Khoeri, H. (2021). Pemilihan Metode Perbaikan Dan Perkuatan Struktur Akibat Gempa (Studi Kasus Pada Bank Sulteng Palu). *Konstruksia*, 12(1), 93–104. <https://doi.org/10.24853/jk.12.1.93-104>

- Natraj, K., Elavenil, S., & Ragavendra, S. (2022). Analysis and Design of Multi-Story Building Retrofitted with Carbon Fibre Reinforced Polymer. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1125(1), 0–12. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1125/1/012021>
- Nicko, A. (2019). Pengaruh Penambahan Lantai Terhadap Kolom Pendek Akibat Kombinasi Beban Aksial dan Lateral. *Universitas Islam Riau*.
- Salam, S. I. (2023). Perkuatan Komponen Struktur Balok dan Kolom Bangunan Gedung Dengan Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP). Skripsi. *Universitas Gadjah Mada. Yogyakarta*.
- Valentina, G., Poiani, M., Clementi, F., Pace, G., & Lenci, S. (2019). Influence of FE Modelling Approaches on Vulnerabilities of RC School Buildings and Proposal of a CFRP Retrofitting Intervention. *The Open Construction and Building Technology Journal*, 13(1), 269–287. <https://doi.org/10.2174/1874836801913010269>
- Wandaning, D. H. (2023). Evaluasi dan Analisis Perkuatan Struktur Gedung Menggunakan Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP). *Politeknik Negeri Jakarta*.
- Yulianto, U. (2024). Analisis Perkuatan Struktur Balok Menggunakan Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP) Pada Bangunan Villa PT. Bangun Karya Filadelfia DI Kota Denpasar-Bali. *Jurnal Ismetek*, 18(1), 10–18.

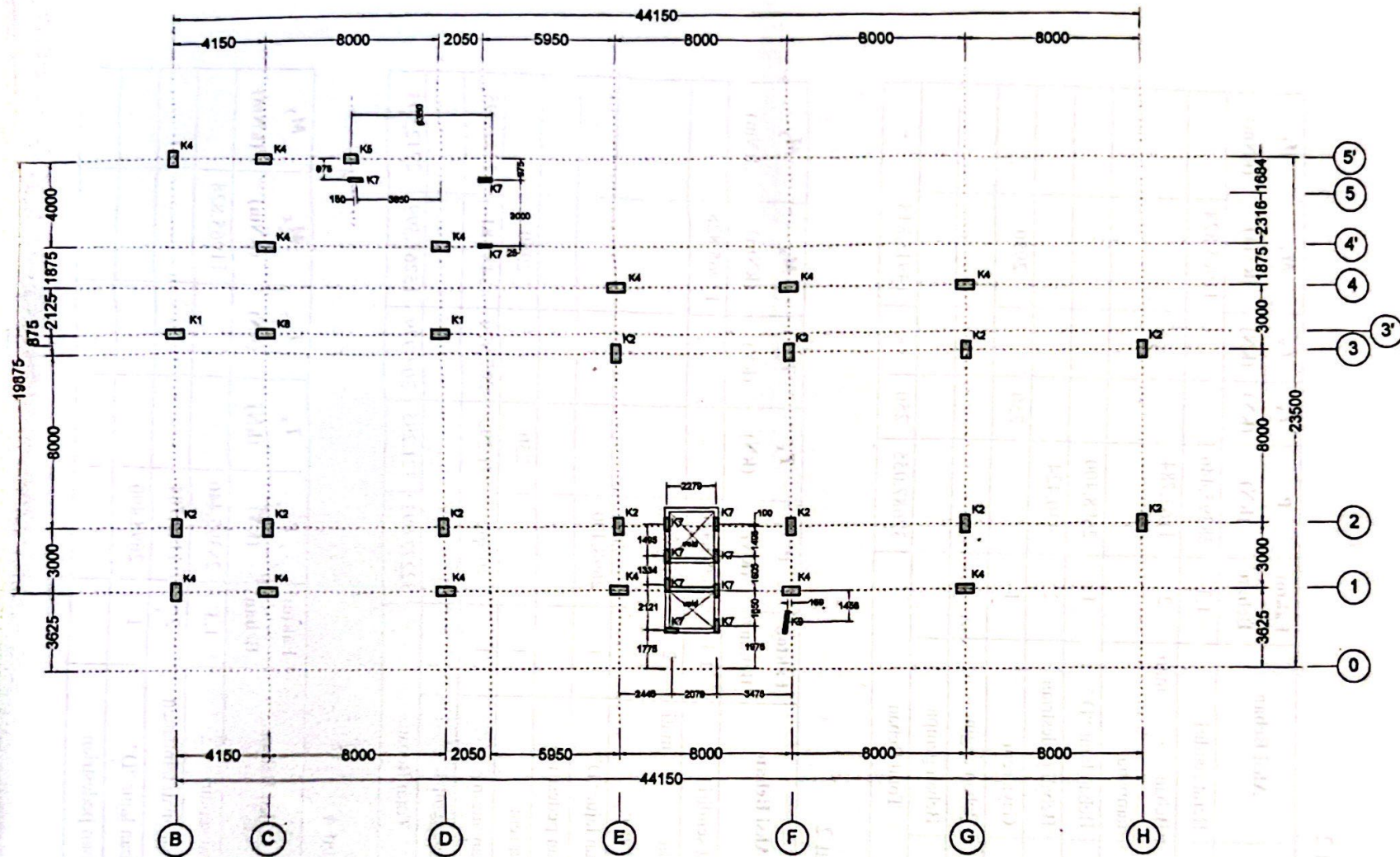
LAMPIRAN

Lampiran 1. *As Built Drawing*



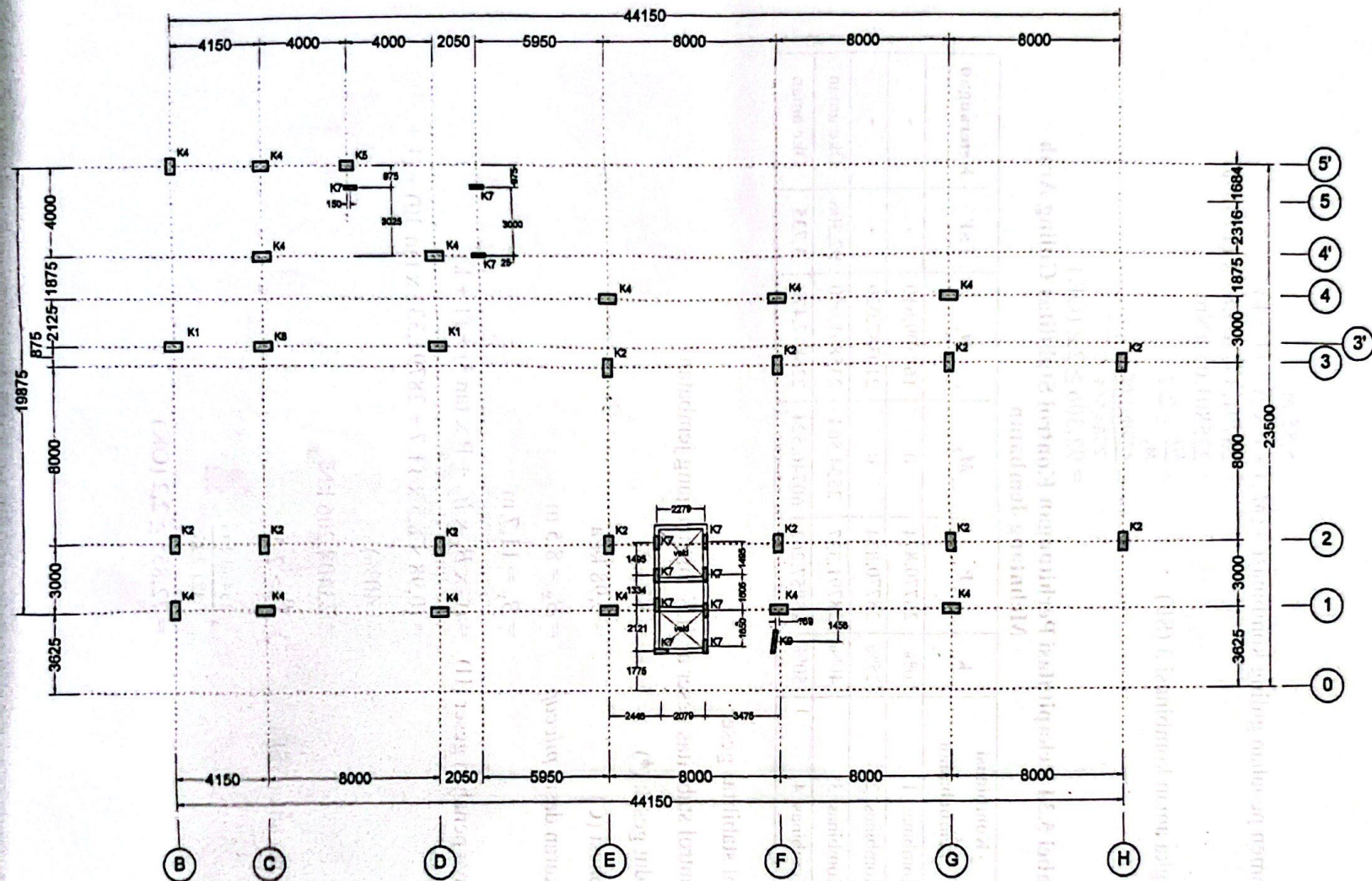

Denah Kolom elv.TOC + 2.350 & + 3.250
 SKALA 1 : 200

NO	SYMBOL	URUTAN KOLAM	KETERANGAN
1	K1	Kolam K1-800/800 mm Kolam K1-400/800 mm	Batas-batas, Struktur, Lantai 2-4
2	K2	Kolam K2-400/800 mm	
3	K3	Kolam K3-400/800 mm	
4	K4	Kolam K4-400/700 mm	
5	K5	Kolam K5-400/800 mm	Batas-batas, Struktur, Lantai 5-6
6	K6	Kolam K6-300/800 mm Kolam K6-200/800 mm	
7	K7	Kolam K7-300/800 mm	
8	K8	Kolam K8-400/800 mm	
9	K9	Kolam K9-200/1000 mm	
10	K10	Kolam K10-400/400 mm	
11	K11	Kolam K11-250/250 mm	
Batu beton P's 25 MPa			



Denah Kolom elv.TOC + 6.550
SKALA 1 : 200

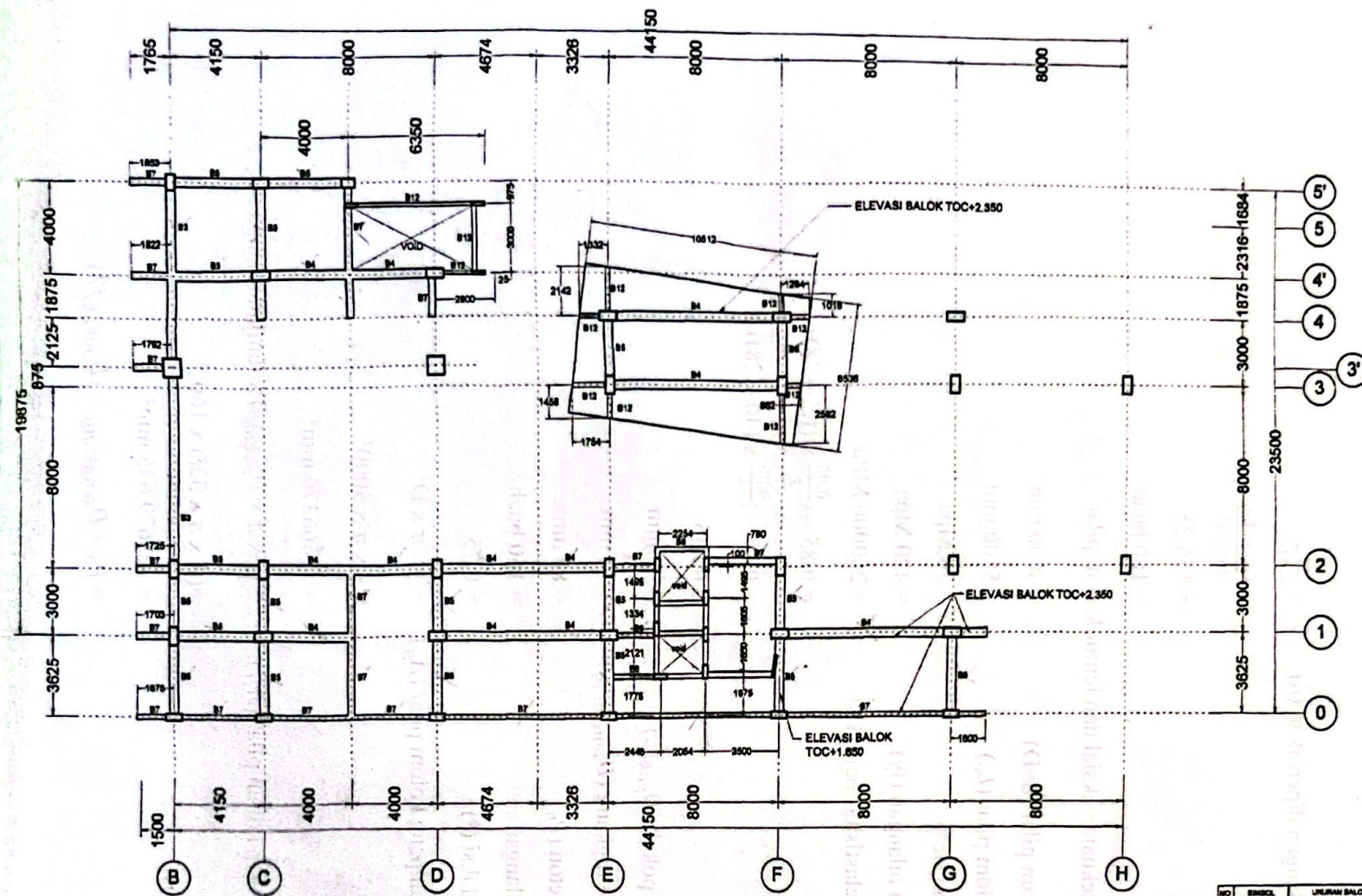
NO	SIMBOL	UJURAN KOLAM	KETERANGAN
1	K1	Kolam K1-800/800 mm Kolam K1-400/800 mm	Kolam, Bund. Kolam, Bund. Lantai 0-5
2	K2	Kolam K2-400/800 mm	
3	K3	Kolam K3-400/800 mm	
4	K4	Kolam K4-400/700 mm	
5	K5	Kolam K5-400/800 mm	
6	K6	Kolam K6-500/800 mm Kolam K6-300/800 mm	Kolam, Bund. Kolam, Bund.
7	K7	Kolam K7-300/800 mm	
8	K8	Kolam K8-400/800 mm	
9	K9	Kolam K9-300/1000 mm	
10	K10	Kolam K10-400/1000 mm	
11	K11	Kolam K11-250/250 mm	
Mutu beton Fc 28 MPa			



Denah Kolom elv.TOC + 13.150
SKALA 1 : 200

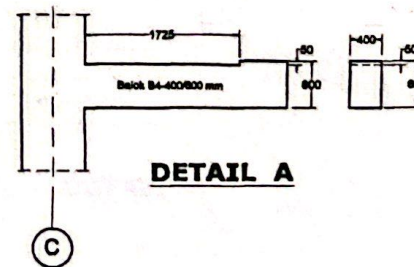
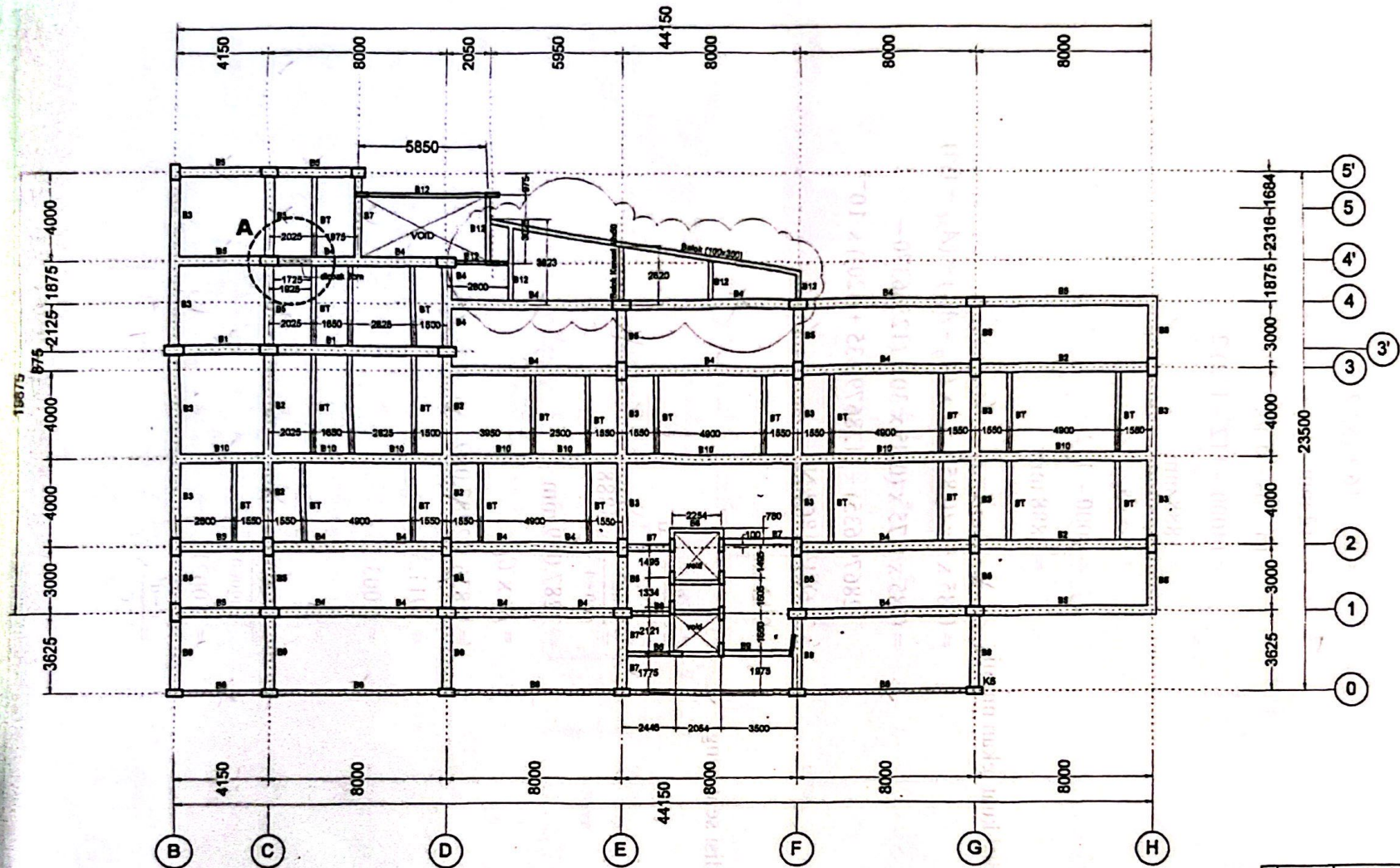
NO	SYMBOL	UJUK/AN KOLOM	KETERANGAN
1	K1	Kolom K1-800/800 mm Kolom K1-400/800 mm	Stasiun, Gmur, Lantai 01-04
2	K2	Kolom K2-400/800 mm	
3	K3	Kolom K3-400/800 mm	
4	K4	Kolom K4-400/700 mm	
5	K5	Kolom K5-400/800 mm	Stasiun, Gmur, Lantai 05-08
6	K6	Kolom K6-300/800 mm Kolom K6-200/800 mm	
7	K7	Kolom K7-200/800 mm	
8	K8	Kolom K8-400/800 mm	
9	K9	Kolom K9-200/1000 mm	
10	K10	Kolom K10-400/400 mm	
11	K11	Kolom K11-200/250 mm	

Maka dibuat 01x 01 100%



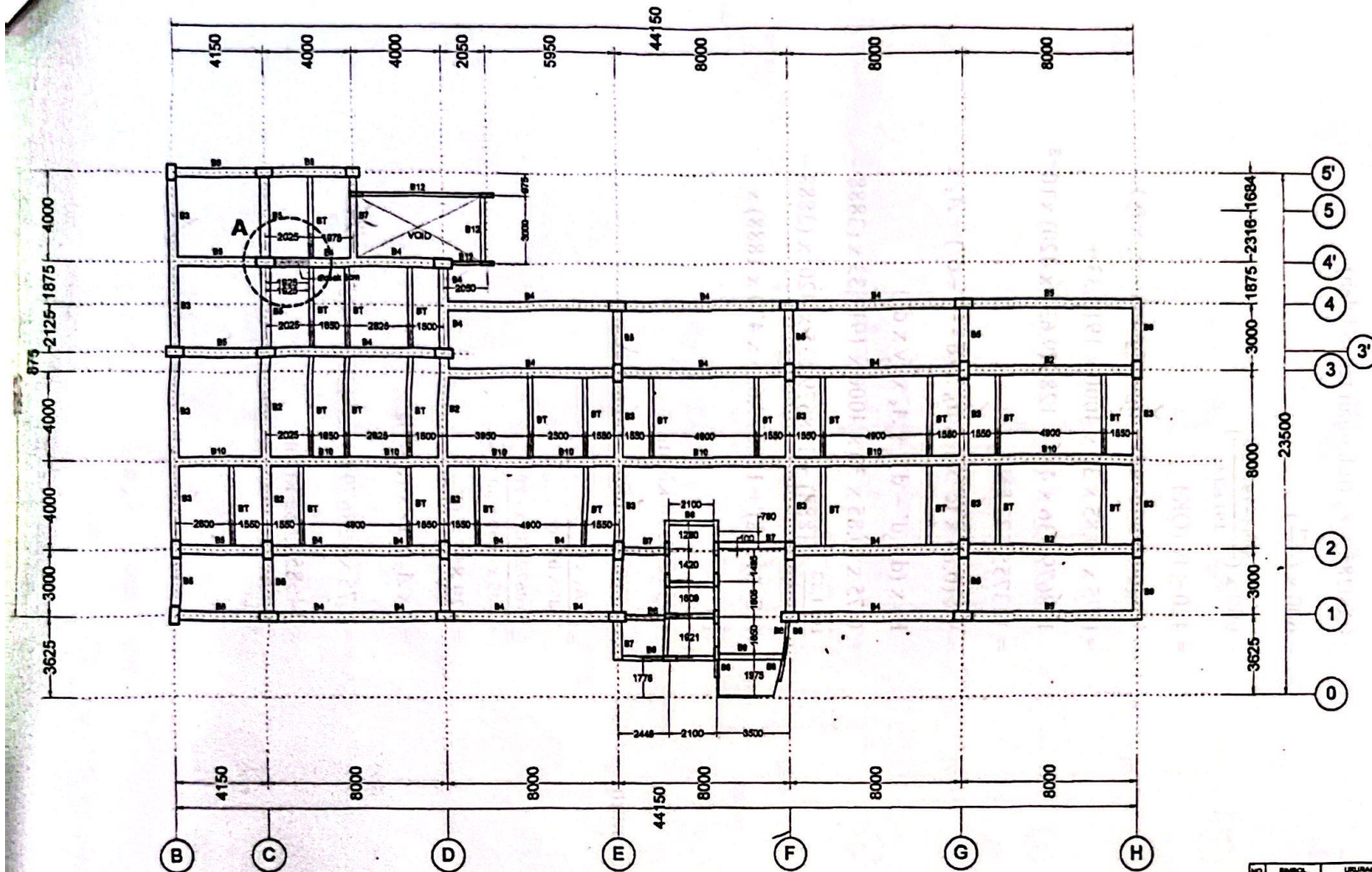
DENAH BALOK MEZZANINE elv.TOC+ 2.350 & + 3.250
 SKALA 1 : 200

NO	REMARK	URUTAN BALOK
1	D81	Dinding beton t = 200 mm
2	D82	Dinding beton t = 180 mm
3	D7	Dinding beton t = 200 mm
4	B81	Balk 400x200x19 mm
5	B82	Balk 400x200x13 mm
6	B1	Balk 81-800x800 mm
7	B2	Balk 82-400x800 mm
8	B3	Balk 83-400x800 mm
9	B4	Balk 84-400x800 mm
10	B5	Balk 85-400x800 mm
11	B6	Balk 86-300x800 mm
12	B7	Balk 87-300x800 mm
13	B8	Balk 88-400x700 mm
14	B9	Balk 89-300x800 mm
15	B10	Balk 90-400x800 mm
16	B11	Balk 91-400x700 mm
17	B12	Balk 92-250x800 mm
18	B13	Balk 93-250x800 mm
19	B7	Balk 94-300x190 mm
		Modul beton Pn 28 MPa

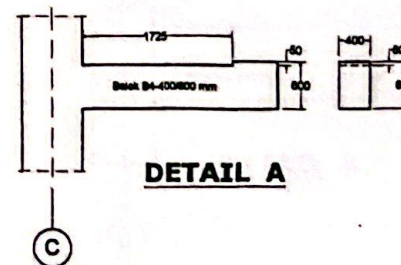


NO	BALOK	URSIAN BALOK
1	D81	Dinding beton t = 200 mm
2	D82	Dinding beton t = 150 mm
3	D7	Dinding beton t = 200 mm
4	B81	MF 400x200x13 mm
5	B82	MF 400x200x13 mm
6	B1	Balok B1-400/1200 mm
7	B2	Balok B2-400/800 mm
8	B3	Balok B3-400/800 mm
9	B4	Balok B4-400/800 mm
10	B5	Balok B5-400/800 mm
11	B6	Balok B6-300/800 mm
12	B7	Balok B7-300/800 mm
13	B8	Balok B8-400/700 mm
14	B9	Balok B9-250/800 mm
15	B10	Balok B10-400/800 mm
16	B11	Balok B11-400/700 mm
17	B12	Balok B12-250/300 mm
18	B13	Balok B13-250/400 mm
19	BT	Balok BT-300/180 mm

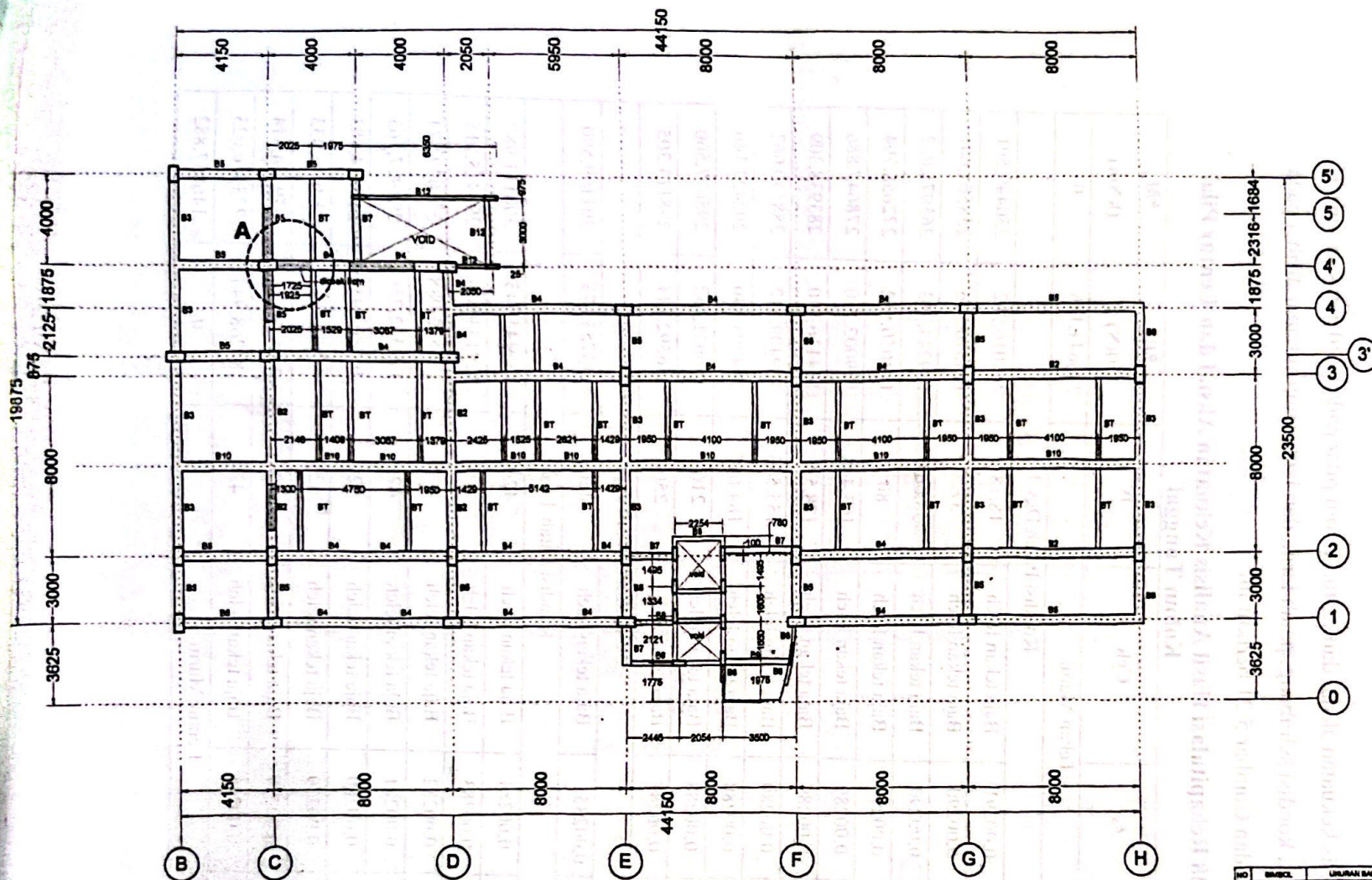
Mutu beton f'c 25 MPa



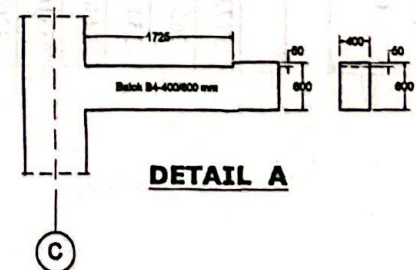
DENAH BALOK elv.TOC + 9.850
SKALA 1 : 200



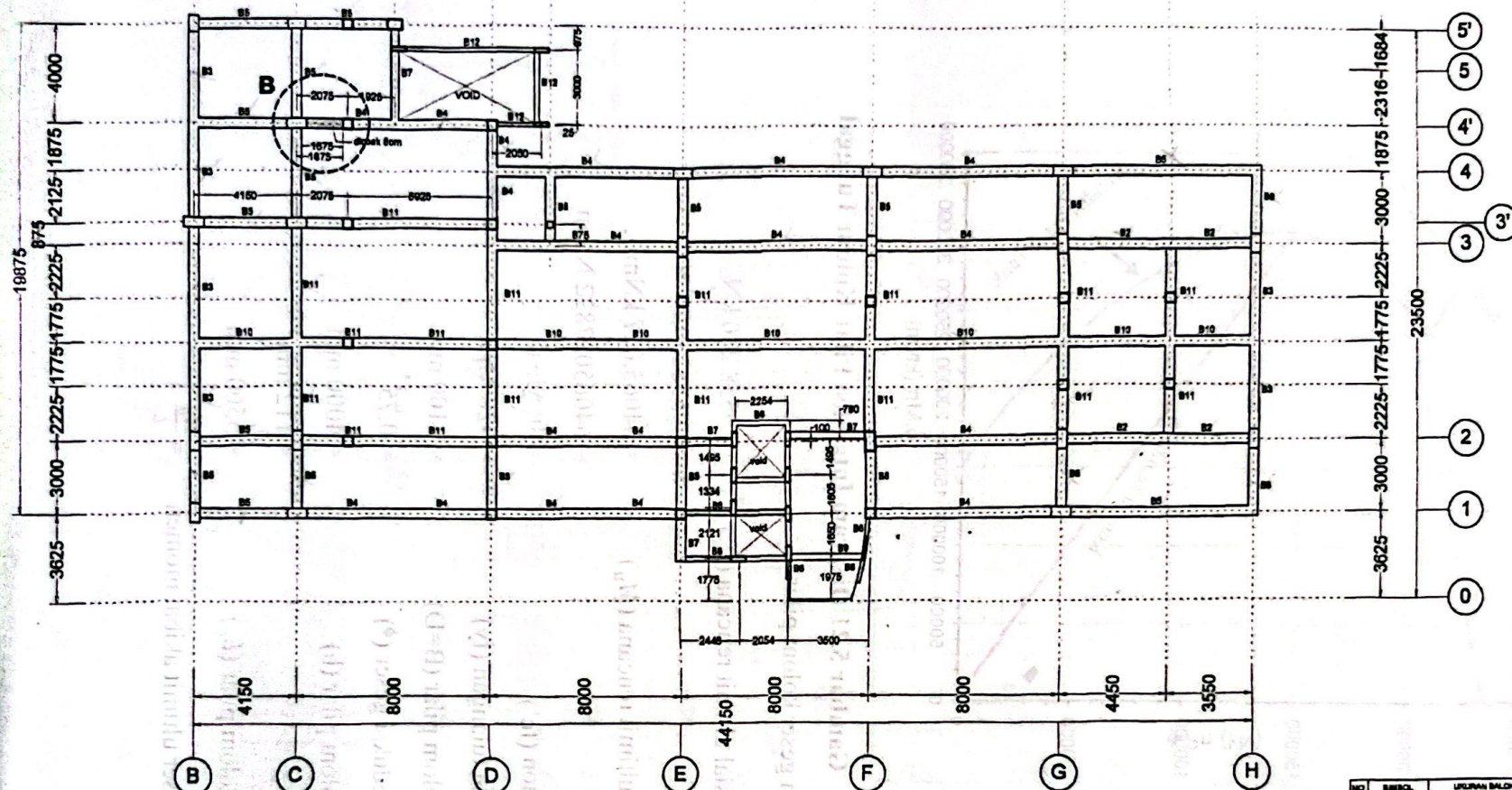
NO	BALOK	URAIAN BALOK
1	DB1	Cladding beton t = 200 mm
2	DB2	Cladding beton t = 180 mm
3	DT	Cladding beton t = 200 mm
4	SB1	WF 400x300x13 mm
5	SB2	WF 400x300x13 mm
6	B1	Balok B1-400x1200 mm
7	B2	Balok B2-400x800 mm
8	B3	Balok B3-400x800 mm
9	B4	Balok B4-400x800 mm
10	B5	Balok B5-400x800 mm
11	B6	Balok B6-200x800 mm
12	B7	Balok B7-300x800 mm
13	B8	Balok B8-400x700 mm
14	B9	Balok B9-250x800 mm
15	B10	Balok B10-400x800 mm
16	B11	Balok B11-400x700 mm
17	B12	Balok B12-350x300 mm
18	B13	Balok B13-350x400 mm
19	BT	Balok BT-300x180 mm
20		Balok beton P'v 28 MPa



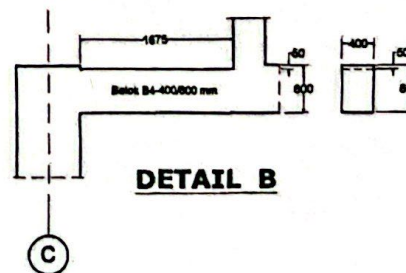
DENHA BALOK elv.TOC + 13.150
SKALA 1 : 200



NO	REVISI	URAIAN BALOK
1		DB1 Dinding beton t = 200 mm
2		DB2 Dinding beton t = 150 mm
3		DT Dinding beton t = 200 mm
4		BB1 WVF 400x200x13 mm
5		BB2 WVF 400x200x13 mm
6		B1 Balok B1-400x1200 mm
7		B2 Balok B2-400x800 mm
8		B3 Balok B3-400x800 mm
9		B4 Balok B4-400x800 mm
10		B5 Balok B5-400x800 mm
11		B6 Balok B6-200x800 mm
12		B7 Balok B7-300x800 mm
13		B8 Balok B8-400x700 mm
14		B9 Balok B9-350x800 mm
15		B10 Balok B10-400x800 mm
16		B11 Balok B11-400x700 mm
17		B12 Balok B12-350x800 mm
18		B13 Balok B13-350x400 mm
19		BT Balok BT-200x180 mm
Mutu beton f'c 25 MPa		

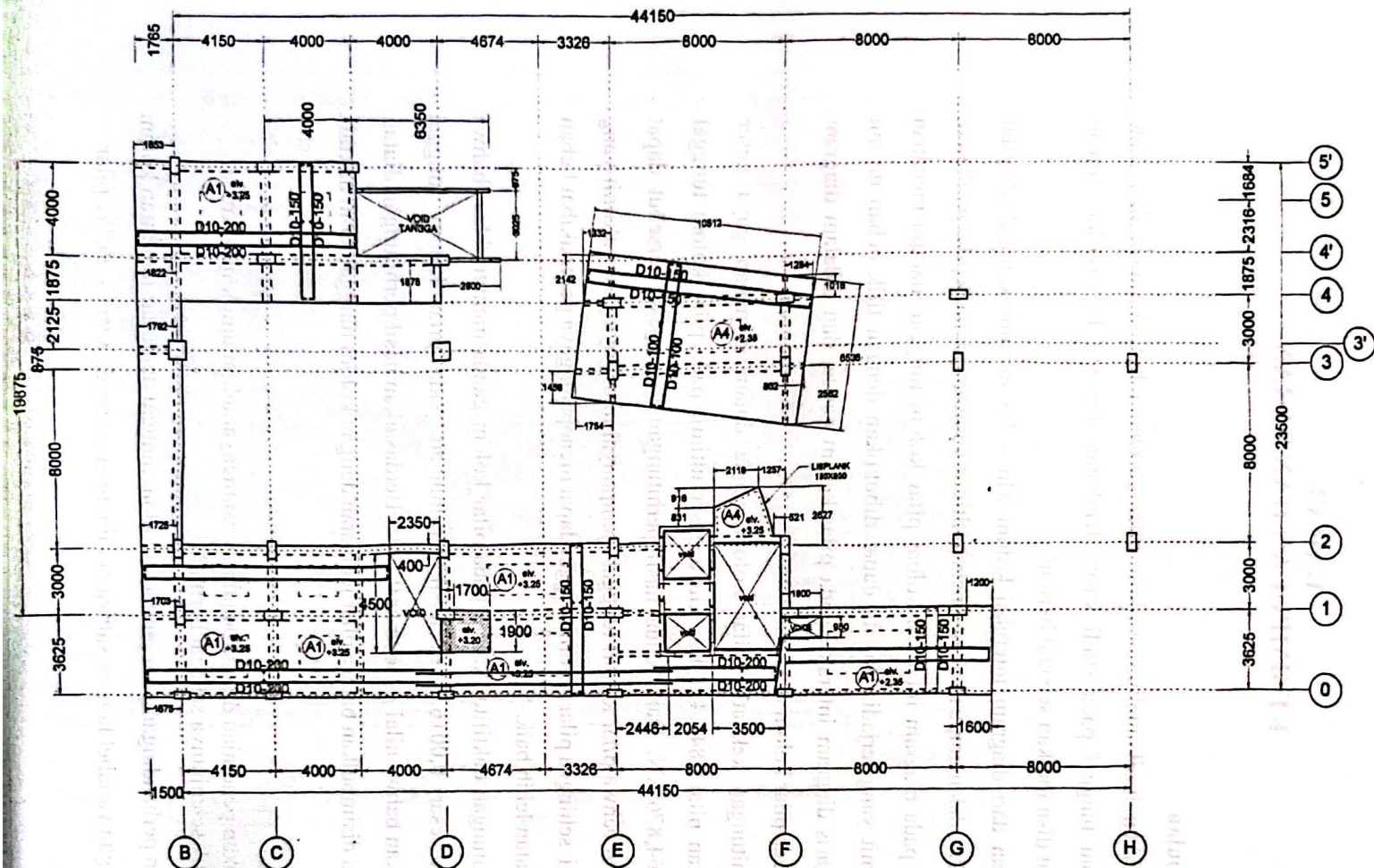


DENAH BALOK elv.TOC + 17.170
SKALA 1 : 100



NO	BALOK	UKURAN BALOK
1	D81	Cladding beton t = 200 mm
2	D82	Cladding beton t = 150 mm
3	D7	Cladding beton t = 200 mm
4	B81	WF 400x200x8x13 mm
5	B82	WF 400x200x8x13 mm
6	B1	Balok B1-400x300 mm
7	B2	Balok B2-400x600 mm
8	B3	Balok B3-400x600 mm
9	B4	Balok B4-400x600 mm
10	B5	Balok B5-400x600 mm
11	B6	Balok B6-300x600 mm
12	B7	Balok B7-300x600 mm
13	B8	Balok B8-400x700 mm
14	B9	Balok B9-250x600 mm
15	B10	Balok B10-400x600 mm
16	B11	Balok B11-400x700 mm
17	B12	Balok B12-250x300 mm
18	B13	Balok B13-250x400 mm
19	B7	Balok B7-300x160 mm

Batu beton Fc 25 MPa

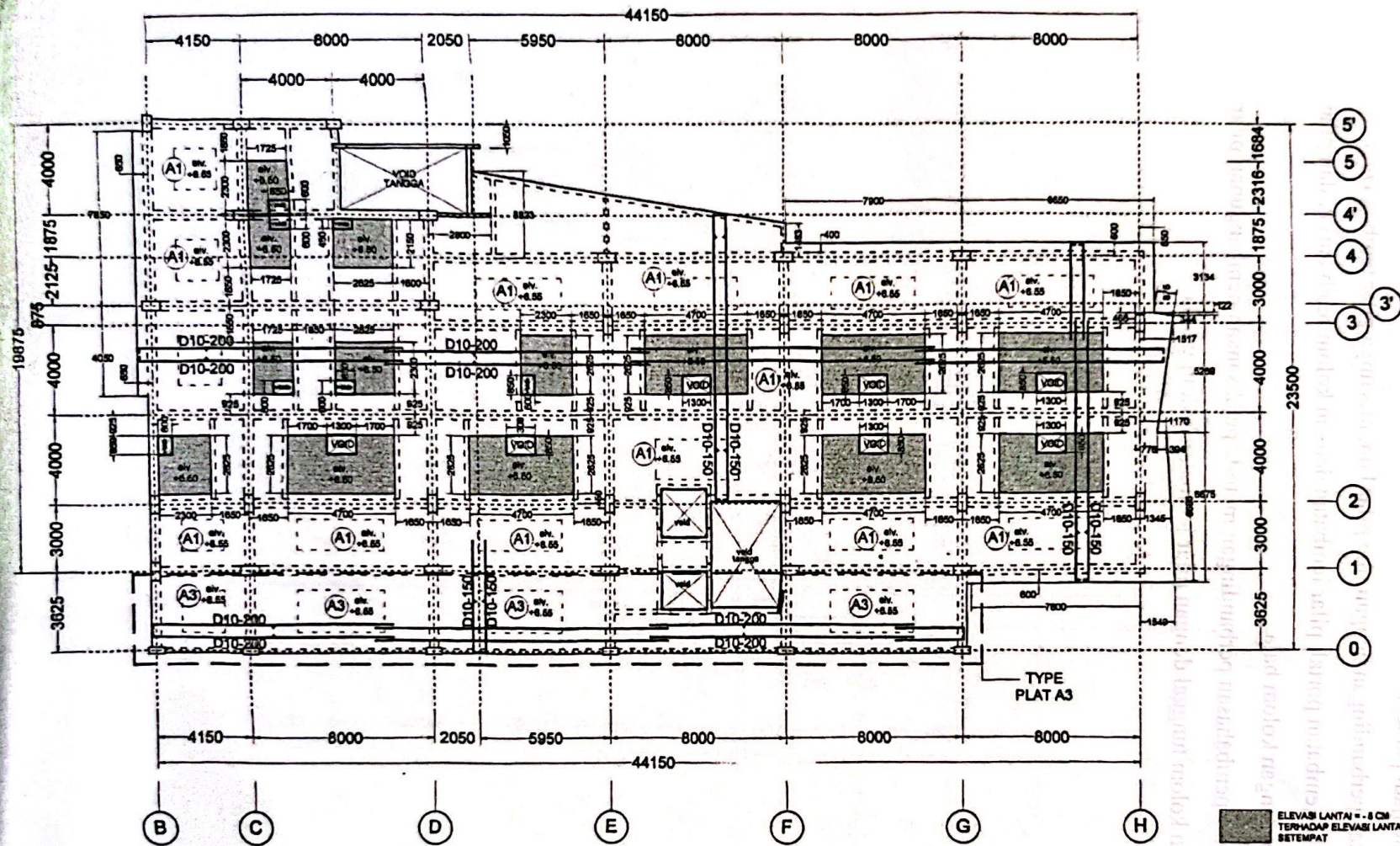


DENAH PLAT LANTAI MEZANINE elv.TOC+ 2.350 & + 3.250

SKALA 1 : 200

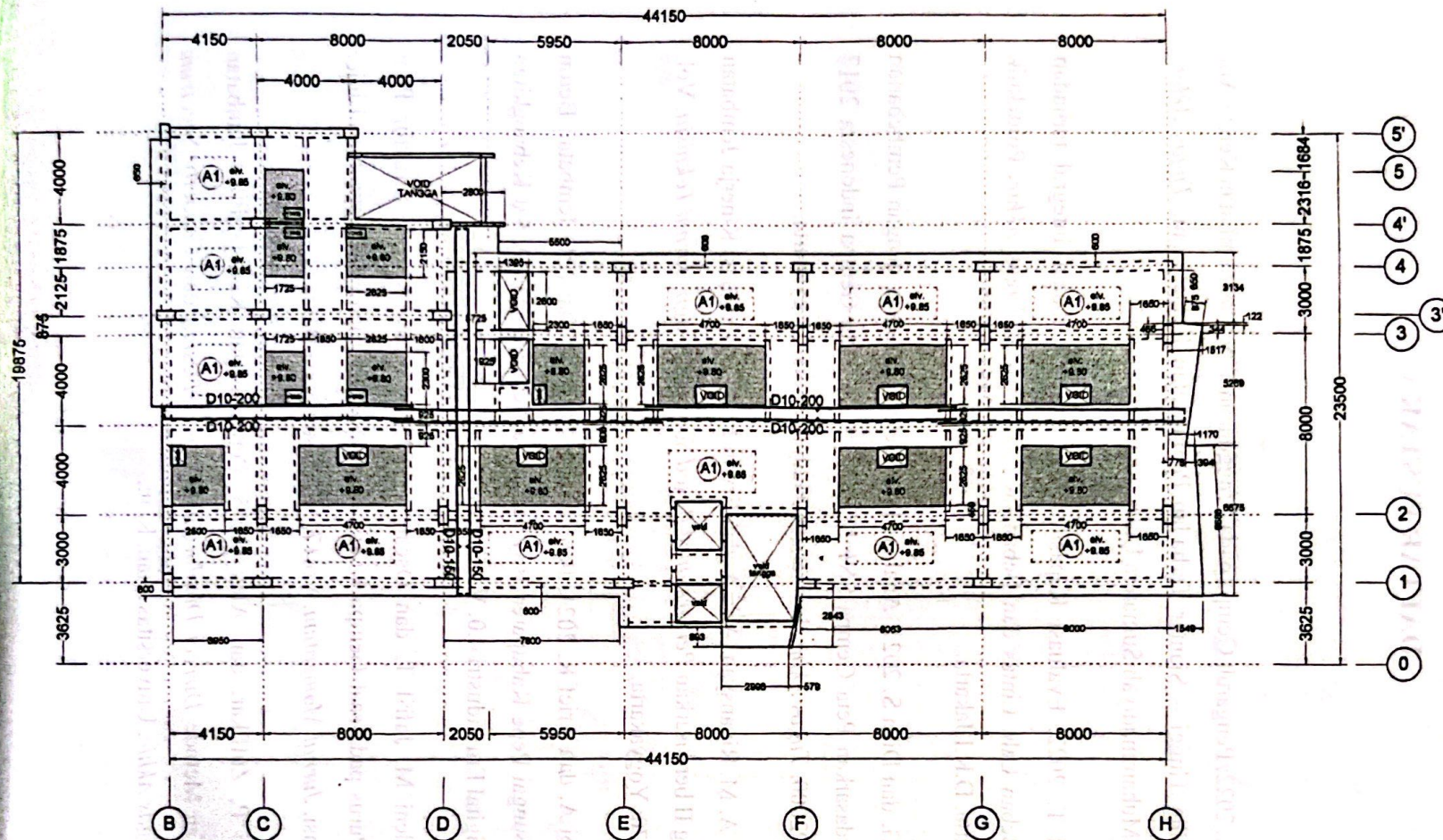
NO	SPEKIFIKASI PLAT A1
1	Tebal plat = 140 mm
2	Tulangan D10-150
3	Tulangan D10-200
4	Mutu beton f'c 25 MPa

NO	SPEKIFIKASI PLAT A4
1	Tebal plat = 140 mm
2	Tulangan D10-100
3	Tulangan D10-150
4	Mutu beton f'c 25 MPa



NO	SPESIFIKASI PLAT A1
1	Tebal plat = 140 mm
2	Tulangan D10-150
3	Tulangan D10-200
4	Mutu beton f'c 25 MPa

NO	SPESIFIKASI PLAT A3
1	Tebal plat = 120 mm
2	Tulangan D10-150
3	Tulangan D10-200
4	Mutu beton f'c 25 MPa

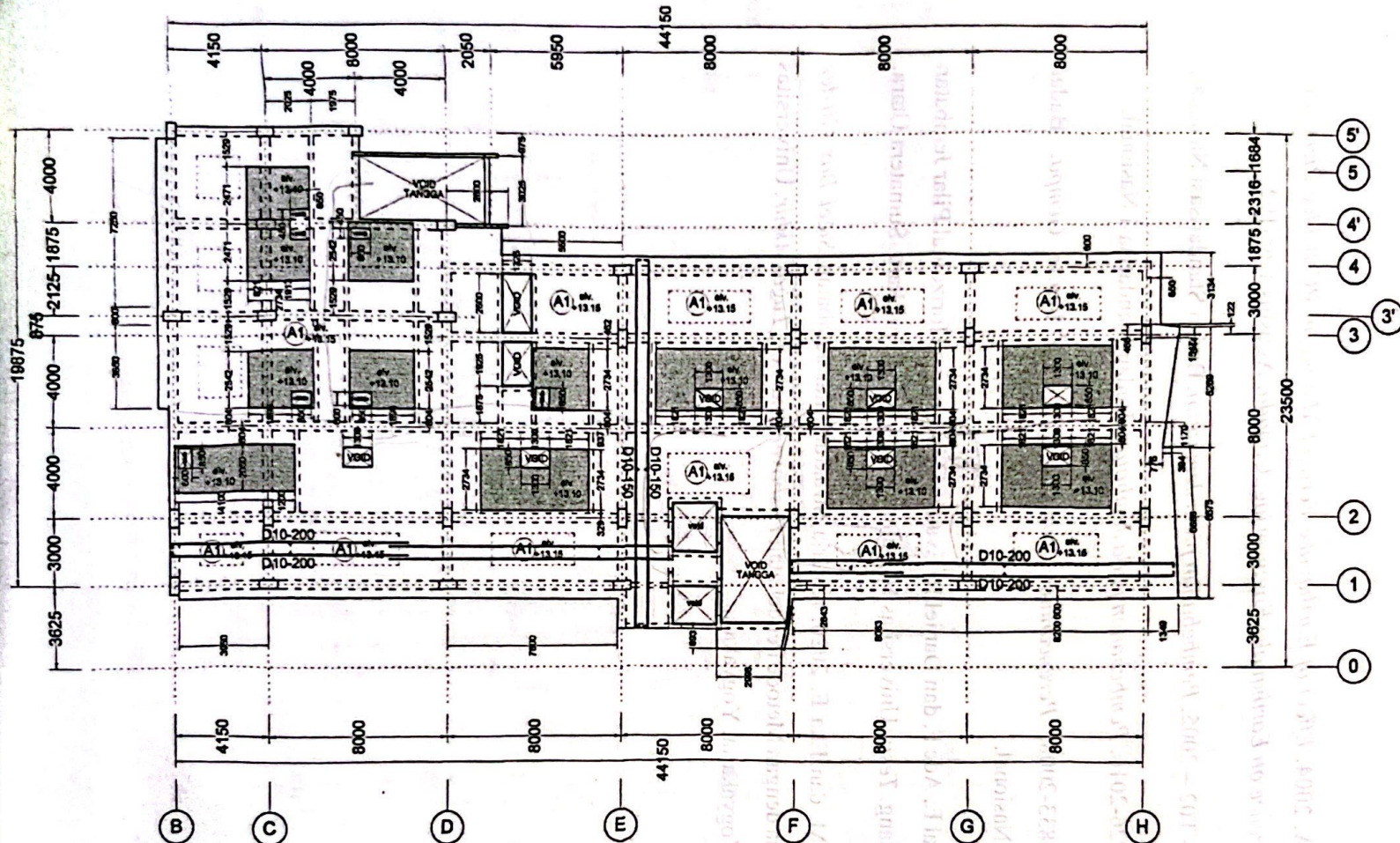


DENAH PLAT LANTAI elv.TOC + 9.850

SKALA 1 : 200

ELEVASI LANTAI = +9.85 CM
TERHADAP ELEVASI LANTAI
SETEMPAT

NO	SPESIFIKASI PLAT A1
1	Tebal plat = 140 mm
2	Tulangan D10-150
3	Tulangan D10-200
4	Mutu beton f'c 25 MPa



DENAH PLAT LANTAI elv.TOC + 13.150
SKALA 1 : 200

NO	SPESIFIKASI PLAT A1
1	Tebal plat = 140 mm
2	Tulangan D10-150
3	Tulangan D10-200
4	Mutu beton f_c 25 MPa

LOKASI	KOLOM K1		KOLOM K2		KOLOM K3		KOLOM K4		NO	KETERANGAN
	TUMPUAN	LAPANGAN	TUMPUAN	LAPANGAN	TUMPUAN	LAPANGAN	TUMPUAN	LAPANGAN		
ment D1									1	Mutu Beton $f_c = 25 \text{ MPa}$
UTAMA	20 D25	20 D25	24 D25	24 D25	14 D19	14 D19	16 D19	16 D19	2	Mutu Baja Ulsr (D) $f_y = 400 \text{ MPa}$
SEKANG	D10 - 100	D10 - 150	D10 - 100	D10 - 150	D10 - 100	D10 - 150	D10 - 100	D10 - 150	3	Mutu Baja polos (P) $f_y = 240 \text{ MPa}$
SESI	800 X 800		400 X 800				400 X 700			
ment D2										
UTAMA	20 D25	20 D25	20 D25	20 D25	14 D19	14 D19	16 D19	16 D19		
SEKANG	D10 - 100	D10 - 150	D10 - 100	D10 - 150	D10 - 100	D10 - 150	D10 - 100	D10 - 150		
SESI	800 X 800		400 X 800				400 X 700			
NTAI D1										
Un Level										
UTAMA	20 D25	20 D25	20 D25	20 D25			16 D19	16 D19		
SEKANG	D10 - 100	D10 - 150	D10 - 100	D10 - 150			D10 - 100	D10 - 150		
SESI	800 X 800		400 X 800				400 X 700			
anline										
UTAMA	20 D25	20 D25	20 D25	20 D25			16 D19	16 D19		
SEKANG	D10 - 100	D10 - 150	D10 - 100	D10 - 150			D10 - 100	D10 - 150		
SESI	800 X 800		400 X 800				400 X 700			
NTAI D2										
UTAMA	20 D25	20 D25	12 D25	12 D25			12 D19	12 D19		
SEKANG	D10 - 100	D10 - 150	D10 - 100	D10 - 150			D10 - 100	D10 - 150		
SESI	400 X 800		400 X 800		400 X 800		400 X 700			

 **Detail Kolom**
SKALA 1 : 50

LOKASI	KOLOM K1		KOLOM K2		KOLOM K3		KOLOM K4		NO	KETERANGAN
	TUMPUAN	LAPANGAN	TUMPUAN	LAPANGAN	TUMPUAN	LAPANGAN	TUMPUAN	LAPANGAN	1	Mutu Beton $f_c = 25 \text{ MPa}$
									2	Mutu Baja UHR (D) $f_y = 400 \text{ MPa}$
									3	Mutu Baja polos (P) $f_y = 240 \text{ MPa}$
TAI 03 50										
	12 D25	12 D25	12 D25	12 D25			12 D19	12 D19		
	D10 - 100	D10 - 150	D10 - 100	D10 - 150			D10 - 100	D10 - 150		
	400 X 800		400 X 800				400 X 700			
TAI 04 150										
	12 D25	12 D25	10 D25	10 D25			12 D19	12 D19		
	D10 - 100	D10 - 150	D10 - 100	D10 - 150			D10 - 100	D10 - 150		
	400 X 800		400 X 800				400 X 700			
TAI 05 170										
			10 D25	10 D25			12 D19	12 D19		
			D10 - 100	D10 - 150			D10 - 100	D10 - 150		
			400 X 800				400 X 700			
TAI 05 490										
			10 D25	10 D25			12 D19	12 D19		
			D10 - 100	D10 - 150			D10 - 100	D10 - 150		
			400 X 800				400 X 700			

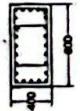
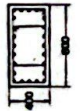
 **Detail Kolom**
SKALA 1 : 50

NO	KETERANGAN	KOLOM K5		KOLOM K6		KOLOM K7	
		TUMPUAN	LAPANGAN	TUMPUAN	LAPANGAN	TUMPUAN	LAPANGAN
1	Mutu Beton $f_c = 25 \text{ MPa}$						
2	Mutu Baja Ular (D) $f_y = 400 \text{ MPa}$						
3	Mutu Baja polos (P) $f_y = 240 \text{ MPa}$						
1	Detail Kolom D1						
		UTAMA	12 D19	12 D19	12 D19	10 D19	10 D19
		NGKANG	D10 - 100	D10 - 150	D10 - 100	D10 - 150	D10 - 150
		ENSI	400 X 600		200 X 600		200 X 600
2	Detail Kolom D2						
		UTAMA	12 D19	12 D19	8 D19	8 D19	10 D19
		NGKANG	D10 - 100	D10 - 150	D10 - 100	D10 - 150	D10 - 150
		ENSI	400 X 600		200 X 600		200 X 600
3	Detail Kolom D1						
		UTAMA	12 D19	12 D19	8 D19	8 D19	10 D19
		NGKANG	D10 - 100	D10 - 150	D10 - 100	D10 - 150	D10 - 150
		ENSI	400 X 600		200 X 600		200 X 600
4	Detail Kolom D2						
		UTAMA	12 D19	12 D19		10 D19	10 D19
		NGKANG	D10 - 100	D10 - 150		D10 - 100	D10 - 150
		ENSI	400 X 600			200 X 600	
5	Detail Kolom D2						
		UTAMA	12 D19	12 D19		10 D19	10 D19
		NGKANG	D10 - 100	D10 - 150		D10 - 100	D10 - 150
		ENSI	400 X 600			200 X 600	

Detail Kolom
SKALA 1 : 50

LOKASI	KOLOM K5		KOLOM K6		KOLOM K7		NO	KETERANGAN
	TUMPUAN	LAPANGAN	TUMPUAN	LAPANGAN	TUMPUAN	LAPANGAN		
TAI 03 150							1	Mutu Beton $f_c = 25 \text{ MPa}$
UTAMA	12 D19	12 D19			10 D19	10 D19	2	Mutu Baja Ulfir (D) $f_y = 400 \text{ MPa}$
SEKANG	D10 - 100	D10 - 150			D10 - 100	D10 - 150	3	Mutu Baja polos (P) $f_y = 240 \text{ MPa}$
ENSI	400 X 600				200 X 600			
TAI 04 150								
UTAMA	12 D19	12 D19			10 D19	10 D19		
SEKANG	D10 - 100	D10 - 150			D10 - 100	D10 - 150		
ENSI	400 X 600				200 X 600			
TAI 05 17.170								
UTAMA					10 D19	10 D19		
SEKANG					D10 - 100	D10 - 150		
ENSI					200 X 600			
TAI 05 10.490								
UTAMA					10 D19	10 D19		
SEKANG					D10 - 100	D10 - 150		
ENSI					200 X 600			

 **Detail Kolom**
SKALA 1 : 50

LOKASI	KOLOM K8		KOLOM K9		KOLOM K10		KOLOM K11		NO	KETERANGAN
	TUMPUAN	LAPANGAN	TUMPUAN	LAPANGAN	TUMPUAN	LAPANGAN	TUMPUAN	LAPANGAN	1	Mutu Beton $f_c = 25 \text{ MPa}$
Lantai 01 Level 100									2	Mutu Baja Ulir (D) $f_y = 400 \text{ MPa}$
	UTAMA		12 D25	12 D25					3	Mutu Baja polos (P) $f_y = 240 \text{ MPa}$
	SEKANG		D10 - 100	D10 - 100						
	SEKANG		200 x 1000							
Lantai 02 Level 150										
	UTAMA		12 D25	12 D25						
	SEKANG		D10 - 100	D10 - 100						
	SEKANG		200 x 1000							
Lantai 01 Level 250										
	UTAMA		12 D25	12 D25						
	SEKANG		D10 - 100	D10 - 100						
	SEKANG		200 x 1000							
Lantai 02 Level 250										
	UTAMA		12 D25	12 D25						
	SEKANG		D10 - 100	D10 - 100						
	SEKANG		200 x 1000							
Lantai 02 Level 550										
	UTAMA	24 D25	24 D25	12 D25	12 D25					
	SEKANG	D10 - 100	D10 - 150	D10 - 100	D10 - 100					
	SEKANG	400 x 800		200 x 1000						

 **Detail Kolom**
SKALA 1 : 50

LOKASI	KOLOM K8		KOLOM K9		KOLOM K10		KOLOM K11		NO	KETERANGAN
	TUMPUAN	LAPANGAN	TUMPUAN	LAPANGAN	TUMPUAN	LAPANGAN	TUMPUAN	LAPANGAN	1	Mutu Beton $f_c = 25 \text{ MPa}$
TAI 03 150									2	Mutu Baja Ulf (D) $f_y = 400 \text{ MPa}$
	16 D25	16 D25	12 D25	12 D25					3	Mutu Baja polos (P) $f_y = 240 \text{ MPa}$
	D10 - 100	D10 - 150	D10 - 100	D10 - 100						
	400 x 800		200 x 1000		400 x 400		250 x 250			
TAI 04 150										
	12 D25	12 D25	12 D25	12 D25						
	D10 - 100	D10 - 150	D10 - 100	D10 - 100						
	400 x 800		200 x 1000		400 x 400		250 x 250			
TAI 05 170										
					8 D25	8 D25	6 D25	6 D25		
					D10 - 100	D10 - 150	D10 - 100	D10 - 150		
					400 x 400		250 x 250			
TAI 05 1490										
					8 D25	8 D25	6 D25	6 D25		
					D10 - 100	D10 - 150	D10 - 100	D10 - 150		
					400 x 400		250 x 250			

 **Detail Kolom**
SKALA 1 : 50

BALOK B1 (600 x 1200)				BALOK B2 (400 x 600)				BALOK B3 (400 x 600)			
TYPE	TUMP. KIRI	LAPANGAN	TUMP. KANAN	TYPE	TUMP. KIRI	LAPANGAN	TUMP. KANAN	TYPE	TUMP. KIRI	LAPANGAN	TUMP. KANAN
POTONGAN				POTONGAN				POTONGAN			
TAL. ATAS	10 D10	5 D10	10 D10	TAL. ATAS	3 D10	3 D10	3 D10	TAL. ATAS	3 D10	3 D10	3 D10
TAL. BAWAH	10 D10	10 D10	10 D10	TAL. BAWAH	3 D10	3 D10	3 D10	TAL. BAWAH	3 D10	3 D10	3 D10
SEKELUARG	1,2 D10 - 100	1,2 D10 - 100	1,2 D10 - 100	SEKELUARG	1,2 D10 - 100	1,2 D10 - 100	1,2 D10 - 100	SEKELUARG	1,2 D10 - 100	1,2 D10 - 100	1,2 D10 - 100
TAL. PERSEKUTUAN	4 D10	4 D10	4 D10	TAL. PERSEKUTUAN	4 D10	4 D10	4 D10	TAL. PERSEKUTUAN	4 D10	4 D10	4 D10
BALOK B4 (400 x 600)				BALOK B5 (400 x 600)				BALOK B6 (200 x 600)			
TYPE	TUMP. KIRI	LAPANGAN	TUMP. KANAN	TYPE	TUMP. KIRI	LAPANGAN	TUMP. KANAN	TYPE	TUMP. KIRI	LAPANGAN	TUMP. KANAN
POTONGAN				POTONGAN				POTONGAN			
TAL. ATAS	4 D10	3 D10	4 D10	TAL. ATAS	3 D10	3 D10	3 D10	TAL. ATAS	3 D10	3 D10	3 D10
TAL. BAWAH	4 D10	3 D10	4 D10	TAL. BAWAH	3 D10	3 D10	3 D10	TAL. BAWAH	3 D10	3 D10	3 D10
SEKELUARG	2D10 - 100	2D10 - 100	2D10 - 100	SEKELUARG	2D10 - 100	2D10 - 100	2D10 - 100	SEKELUARG	2D10 - 100	2D10 - 100	2D10 - 100
TAL. PERSEKUTUAN	4 D10	4 D10	4 D10	TAL. PERSEKUTUAN	4 D10	4 D10	4 D10	TAL. PERSEKUTUAN	4 D10	4 D10	4 D10
BALOK B7 (300 x 600)				BALOK B8 (400 x 700)				BALOK B9 (250 x 600)			
TYPE	TUMP. KIRI	LAPANGAN	TUMP. KANAN	TYPE	TUMP. KIRI	LAPANGAN	TUMP. KANAN	TYPE	TUMP. KIRI	LAPANGAN	TUMP. KANAN
POTONGAN				POTONGAN				POTONGAN			
TAL. ATAS	3 D10	3 D10	3 D10	TAL. ATAS	3 D10	3 D10	3 D10	TAL. ATAS	3 D10	3 D10	3 D10
TAL. BAWAH	3 D10	3 D10	3 D10	TAL. BAWAH	3 D10	3 D10	3 D10	TAL. BAWAH	3 D10	3 D10	3 D10
SEKELUARG	2D10 - 100	2D10 - 100	2D10 - 100	SEKELUARG	2D10 - 100	2D10 - 100	2D10 - 100	SEKELUARG	2D10 - 100	2D10 - 100	2D10 - 100
TAL. PERSEKUTUAN	4 D10	4 D10	4 D10	TAL. PERSEKUTUAN	4 D10	4 D10	4 D10	TAL. PERSEKUTUAN	3 D10	3 D10	3 D10

NO	KETERANGAN
1	Mutu Beton $f_c = 25 \text{ MPa}$
2	Mutu Baja U1R (D) $f_y = 400 \text{ MPa}$
3	Mutu Baja polos (P) $f_y = 240 \text{ MPa}$

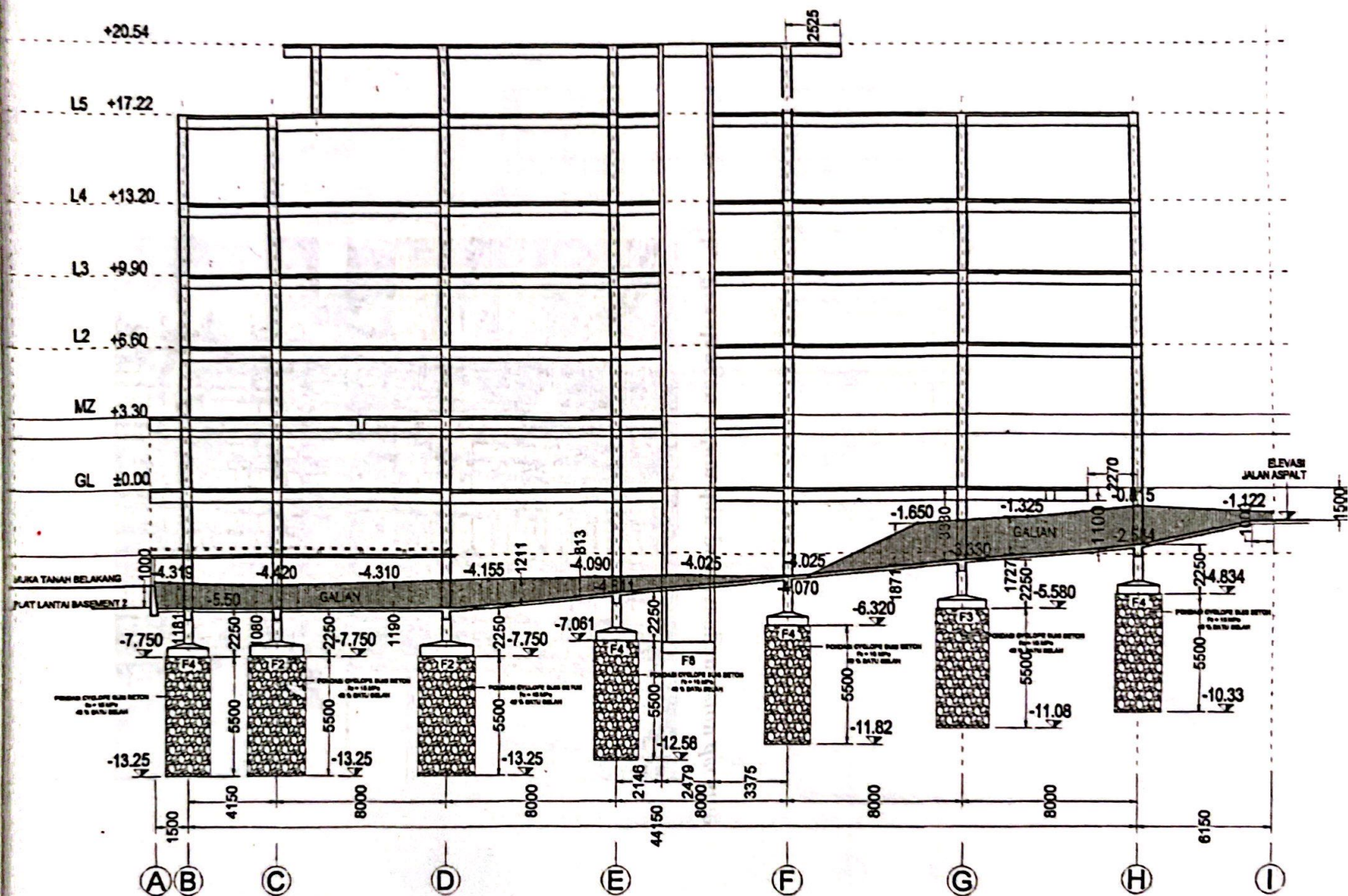

Detail Balok
 SKALA 1 : 50

BALOK B10 (400 x 600)				BALOK B11 (400 x 700)				BALOK B12 (250 x 300)			
TYPE	TUMP. KIRI	LAPANGAN	TUMP. KANAN	TYPE	TUMP. KIRI	LAPANGAN	TUMP. KANAN	TYPE	TUMP. KIRI	LAPANGAN	TUMP. KANAN
POTONGAN				POTONGAN				POTONGAN			
T/L ATAS	4 D20	1 D20	4 D20	T/L ATAS	1 D20	3 D20	1 D20	T/L ATAS	3 D20	1 D20	3 D20
T/L BAWAH	3 D20	1 D20	3 D20	T/L BAWAH	1 D20	7 D20	1 D20	T/L BAWAH	1 D20	3 D20	3 D20
SEKIDAR	D10 - 150	D10 - 200	D10 - 150	SEKIDAR	D10 - 150	D10 - 200	D10 - 150	SEKIDAR	D10 - 150	D10 - 200	D10 - 150
T/L PERANGKAP	4 D10	4 D10	4 D10	T/L PERANGKAP	4 D10	4 D10	4 D10	T/L PERANGKAP	3 D10	3 D10	3 D10

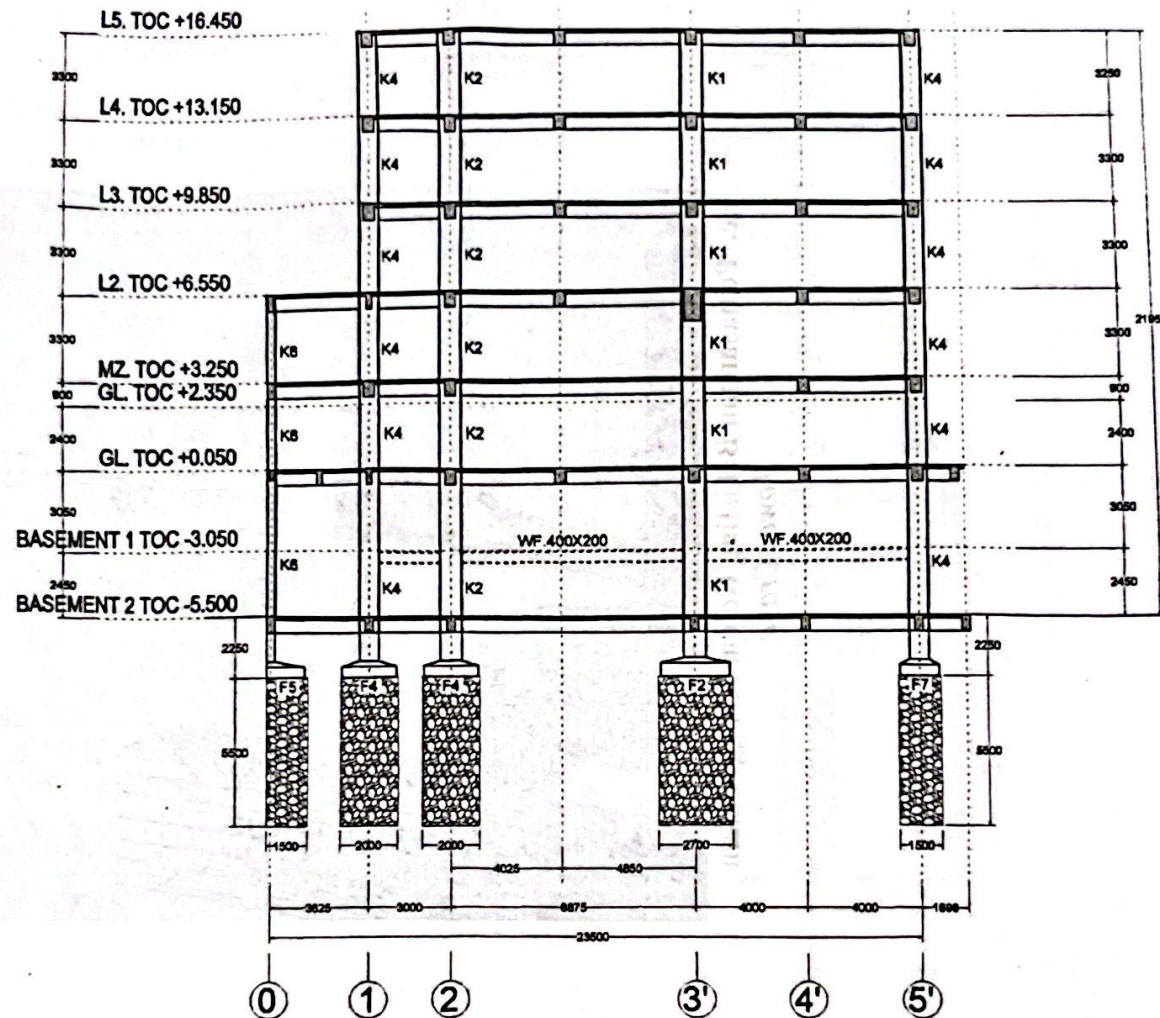
BALOK B13 (250 x 400)				BALOK BT (200 x 100)			
TYPE	TUMP. KIRI	LAPANGAN	TUMP. KANAN	TYPE	TUMP. KIRI	LAPANGAN	TUMP. KANAN
POTONGAN				POTONGAN			
T/L ATAS	3 D20	3 D20	3 D20	T/L ATAS	3 D10	3 D10	3 D10
T/L BAWAH	3 D20	3 D20	3 D20	T/L BAWAH	3 D10	3 D10	3 D10
SEKIDAR	D10 - 150	D10 - 200	D10 - 150	SEKIDAR	P10 - 150	P10 - 150	P10 - 150
T/L PERANGKAP	3 D10	3 D10	3 D10	T/L PERANGKAP	3 D10		

NO	KETERANGAN
1	Mutu Beton $f_c = 25 \text{ MPa}$
2	Mutu Baja Uls (D) $f_y = 400 \text{ MPa}$
3	Mutu Baja polos (P) $f_y = 240 \text{ MPa}$

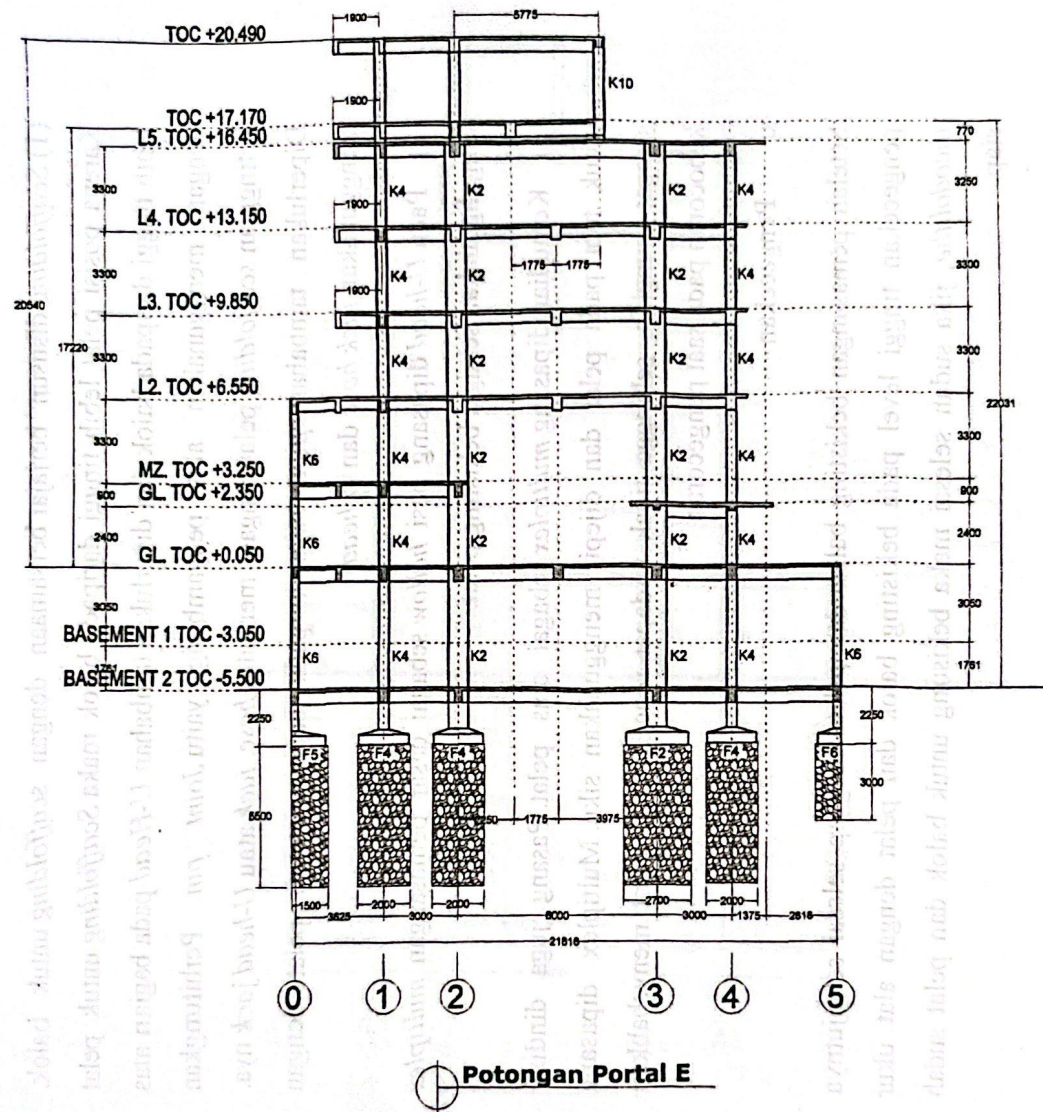
Detail Balok
 SKALA 1 : 50

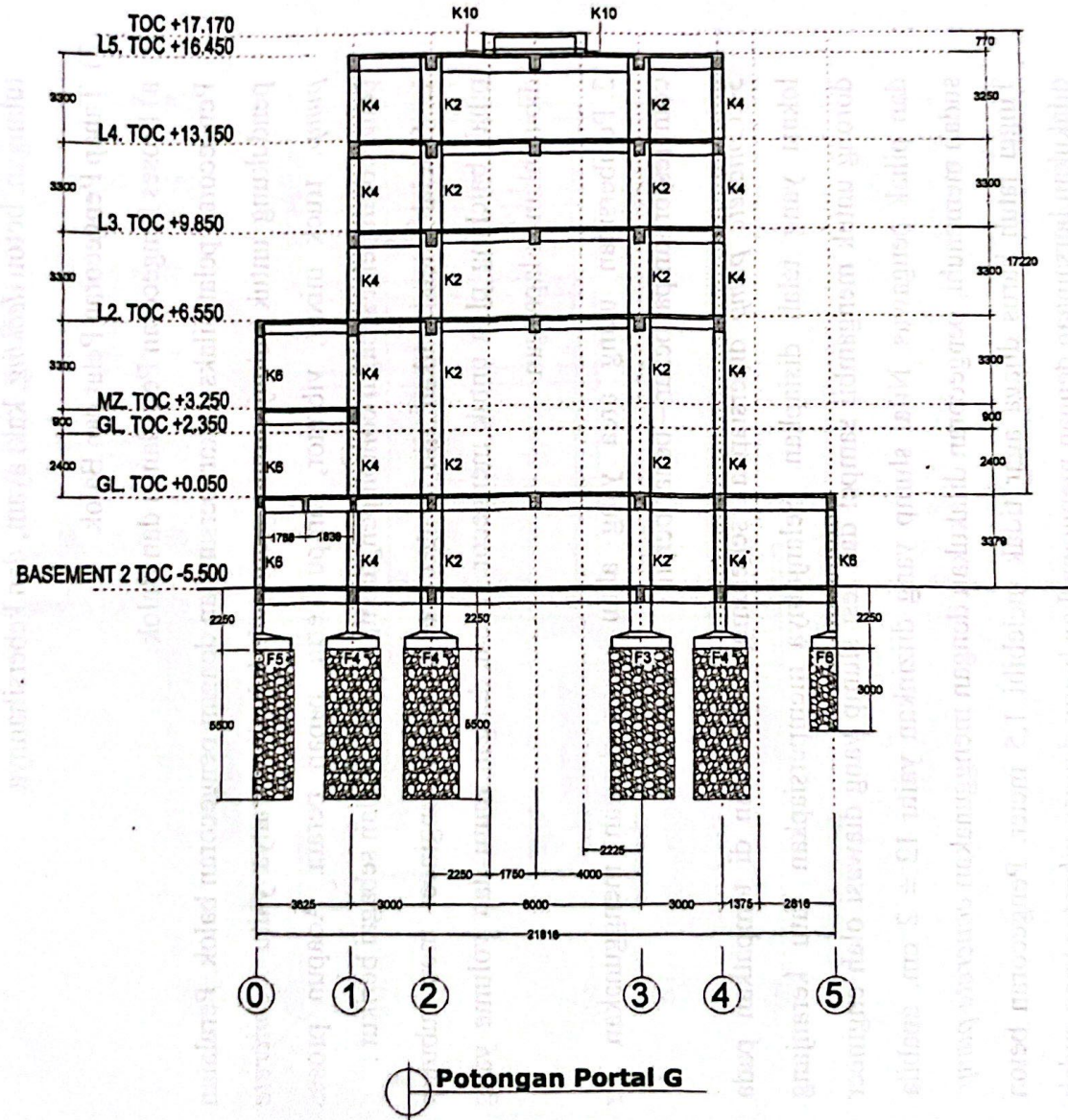


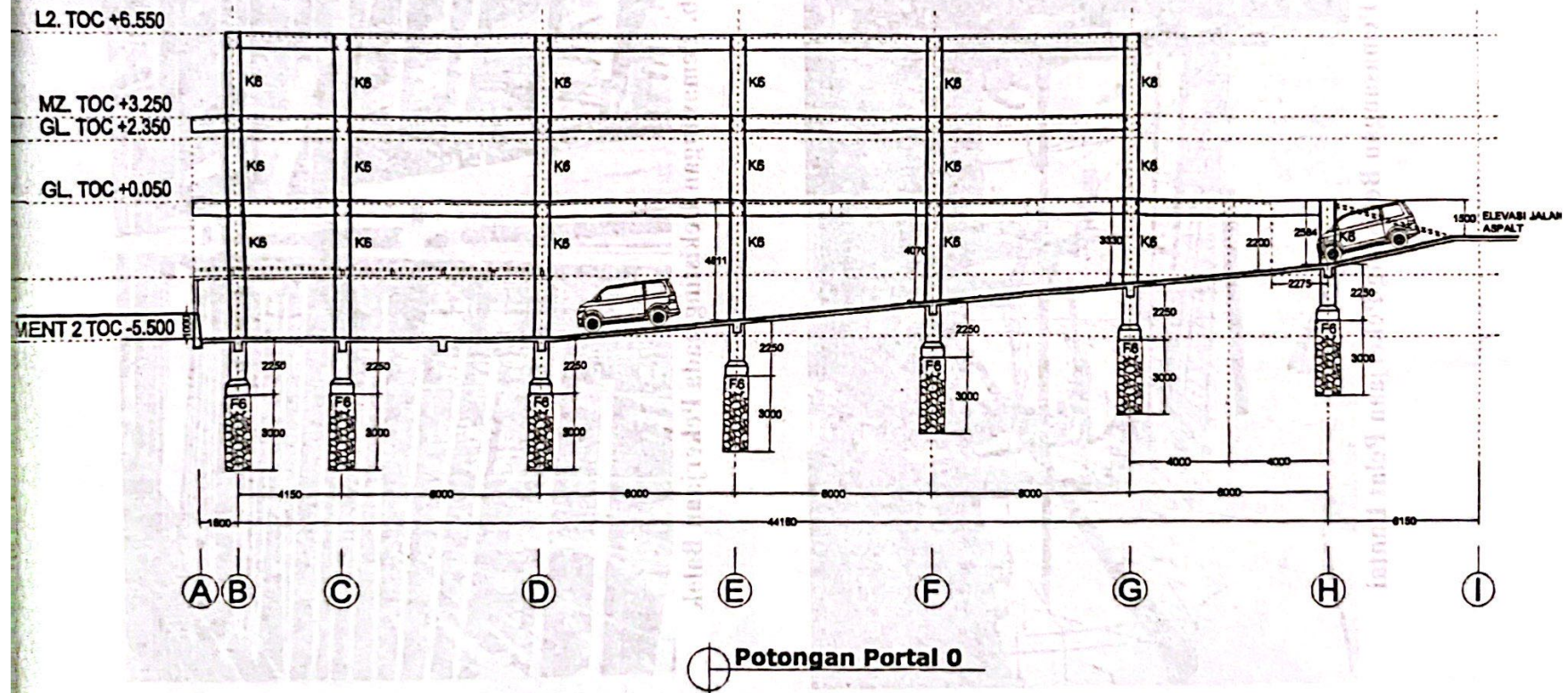
KONDISI TANAH EXISTING TERHADAP BANGUNAN

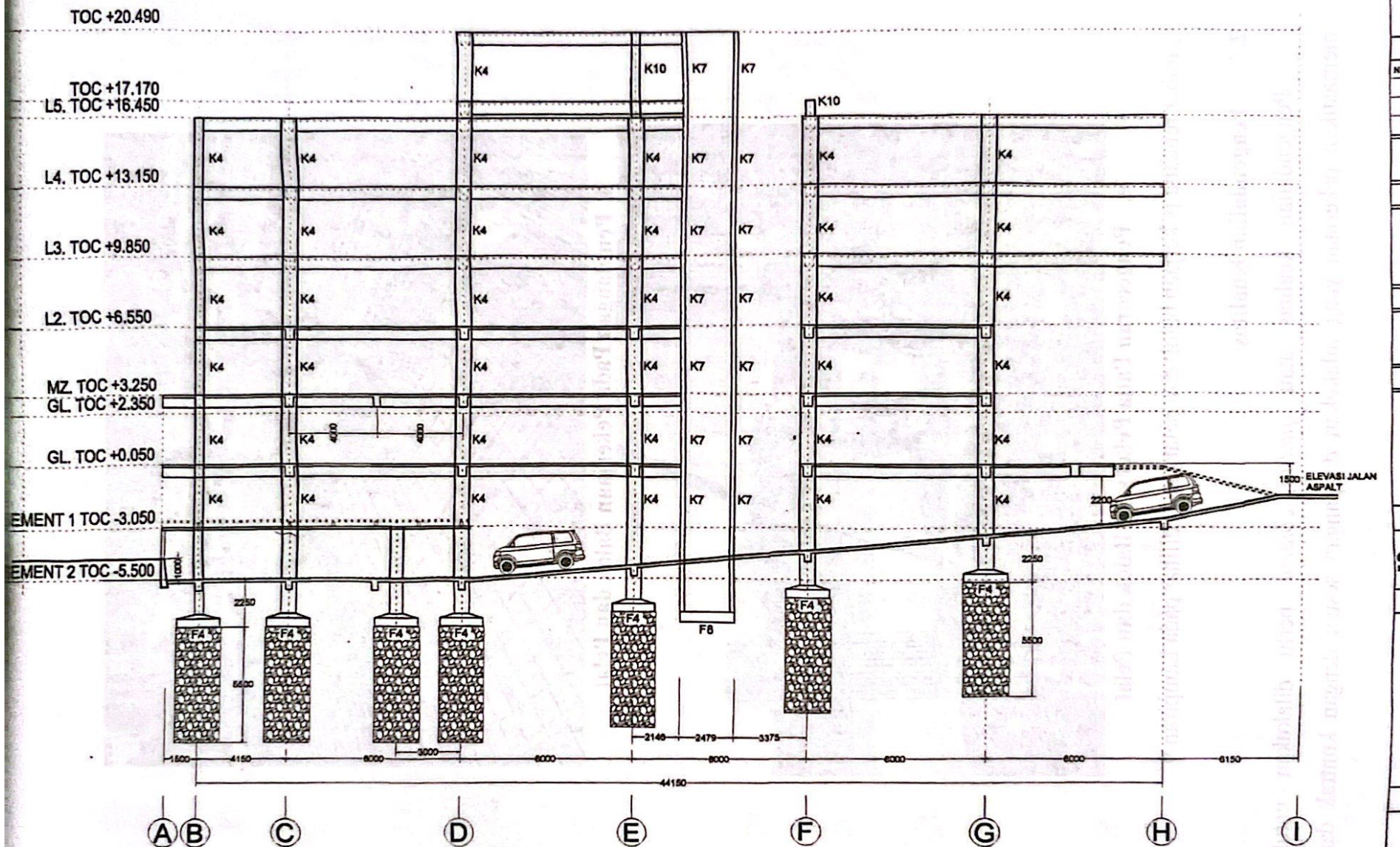


⊕ Potongan Portal B

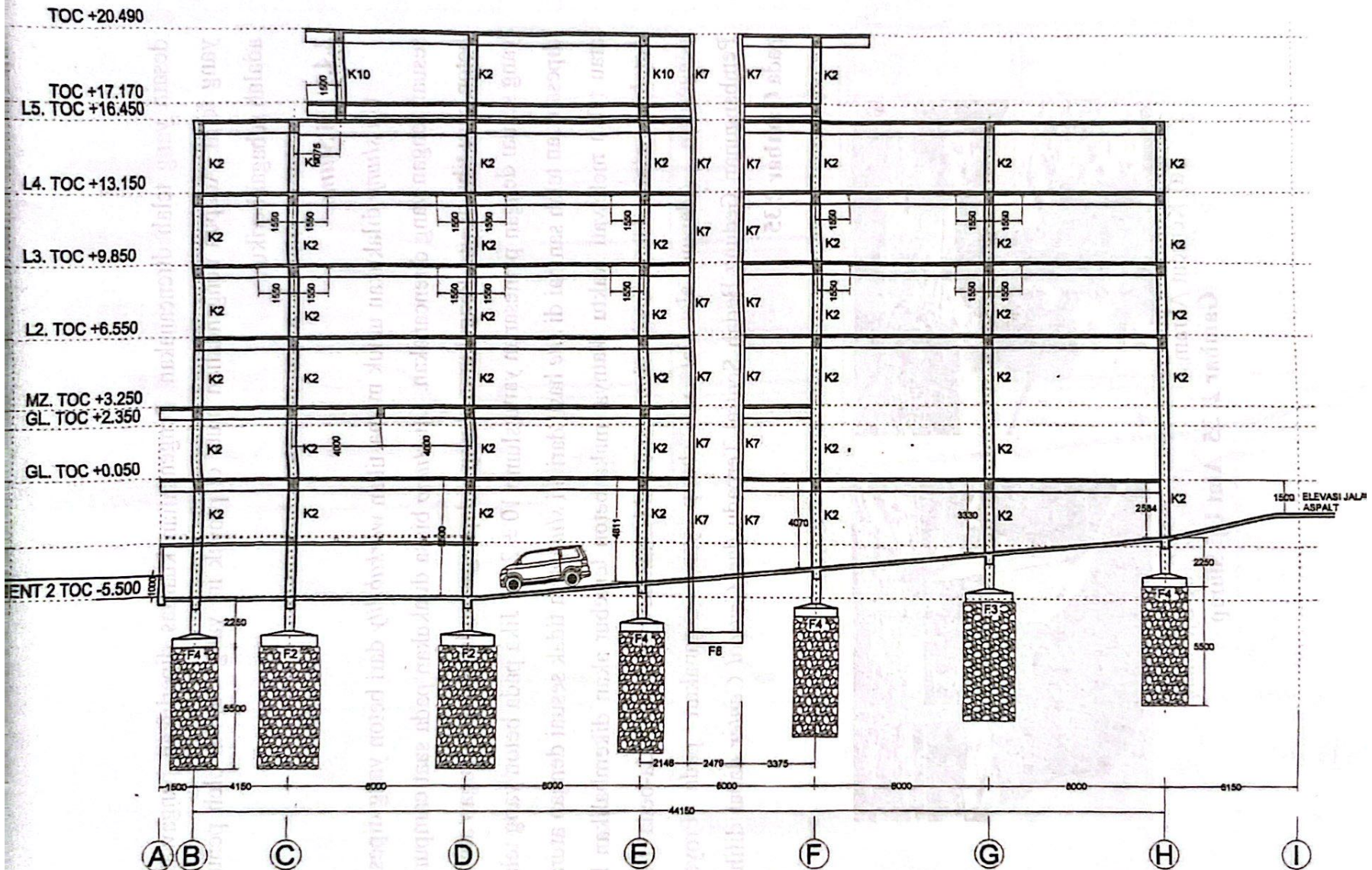




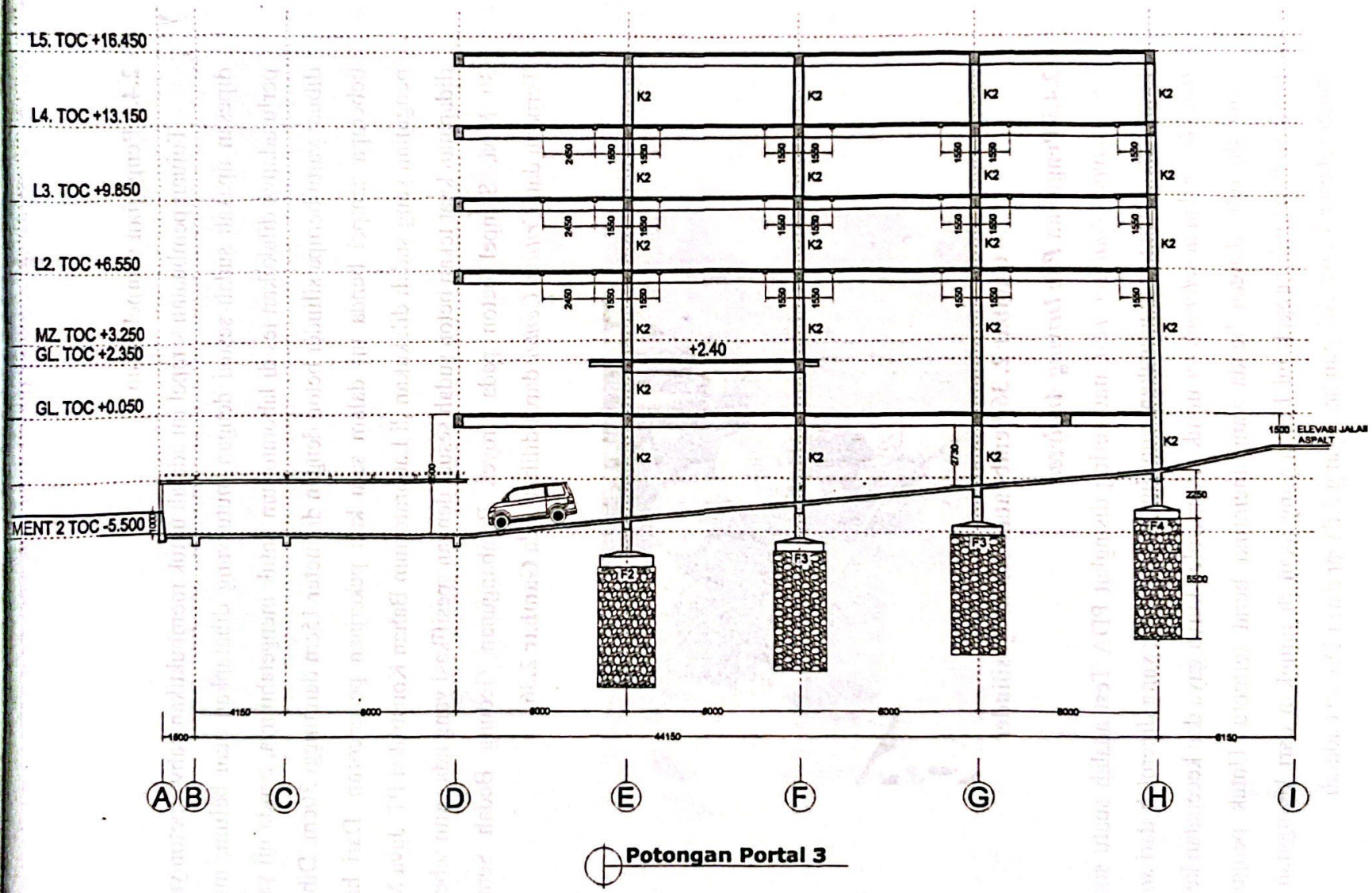


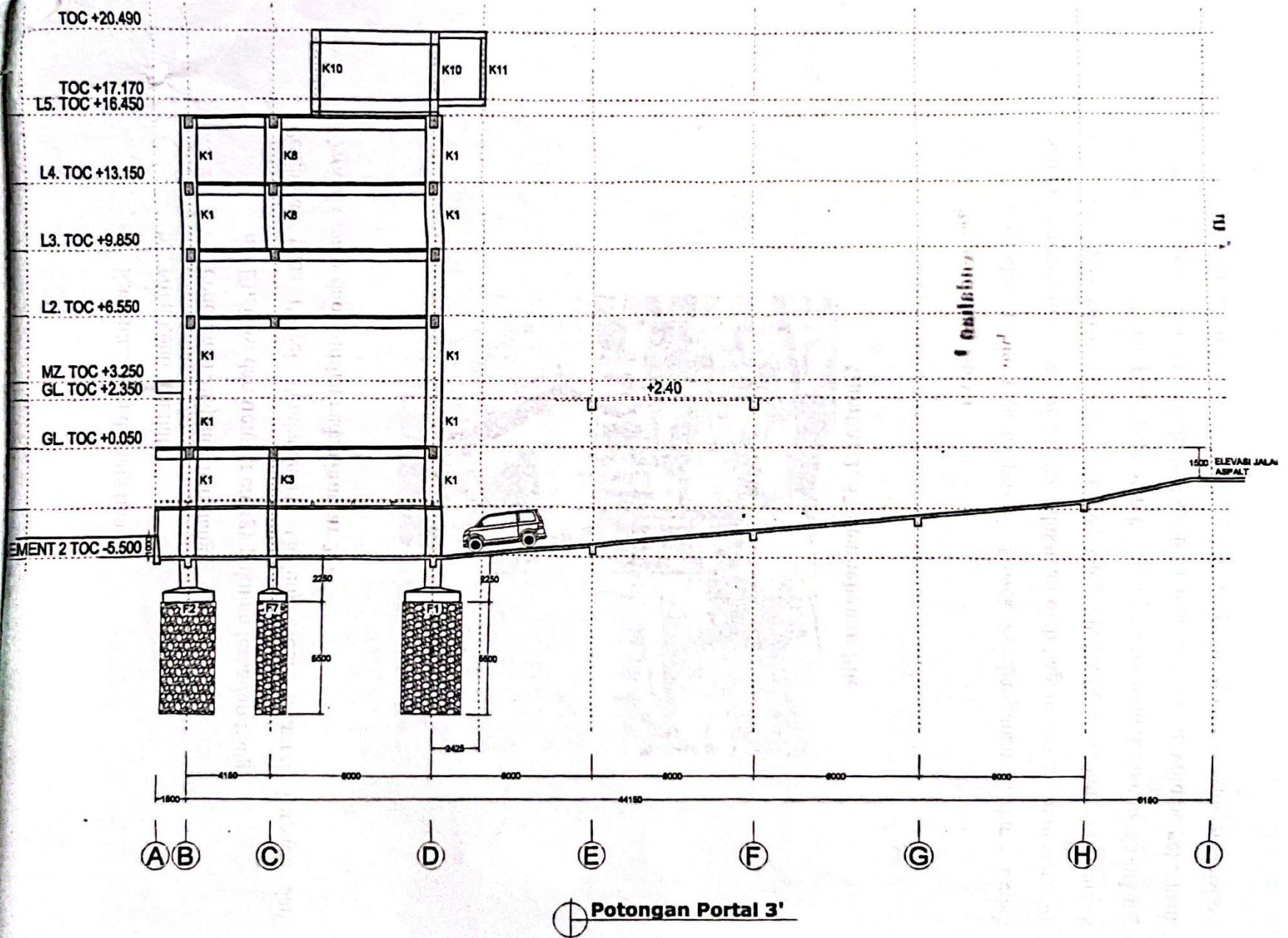


⊕ Potongan Portal 1



Potongan Portal 2





Lampiran 2. Katalog CFRP

PRODUCT DATA SHEET

Sika® CarboDur® S

Pultruded Carbon Fibre Plates for Structural Strengthening as Part of the Sika® CarboDur® System

PRODUCT DESCRIPTION

Sika® CarboDur® plates are pultruded carbon fibre reinforced polymer (CFRP) laminates, designed for strengthening concrete, timber, masonry, steel and fibre reinforced polymer structures.

Sika® CarboDur® plates are bonded onto the structure as externally bonded reinforcement using Sikadur®-30 epoxy resin based adhesive for normal temperatures during application and/or service.

Please refer to the relevant Product Data Sheet(s) for more detailed information about each of these adhesives.

USES

Sika® CarboDur® S may only be used by experienced professionals.

Sika® CarboDur® systems are used to improve, increase or repair the performance and resistance of structures for:

Increased Load Carrying Capacity:

- Increasing the load capacity of floor slabs, beams and bridge sections.
- For the installation of heavier machinery.
- To stabilise vibrating structures.
- For changes in building use.

Damage to structural elements due to:

- Deterioration of the original construction materials.
- Steel reinforcement corrosion.
- Accidents (vehicle impact, earthquakes, fire).

Improvement of serviceability and durability:

- Reduced deflection and crack width.
- Stress reduction in the steel reinforcement.
- Improved fatigue resistance.

Change of the structural system:

- Removal of walls and/or columns.
- Removal of floor and wall sections to create access/openings.

Resistance to possible events:

- Increased resistance to earthquakes, impact or explosion, etc.

To repair design or construction defects such as:

- Insufficient/inadequate reinforcement.
- Insufficient/inadequate structural depth.

CHARACTERISTICS / ADVANTAGES

- Non-corroding.
- Very high strength.
- Excellent durability and fatigue resistance.
- Unlimited lengths, no joints required.
- Low system thickness, simple execution of plate intersections or crossings.
- Easy transportation (rolls).
- Lightweight, very easy to install, especially overhead (without temporary support).
- Minimum preparation of plate, applicable in several layers.
- Smooth edges without exposed fibres as result of production by pultrusion.
- Extensive Testing and Approvals available from many countries worldwide.

APPROVALS / STANDARDS

- Slovakia: TSUS, Building Testing and research institutes.
- Slovakia: Technical Approval TO-09/0080, 2009: Systémy dodatočného zosilňovania konštrukcií Sika® CarboDur® a SikaWrap®.
- Poland: Technical Approval ITB AT-15-5604/2011: Zestaw wyrobów Sika® CarboDur® do wzmacniania i napraw konstrukcji betonowych.
- Poland: Technical Approval IBDiM Nr AT/2008-03-0336/1 „Płaskowniki. pręty, kształtki i maty kompozytowe do wzmacniania betonu o nazwie handlowej: Zestaw materiałów Sika® CarboDur® do wzmacniania konstrukcji obiektów mostowych.
- France: CSTB - Avis Technique 3/16-875, Sika CarboDur, SikaWrap.
- Fib, Technical Report, bulletin 14: Externally bonded

FRP reinforcement for RC structures, July 2001.

- USA: ACI 440.2R-08, Guide for the Design and construction of Externally Bonded FRP Systems for strengthening concrete structures, July 2008.
- UK: Concrete Society Technical Report No. 55, Design guidance for strengthening concrete structures using fibre composite material, 2012.
- Switzerland: SIA 166:2004 Klebebewehrungen.
- Italy: CNR-DT 200 R1/2013 - Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Existing Structures.

PRODUCT INFORMATION

Fibre Volume Content	> 68 %			
Packaging	Cut to size in non-returnable cardboard packaging. Supplied in rolls of 250 m in non-returnable cardboard boxes.			
Shelf Life	Unlimited, provided the storage conditions are met.			
Storage Conditions	Store in original, unopened, sealed and undamaged packaging in dry conditions at temperatures of max. +50 °C. Protect from direct sunlight. Transportation: only in the original packaging, or otherwise adequately protected against any mechanical damage			
Appearance / Colour	Carbon fibre reinforced polymer with an epoxy matrix, black.			
Dimensions	Type Sika® CarboDur® S	Width	Thickness	Cross section area
	S512	50 mm	1.2 mm	60 mm ²
	S812	80 mm	1.2 mm	96 mm ²
	S1012	100 mm	1.2 mm	120 mm ²
	S1512	150 mm	1.2 mm	180 mm ²
	S626	60mm	2.6mm	156 mm ²
	S626	Tensioning Force: 220 kN	Pre-stressing Loss: <0.1%	Pre-tensioning Strain: 8.5%

TECHNICAL INFORMATION

Laminate Tensile Strength	Mean value	3 100 N/mm ²	(EN 2561)
	5 % fractile-value	2 900 N/mm ²	
	Values in the longitudinal direction of the fibres.		
Laminate Tensile Modulus of Elasticity	Mean value	170 000 N/mm ²	(EN 2561)
	5 % fractile-value	165 000 N/mm ²	
	Values in the longitudinal direction of the fibres.		
Laminate Elongation at Break	Strain mean value	1.80 %	(EN 2561)
	Values in the longitudinal direction of the fibres.		
Glass transition temperature	>100 °C	(EN 61006)	

SYSTEM INFORMATION

System Structure	The system build-up and configuration as described must be fully complied with and may not be changed. Resin adhesive: Sikadur®-30. Structural strengthening Carbon plates: Sika® CarboDur® S. For detailed information on Sikadur®-30 together with the application details, refer to the Sikadur®-30 Product Data Sheet and the "Technical Information Manual Sika® CarboDur® Externally Bonded Reinforcement" Ref: 850 41 05.
-------------------------	--

APPLICATION INFORMATION

Consumption	Width of Sika® CarboDur® S plate	Typical consumption of Sikadur®-30*
	50 mm	0.20 – 0.28 kg/m
	80 mm	0.32 – 0.44 kg/m
	100 mm	0.44 – 0.64 kg/m
	150 mm	0.68 – 1.00 kg/m

*Note: Consumption is for standard application only. Rough or uneven substrate surfaces, plate crossings, loss and wastage can lead to a higher adhesive consumption of up to 20 %.

VALUE BASE

All technical data stated in this Product Data Sheet are based on laboratory tests. Actual measured data may vary due to circumstances beyond our control.

LIMITATIONS

Refer to the relevant Product Data Sheet of Sikadur® epoxy adhesive:

- Sikadur®-30

A suitably qualified Structural Engineer must be responsible for the design of the strengthening works. Additionally as this application is structural, great care must also be taken in selecting suitably experienced and trained specialist contractors.

Sika® CarboDur® strengthening systems with Sika® CarboDur® plates must be protected from permanent exposure to direct sunlight, moisture and/or water. Refer to the relevant Technical Information Manual and Product Data Sheets for the selection of suitable over coating materials, in situations where systems will be fully or partially exposed.

Maximum permissible continuous service temperature is approximately +50 °C.

Note: When using the Sika CarboHeater for curing Sikadur®-30 LP to be used at elevated temperatures, the maximum continuous service temperature can be increased to max. +80 °C. Refer to the relevant Technical Information Manual for further limitations and guidelines: "Technical Information Manual for Sika CarboDur® Externally Bonded Reinforcement" Ref: 850 41 05.

Contact Sika Technical Service for detailed advice.

ECOLOGY, HEALTH AND SAFETY

REGULATION (EC) NO 1907/2006 - REACH

This product is an article as defined in article 3 of regulation (EC) No 1907/2006 (REACH). It contains no substances which are intended to be released from the article under normal or reasonably foreseeable conditions of use. A safety data sheet following article 31 of the same regulation is not needed to bring the product to the market, to transport or to use it. For safe use follow the instructions given in the product data sheet. Based on our current knowledge, this product does not contain SVHC (substances of very high concern) as listed in Annex XIV of the REACH regulation or on the candidate list published by the

European Chemicals Agency in concentrations above 0,1 % (w/w).

APPLICATION INSTRUCTIONS

SUBSTRATE QUALITY

Sika® CarboDur® plates externally bonded to the concrete surface

Recommended minimum concrete pull-off strength after surface preparation:

- Mean: 2.0 N/mm²
- Minimum: 1.5 N/mm²

The effective concrete pull-off strength after surface preparation has to be verified.

If concrete pull-off strength is below the stated minimum requirements, alternative Sika solutions are available:

- CarboDur® applied in slots as near surface mounted (NSM) reinforcement.
- SikaWrap® fabrics: Please refer to the Product Data Sheet for the SikaWrap® fabrics.

Concrete must generally be older than 28 days (dependent on curing conditions and the type of concrete etc.).

Sika® CarboDur® externally bonded to other substrates

For application of CarboDur® plates to all other substrates (brick, stone, steel, wood, fibre reinforced polymer, etc.) refer to the "Technical Information Manual for Sika® CarboDur® Externally Bonded Reinforcement" Ref: 850 41 05. Contact Sika Technical Service for detailed advice.

SUBSTRATE PREPARATION

Concrete must be cleaned and prepared to achieve a laitance and contaminant free, open textured surface. Refer to the "Technical Information Manual for Sika® CarboDur® Externally Bonded Reinforcement" Ref: 850 41 05.

APPLICATION METHOD / TOOLS

Refer to the relevant Product Data Sheet:

- Sikadur®-30

LOCAL RESTRICTIONS

Please note that as a result of specific local regulations the performance of this product may vary from country to country. Please consult the local Product Data Sheet for the exact description of the application fields.

LEGAL NOTES

The information, and, in particular, the recommendations relating to the application and end-use of Sika products, are given in good faith based on Sika's current knowledge and experience of the products when properly stored, handled and applied under normal conditions in accordance with Sika's recommendations. In practice, the differences in materials, substrates and actual site conditions are such that no warranty in respect of merchantability or of fitness for a particular purpose, nor any liability arising out of any legal relationship whatsoever, can be inferred either from this information, or from any written recommendations, or from any other advice offered. The user of the product must test the product's suitability for the intended application and purpose. Sika reserves the right to change the properties of its products. The proprietary rights of third parties must be observed. All orders are accepted subject to our current terms of sale and delivery. Users must always refer to the most recent issue of the local Product Data Sheet for the product concerned, copies of which will be supplied on request.

SIKA LIMITED

Watchmead
Welwyn Garden City
Hertfordshire, AL7 1BQ
Tel: 01707 394444
Web: www.sika.co.uk
Twitter: @SikaLimited



Product Data Sheet

Sika® CarboDur® S
July 2022, Version 05.03
020206010010000040

SikaCarboDurS-en-GB-(07-2022)-5-3.pdf

PRODUCT DATA SHEET

SikaWrap®-600 C WV

WOVEN UNIDIRECTIONAL CARBON FIBRE FABRIC, DESIGNED FOR STRUCTURAL STRENGTHENING APPLICATIONS AS PART OF THE SIKA® STRENGTHENING SYSTEM

DESCRIPTION

SikaWrap®-600 C WV is a unidirectional woven heavy carbon fibre fabric with mid-range strength, designed for installation using the wet application process.

USES

SikaWrap®-600 C WV may only be used by experienced professionals.

Structural strengthening of reinforced concrete, masonry, brickwork and timber elements or structures, to increase flexural and shear loading capacity for:

- Improved seismic performance of masonry walls
- Replacing missing steel reinforcement
- Increasing the strength and ductility of columns
- Increasing the loading capacity of structural elements
- Enabling changes in use / alterations and refurbishment
- Correcting structural design and / or construction defects
- Increasing resistance to seismic movement
- Improving service life and durability
- Structural upgrading to comply with current standards

CHARACTERISTICS / ADVANTAGES

- Multifunctional fabric for use in many different strengthening applications
- Flexible and accommodating of different surface planes and geometry (beams, columns, chimneys, piles, walls, soffits, silos etc.)
- Low density for minimal additional weight
- Extremely cost effective in comparison to traditional strengthening technique

APPROVALS / CERTIFICATES

- USA: ACI 440.2R-08, Guide for the Design and construction of Externally Bonded FRP Systems for strengthening concrete structures, July 2008
- UK: Concrete Society Technical Report No. 55, Design guidance for strengthening concrete structures using fibre composite material, 2012.

PRODUCT INFORMATION

Construction	Fibre orientation	0° (unidirectional)	
	Warp	Black carbon fibres 95 %	
	Weft	E-Glass 5 %	
Fibre Type	Selected mid-range strength carbon fibres		
Packaging		Fabric length per roll	Fabric width
	1 roll in a carboard box	≥ 50 m	500 mm
Shelf life	24 months from date of production		

Storage conditions	Store in undamaged, original sealed packaging, in dry conditions at temperatures between +5 °C and +35 °C. Protect from direct sunlight.		
Dry Fibre Density	1.81 g/cm ³		
Dry Fibre Thickness	0.331 mm (based on fibre content)		
Area Density	600 g/m ² ± 20 g/m ² (carbon fibres only)		
Dry Fibre Tensile Strength	4 000 N/mm ²		(ISO 10618)
Dry Fibre Modulus of Elasticity in Tension	230 000 N/mm ²		(ISO 10618)
Dry Fibre Elongation at Break	2.1 %		(ISO 10618)

TECHNICAL INFORMATION

Laminate Nominal Thickness	0.331 mm		
Laminate Nominal Cross Section	331 mm ² per m width		
Laminate Tensile Strength	Average	Characteristic	(EN 2561*)
	3 500 N/mm ²	3 200 N/mm ²	(ASTM 3039*)
Laminate Modulus of Elasticity in Tension	Average	Characteristic	(EN 2561*)
	235 kN/mm ²	200 kN/mm ²	(ASTM 3039*)
	* modification: sample with 50 mm		
	Values in the longitudinal direction of the fibres		
Single layer, minimum 27 samples per test series			
Laminate Elongation at Break in Tension	1.56 %		(based on EN 2561)
	1.59 %		(based on ASTM 3039)
Tensile Resistance	Average	Characteristic	(based on EN 2561)
	1155 N/mm	1056 N/mm	(based on ASTM 3039)
Tensile Stiffness	Average	Characteristic	(based on EN 2561)
	74.3 MN/m	72.6 MN/m	
	74.3 kN/m per ‰ elongation	72.6 kN/m per ‰ elongation	
	Average	Characteristic	(based on ASTM 3039)
	72.6 MN/m	69.3 MN/m	
	72.6 kN/m per ‰ elongation	69.3 kN/m per ‰ elongation	

SYSTEMS

System Structure	The system build-up and configuration as described must be fully complied with and may not be changed.		
	Concrete substrate adhesive primer	Sikadur®-330 or Sikadur®-300	
	Impregnating / laminating resin	Sikadur®-300	
	Structural strengthening fabric	SikaWrap®-600 C WV	

For detailed information on Sikadur®-330 or Sikadur®-300, together with the resin and fabric application details, please refer to the Sikadur®-330 or Sikadur®-300 Product Data Sheet and to the relevant Method Statement.

APPLICATION INFORMATION

Consumption

Wet application with Sikadur®-300

First layer including primer	0.8–1.2 kg/m ²
Following layers	0.85–1.0 kg/m ²

Application with Sikadur®-330 as primer and Sikadur®-300

Primer layer	0.4–0.6 kg/m ²
Fabric layers	0.85–1.0 kg/m ²

APPLICATION INSTRUCTIONS

SUBSTRATE QUALITY

Minimum substrate tensile strength: 1.0 N/mm² or as specified in the strengthening design.
Please also refer to the relevant Method Statement for further information.

SUBSTRATE PREPARATION

Concrete must be cleaned and prepared to achieve a laitance and contaminant free, open textured surface.
Please also refer to the relevant Method Statement for further information.

APPLICATION METHOD / TOOLS

The fabric can be cut with special scissors or a Stanley knife (razor knife / box-cutter knife). Never fold the fabric.

SikaWrap®-600 C WV is applied using the wet application process.

Please refer to the relevant Method Statement for details on the impregnating / laminating procedure.

IMPORTANT CONSIDERATIONS

- SikaWrap®-600 C WV shall only be applied by trained and experienced professionals.
- A specialist structural engineer must be consulted for any structural strengthening design calculation.
- SikaWrap®-600 C WV fabric is coated to ensure maximum bond and durability with the Sikadur® adhesives / impregnating / laminating resins. To maintain and ensure full system compatibility, do not interchange different system components.
- SikaWrap®-600 C WV can be over coated with a cementitious overlay or other coatings for aesthetic and / or protective purposes. The over coating system selection is dependent on the exposure and the project specific requirements. For additional protection against UV light in exposed areas use Sikagard®-550 W Elastic, Sikagard® ElastoColor-675 W or Sikagard®-680 S.

BASIS OF PRODUCT DATA

All technical data stated in this Data Sheet are based on laboratory tests. Actual measured data may vary due to circumstances beyond our control.

LOCAL RESTRICTIONS

Note that as a result of specific local regulations the declared data and recommended uses for this product may vary from country to country. Consult the local Product Data Sheet for the exact product data and uses.

ECOLOGY, HEALTH AND SAFETY

This product is an article as defined in article 3 of regulation (EC) No 1907/2006 (REACH). It contains no substances which are intended to be released from the article under normal or reasonably foreseeable conditions of use. A safety data sheet following article 31 of the same regulation is not needed to bring the product to the market, to transport or to use it. For safe use follow the instructions given in the product data sheet. Based on our current knowledge, this product does not contain SVHC (substances of very high concern) as listed in Annex XIV of the REACH regulation or on the candidate list published by the European Chemicals Agency in concentrations above 0,1 % (w/w)

LEGAL NOTES

The information, and, in particular, the recommendations relating to the application and end-use of Sika products, are given in good faith based on Sika's current knowledge and experience of the products when properly stored, handled and applied under normal conditions in accordance with Sika's recommendations. In practice, the differences in materials, substrates and actual site conditions are such that no warranty in respect of merchantability or of fitness for a particular purpose, nor any liability arising out of any legal relationship whatsoever, can be inferred either from this information, or from any written recommendations, or from any other advice offered. The user of the product must test the product's suitability for the intended application and purpose. Sika reserves the right to change the properties of its products. The proprietary rights of third parties must be observed. All orders are accepted subject to our current terms of sale and delivery. Users must always refer to the most recent issue of the local Product Data Sheet for the product concerned, copies of which will be supplied on request.

PT. Sika Indonesia Head Office and

Jl. Raya Cibinong-Bekasi Km.20
Limusnunggal-Cileungsi
Bogor 16820-Indonesia
Tel. +62 21 8230025, Fax +62 21 8230026
Web: idn.sika.com
Email: sikacare@id.sika.com



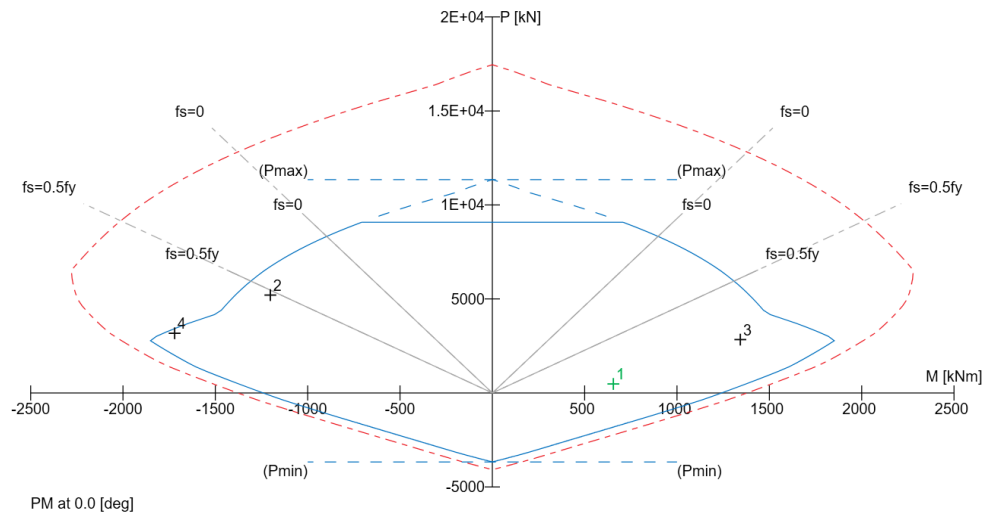
Product Data Sheet
SikaWrap®-600 C WV
June 2018, Version 01.01
020206020010000065

SikaWrap-600CWV-en-ID-(06-2018)-1-1.pdf

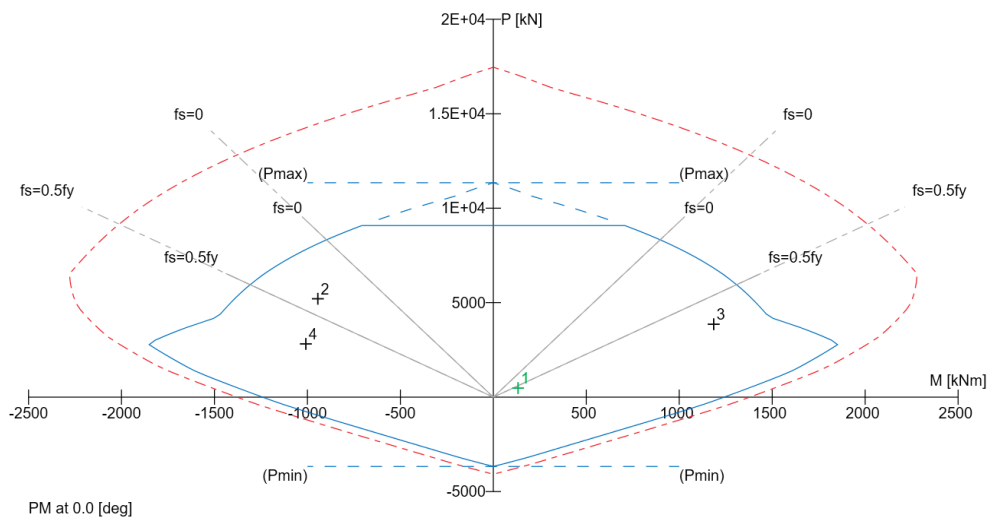
BUILDING TRUST



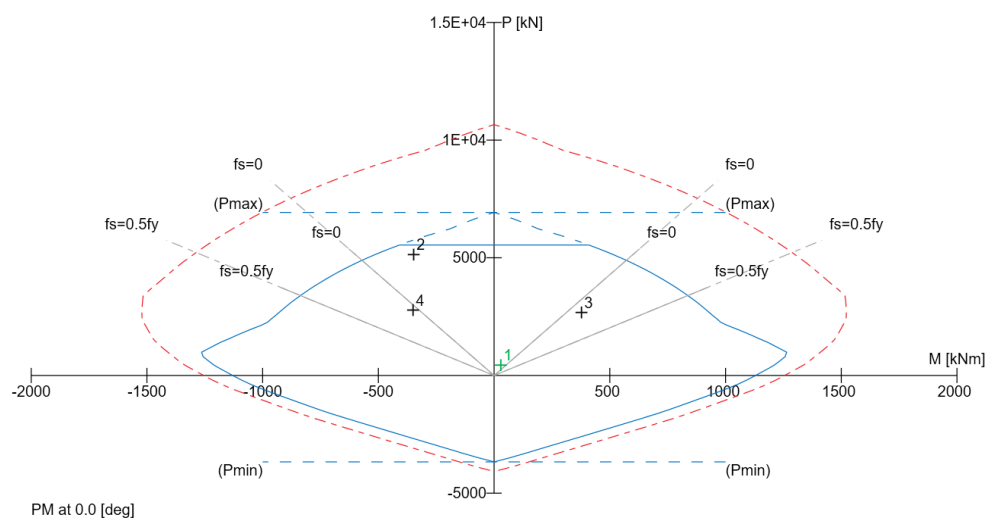
**Lampiran 3. Gambar Diagram Interaksi
Kolom (*sPColumn*)**



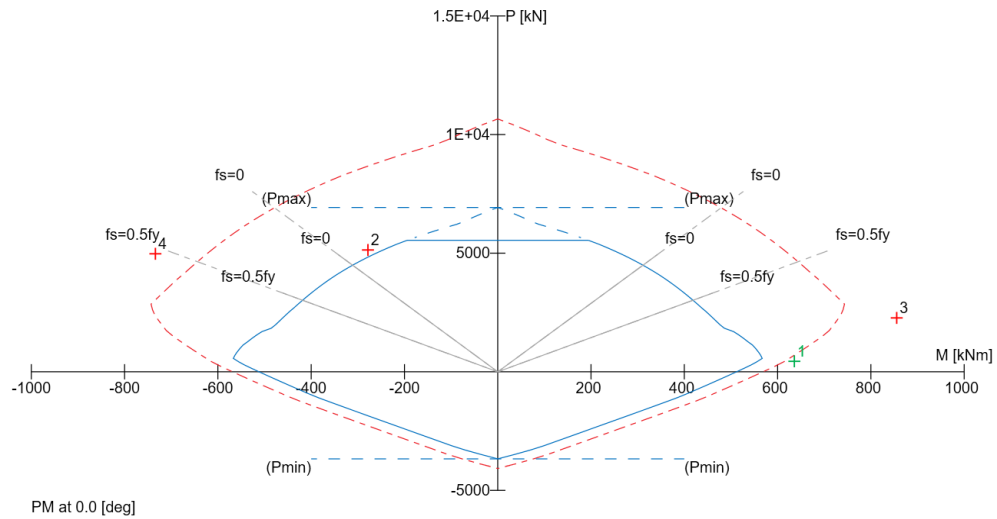
Gambar L3. 1 Diagram Interaksi Kolom K1(M) Arah X



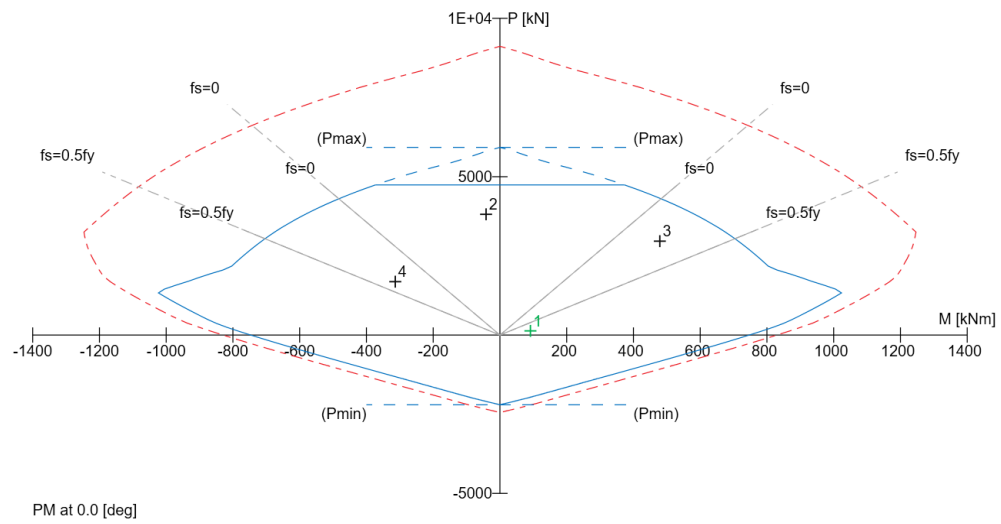
Gambar L3. 2 Diagram Interaksi Kolom K1(M) Arah Y



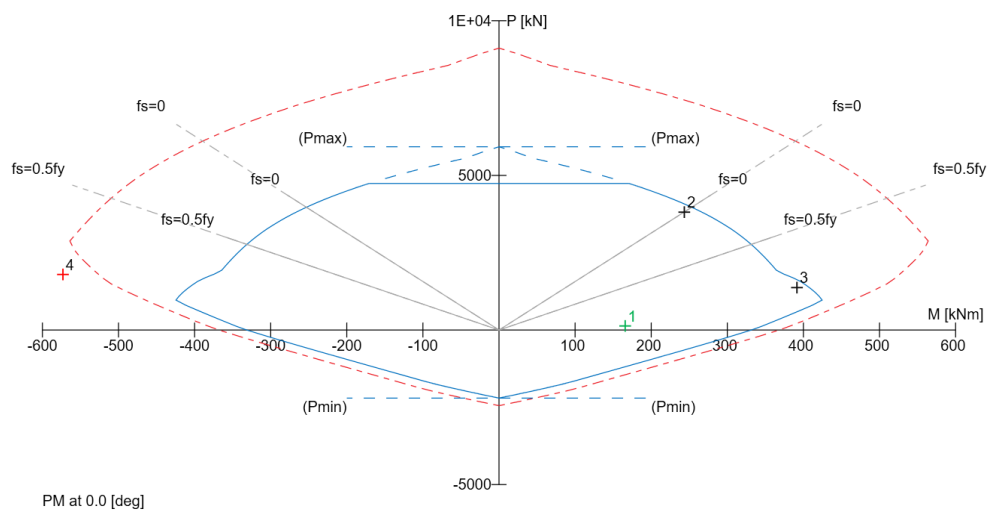
Gambar L3. 3 Diagram Interaksi Kolom K1(L2) Arah X



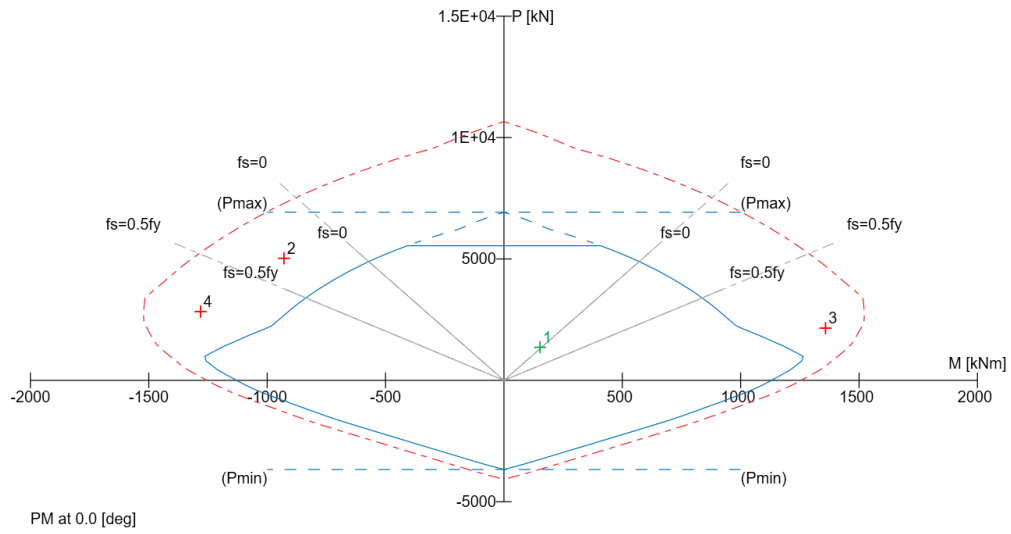
Gambar L3. 4 Diagram Interaksi Kolom K1(L2) Arah Y



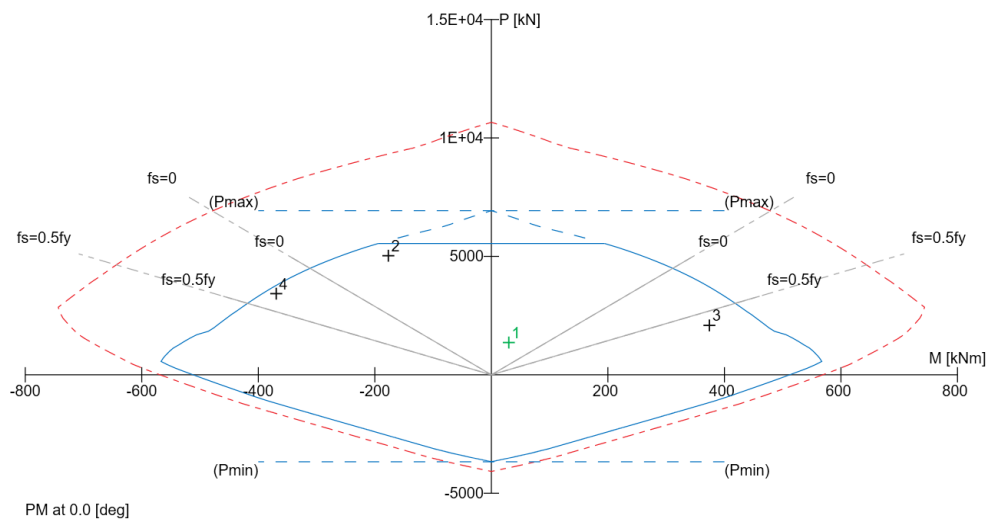
Gambar L3. 5 Diagram Interaksi Kolom K1(L3-A) Arah Y



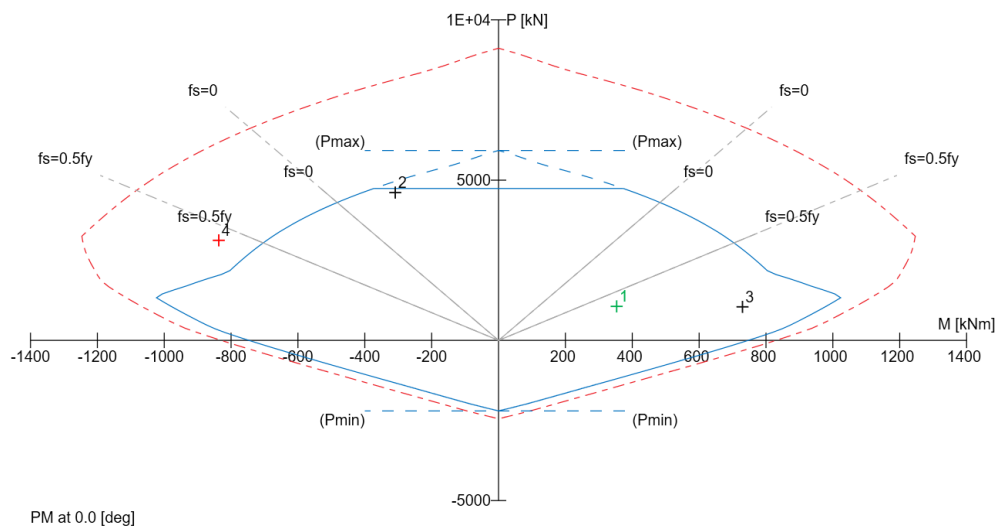
Gambar L3. 6 Diagram Interaksi Kolom K1(L3-A) Arah X



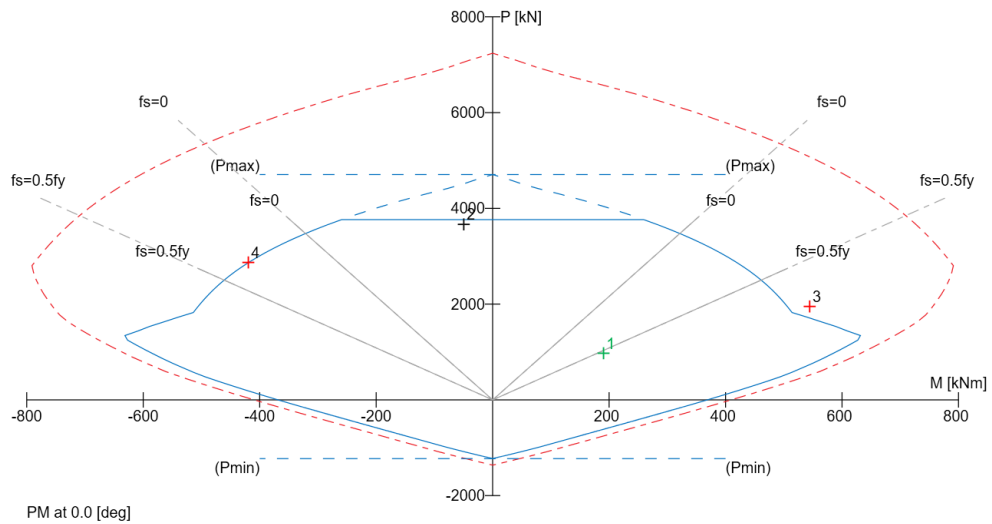
Gambar L3. 7 Diagram Interaksi Kolom K2(M) Arah X



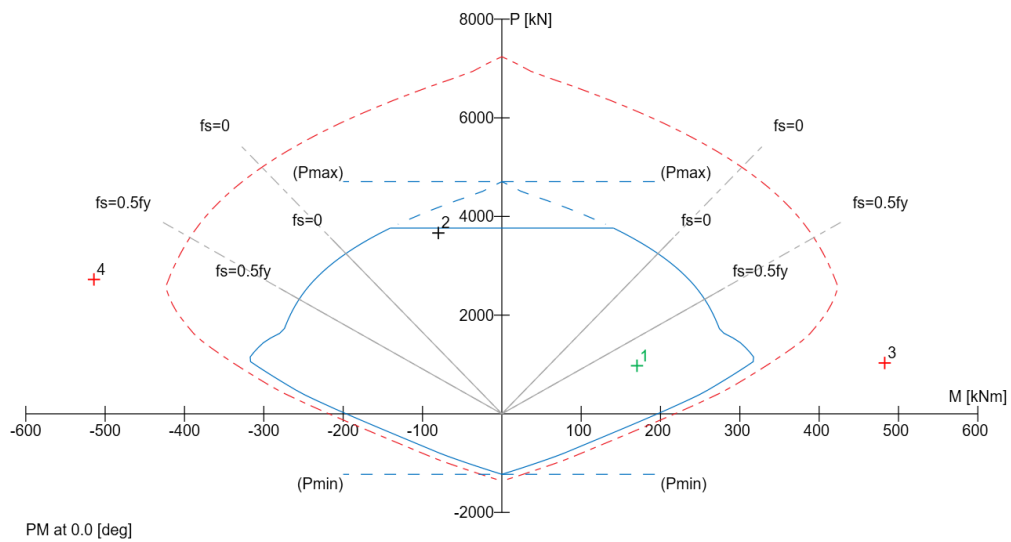
Gambar L3. 8 Diagram Interaksi Kolom K2(M) Arah Y



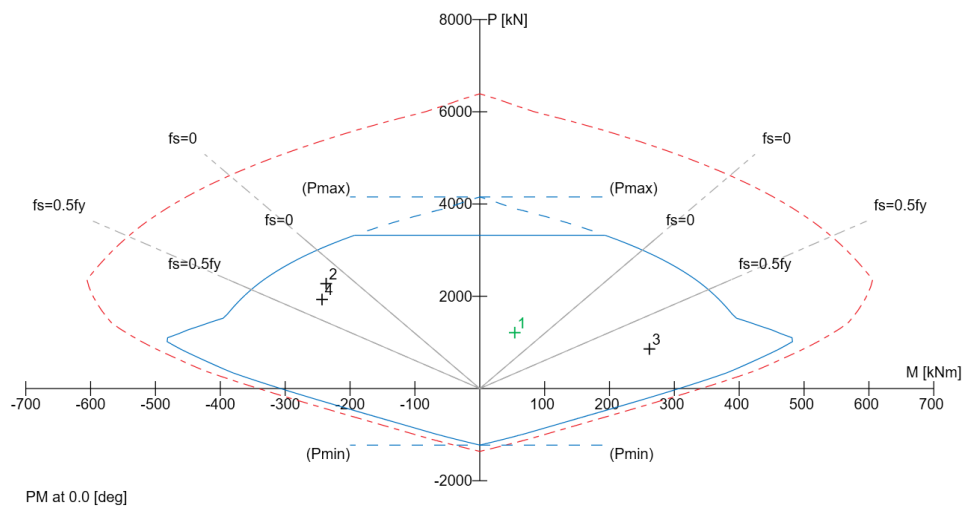
Gambar L3. 9 Diagram Interaksi Kolom K2(L2-L3) Arah X



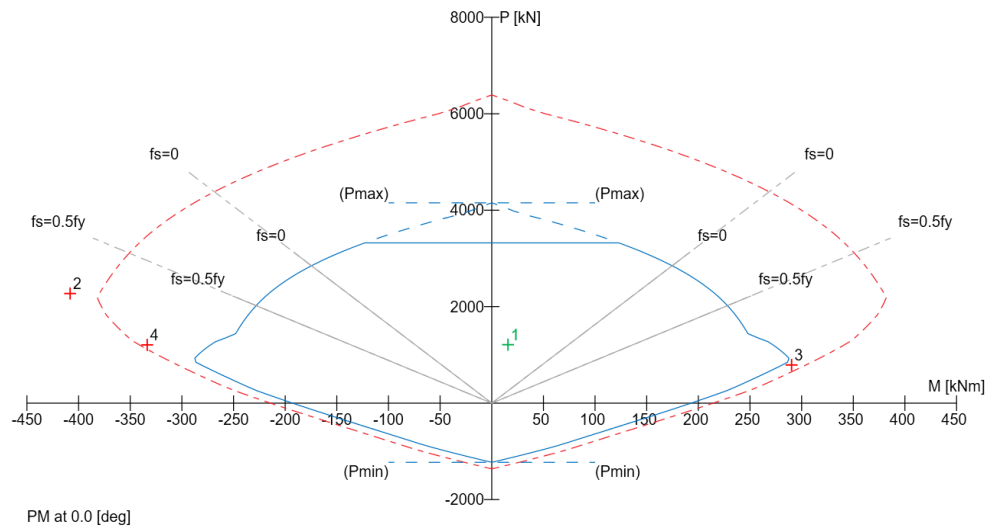
Gambar L3. 13 Diagram Interaksi Kolom K4 Arah X



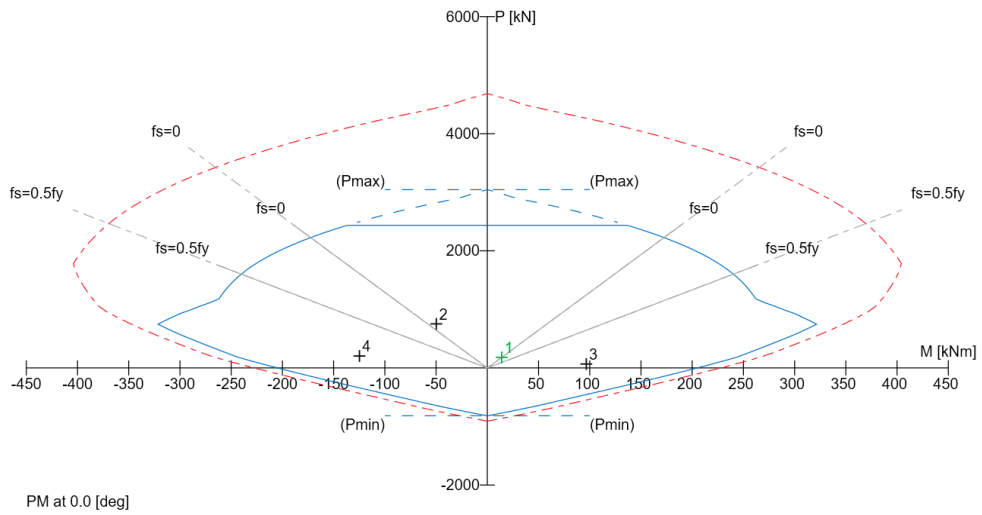
Gambar L3. 14 Diagram Interaksi Kolom K4 Arah Y



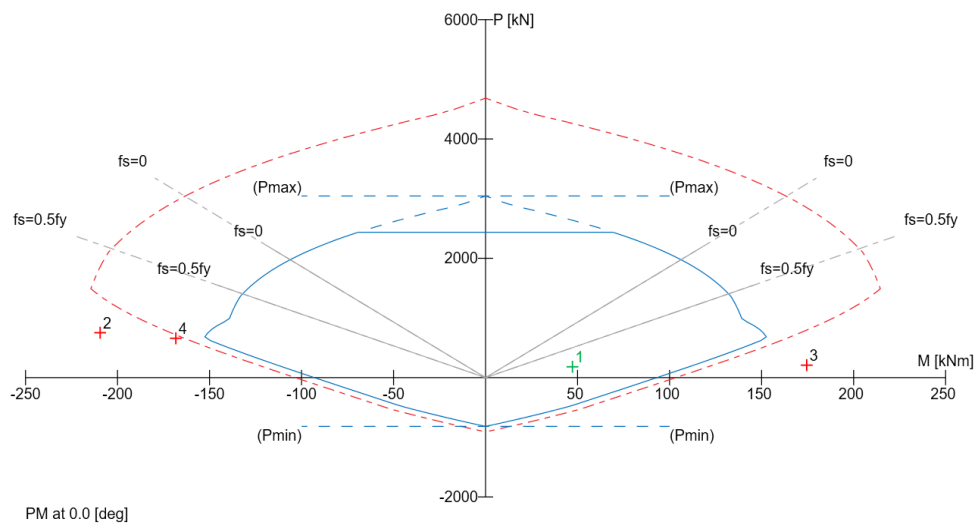
Gambar L3. 15 Diagram Interaksi Kolom K5 Arah X



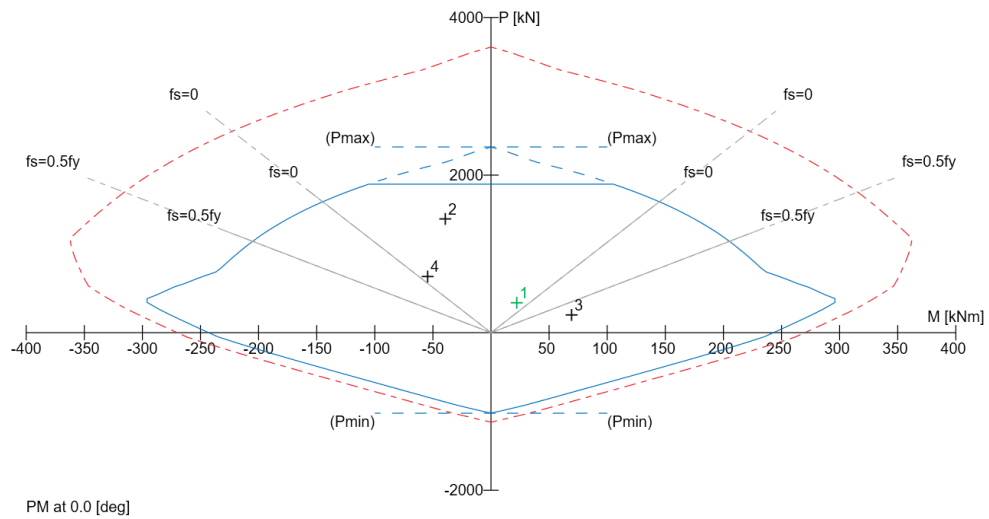
Gambar L3. 16 Diagram Interaksi Kolom K5 Arah Y



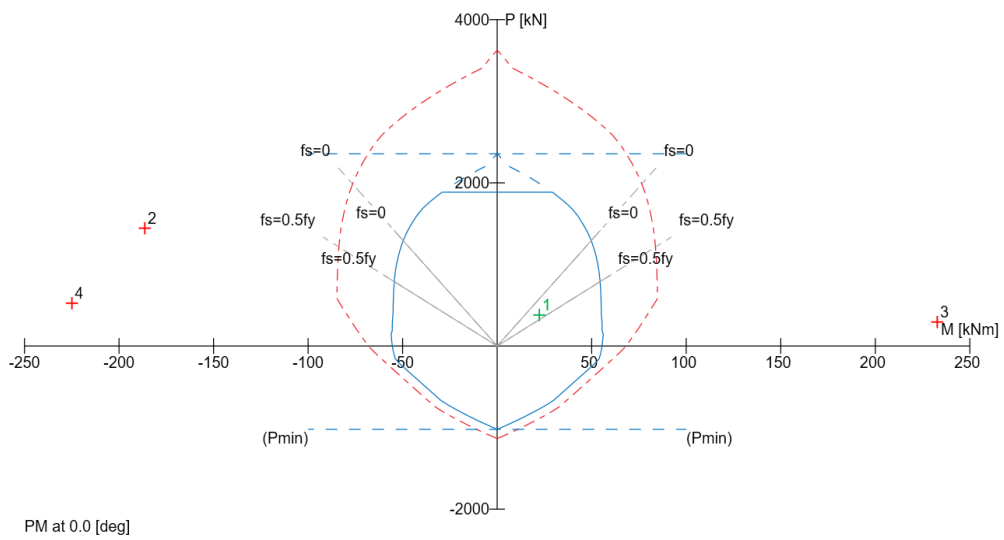
Gambar L3. 17 Diagram Interaksi Kolom K6 Arah X



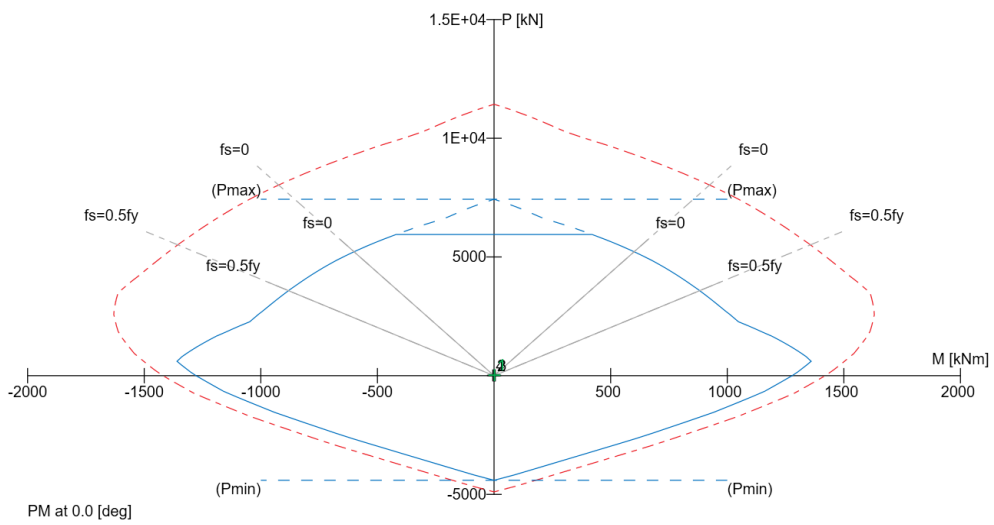
Gambar L3. 18 Diagram Interaksi Kolom K6 Arah Y



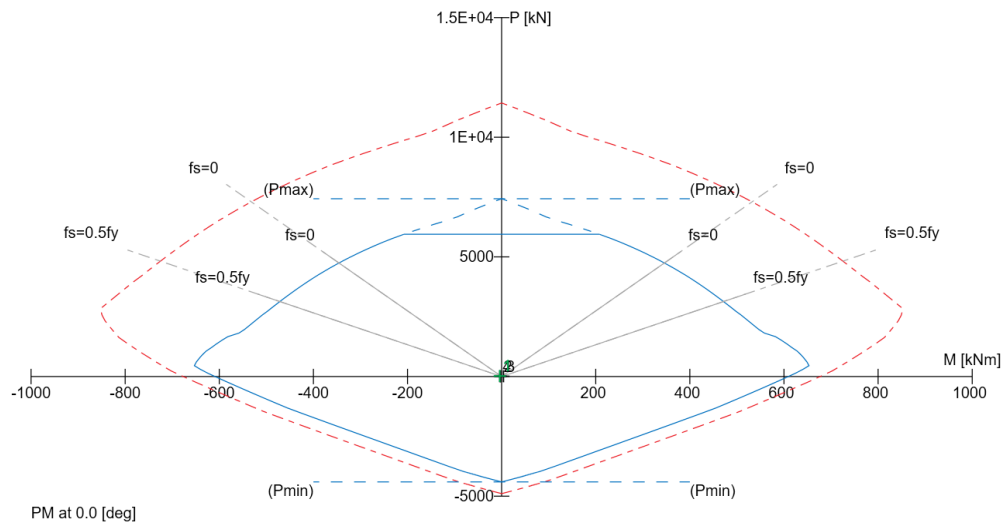
Gambar L3. 19 Diagram Interaksi Kolom K7 Arah X



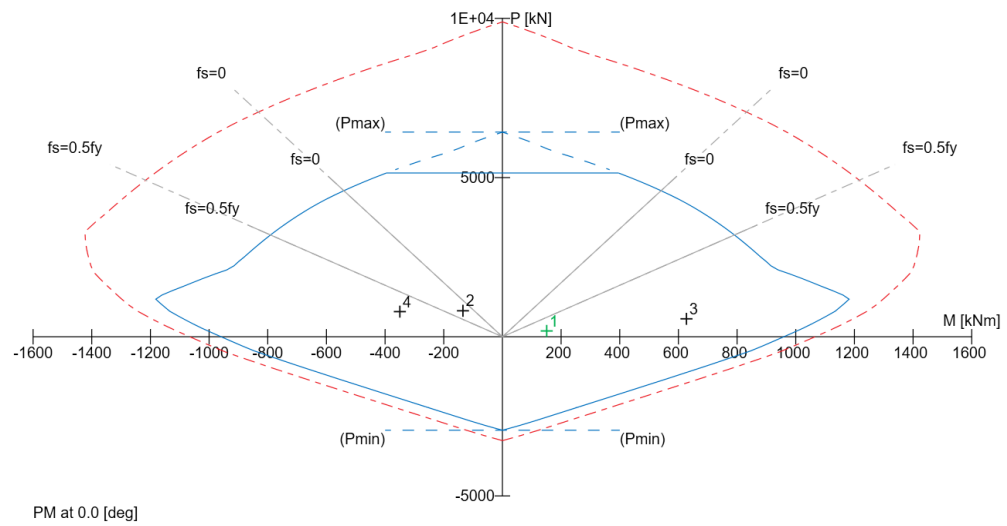
Gambar L3. 20 Diagram Interaksi Kolom K7 Arah Y



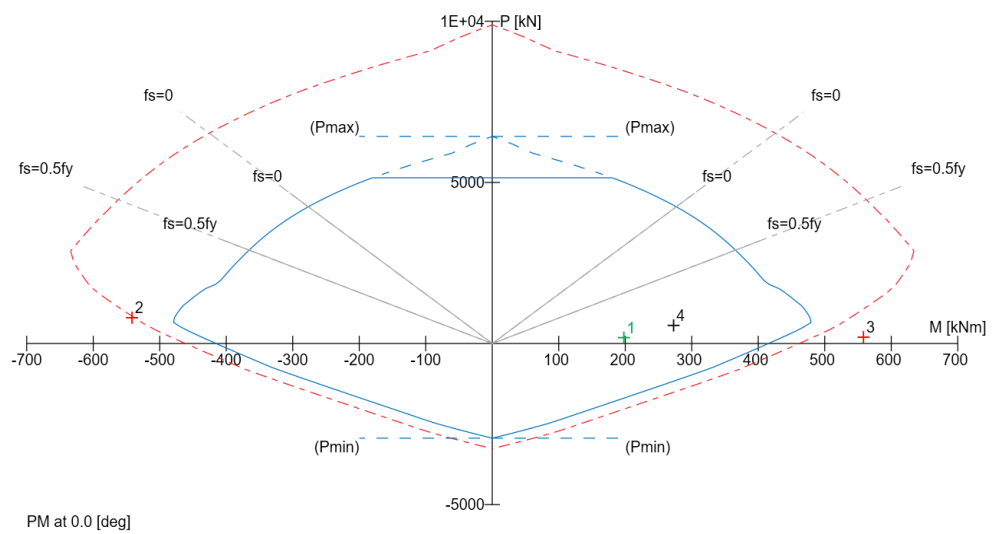
Gambar L3. 21 Diagram Interaksi Kolom K8(L2) Arah X



Gambar L3. 22 Diagram Interaksi Kolom K8(L2) Arah Y



Gambar L3. 23 Diagram Interaksi Kolom K8(L3) Arah X

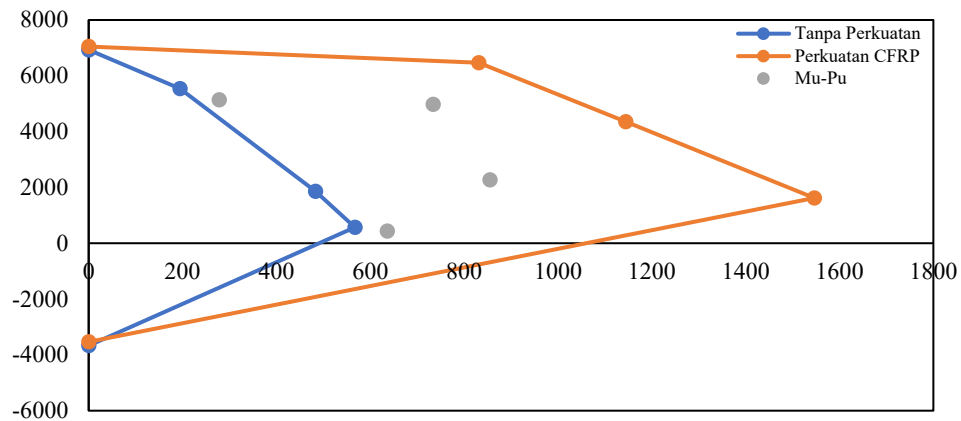


Gambar L3. 24 Diagram Interaksi Kolom K8(L3) Arah Y

**Lampiran 4. Tabel Rekapitulasi Hasil
Perhitungan Perkuatan CFRP Terhadap
Kapasitas Aksial – Lentur dan Gambar
Diagram Interaksi Kolom Setelah Perkuatan**

Tabel L4. 1 Rekapitulasi Hasil Perhitungan Perkuatan CFRP terhadap Kapasitas Aksial – Lentur Kolom K1(L2) Arah Y

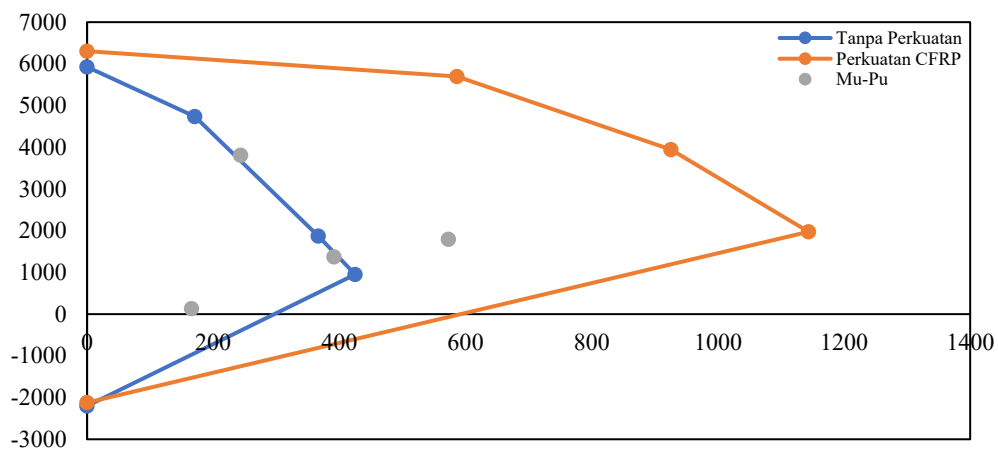
Tipe Kolom	Titik	Sebelum Perkuatan		Setelah Perkuatan (n = 3)		Kenaikan (%)	
		ϕP_n	ϕM_n	ϕP_n	ϕM_n	ϕP_n	ϕM_n
K1(L2) Arah Y	A	6929,500	0	7047,472	0	2%	
	B	5543,600	194,370	6463,631	830,941	17%	328%
	C	1855,900	483,210	4359,097	1144,323	135%	137%
	4	569,800	567,320	1620,564	1546,380	184%	173%
	5	-3669,700	0	-3534,292	0	4%	



Gambar L4. 1 Diagram Interaksi Kolom K1(L2) Arah Y Setelah Perkuatan

Tabel L4. 2 Rekapitulasi Hasil Perhitungan Perkuatan CFRP terhadap Kapasitas Aksial – Lentur Kolom K1(L3-A) Arah Y

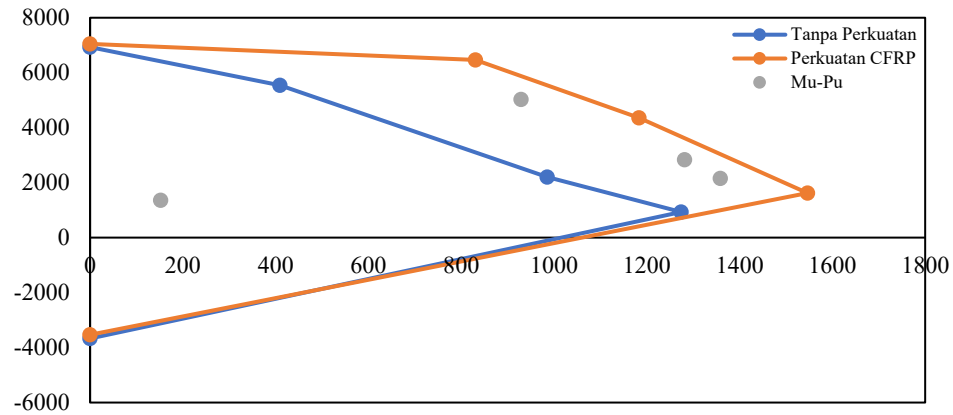
Tipe Kolom	Titik	Sebelum Perkuatan		Setelah Perkuatan (n = 3)		Kenaikan (%)	
		ϕP_n	ϕM_n	ϕP_n	ϕM_n	ϕP_n	ϕM_n
K1(L3-A) Arah Y	A	6929,500	0	7047,472	0	6%	
	B	5543,600	194,370	6463,631	830,941	20%	244%
	C	1855,900	483,210	4359,097	1144,323	111%	152%
	4	569,800	567,320	1620,564	1546,380	108%	169%
	5	-3669,700	0	-3534,292	0	4%	



Gambar L4. 2 Diagram Interaksi Kolom K1(L3-A) Arah Y Setelah Perkuatan

Tabel L4. 3 Rekapitulasi Hasil Perhitungan Perkuatan CFRP terhadap Kapasitas Aksial – Lentur Kolom K2(M) Arah X

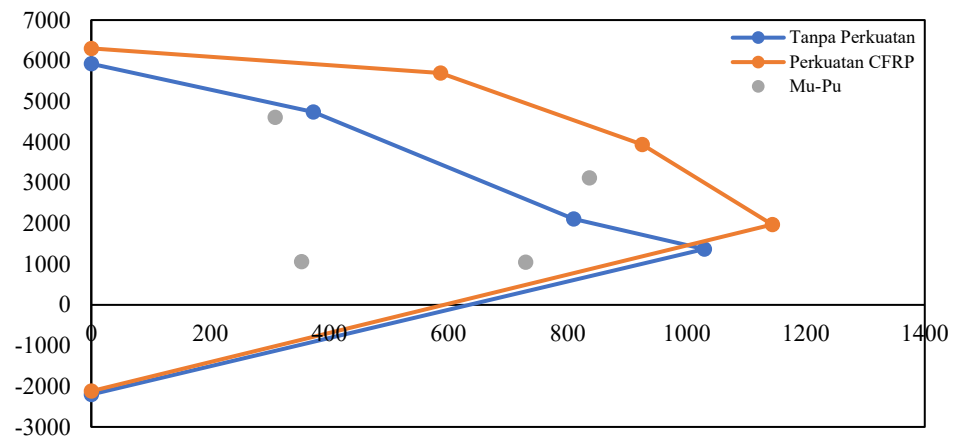
Tipe Kolom	Titik	Sebelum Perkuatan		Setelah Perkuatan (n = 3)		Kenaikan (%)	
		ϕP_n	ϕM_n	ϕP_n	ϕM_n	ϕP_n	ϕM_n
K2(M) Arah X	A	6929,500	0	7047,472	0	2%	
	B	5543,600	409,270	6463,631	830,941	17%	103%
	C	2207,100	985,250	4359,097	1183,024	98%	20%
	4	932,700	1274,160	1620,564	1546,380	74%	21%
	5	-3669,700	0	-3534,292	0	4%	



Gambar L4. 3 Diagram Interaksi Kolom K2(M) Arah X Setelah Perkuatan

Tabel L4. 4 Rekapitulasi Hasil Perhitungan Perkuatan CFRP terhadap Kapasitas Aksial – Lentur Kolom K2(L2-L3) Arah X

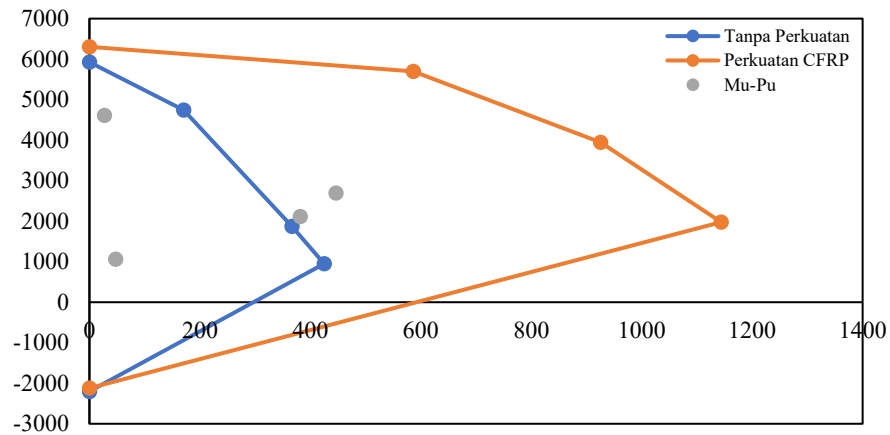
Tipe Kolom	Titik	Sebelum Perkuatan		Setelah Perkuatan (n = 3)		Kenaikan (%)	
		ϕP_n	ϕM_n	ϕP_n	ϕM_n	ϕP_n	ϕM_n
K2(L2-L3) Arah X	A	5925,700	0	6304,544	0	6%	
	B	4740,600	372,980	5698,889	586,427	20%	57%
	C	2113,300	810,200	3942,548	925,455	87%	14%
	4	1371,700	1029,620	1976,254	1143,826	44%	11%
	5	-2201,800	0	-2120,575	0	4%	



Gambar L4. 4 Diagram Interaksi Kolom K2(L2-L3) Arah X Setelah Perkuatan

Tabel L4. 5 Rekapitulasi Hasil Perhitungan Perkuatan CFRP terhadap Kapasitas Aksial – Lentur Kolom K2(L2-L3) Arah Y

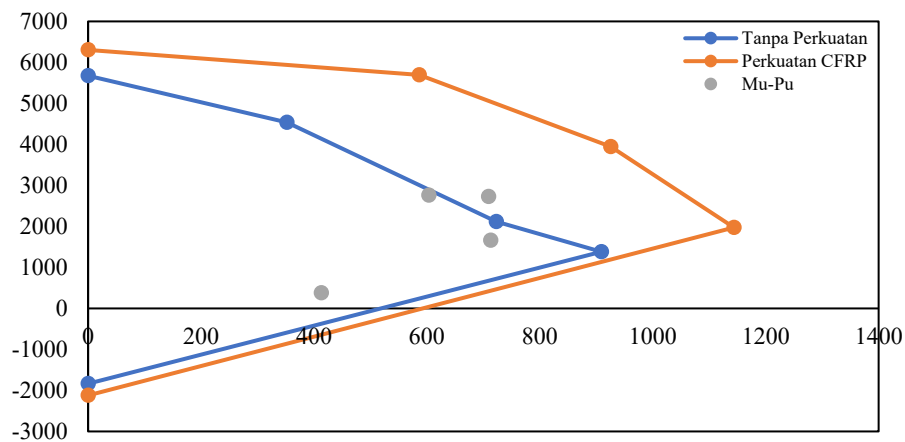
Tipe Kolom	Titik	Sebelum Perkuatan		Setelah Perkuatan (n = 3)		Kenaikan (%)	
		ϕP_n	ϕM_n	ϕP_n	ϕM_n	ϕP_n	ϕM_n
K2(L2-L3) Arah Y	A	5925,700	0	6304,544	0	6%	
	B	4740,600	170,720	5698,889	586,427	20%	244%
	C	1871,700	366,560	3942,548	925,455	111%	152%
	4	948,400	425,070	1976,254	1143,826	108%	169%
	5	-2201,800	0	-2120,575	0	4%	



Gambar L4. 5 Diagram Interaksi Kolom K2(L2-L3) Arah Y Setelah Perkuatan

Tabel L4. 6 Rekapitulasi Hasil Perhitungan Perkuatan CFRP terhadap Kapasitas Aksial – Lentur Kolom K2(L4-A) Arah X

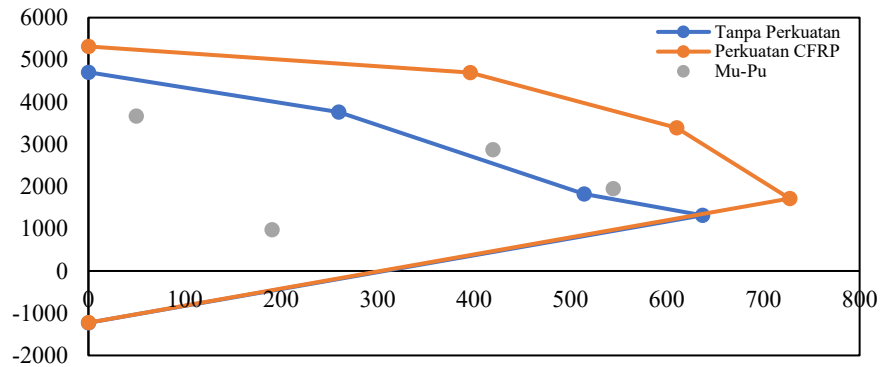
Tipe Kolom	Titik	Sebelum Perkuatan		Setelah Perkuatan (n = 3)		Kenaikan (%)	
		ϕP_n	ϕM_n	ϕP_n	ϕM_n	ϕP_n	ϕM_n
K2(L4-A) Arah X	A	5674,800	0	6304,544	0	11%	
	B	4539,800	351,990	5698,889	586,427	26%	67%
	C	2120,300	723,060	3942,548	925,455	86%	28%
	4	1381,400	908,960	1976,254	1143,826	43%	26%
	5	-1834,800	0	-2120,575	0	16%	



Gambar L4. 6 Diagram Interaksi Kolom K2(L4-A) Arah X Setelah Perkuatan

Tabel L4. 7 Rekapitulasi Hasil Perhitungan Perkuatan CFRP terhadap Kapasitas Aksial – Lentur Kolom K4 Arah X

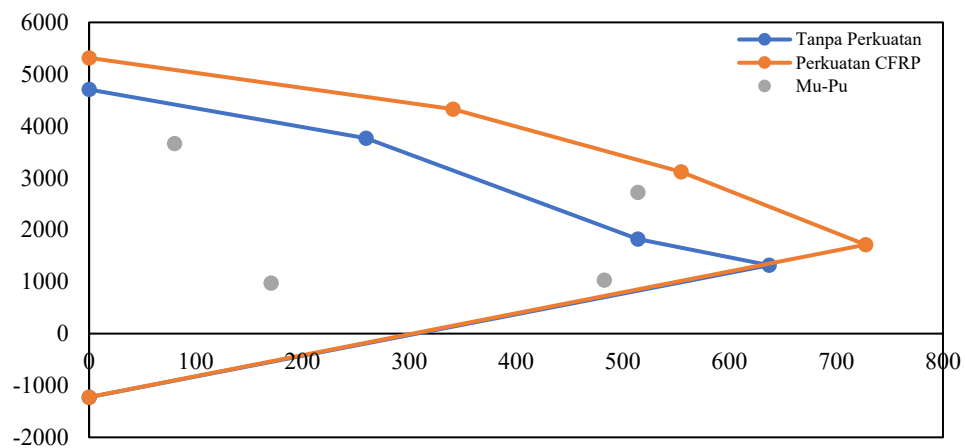
Tipe Kolom	Titik	Sebelum Perkuatan		Setelah Perkuatan (n = 3)		Kenaikan (%)	
		ϕP_n	ϕM_n	ϕP_n	ϕM_n	ϕP_n	ϕM_n
K4 Arah X	A	4706,100	0	5316,846	0	13,0%	
	B	3764,900	259,570	4699,365	396,013	24,8%	52,6%
	C	1822,300	514,230	3387,093	610,361	85,9%	18,7%
	4	1320,700	637,170	1713,606	727,477	29,7%	14,2%
	5	-1226,300	0	-1224,844	0	0,12%	



Gambar L4. 7 Diagram Interaksi Kolom K4 Arah X Setelah Perkuatan

Tabel L4. 8 Rekapitulasi Hasil Perhitungan Perkuatan CFRP terhadap Kapasitas Aksial – Lentur Kolom K4 Arah Y

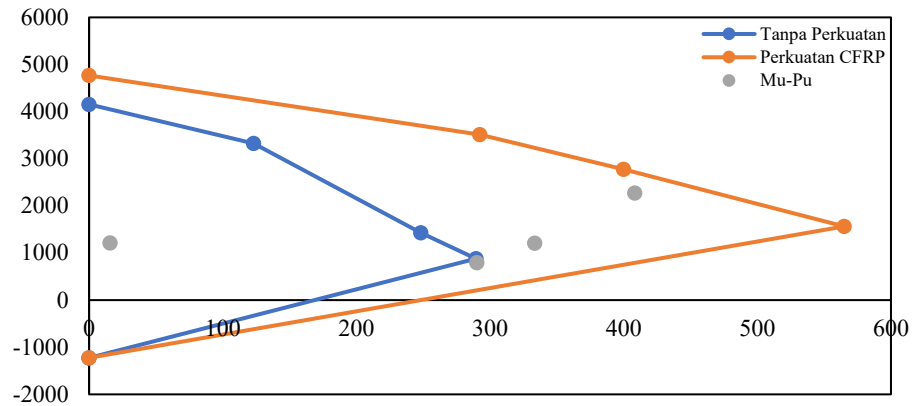
Tipe Kolom	Titik	Sebelum Perkuatan		Setelah Perkuatan (n = 3)		Kenaikan (%)	
		ϕP_n	ϕM_n	ϕP_n	ϕM_n	ϕP_n	ϕM_n
K4 Arah Y	A	4706,100	0	5316,846	0	13%	
	B	3764,900	140,750	4326,346	341,007	15%	142%
	C	1667,600	275,500	3117,954	554,546	87%	101%
	4	1089,700	319,760	1713,606	727,477	57%	128%
	5	-1226,300	0	-1224,844	0	0,12%	



Gambar L4. 8 Diagram Interaksi Kolom K4 Arah Y Setelah Perkuatan

Tabel L4. 9 Rekapitulasi Hasil Perhitungan Perkuatan CFRP terhadap Kapasitas Aksial – Lentur Kolom K5 Arah Y

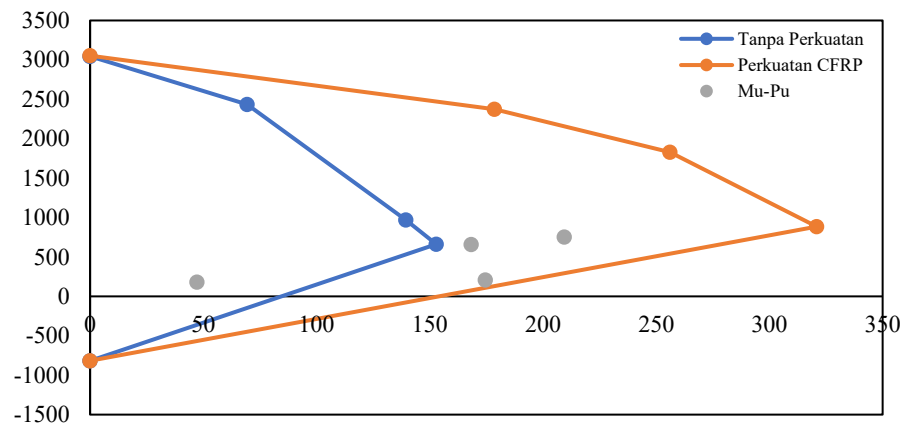
Tipe Kolom	Titik	Sebelum Perkuatan		Setelah Perkuatan (n = 3)		Kenaikan (%)	
		ϕP_n	ϕM_n	ϕP_n	ϕM_n	ϕP_n	ϕM_n
K5 Arah Y	A	4153,600	0	4766,503	0	14,76%	
	B	3322,900	123,070	3511,242	292,355	5,67%	138%
	C	1427,400	248,350	2777,550	399,900	94,59%	61%
	4	881,800	289,480	1562,429	565,036	77,19%	95%
	5	-1226,300	0	-1224,844	0	0,12%	



Gambar L4. 9 Diagram Interaksi Kolom K5 Arah Y Setelah Perkuatan

Tabel L4. 10 Rekapitulasi Hasil Perhitungan Perkuatan CFRP terhadap Kapasitas Aksial – Lentur Kolom K6 Arah Y

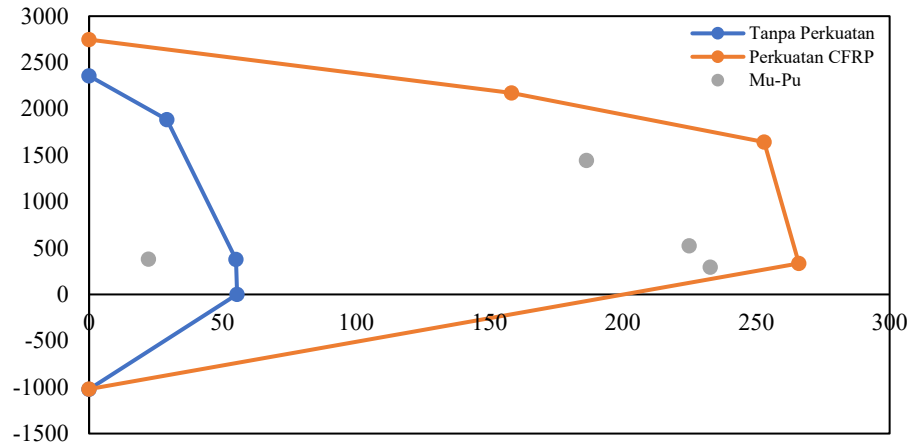
Tipe Kolom	Titik	Sebelum Perkuatan		Setelah Perkuatan (n = 3)		Kenaikan (%)	
		ϕP_n	ϕM_n	ϕP_n	ϕM_n	ϕP_n	ϕM_n
K6 Arah Y	A	3045,300	0	3053,661	0	0,27%	
	B	2436,300	69,330	2372,777	178,531	6,10%	158%
	C	969,500	139,440	1830,213	256,098	88,78%	84%
	4	663,300	152,880	883,652	320,907	33,22%	110%
	5	-817,500	0	-816,563	0	0,11%	



Gambar L4. 10 Diagram Interaksi Kolom K6 Arah Y Setelah Perkuatan

Tabel L4. 11 Rekapitulasi Hasil Perhitungan Perkuatan CFRP terhadap Kapasitas Aksial – Lentur Kolom K7 Arah Y

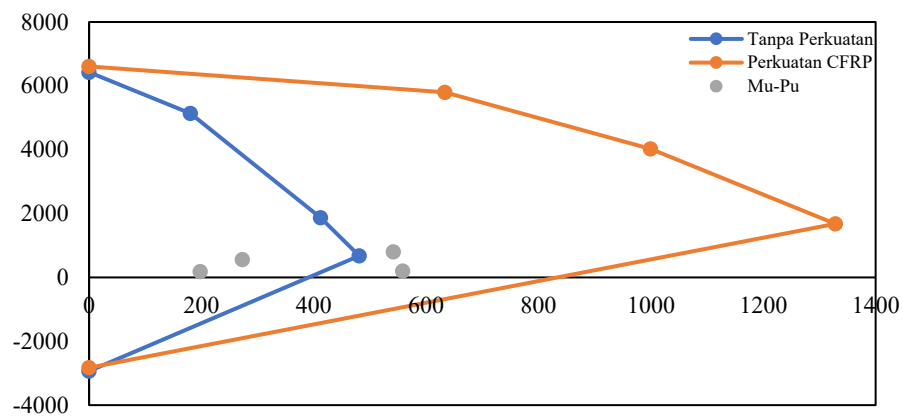
Tipe Kolom	Titik	Sebelum Perkuatan		Setelah Perkuatan (n = 3)		Kenaikan (%)	
		ϕP_n	ϕM_n	ϕP_n	ϕM_n	ϕP_n	ϕM_n
K7 Arah Y	A	2356,400	0	2747,649	0	16,60%	
	B	1885,100	29,140	2171,460	158,368	15,19%	443%
	C	378,100	55,080	1642,061	253,011	334,29%	359%
	4	0,000	55,470	333,906	265,999	0,00%	380%
	5	-1021,900	0	-1020,703	0	0,12%	



Gambar L4. 11 Diagram Interaksi Kolom K7 Arah Y Setelah Perkuatan

Tabel L4. 12 Rekapitulasi Hasil Perhitungan Perkuatan CFRP terhadap Kapasitas Aksial – Lentur Kolom K8(L3) Arah Y

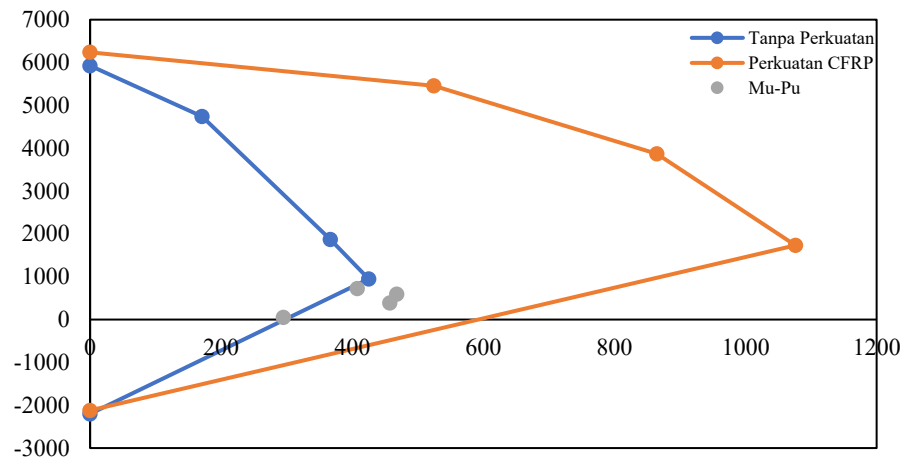
Tipe Kolom	Titik	Sebelum Perkuatan		Setelah Perkuatan (n = 3)		Kenaikan (%)	
		ϕP_n	ϕM_n	ϕP_n	ϕM_n	ϕP_n	ϕM_n
K8(L3) Arah Y	A	6427,600	0	6609,211	0	2,83%	
	B	5142,100	180,510	5800,530	633,243	12,80%	251%
	C	1869,900	412,120	4030,420	999,281	115,54%	142%
	4	676,200	480,870	1675,996	1328,354	147,86%	176%
	5	-2935,700	0	-2827,433	0	3,69%	



Gambar L4. 12 Diagram Interaksi Kolom K8(L3) Arah Y Setelah Perkuatan

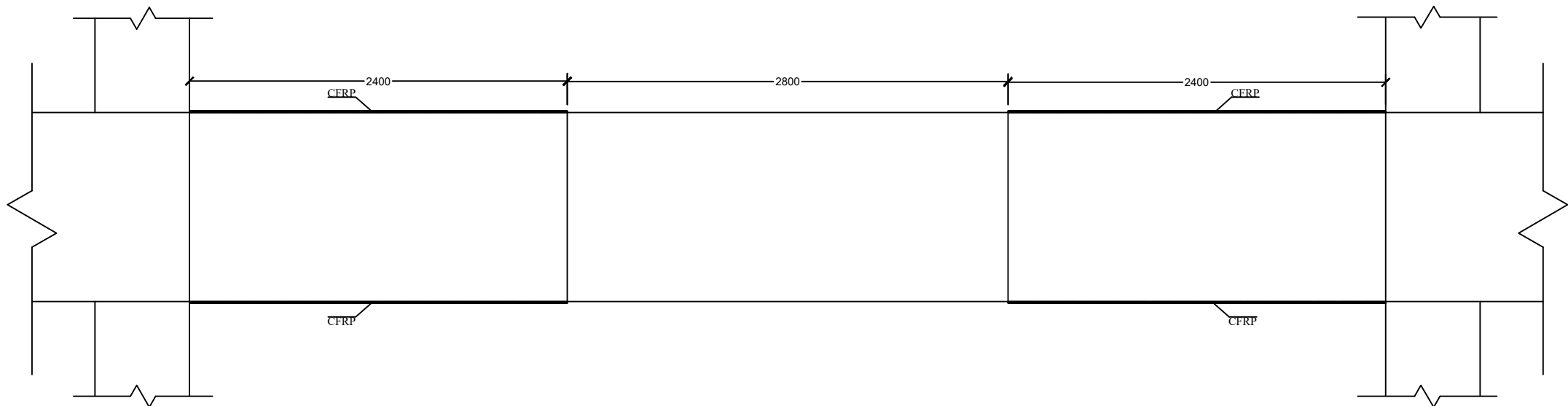
Tabel L4. 13 Rekapitulasi Hasil Perhitungan Perkuatan CFRP terhadap Kapasitas Aksial – Lentur Kolom K8(L4-A) Arah Y

Tipe Kolom	Titik	Sebelum Perkuatan		Setelah Perkuatan (n = 3)		Kenaikan (%)	
		ϕP_n	ϕM_n	ϕP_n	ϕM_n	ϕP_n	ϕM_n
K8(L4-A) Arah Y	A	5925,700	0	6237,747	0	5,27%	
	B	4740,600	170,720	5455,427	524,483	15,08%	207%
	C	1871,700	366,560	3869,775	864,784	106,75%	136%
	4	948,400	425,070	1731,456	1076,194	82,57%	153%
	5	-2201,800	0	-2120,575	0	3,69%	



Gambar L4. 13 Diagram Interaksi Kolom K8(L4-A) Arah Y Setelah Perkuatan

Lampiran 5. Gambar Pemasangan Perkuatan CFRP



TAMPAK SAMPING BALOK B1
SKALA 1 : 35

TIPE	B1		
POSISI	SENDI PLASTIS KIRI	LUAR SENDI PLASTIS	SENDI PLASTIS KANAN
POTONGAN			
DIMENSI	400 X 600		
TUL. ATAS	8 D25	3 D25	8 D25
TUL. BAWAH	3 D25	8 D25	3 D25
TUL. SENGKANG	D10 - 100	D10 - 150	D10 - 150
CFRP	1 LAPISAN	-	1 LAPISAN



Tugas Akhir :
Evaluasi dan Perkuatan Elemen Struktur
Balok dan Kolom Bangunan Hotel di
Yogyakarta dengan Menggunakan *Carbon
Fiber Reinforced Polymer (CFRP)*

Mahasiswa
Hajrah Zulfika
21511173

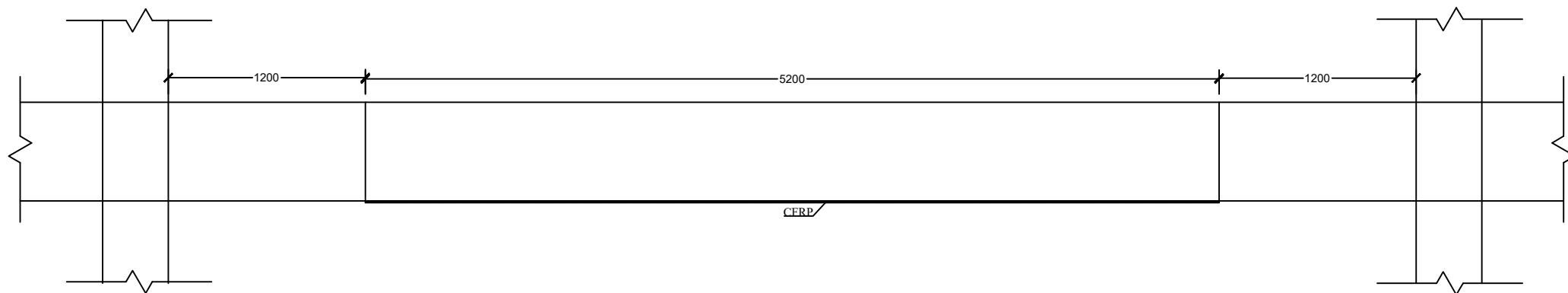
Dosen Pembimbing
Jafar, S.T., MURP., M.T.

Judul Gambar
Detail Pemasangan CFRP terhadap
Kapasitas Lentur Balok B1

Skala
1 : 35

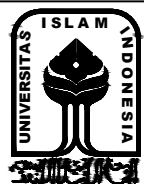
Nomor
Gambar
1

Jumlah
Gambar
34



TAMPAK SAMPING BALOK B2
SKALA 1 : 35

TIPE	B2		
POSISI	TUMPUAN KIRI	LAPANGAN	TUMPUAN KANAN
POTONGAN			
DIMENSI	400 X 600		
TUL. ATAS	8 D25	3 D25	8 D25
TUL. BAWAH	3 D25	8 D25	3 D25
TUL. SENGKANG	D10 - 100	D10 - 150	D10 - 150
CFRP	-	1 LAPISAN	-



Tugas Akhir :
Evaluasi dan Perkuatan Elemen Struktur
Balok dan Kolom Bangunan Hotel di
Yogyakarta dengan Menggunakan *Carbon
Fiber Reinforced Polymer (CFRP)*

Mahasiswa
Hajrah Zulfika
21511173

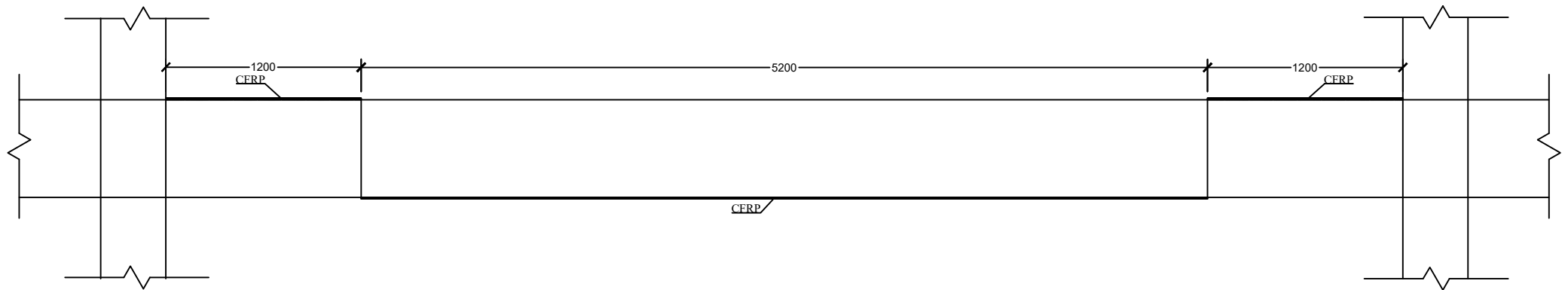
Dosen Pembimbing
Jafar, S.T., MURP., M.T.

Judul Gambar
Detail Pemasangan CFRP terhadap
Kapasitas Lentur Balok B2

Skala
1 : 35

Nomor
Gambar
2

Jumlah
Gambar
34



TAMPAK SAMPING BALOK B3
SKALA 1 : 35

TIPE	B3		
POSISI	TUMPUAN KIRI	LAPANGAN	TUMPUAN KANAN
POTONGAN			
DIMENSI	400 X 600		
TUL. ATAS	6 D25	3 D25	6 D25
TUL. BAWAH	3 D25	7 D25	3 D25
TUL. SENGKANG	D10 - 100	D10 - 150	D10 - 150
CFRP	1 LAPISAN	1 LAPISAN	1 LAPISAN



Tugas Akhir :
Evaluasi dan Perkuatan Elemen Struktur
Balok dan Kolom Bangunan Hotel di
Yogyakarta dengan Menggunakan *Carbon
Fiber Reinforced Polymer (CFRP)*

Mahasiswa
Hajrah Zulfika
21511173

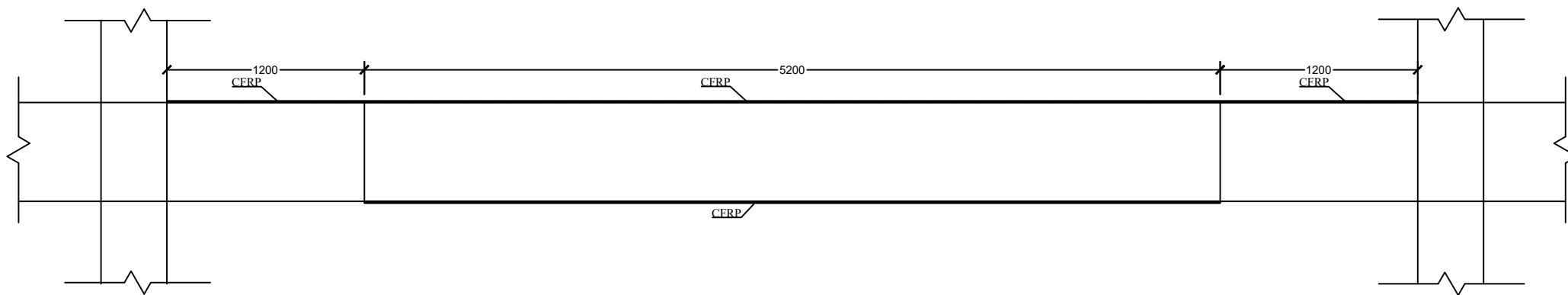
Dosen Pembimbing
Jafar, S.T., MURP., M.T.

Judul Gambar
Detail Pemasangan CFRP terhadap
Kapasitas Lentur Balok B3

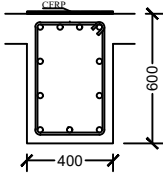
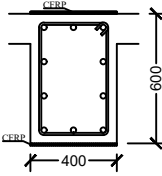
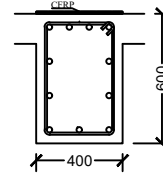
Skala
1 : 35

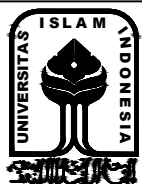
Nomor
Gambar
3

Jumlah
Gambar
34



TAMPAK SAMPIING BALOK B4
SKALA 1 : 35

TIPE	B4		
POSISI	TUMPUAN KIRI	LAPANGAN	TUMPUAN KANAN
POTONGAN			
DIMENSI	400 X 600		
TUL. ATAS	4 D25	3 D25	4 D25
TUL. BAWAH	3 D25	3 D25	3 D25
TUL. SENGKANG	D10 - 100	D10 - 150	D10 - 150
CFRP	1 LAPISAN	1 LAPISAN	1 LAPISAN



Tugas Akhir :
Evaluasi dan Perkuatan Elemen Struktur
Balok dan Kolom Bangunan Hotel di
Yogyakarta dengan Menggunakan *Carbon*
Fiber Reinforced Polymer (CFRP)

Mahasiswa
Hajrah Zulfika
21511173

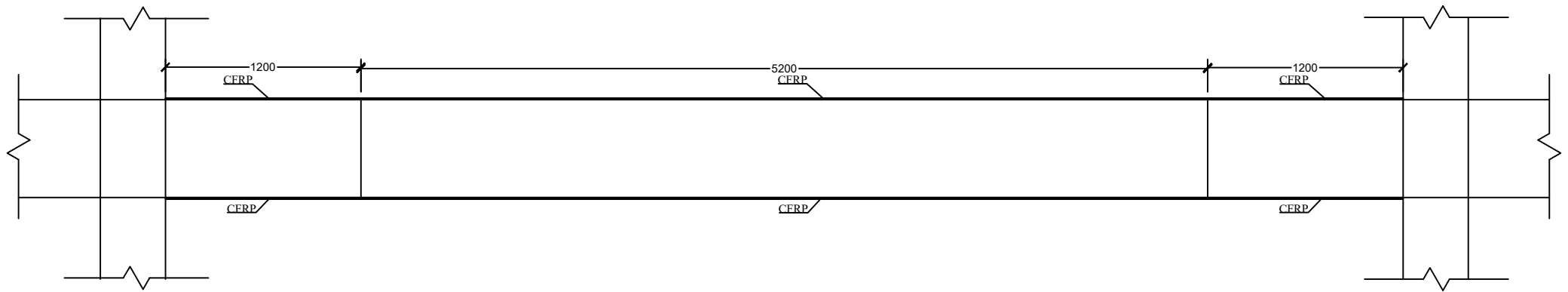
Dosen Pembimbing
Jafar, S.T., MURP., M.T.

Judul Gambar
Detail Pemasangan CFRP terhadap
Kapasitas Lentur Balok B4

Skala
1 : 35

Nomor
Gambar
4

Jumlah
Gambar
34



TAMPAK SAMPING BALOK B5
SKALA 1 : 35

TIPE	B5		
POSISI	TUMPUAN KIRI	LAPANGAN	TUMPUAN KANAN
POTONGAN			
DIMENSI	400 X 600		
TUL. ATAS	3 D25	3 D25	3 D25
TUL. BAWAH	3 D25	3 D25	3 D25
TUL. SENGKANG	D10 - 100	D10 - 150	D10 - 150
CFRP	2 LAPISAN	2 LAPISAN	2 LAPISAN



Tugas Akhir :
Evaluasi dan Perkuatan Elemen Struktur
Balok dan Kolom Bangunan Hotel di
Yogyakarta dengan Menggunakan *Carbon
Fiber Reinforced Polymer (CFRP)*

Mahasiswa
Hajrah Zulfika
21511173

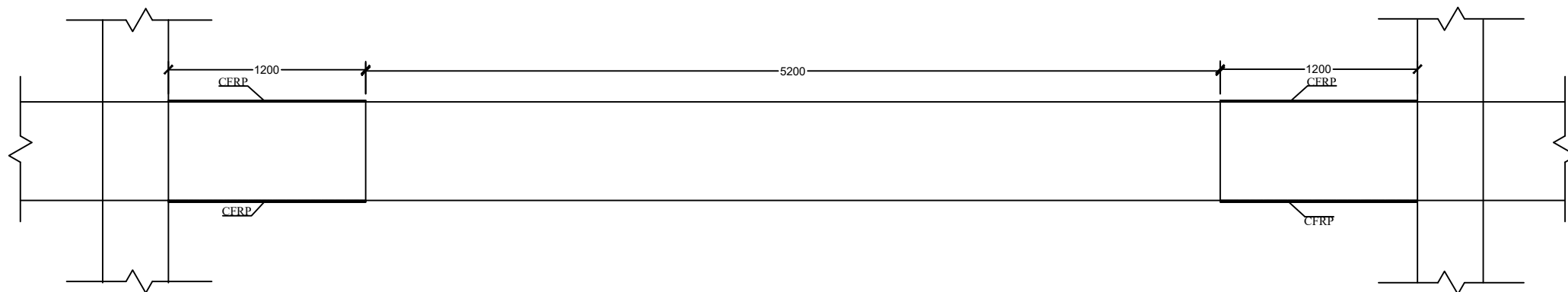
Dosen Pembimbing
Jafar, S.T., MURP., M.T.

Judul Gambar
Detail Pemasangan CFRP terhadap
Kapasitas Lentur Balok B5

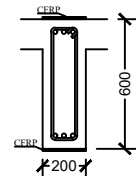
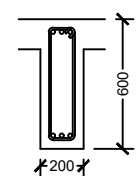
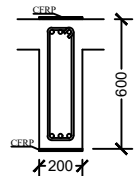
Skala
1 : 35

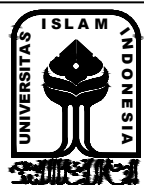
Nomor
Gambar
5

Jumlah
Gambar
34



 **TAMPAK SAMPING BALOK B6**
SKALA 1 : 35

TIPE	B6		
POSISI	TUMPUAN KIRI	LAPANGAN	TUMPUAN KANAN
POTONGAN			
DIMENSI	200 X 600		
TUL. ATAS	3 D25	3 D25	3 D25
TUL. BAWAH	3 D25	3 D25	3 D25
TUL. SENGKANG	D10 - 100	D10 - 150	D10 - 150
CFRP	1 LAPISAN	-	1 LAPISAN



Tugas Akhir :
Evaluasi dan Perkuatan Elemen Struktur
Balok dan Kolom Bangunan Hotel di
Yogyakarta dengan Menggunakan *Carbon*
Fiber Reinforced Polymer (CFRP)

Mahasiswa
Hajrah Zulfika
21511173

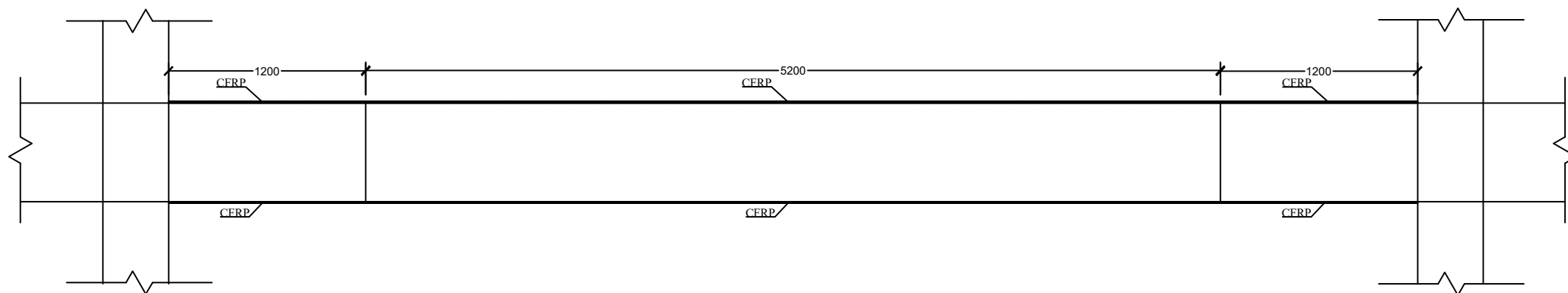
Dosen Pembimbing
Jafar, S.T., MURP., M.T.

Judul Gambar
Detail Pemasangan CFRP terhadap
Kapasitas Lentur Balok B6

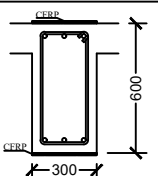
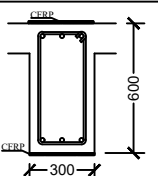
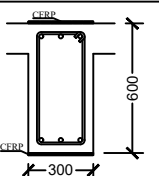
Skala
1 : 35

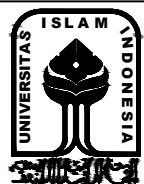
Nomor
Gambar
6

Jumlah
Gambar
34



TAMPAK SAMPIING BALOK B7
SKALA 1 : 35

TIPE	B7		
POSISI	TUMPUAN KIRI	LAPANGAN	TUMPUAN KANAN
POTONGAN			
DIMENSI	300 X 600		
TUL. ATAS	3 D25	3 D25	3 D25
TUL. BAWAH	3 D25	3 D25	3 D25
TUL. SENGKANG	D10 - 100	D10 - 150	D10 - 150
CFRP	1 LAPISAN	1 LAPISAN	1 LAPISAN



Tugas Akhir :
Evaluasi dan Perkuatan Elemen Struktur
Balok dan Kolom Bangunan Hotel di
Yogyakarta dengan Menggunakan *Carbon
Fiber Reinforced Polymer (CFRP)*

Mahasiswa
Hajrah Zulfika
21511173

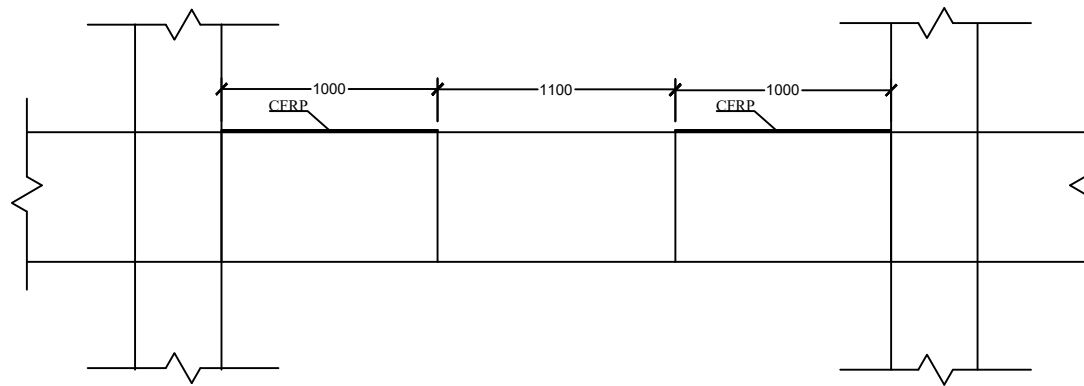
Dosen Pembimbing
Jafar, S.T., MURP., M.T.

Judul Gambar
Detail Pemasangan CFRP terhadap
Kapasitas Lentur Balok B7

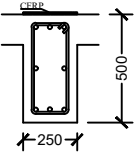
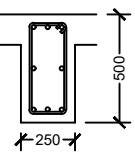
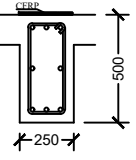
Skala
1 : 35

Nomor
Gambar
7

Jumlah
Gambar
34




TAMPAK SAMPING BALOK B9
 SKALA 1 : 35

TIPE	B9		
POSISI	TUMPUAN KIRI	LAPANGAN	TUMPUAN KANAN
POTONGAN			
DIMENSI	250 X 500		
TUL. ATAS	3 D25	3 D25	3 D25
TUL. BAWAH	3 D25	3 D25	3 D25
TUL. SENGKANG	D10 - 100	D10 - 150	D10 - 150
CFRP	1 LAPISAN	-	1 LAPISAN



Tugas Akhir :
 Evaluasi dan Perkuatan Elemen Struktur
 Balok dan Kolom Bangunan Hotel di
 Yogyakarta dengan Menggunakan *Carbon*
Fiber Reinforced Polymer (CFRP)

Mahasiswa
 Hajrah Zulfika
 21511173

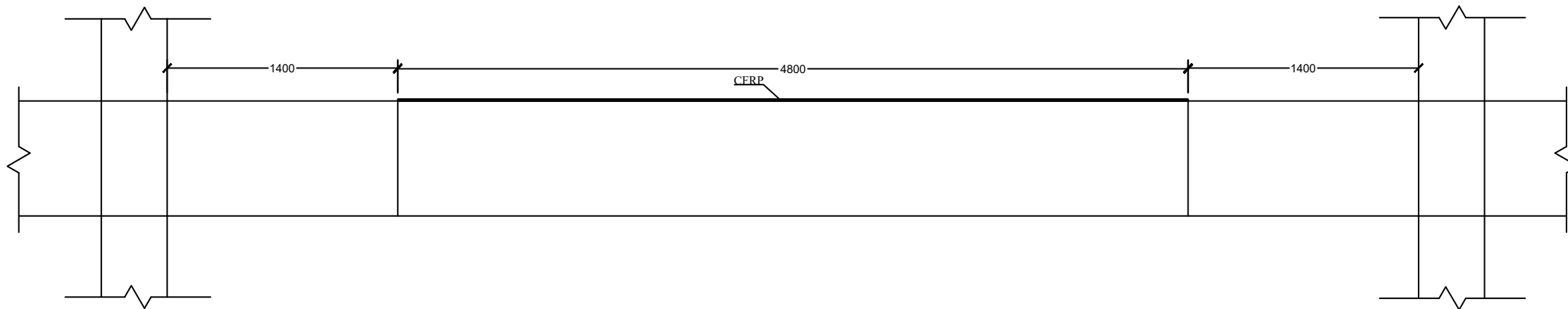
Dosen Pembimbing
 Jafar, S.T., MURP., M.T.

Judul Gambar
 Detail Pemasangan CFRP terhadap
 Kapasitas Lentur Balok B9

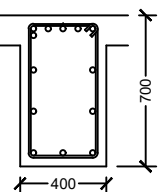
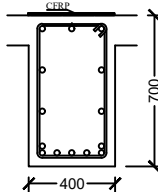
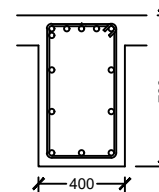
Skala
 1 : 35

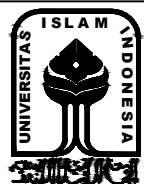
Nomor
 Gambar
 8

Jumlah
 Gambar
 34



TAMPAK SAMPING BALOK B11
SKALA 1 : 35

TIPE	B11		
POSISI	TUMPUAN KIRI	LAPANGAN	TUMPUAN KANAN
POTONGAN			
DIMENSI	400 X 700		
TUL. ATAS	6 D25	3 D25	6 D25
TUL. BAWAH	3 D25	7 D25	3 D25
TUL. SENGKANG	D10 - 100	D10 - 150	D10 - 150
CFRP	-	1 LAPISAN	-



Tugas Akhir :
Evaluasi dan Perkuatan Elemen Struktur
Balok dan Kolom Bangunan Hotel di
Yogyakarta dengan Menggunakan *Carbon
Fiber Reinforced Polymer (CFRP)*

Mahasiswa
Hajrah Zulfika
21511173

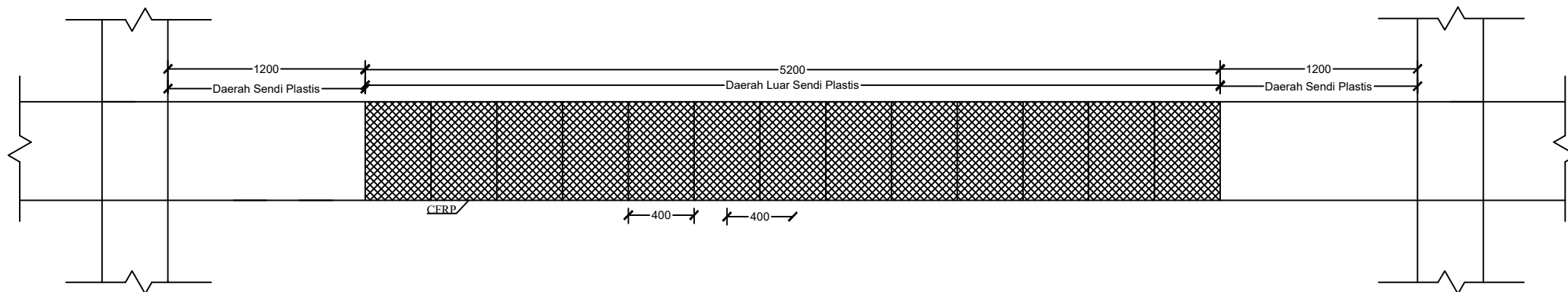
Dosen Pembimbing
Jafar, S.T., MURP., M.T.

Judul Gambar
Detail Pemasangan CFRP terhadap
Kapasitas Lentur Balok B11

Skala
1 : 35

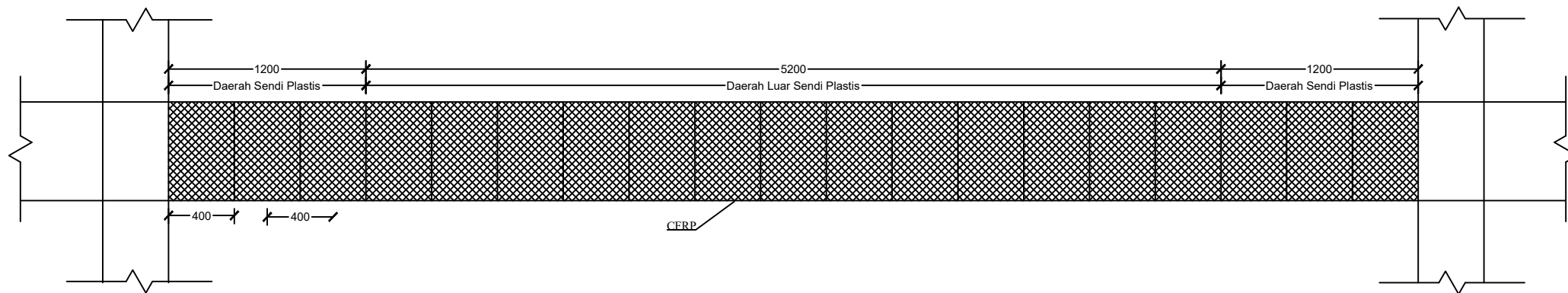
Nomor
Gambar
9

Jumlah
Gambar
36



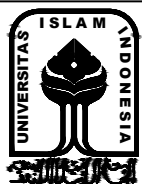
TAMPAK SAMPING BALOK B2
 SKALA 1 : 35

TIPE	B2		
POSISI	SENDI PLASTIS KIRI	LUAR SENDI PLASTIS	SENDI PLASTIS KANAN
POTONGAN			
DIMENSI	400 X 600		
TUL. ATAS	8 D25	3 D25	8 D25
TUL. BAWAH	3 D25	8 D25	3 D25
TUL. SENGKANG	D10 - 100	D10 - 150	D10 - 150
CFRP	-	1 LAPISAN	-



TAMPAK SAMPING BALOK B4
SKALA 1 : 35

TIPE	B4		
POSISI	SENDI PLASTIS KIRI	LUAR SENDI PLASTIS	SENDI PLASTIS KANAN
POTONGAN			
DIMENSI	400 X 600		
TUL. ATAS	4 D25	3 D25	4 D25
TUL. BAWAH	3 D25	3 D25	3 D25
TUL. SENGKANG	D10 - 100	D10 - 150	D10 - 150
CFRP	1 LAPISAN	1 LAPISAN	1 LAPISAN



Tugas Akhir :
Evaluasi dan Perkuatan Elemen Struktur
Balok dan Kolom Bangunan Hotel di
Yogyakarta dengan Menggunakan *Carbon
Fiber Reinforced Polymer (CFRP)*

Mahasiswa
Hajrah Zulfika
21511173

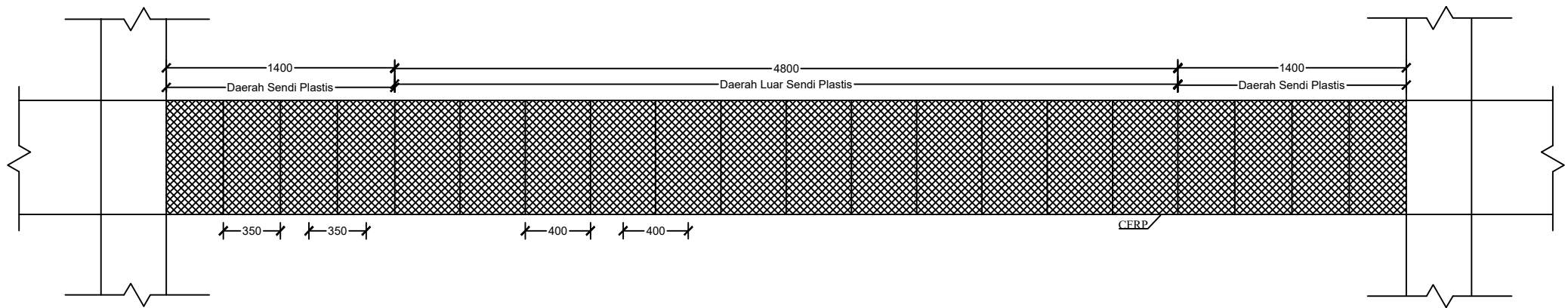
Dosen Pembimbing
Jafar, S.T., MURP., M.T.

Judul Gambar
Detail Pemasangan CFRP terhadap
Kapasitas Geser Balok B4

Skala
1 : 35

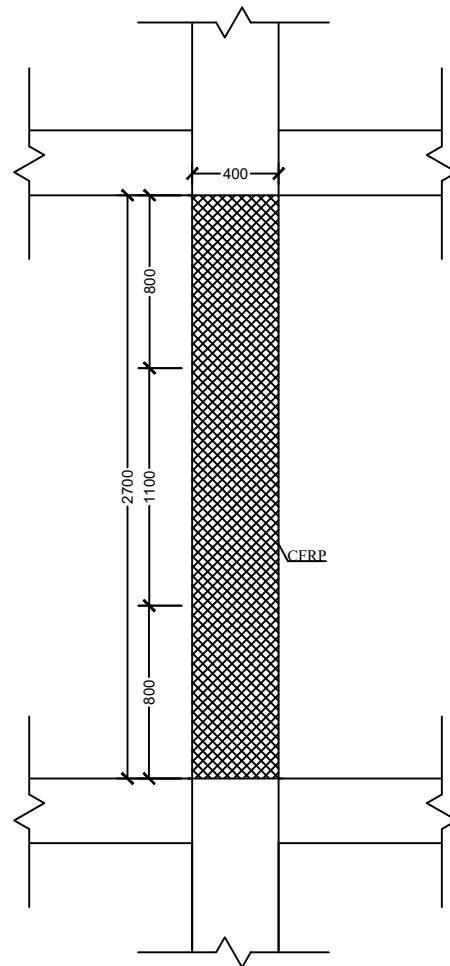
Nomor
Gambar
11

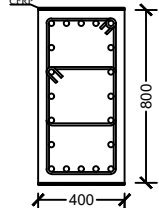
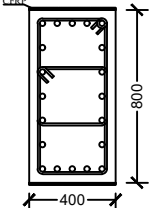
Jumlah
Gambar
34



TAMPAK SAMPING BALOK B11
SKALA 1 : 35

TIPE	B11		
POSISI	SENDI PLASTIS KIRI	LUAR SENDI PLASTIS	SENDI PLASTIS KANAN
POTONGAN			
DIMENSI	400 X 700		
TUL. ATAS	6 D25	3 D25	6 D25
TUL. BAWAH	3 D25	7 D25	3 D25
TUL. SENGKANG	D10 - 100	D10 - 150	D10 - 150
CFRP	1 LAPISAN	1 LAPISAN	1 LAPISAN



TIPE	K1 (L2)	
POSISI	TUMPUAN	LAPANGAN
POTONGAN		
DIMENSI	400 X 800	
TUL. UTAMA	20 D25	20 D25
TUL. SENGKANG ARAH X	2D10 -100	2D10-150
TUL. SENGKANG ARAH Y	4D10 -100	4D10 -150
CFRP ARAH X	-	-
CFRP ARAH Y	3 LAPISAN	3 LAPISAN

 TAMPAK KOLOM K1 (L2) ARAH Y
SKALA 1 : 35



Tugas Akhir :
Evaluasi dan Perkuatan Elemen Struktur
Balok dan Kolom Bangunan Hotel di
Yogyakarta dengan Menggunakan *Carbon
Fiber Reinforced Polymer (CFRP)*

Mahasiswa
Hajrah Zulfika
21511173

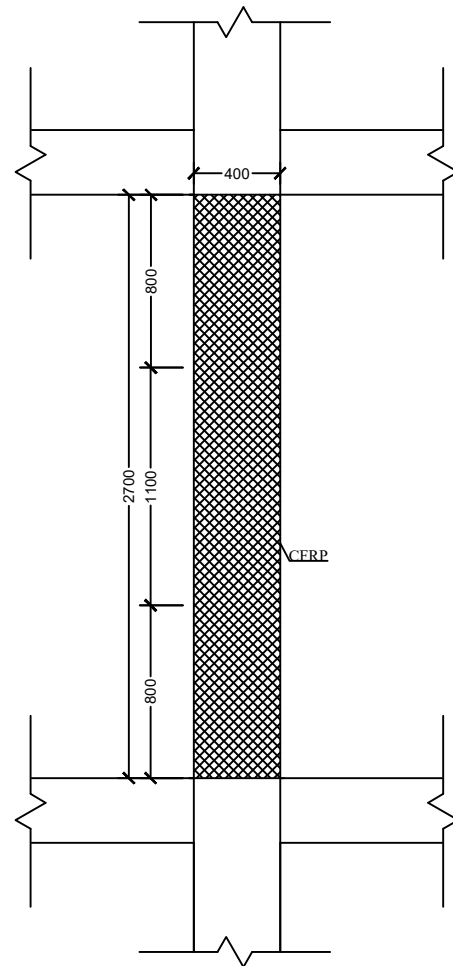
Dosen Pembimbing
Jafar, S.T., MURP., M.T.

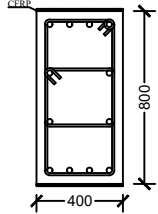
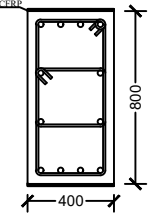
Judul Gambar
Detail Pemasangan CFRP terhadap
Kapasitas Aksial - Lentur Kolom
K1(L2)

Skala
1 : 35

Nomor
Gambar
13

Jumlah
Gambar
34



TIPE	K1 (L3-A)	
POSISI	TUMPUAN	LAPANGAN
POTONGAN		
DIMENSI	400 X 800	
TUL. UTAMA	12 D25	12 D25
TUL. SENGKANG ARAH X	2D10 -100	2D10-150
TUL. SENGKANG ARAH Y	4D10 -100	4D10 -150
CFRP ARAH X	-	-
CFRP ARAH Y	3 LAPISAN	3 LAPISAN

 TAMPAK KOLOM K1 (L3-A) ARAH Y
SKALA 1 : 35



Tugas Akhir :
Evaluasi dan Perkuatan Elemen Struktur
Balok dan Kolom Bangunan Hotel di
Yogyakarta dengan Menggunakan *Carbon
Fiber Reinforced Polymer (CFRP)*

Mahasiswa
Hajrah Zulfika
21511173

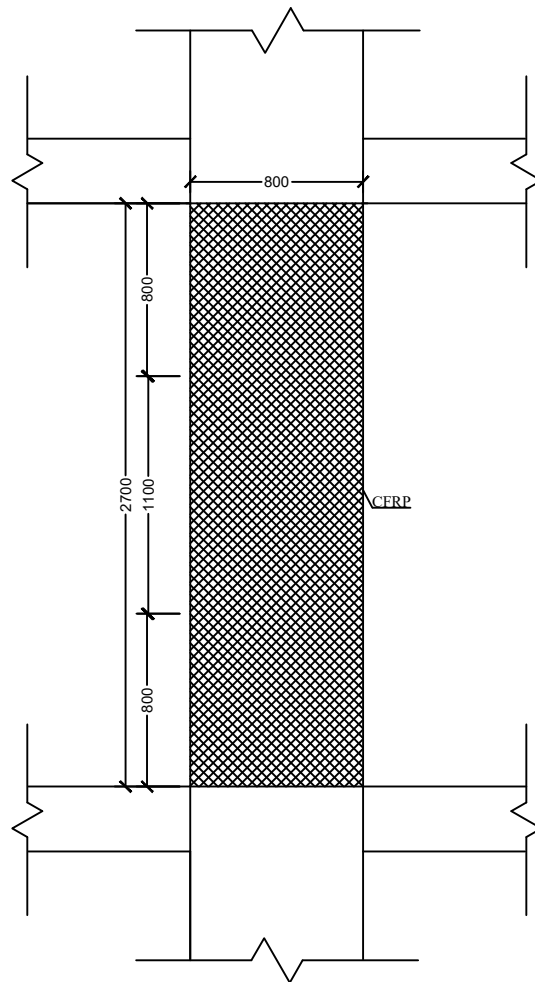
Dosen Pembimbing
Jafar, S.T., MURP., M.T.

Judul Gambar
Detail Pemasangan CFRP terhadap
Kapasitas Aksial - Lentur Kolom
K1(L3-A)

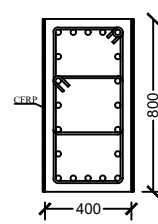
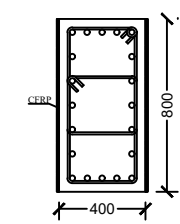
Skala
1 : 35

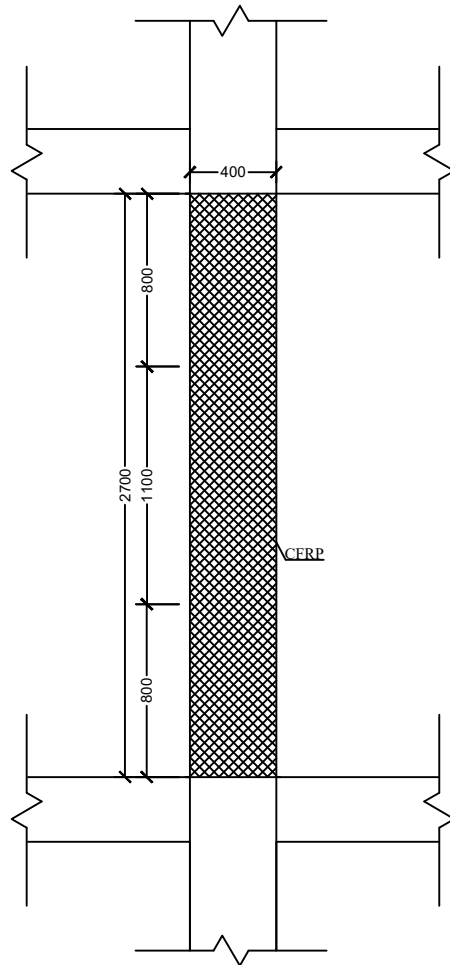
Nomor
Gambar
14

Jumlah
Gambar
34

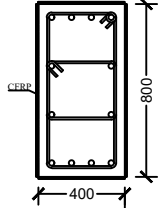
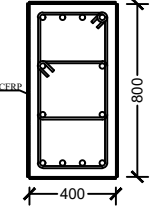


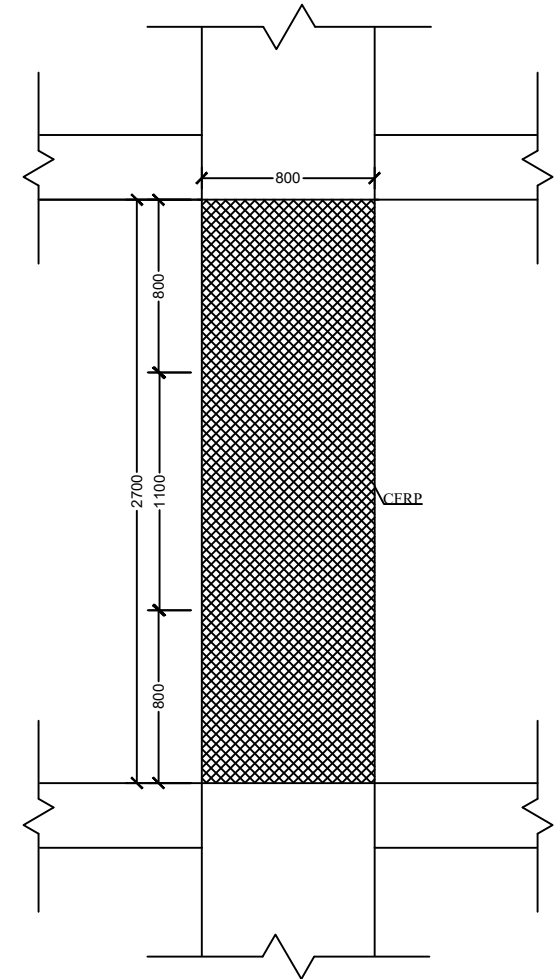
TAMPAK KOLOM K2 (M) ARAH X
SKALA 1 : 35

TIPE	K2 (M)	
POSISI	TUMPUAN	LAPANGAN
POTONGAN		
DIMENSI	400 X 800	
TUL. UTAMA	20 D25	20 D25
TUL. SENGKANG ARAH X	2D10 -100	2D10-150
TUL. SENGKANG ARAH Y	4D10 -100	4D10 -150
CFRP ARAH X	3 LAPISAN	3 LAPISAN
CFRP ARAH Y	-	-



TAMPAK KOLOM K2 (L2-L3) ARAH Y
SKALA 1 : 35

TIPE	K2 (L2-L3)	
POSISI	TUMPUAN	LAPANGAN
POTONGAN		
DIMENSI	400 X 800	
TUL. UTAMA	12 D25	12 D25
TUL. SENGKANG ARAH X	2D10 -100	2D10-150
TUL. SENGKANG ARAH Y	4D10 -100	4D10 -150
CFRP ARAH X	3 LAPISAN	3 LAPISAN
CFRP ARAH Y	3 LAPISAN	3 LAPISAN



TAMPAK KOLOM K2 (L2-L3) ARAH X
SKALA 1 : 35



Tugas Akhir :
Evaluasi dan Perkuatan Elemen Struktur
Balok dan Kolom Bangunan Hotel di
Yogyakarta dengan Menggunakan *Carbon
Fiber Reinforced Polymer (CFRP)*

Mahasiswa
Hajrah Zulfika
21511173

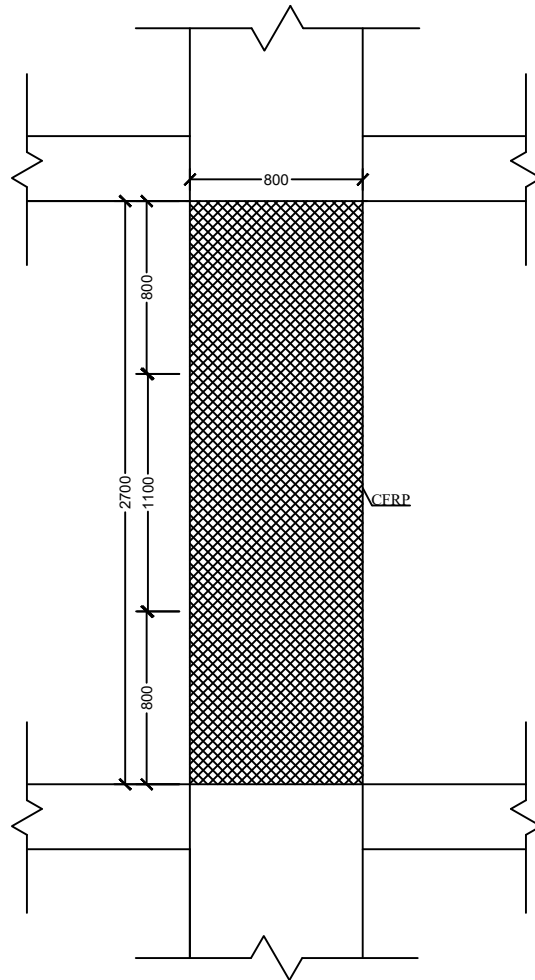
Dosen Pembimbing
Jafar, S.T., MURP., M.T.

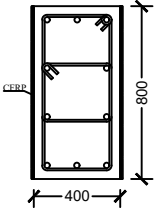
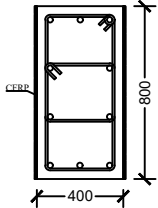
Judul Gambar
Detail Pemasangan CFRP terhadap
Kapasitas Aksial - Lentur Kolom
K2(L2-L3)

Skala
1 : 35

Nomor
Gambar
16

Jumlah
Gambar
34



TIPE	K2 (L4-A)	
POSISI	TUMPUAN	LAPANGAN
POTONGAN		
DIMENSI	400 X 800	
TUL. UTAMA	10 D25	10 D25
TUL. SENGKANG ARAH X	2D10 -100	2D10-150
TUL. SENGKANG ARAH Y	4D10 -100	4D10 -150
CFRP ARAH X	3 LAPISAN	3 LAPISAN
CFRP ARAH Y	-	-

TAMPAK KOLOM K2 (L4-A) ARAH X
SKALA 1 : 35



Tugas Akhir :
Evaluasi dan Perkuatan Elemen Struktur
Balok dan Kolom Bangunan Hotel di
Yogyakarta dengan Menggunakan *Carbon
Fiber Reinforced Polymer (CFRP)*

Mahasiswa
Hajrah Zulfika
21511173

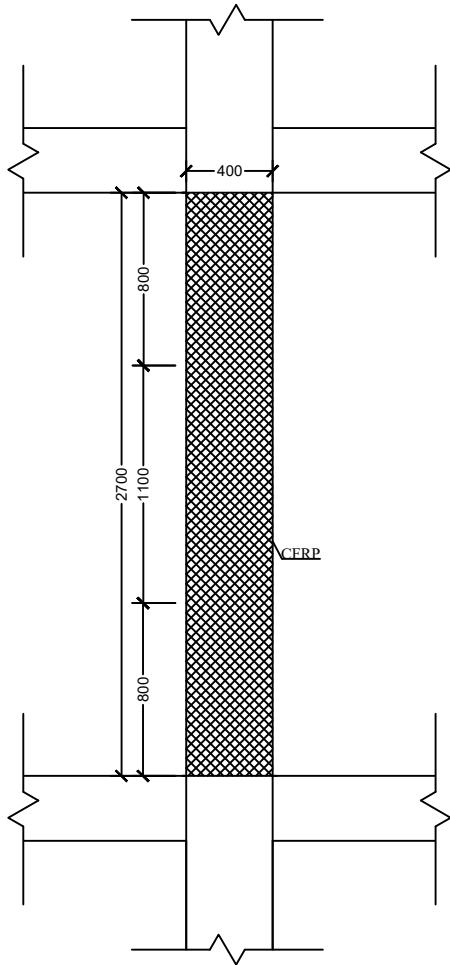
Dosen Pembimbing
Jafar, S.T., MURP., M.T.

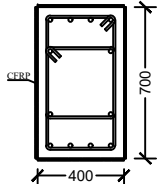
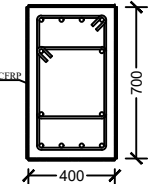
Judul Gambar
Detail Pemasangan CFRP terhadap
Kapasitas Aksial - Lentur Kolom
K2(L4-A)

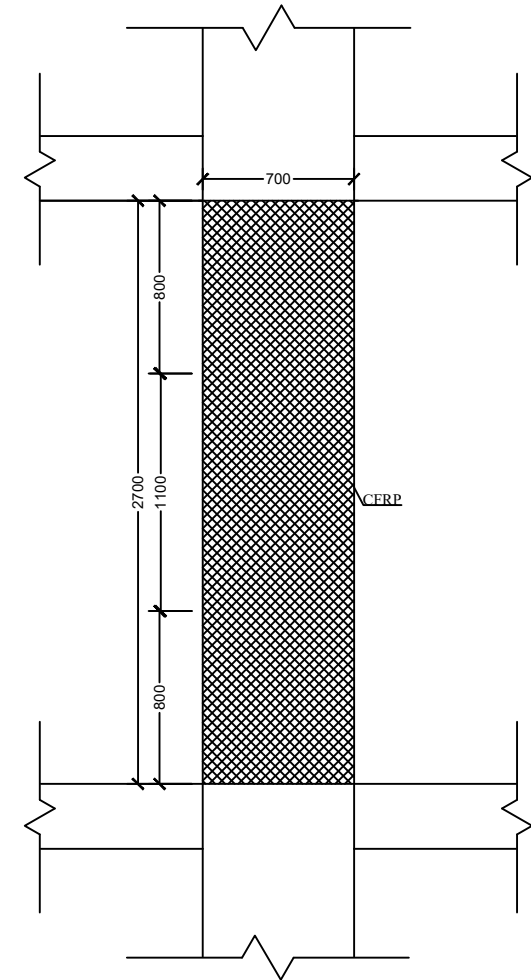
Skala
1 : 35

Nomor
Gambar
17

Jumlah
Gambar
34



TIPE	K4	
POSISI	TUMPUAN	LAPANGAN
POTONGAN		
DIMENSI	400 X 700	
TUL. UTAMA	12 D19	12 D19
TUL. SENGKANG ARAH X	2D10 -100	2D10-150
TUL. SENGKANG ARAH Y	4D10 -100	4D10 -150
CFRP ARAH X	3 LAPISAN	3 LAPISAN
CFRP ARAH Y	3 LAPISAN	3 LAPISAN



TAMPAK KOLOM K4 ARAH Y
SKALA 1 : 35

TAMPAK KOLOM K4 ARAH X
SKALA 1 : 35



Tugas Akhir :
Evaluasi dan Perkuatan Elemen Struktur
Balok dan Kolom Bangunan Hotel di
Yogyakarta dengan Menggunakan *Carbon
Fiber Reinforced Polymer (CFRP)*

Mahasiswa
Hajrah Zulfika
21511173

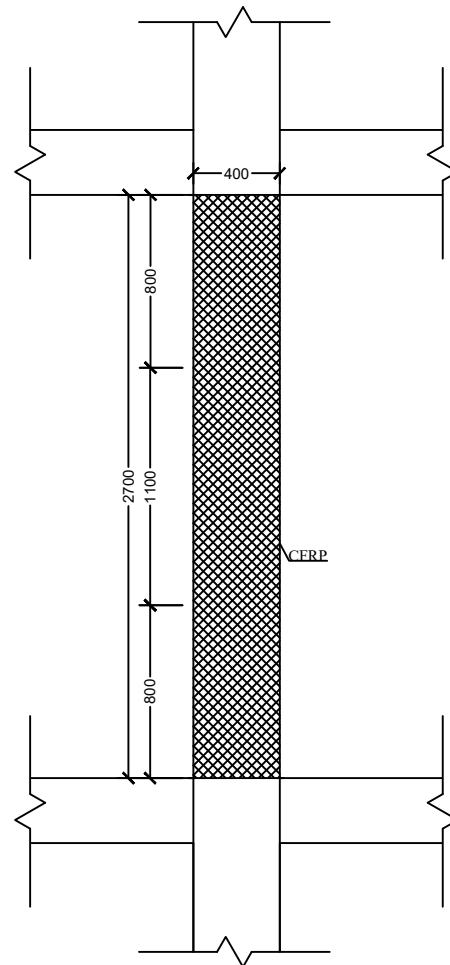
Dosen Pembimbing
Jafar, S.T., MURP., M.T.

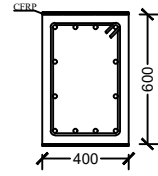
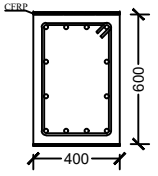
Judul Gambar
Detail Pemasangan CFRP terhadap
Kapasitas Aksial - Lentur Kolom K4

Skala
1 : 35

Nomor
Gambar
18

Jumlah
Gambar
34



TIPE	K5	
POSISI	TUMPUAN	LAPANGAN
POTONGAN		
DIMENSI	400 X 600	
TUL. UTAMA	12 D19	12 D19
TUL. SENGKANG ARAH X	2D10 -100	2D10-150
TUL. SENGKANG ARAH Y	2D10 -100	2D10 -150
CFRP ARAH X	-	-
CFRP ARAH Y	3 LAPISAN	3 LAPISAN

 TAMPAK KOLOM K5 ARAH Y
SKALA 1 : 35



Tugas Akhir :
Evaluasi dan Perkuatan Elemen Struktur
Balok dan Kolom Bangunan Hotel di
Yogyakarta dengan Menggunakan *Carbon
Fiber Reinforced Polymer (CFRP)*

Mahasiswa
Hajrah Zulfika
21511173

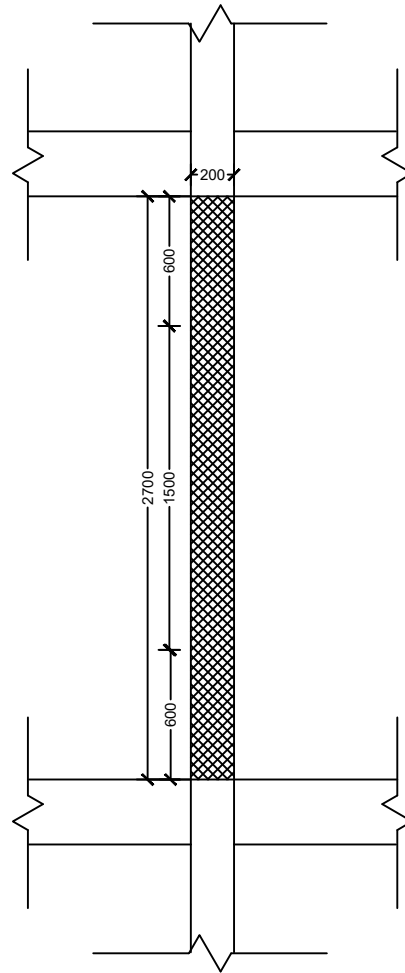
Dosen Pembimbing
Jafar, S.T., MURP., M.T.

Judul Gambar
Detail Pemasangan CFRP terhadap
Kapasitas Aksial - Lentur Kolom K5

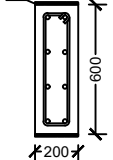
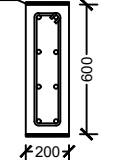
Skala
1 : 35

Nomor
Gambar
19

Jumlah
Gambar
34



TAMPAK KOLOM K6 ARAH Y
SKALA 1 : 35

TIPE	K6	
POSISI	TUMPUAN	LAPANGAN
POTONGAN		
DIMENSI	200 X 600	
TUL. UTAMA	8 D19	8 D19
TUL. SENGKANG ARAH X	2D10 -100	2D10-150
TUL. SENGKANG ARAH Y	2D10 -100	2D10 -150
CFRP ARAH X	-	-
CFRP ARAH Y	3 LAPISAN	3 LAPISAN



Tugas Akhir :
Evaluasi dan Perkuatan Elemen Struktur
Balok dan Kolom Bangunan Hotel di
Yogyakarta dengan Menggunakan *Carbon
Fiber Reinforced Polymer (CFRP)*

Mahasiswa
Hajrah Zulfika
21511173

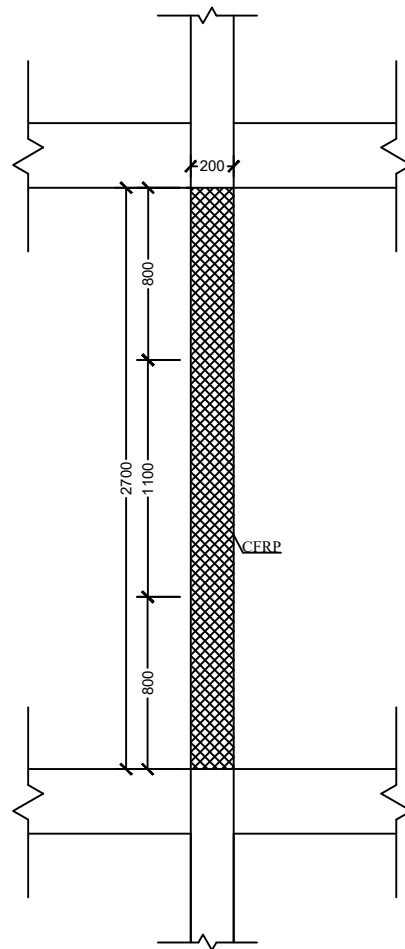
Dosen Pembimbing
Jafar, S.T., MURP., M.T.

Judul Gambar
Detail Pemasangan CFRP terhadap
Kapasitas Aksial - Lentur Kolom K6

Skala
1 : 35

Nomor
Gambar
20

Jumlah
Gambar
34



TAMPAK KOLOM K7 ARAH Y
SKALA 1 : 35

TIPE	K7	
POSISI	TUMPUAN	LAPANGAN
POTONGAN		
DIMENSI	200 X 600	
TUL. UTAMA	10 D19	10 D19
TUL. SENGKANG ARAH X	2D10 -100	2D10-150
TUL. SENGKANG ARAH Y	2D10 -100	2D10 -150
CFRP ARAH X	-	-
CFRP ARAH Y	3 LAPISAN	3 LAPISAN



Tugas Akhir :
Evaluasi dan Perkuatan Elemen Struktur
Balok dan Kolom Bangunan Hotel di
Yogyakarta dengan Menggunakan Carbon
Fiber Reinforced Polymer (CFRP)

Mahasiswa
Hajrah Zulfika
21511173

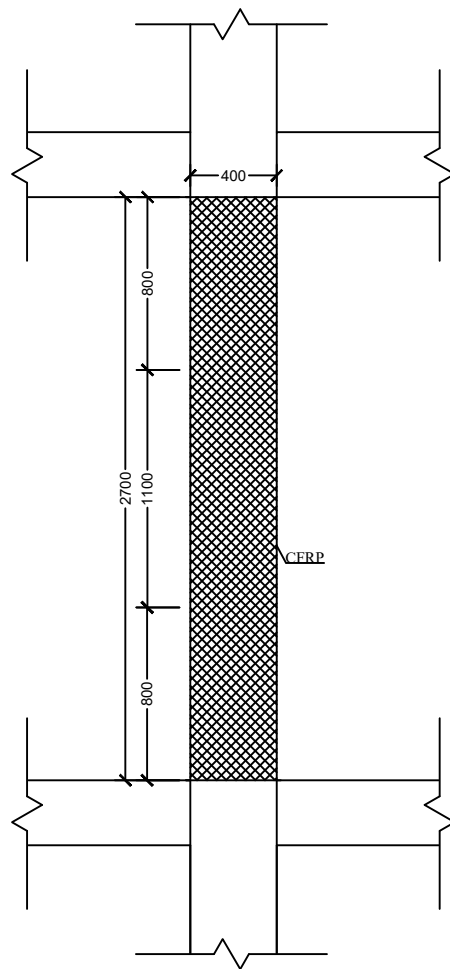
Dosen Pembimbing
Jafar, S.T., MURP., M.T.

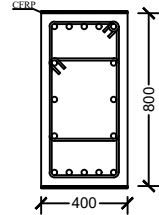
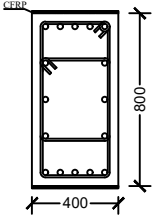
Judul Gambar
Detail Pemasangan CFRP terhadap
Kapasitas Aksial - Lentur Kolom K7

Skala
1 : 35

Nomor
Gambar
21

Jumlah
Gambar
34

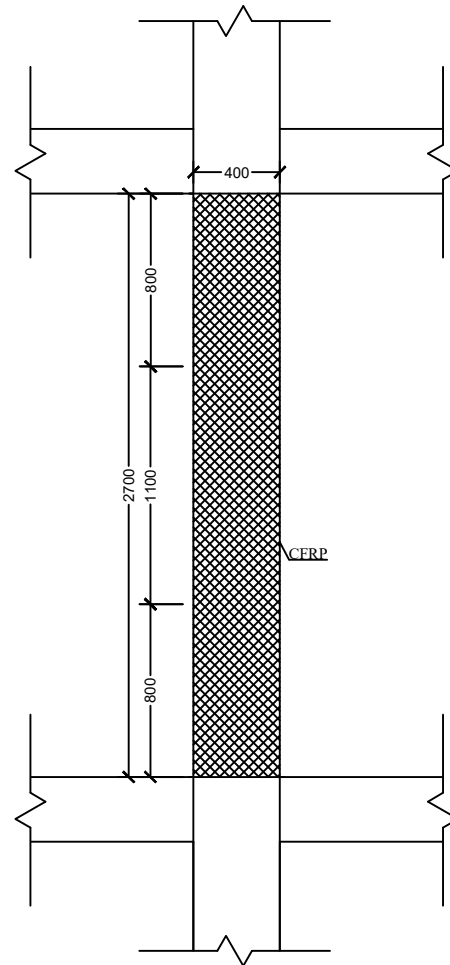


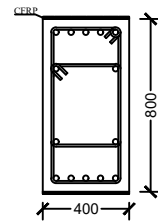
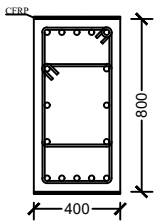
TIPE	K8 (L3)	
POSISI	TUMPUAN	LAPANGAN
POTONGAN		
DIMENSI	400 X 800	
TUL. UTAMA	16 D25	16 D25
TUL. SENGKANG ARAH X	2D10 -100	2D10-150
TUL. SENGKANG ARAH Y	4D10 -100	4D10 -150
CFRP ARAH X	-	-
CFRP ARAH Y	3 LAPISAN	3 LAPISAN

 TAMPAK KOLOM K8 (L3) ARAH Y
SKALA 1 : 35



Tugas Akhir :	Mahasiswa	Dosen Pembimbing	Judul Gambar	Skala	Nomor Gambar	Jumlah Gambar
Evaluasi dan Perkuatan Elemen Struktur Balok dan Kolom Bangunan Hotel di Yogyakarta dengan Menggunakan <i>Carbon Fiber Reinforced Polymer</i> (CFRP)	Hajrah Zulfika 21511173	Jafar, S.T., MURP., M.T.	Detail Pemasangan CFRP terhadap Kapasitas Aksial - Lentur Kolom K8(L3)	1 : 35	22	34



TIPE	K8 (L4-A)	
POSISI	TUMPUAN	LAPANGAN
POTONGAN		
DIMENSI	400 X 800	
TUL. UTAMA	12 D25	12 D25
TUL. SENGKANG ARAH X	2D10 -100	2D10-150
TUL. SENGKANG ARAH Y	4D10 -100	4D10 -150
CFRP ARAH X	-	-
CFRP ARAH Y	3 LAPISAN	3 LAPISAN

TAMPAK KOLOM K8 (L4-A) ARAH Y
SKALA 1 : 35



Tugas Akhir :
Evaluasi dan Perkuatan Elemen Struktur
Balok dan Kolom Bangunan Hotel di
Yogyakarta dengan Menggunakan *Carbon
Fiber Reinforced Polymer (CFRP)*

Mahasiswa
Hajrah Zulfika
21511173

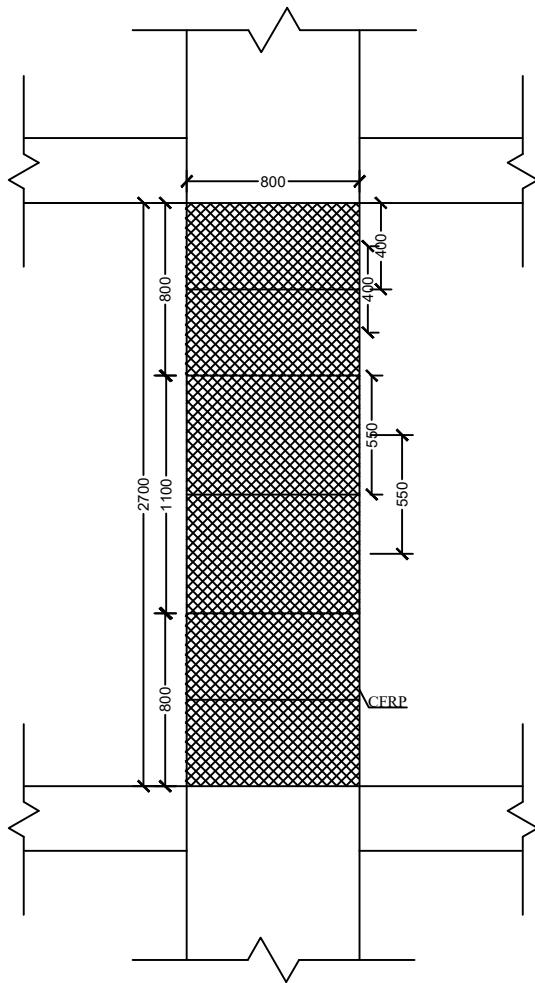
Dosen Pembimbing
Jafar, S.T., MURP., M.T.

Judul Gambar
Detail Pemasangan CFRP terhadap
Kapasitas Aksial - Lentur Kolom
K8(L4-A)

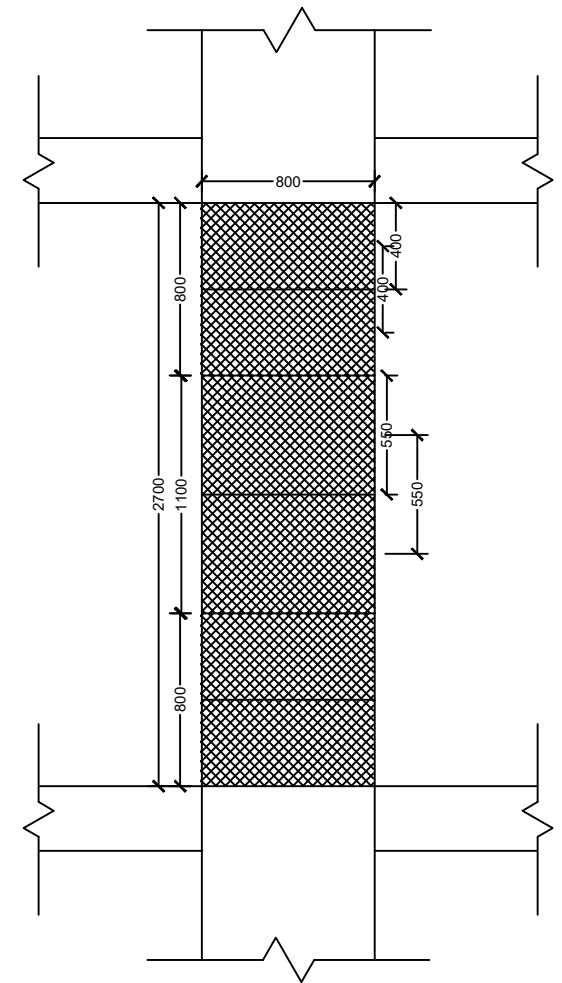
Skala
1 : 35

Nomor
Gambar
23

Jumlah
Gambar
34



TIPE	K1 (M)	
POSISI	SENDI PLASTIS	LUAR SENDI PLASTIS
POTONGAN		
DIMENSI	400 X 800	
TUL. UTAMA	20 D25	20 D25
TUL. SENGKANG ARAH X	2D10 -100	2D10-150
TUL. SENGKANG ARAH Y	4D10 -100	4D10 -150
CFRP ARAH X	1 LAPISAN	1 LAPISAN
CFRP ARAH Y	1 LAPISAN	1 LAPISAN



TAMPAK KOLOM K1 (M) ARAH X
SKALA 1 : 35

TAMPAK KOLOM K2 (M) ARAH Y
SKALA 1 : 35



Tugas Akhir :
Evaluasi dan Perkuatan Elemen Struktur
Balok dan Kolom Bangunan Hotel di
Yogyakarta dengan Menggunakan Carbon
Fiber Reinforced Polymer (CFRP)

Mahasiswa
Hajrah Zulfika
21511173

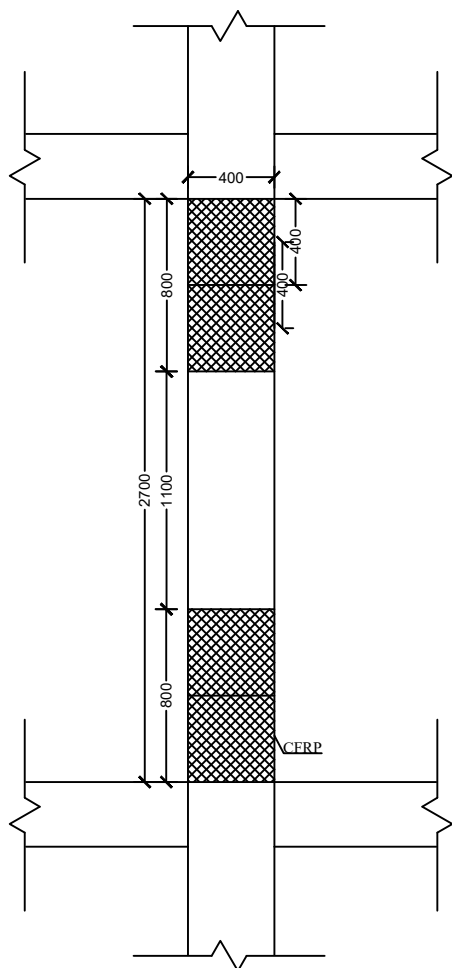
Dosen Pembimbing
Jafar, S.T., MURP., M.T.

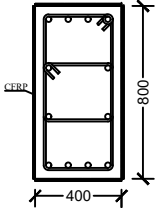
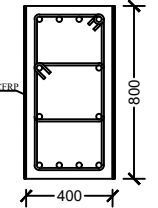
Judul Gambar
Detail Pemasangan CFRP terhadap
Kapasitas Geser Kolom K1(M)

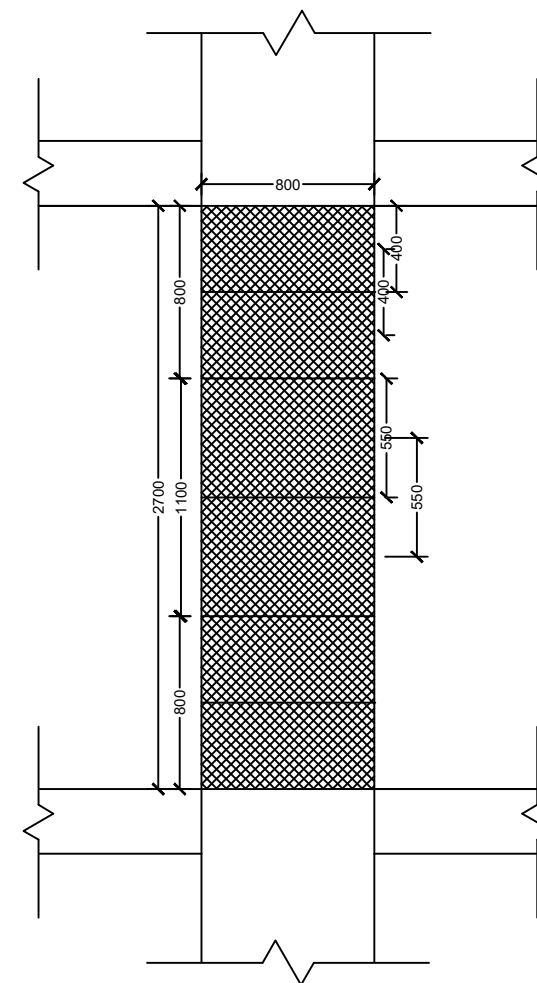
Skala
1 : 35

Nomor
Gambar
24

Jumlah
Gambar
34

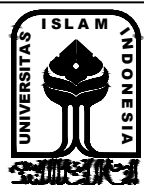


TIPE	K1 (L2)	
POSISI	SENDI PLASTIS	LUAR SENDI PLASTIS
POTONGAN		
DIMENSI	400 X 800	
TUL. UTAMA	12 D25	12 D25
TUL. SENGKANG ARAH X	2D10 -100	2D10-150
TUL. SENGKANG ARAH Y	4D10 -100	4D10 -150
CFRP ARAH X	4 LAPISAN	3 LAPISAN
CFRP ARAH Y	1 LAPISAN	-

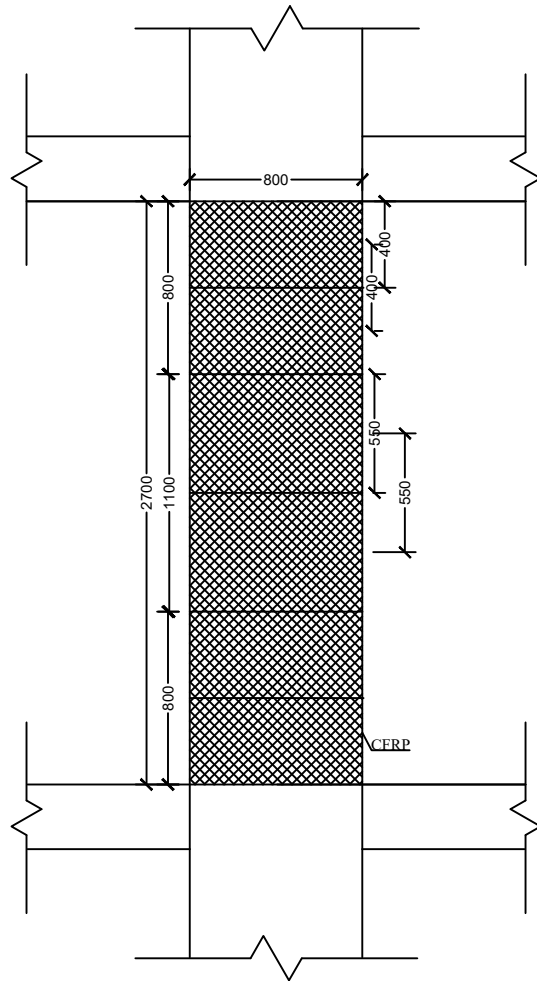


TAMPAK KOLOM K1 (L2) ARAH Y
SKALA 1 : 35

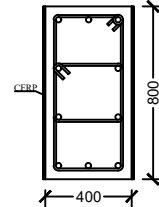
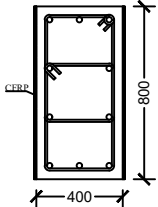
TAMPAK KOLOM K1 (L2) ARAH X
SKALA 1 : 35

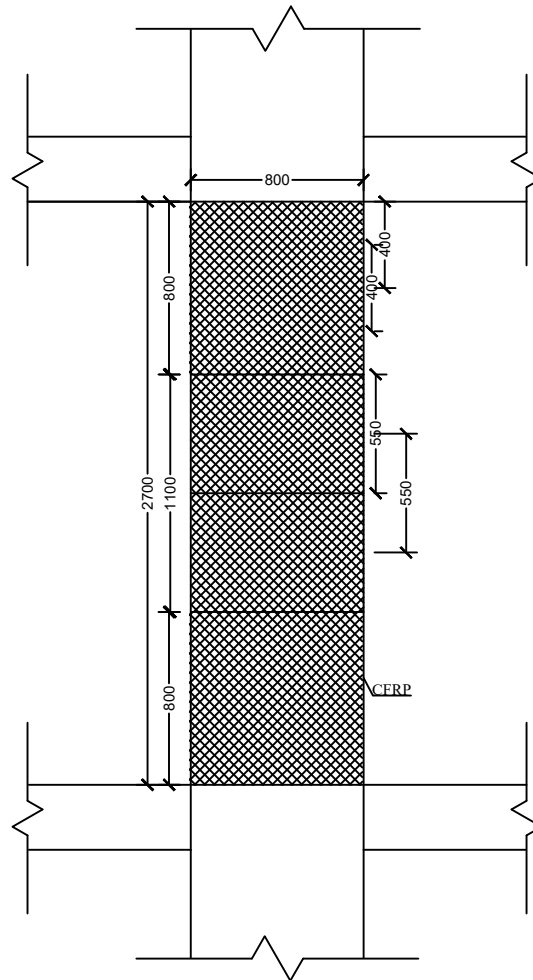


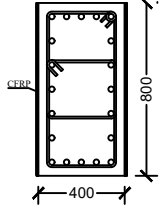
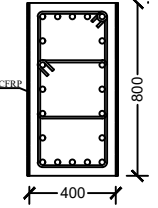
Tugas Akhir :	Mahasiswa	Dosen Pembimbing	Judul Gambar	Skala	Nomor Gambar	Jumlah Gambar
Evaluasi dan Perkuatan Elemen Struktur Balok dan Kolom Bangunan Hotel di Yogyakarta dengan Menggunakan <i>Carbon Fiber Reinforced Polymer</i> (CFRP)	Hajrah Zulfika 21511173	Jafar, S.T., MURP., M.T.	Detail Pemasangan CFRP terhadap Kapasitas Geser Kolom K1(L2)	1 : 35	25	34



TAMPAK KOLOM K1 (L3-A) ARAH X
SKALA 1 : 35

TIPE	K1 (L3-A)	
POSISI	SENDI PLASTIS	LUAR SENDI PLASTIS
POTONGAN		
DIMENSI	400 X 800	
TUL. UTAMA	10 D25	10 D25
TUL. SENGKANG ARAH X	2D10 -100	2D10-150
TUL. SENGKANG ARAH Y	4D10 -100	4D10 -150
CFRP ARAH X	1 LAPISAN	1 LAPISAN
CFRP ARAH Y	-	-



TIPE	K2 (M)	
POSISI	SENDI PLASTIS	LUAR SENDI PLASTIS
POTONGAN		
DIMENSI	400 X 800	
TUL. UTAMA	20 D25	20 D25
TUL. SENGKANG ARAH X	2D10 -100	2D10-150
TUL. SENGKANG ARAH Y	4D10 -100	4D10 -150
CFRP ARAH X	2 LAPISAN	1 LAPISAN
CFRP ARAH Y	-	-

TAMPAK KOLOM K2 (M) ARAH X
SKALA 1 : 35



Tugas Akhir :
Evaluasi dan Perkuatan Elemen Struktur
Balok dan Kolom Bangunan Hotel di
Yogyakarta dengan Menggunakan *Carbon
Fiber Reinforced Polymer (CFRP)*

Mahasiswa
Hajrah Zulfika
21511173

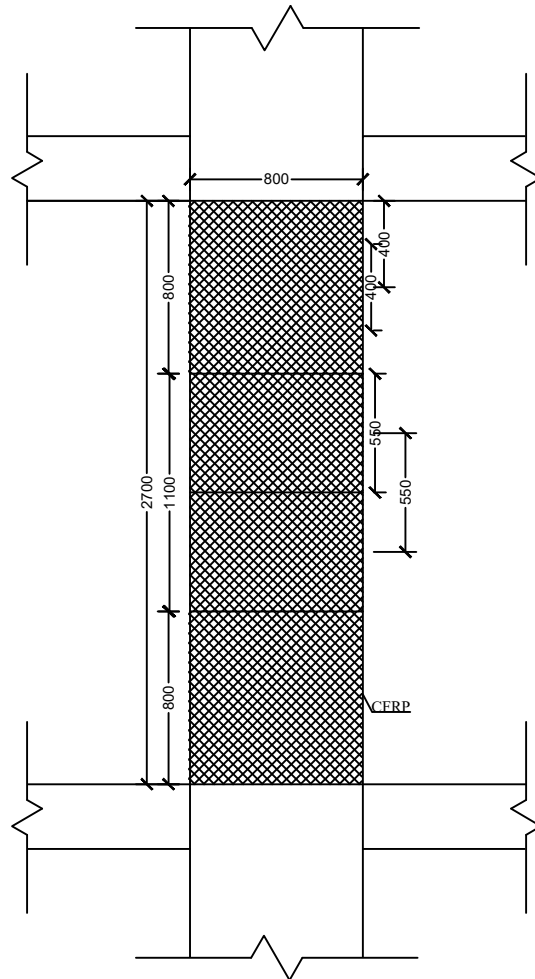
Dosen Pembimbing
Jafar, S.T., MURP., M.T.

Judul Gambar
Detail Pemasangan CFRP terhadap
Kapasitas Geser Kolom K2(M)

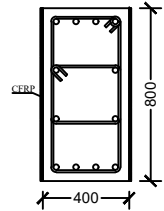
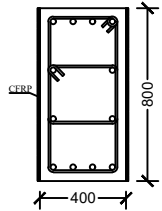
Skala
1 : 35

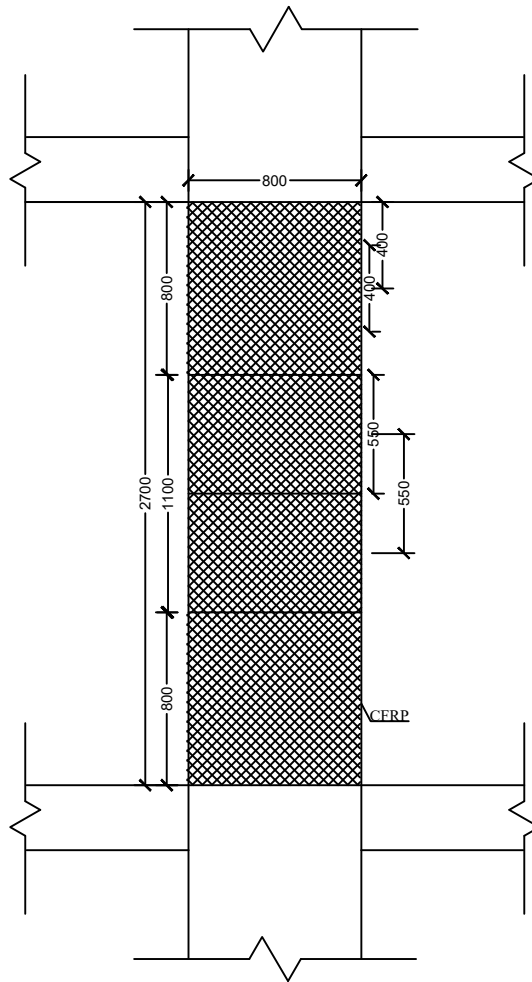
Nomor
Gambar
27

Jumlah
Gambar
34

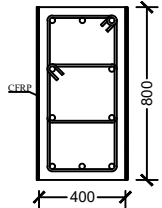
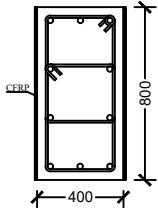


TAMPAK KOLOM K2 (L2-L3) ARAH X
SKALA 1 : 35

TIPE	K2 (L2-L3)	
POSISI	SENDI PLASTIS	LUAR SENDI PLASTIS
POTONGAN		
DIMENSI	400 X 800	
TUL. UTAMA	12 D25	12 D25
TUL. SENGKANG ARAH X	2D10 -100	2D10-150
TUL. SENGKANG ARAH Y	4D10 -100	4D10 -150
CFRP ARAH X	1 LAPISAN	1 LAPISAN
CFRP ARAH Y	-	-



TAMPAK KOLOM K2 (L4-A) ARAH X
SKALA 1 : 35

TIPE	K2 (L4-A)	
POSISI	SENDI PLASTIS	LUAR SENDI PLASTIS
POTONGAN		
DIMENSI	400 X 800	
TUL. UTAMA	10 D25	10 D25
TUL. SENGKANG ARAH X	2D10 -100	2D10-150
TUL. SENGKANG ARAH Y	4D10 -100	4D10 -150
CFRP ARAH X	1 LAPISAN	1 LAPISAN
CFRP ARAH Y	-	-



Tugas Akhir :
Evaluasi dan Perkuatan Elemen Struktur
Balok dan Kolom Bangunan Hotel di
Yogyakarta dengan Menggunakan *Carbon
Fiber Reinforced Polymer (CFRP)*

Mahasiswa
Hajrah Zulfika
21511173

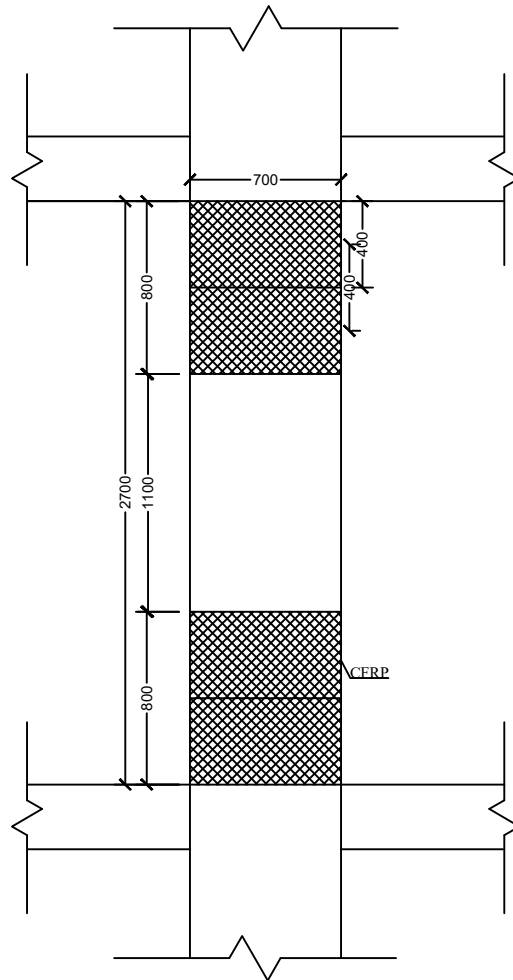
Dosen Pembimbing
Jafar, S.T., MURP., M.T.

Judul Gambar
Detail Pemasangan CFRP terhadap
Kapasitas Geser Kolom K2(L4-A)

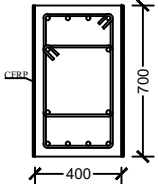
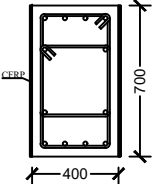
Skala
1 : 35

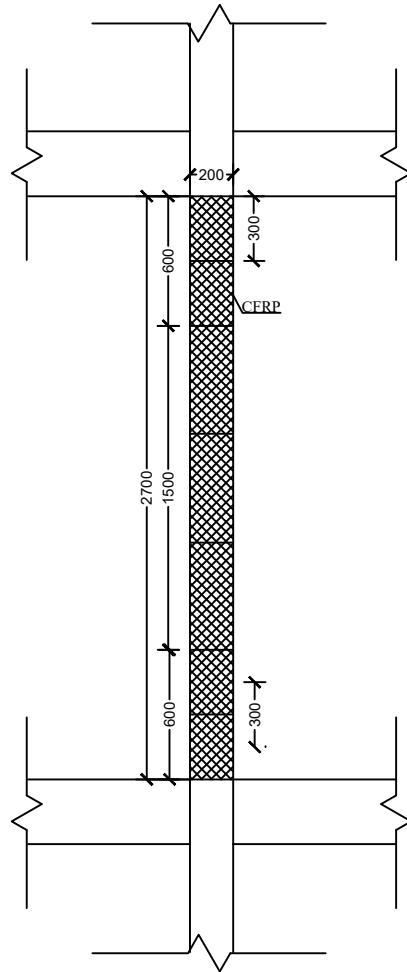
Nomor
Gambar
29

Jumlah
Gambar
34

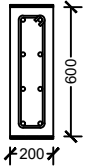
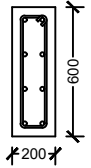


TAMPAK KOLOM K2 (L4-A) ARAH X
SKALA 1 : 35

TIPE	K4	
POSISI	SENDI PLASTIS	LUAR SENDI PLASTIS
POTONGAN		
DIMENSI	400 X 700	
TUL. UTAMA	12 D19	12 D19
TUL. SENGKANG ARAH X	2D10 -100	2D10-150
TUL. SENGKANG ARAH Y	4D10 -100	4D10 -150
CFRP ARAH X	1 LAPISAN	-
CFRP ARAH Y	-	-



TAMPAK KOLOM K6 ARAH Y
SKALA 1 : 35

TIPE	K6	
POSISI	SENDI PLASTIS	LUAR SENDI PLASTIS
POTONGAN		
DIMENSI	200 X 600	
TUL. UTAMA	8 D19	8 D19
TUL. SENGKANG ARAH X	2D10 -100	2D10 -150
TUL. SENGKANG ARAH Y	2D10 -100	2D10 -150
CFRP ARAH X	-	-
CFRP ARAH Y	1 LAPISAN	1 LAPISAN



Tugas Akhir :
Evaluasi dan Perkuatan Elemen Struktur
Balok dan Kolom Bangunan Hotel di
Yogyakarta dengan Menggunakan *Carbon
Fiber Reinforced Polymer (CFRP)*

Mahasiswa
Hajrah Zulfika
21511173

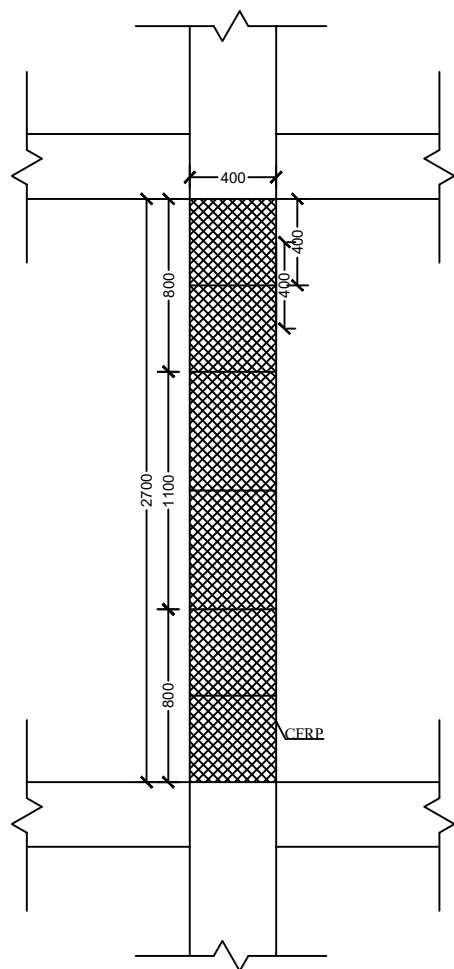
Dosen Pembimbing
Jafar, S.T., MURP., M.T.

Judul Gambar
Detail Pemasangan CFRP terhadap
Kapasitas Geser Kolom K6

Skala
1 : 35

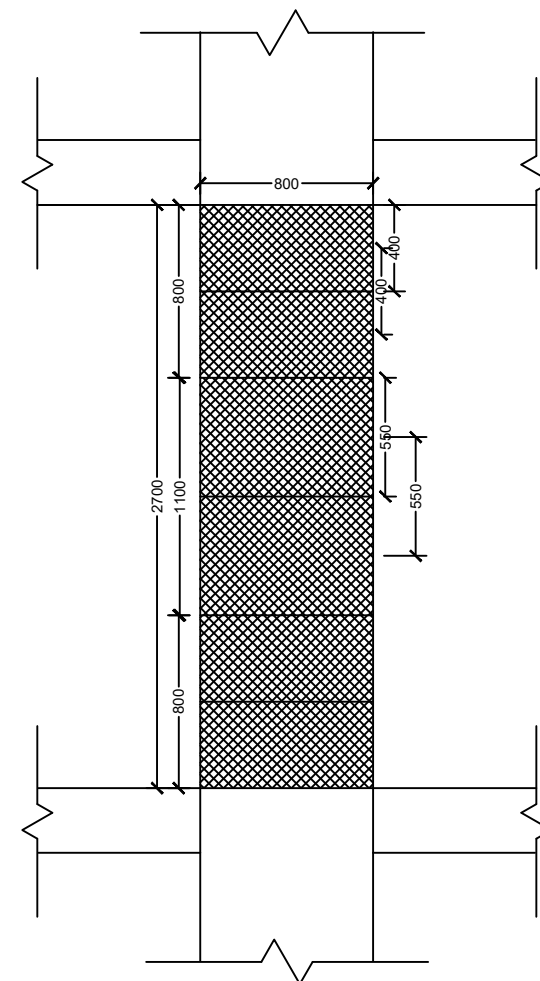
Nomor
Gambar
31

Jumlah
Gambar
34

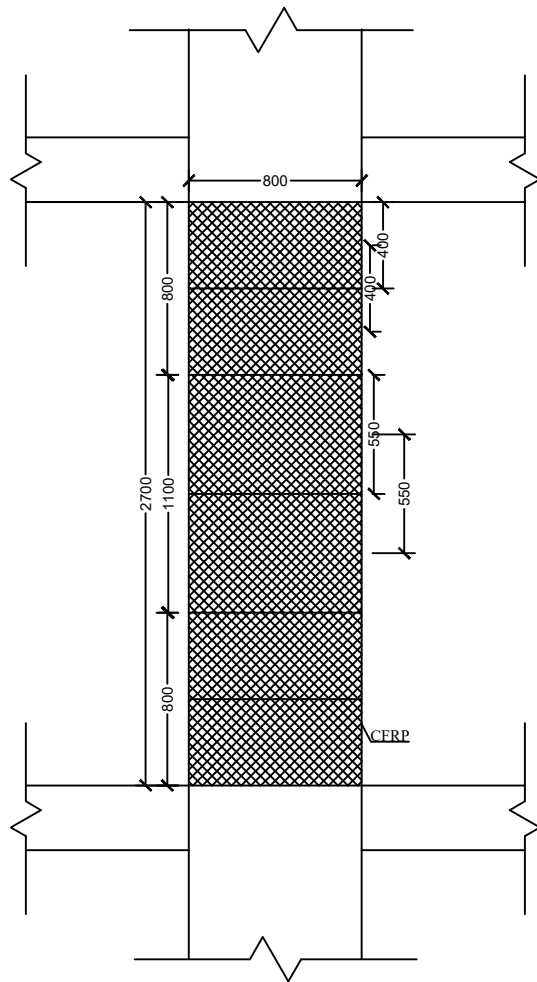


TAMPAK KOLOM K8 (L2) ARAH Y
SKALA 1 : 35

TIPE	K8 (L2)	
POSISI	SENDI PLASTIS	LUAR SENDI PLASTIS
POTONGAN		
DIMENSI	400 X 800	
TUL. UTAMA	24 D25	24 D25
TUL. SENGKANG ARAH X	2D10 -100	2D10-150
TUL. SENGKANG ARAH Y	4D10 -100	4D10 -150
CFRP ARAH X	2 LAPISAN	2 LAPISAN
CFRP ARAH Y	1 LAPISAN	1 LAPISAN



TAMPAK KOLOM K8 (L2) ARAH X
SKALA 1 : 35



TAMPAK KOLOM K8 (L3) ARAH X
SKALA 1 : 35

TIPE	K8 (L3)	
POSISI	SENDI PLASTIS	LUAR SENDI PLASTIS
POTONGAN		
DIMENSI	400 X 800	
TUL. UTAMA	16 D25	16 D25
TUL. SENGKANG ARAH X	2D10 -100	2D10-150
TUL. SENGKANG ARAH Y	4D10 -100	4D10 -150
CFRP ARAH X	2 LAPISAN	2 LAPISAN
CFRP ARAH Y	-	-



Tugas Akhir :
Evaluasi dan Perkuatan Elemen Struktur
Balok dan Kolom Bangunan Hotel di
Yogyakarta dengan Menggunakan *Carbon
Fiber Reinforced Polymer (CFRP)*

Mahasiswa
Hajrah Zulfika
21511173

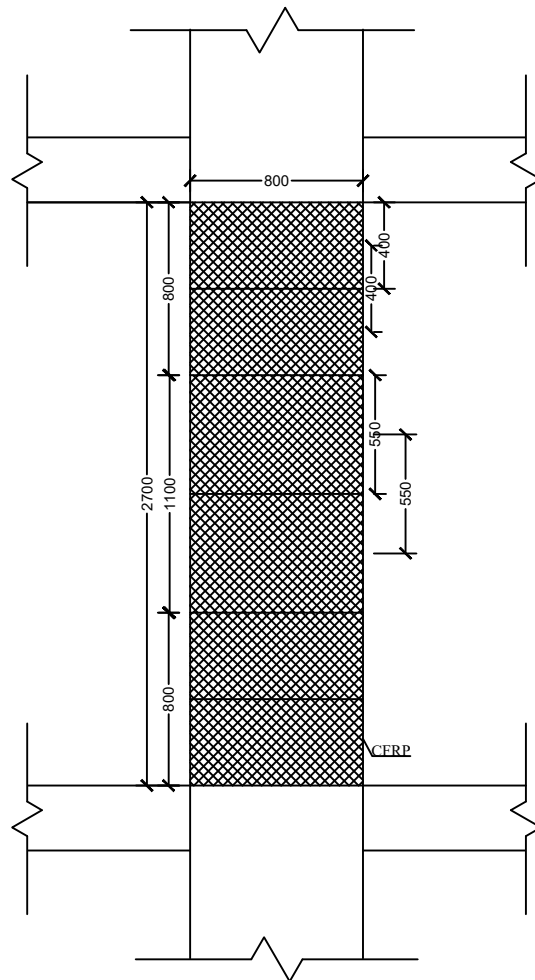
Dosen Pembimbing
Jafar, S.T., MURP., M.T.

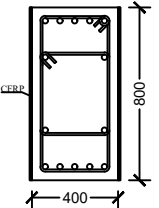
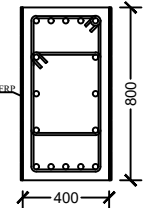
Judul Gambar
Detail Pemasangan CFRP terhadap
Kapasitas Geser Kolom K8(L3)

Skala
1 : 35

Nomor
Gambar
33

Jumlah
Gambar
34



TIPE	K8 (L4-A)	
POSISI	SENDI PLASTIS	LUAR SENDI PLASTIS
POTONGAN		
DIMENSI	400 X 800	
TUL. UTAMA	12 D25	12 D25
TUL. SENGKANG ARAH X	2D10 -100	2D10 -150
TUL. SENGKANG ARAH Y	4D10 -100	4D10 -150
CFRP ARAH X	1 LAPISAN	1 LAPISAN
CFRP ARAH Y	-	-

TAMPAK KOLOM K8 (L4-A) ARAH X
SKALA 1 : 35



Tugas Akhir :
Evaluasi dan Perkuatan Elemen Struktur
Balok dan Kolom Bangunan Hotel di
Yogyakarta dengan Menggunakan *Carbon
Fiber Reinforced Polymer* (CFRP)

Mahasiswa
Hajrah Zulfika
21511173

Dosen Pembimbing
Jafar, S.T., MURP., M.T.

Judul Gambar
Detail Pemasangan CFRP terhadap
Kapasitas Geser Kolom K8(L4-A)

Skala
1 : 35

Nomor
Gambar
34

Jumlah
Gambar
34