

SKRIPSI

**EFEKTIFITAS PENAMBAHAN LAPISAN *CARBON FIBER-REINFORCED POLYMER (CFRP)* TERHADAP
PENINGKATAN KEKUATAN KOLOM PERSEGI
DENGAN MUTU BETON f'_c 22,5 MPa**



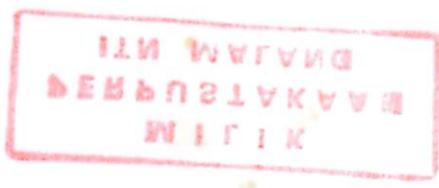
**MILIK
PERPUSTAKAAN
ITN MALANG**

Disusun Oleh :
BENYAMIN NDU UFI
09 21 907

**PROGRAM STUDI TEKNIK SIPIL
FAKULTAS TEKNIK SIPIL DAN PERENCANAAN
INSTITUT TEKNOLOGI NASIONAL
MALANG
2011**

2011
NOTICE
FEDERAL BUREAU OF INVESTIGATION
UNITED STATES DEPARTMENT OF JUSTICE
WASHINGTON, D.C.

NO 11 001
SERIALIZED 11/11/11
OCT 11 2011



SEARCHED INDEXED SERIALIZED FILED
OCT 11 2011
FBI WASHINGTON

2011

LEMBAR PERSETUJUAN

SKRIPSI

**” EFEKTIFITAS PENAMBAHAN LAPISAN CARBON
FIBER-REINFORCED POLYMER (CFRP) TERHADAP PENINGKATAN
KEKUATAN KOLOM PERSEGI DENGAN MUTU BETON $f'c$ 22,5 MPa”**

*Diajukan Sebagai Salah Satu Syarat Memperoleh Gelar Sarjana Teknik Sipil S-1
Institut Teknologi Nasional Malang*

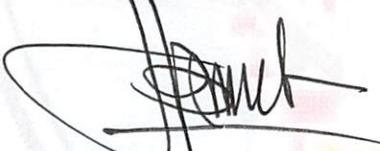
Disusun Oleh :

BENYAMIN NDU UFI

09 21 907

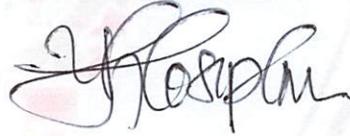
Menyetujui

Pembimbing I



(Ir. Bambang Wedyantadji, MT)

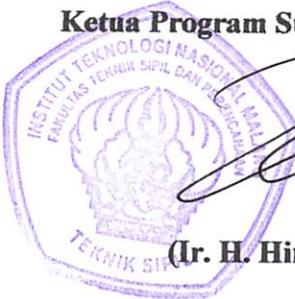
Pembimbing II



(Yosimson P. Manaha, ST. MT)

Mengetahui

Ketua Program Studi Teknik Sipil S-1



(Ir. H. Hirijanto, MT)

LEMBAR PENGESAHAN

**"EFEKTIFITAS PENAMBAHAN LAPISAN CARBON FIBER
REINFORCED POLYMER (CFRP) TERHADAP PEENINGKATAN
KEKUATAN KOLOM PERSEGI DENGAN MUTU BETON 22,5 Mpa"**

SKRIPSI

Dipertahankan Dihadapan Majelis Penguji Sidang Skripsi

Jenjang Strata (S-1)

Pada Hari : Kamis

Tanggal : 24 Februari 2011

*Dan Diterima Untuk Memenuhi Salah Satu Persyaratan
Guna Memperoleh Gelar Sarjana Teknik*

Disusun Oleh :

BENYAMIN NDU UFI

09 21 907

Disahkan Oleh :

Ketua



(Ir. H. Hirijanto, MT)

Sekretaris



(Lila Ayu Ratna Winanda, ST. MT)

Anggota Penguji :

Penguji I



(Ir. A. Agus Santosa, MT)

Penguji II



(Ir. Ester Priskasari, MT)

**PROGRAM STUDI TEKNIK SIPIL
FAKULTAS TEKNIK SIPIL DAN PERENCANAAN
INSTITUT TEKNOLOGI NASIONAL MALANG
2011**

PERNYATAAN KEASLIAN SKRIPSI

Saya yang bertanda tangan dibawah ini :

Nama : **BENYAMIN NDU UFI**
NIM : **09 21 907**
Jurusan : **Teknik Sipil S-1**
Fakultas : **Teknik Sipil dan Perencanaan**

Menyatakan bahwa dengan sesungguhnya Tugas Akhir yang berjudul :
**“EFEKTIFITAS PENAMBAHAN LAPISAN CARBON FIBER
REINFORCED POLYMER (CFRP) TERHADAP PENINGKATAN
KEKUATAN KOLOM PERSEGI DENGAN MUTU BETON f'_c 22,5 MPa”**

Adalah Tugas Akhir saya sendiri, seluruhnya bukan duplikat serta tidak mengutip
atau menyadur karya orang lain kecuali disebut dari sumber aslinya.

Malang, 24 Februari 2011

Yang Membuat Pernyataan

BENYAMIN NDU UFI

KATA PENGANTAR

Puji syukur kepada Tuhan Yang Maha Esa yang telah memberikan Berkah dan Rahmat-Nya, sehingga penulis dapat menyelesaikan Skripsi yang berjudul : *"Efektifitas Penambahan Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP) terhadap peningkatan Kekuatan Kolom Persegi dengan Mutu beton 22,5 MPa"* yang merupakan salah satu syarat untuk menyelesaikan studi di program Studi Teknik Sipil-S1, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan Institut Teknologi Nasional (ITN) Malang.

Penulis mengucapkan terima kasih dan penghargaan yang sebesar-besarnya kepada :

1. Bapak Ir. A. Agus Santosa, MT, selaku Dekan Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan ITN Malang.
2. Ir. H. Hirijanto, MT selaku Ketua program Studi Teknik Sipil S-1 ITN Malang.
3. Ir. Bambang Wadyantadji, MT dan Yosimson P. Manaha, ST. MT selaku dosen Pembimbing I dan dosen Pembimbing II yang telah banyak membantu penulis dengan sumbangan ilmu, masukan dan koreksi yang sangat bermanfaat bagi penyelesaian skripsi ini.
4. Bapak Muh. Mahfud, selaku Asisten Laboratorium Beton dan Bahan Konstruksi ITN Malang, Pak Sumardji, Pak Hendra dan semua Staf Laboratorium Beton dan Bahan Konstruksi ITS Surabaya yang telah banyak membantu pelaksanaan pengujian sample.
5. Bapak, Mama, kakak, Adik dan semua saudara tercinta, yang selalu mendukung studi penulis hingga selesai.
6. Teman-teman terbaikku, Nona Limba, Okin, Fanchez, Amel; atas kebersamaan, dukungan dan bantuan yang tulus selama studi, kegiatan penelitian hingga penyelesaian tulisan ini.

Penulis menyadari bahwa tulisan ini masih jauh dari sempurna. Jika masih ada kekurangan dalam hal isi maupun tata tulis, saran dan masukkan dari pembaca sangat penulis harapkan.

Malang, Pebruari 2011

Penulis

ABSTRAKSI

BENYAMIN NDU UFI (09.21.907); “Efektifitas Penambahan Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP) Terhadap Peningkatan Kekuatan Kolom Persegi Dengan Mutu Beton 22,5 MPa”. Dosen Pembimbing: Ir.Bambang Wadyantadji, MT dan Yosimson P. Manaha, ST. MT.

Keruntuhan bangunan yang terjadi banyak disebabkan oleh kegagalan struktur memikul beban gempa terutama elemen struktur kolom. Faktor yang mengakibatkan kegagalan kolom antara lain perancangan kolom yang tidak memperhitungkan daktilitas, detailing kolom yang kurang baik dan metode perencanaan lama masih mengabaikan konsep “Strong Columns Weak Beams”.

Salah satu cara untuk meningkatkan daktilitas kolom pada struktur gedung lama adalah meretrofit kolom tersebut dengan menggunakan *Carbon Fiber reinforced Polymer (CFRP)* sebagai elemen pengekang. Dalam penelitian ini akan dikaji bagaimana efektifitas penggunaan *CFRP* terhadap peningkatan kekuatan kolom persegi dengan mutu beton f'_c 22,5 MPa. Parameter kunci yang diteliti dalam penelitian ini adalah f'_{cc} , ϵ'_{cc} , ϵ_{cu} yang merupakan faktor kunci kinerja kolom terhadap beban siklik gempa yang lebih besar dari beban gempa nominal.

Untuk memverifikasi peningkatan efektifitas seperti yang diprediksi melalui pendekatan analisis, maka dilakukan uji eksperimental. Pengujian eksperimental tersebut memakai benda uji kolom persegi dengan dimensi 150 mm x 150 mm dengan lima tipe kolom yaitu kolom beton polos (KP1), kolom beton terkekang CFRP (KP2), kolom beton terkekang tulangan BJTP Ø6 (KP3), kolom beton terkekang tulangan BJTP Ø8 (KP4) dan kolom beton terkekang tulangan BJTP Ø6 yang dibungkus CFRP (KP5).

Hasil penelitian yang diperoleh dibandingkan dengan hasil analisis teoritis berdasarkan hubungan tegangan-regangan beton terkekang yang dikembangkan oleh Mander, dkk. dapat disimpulkan bahwa *Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP)* cukup efektif bila digunakan sebagai elemen retrofit pada kolom beton persegi. Hal ini dibuktikan dari kolom beton terkekang tulangan BJTP Ø6 yang dibungkus lagi CFRP (KP5) memberi efektifitas pengekangan lebih baik dari kolom beton terkekang tulangan BJTP Ø8 (KP4), dimana dengan perbedaan rasio tulangan transversal $\rho_s = 58,24\%$, kuat tekan (f'_c) meningkat 123,94%, regangan beton terkekang (ϵ_{cc}) meningkat 156,51 % dan regangan beton ultimit (ϵ_{cu}) berbeda 93,32%. Dengan demikian kolom beton persegi yang belum dirancang memikul beban gempa dapat diretrofit menggunakan CFRP agar dapat meningkatkan kuat tekan dan daktilitas dari kolom tersebut.

Kata Kunci : *Tegangan-regangan beton, daktilitas, Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP).*

DAFTAR ISI

	Hal
Halaman Judul	i
Lembar Persetujuan	ii
Lembar Pengesahan	iii
Pernyataan Keaslian Skripsi	iv
Lembar Persembahan	v
Kata Pengantar	vi
Abstraksi	vii
Daftar Isi	viii
Daftar Tabel	xii
Daftar Grafik	xiv
Daftar Gambar	xvi
Daftar Lampiran	xix
Daftar Notasi	xxi

BAB I. PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang	1
1.2. Rumusan Masalah	3
1.3. Tujuan Penelitian	3
1.4. Manfaat Penelitian	4
1.5. Batasan Masalah	5

BAB II. TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Umum	6
2.1.1. Carbon Fiber reinforced Polymer	8
2.1.2. CFRP Yang Ada Dipasaran	11
2.1.3. Alasan Penggunaan <i>CFRP</i> Sebagai Elemen Retrofit	15
2.1.4. Fungsi <i>CFRP</i>	17
2.1.5. Metode Perbaikan Struktur	17
2.1.6. Aplikasi <i>CFRP</i> pada bangunan	19

2.1.7. Pekerjaan dan Pemasangan <i>CFRP</i> pada kolom	21
2.1.8. Perumusan <i>CFRP</i>	25
2.2. Penelitian Terdahulu Tentang <i>CFRP</i>	27
2.3. Metode Pengekangan Beton	32
2.3.1. Tulangan Transversal Sebagai Pengekang Beton	32
2.3.2. Carbon Fiber sebagai Pengekang Beton	33
2.4. Syarat Pengekangan Beton	34
2.5. Penulangan Kolom dan Persyaratan untuk Kolom	35
2.6. Kurva Hubungan Tegangan –Regangan Beton	37
2.6.1. Menurut Hognestad (1951)	38
2.6.2. Menurut Mander, Priestley dan Park (1988)	39
2.7. Diagram Tegangan-Regangan Baja Tulangan	41
2.8. Diagram Interaksi Kolom	42
2.8.1. Pengertian Diagram Interaksi	42
2.8.2. Kegunaan Diagram Interaksi	43
2.8.3. Tipe Batas Keruntuhan pada Diagram Interaksi	45
2.9. Analisa Kekuatan Kolom	48
2.9.1. Kolom Persegi tanpa menggunakan <i>CFRP</i>	48
2.9.2. Kolom Persegi dengan menggunakan <i>CFRP</i>	50

BAB III. METODE PENELITIAN

3.1. Studi Pustaka.....	53
3.2. Analisis Preliminary Penelitian	53
3.3. Parameter Penelitian	54
3.4. Model Analisis	55
3.5. Pengujian di Laboratorium	56
3.5.1. Spesifikasi Material	56
3.5.2. Benda Uji.....	56
3.5.3. Peralatan Pengujian Silinder dan Kolom.....	59
3.5.4. Tahap Pelaksanaan Eksperimen	60
3.6. Prediksi Analitis	62
3.6.1. Analisa Teoritis Kekuatan Terhadap Beban Eksentris	62

a. Kolom Beton Tak Terkekang (KP1)	62
b. Kolom Beton Terkekang CFRP (KP2)	76
c. Kolom Beton Terkekang Tulangan BJTP Ø6 (KP3).....	94
d. Kolom Beton Terkekang Tulangan BJTP Ø8 (KP4)	109
e. Kolom Beton Terkekang Tulangan BJTP Ø6 dan CFRP (KP5)....	124
f. Diagram Interaksi Gabungan 5 kolom.....	144
3.6.2. Analisa Teoritis Kekuatan Kolom Terhadap Beban Sentris	144
a. Kolom Beton Tak Terkekang (KP1)	144
b. Kolom Beton Terkekang CFRP (KP2)	148
c. Kolom Beton Terkekang Tulangan BJTP Ø6 (KP3).....	153
d. Kolom Beton Terkekang Tulangan BJTP Ø8 (KP4)	158
e. Kolom Beton Terkekang Tulangan BJTP Ø6 dan CFRP (KP5)	163
3.7. Analisa Daktilitas Regangan Teoritis Kolom	173
3.8. Laporan Yang Akan Dikerjakan.....	175
3.9. Bagan Alir Penelitian.....	177

BAB IV. HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

4.1. Hasil Pengujian Laboratorium	178
4.1.1. Perancangan Campuran Beton	178
4.1.2. Pengujian Kuat Tekan Beton Silinder	178
4.1.3. Pengujian tarik Baja Tulangan	179
4.2. Hasil Pengujian Tekan Kolom	180
4.2.1. Kolom Beton Tak terkekang (KP1)	180
4.2.2. Kolom Beton Terkekang CFRP (KP2).....	183
4.2.3. Kolom Beton Terkekang Tulangan BJTP Ø6 (KP3).....	187
4.2.4. Kolom Beton Terkekang Tulangan BJTP Ø8 (KP4).....	190
4.2.5. Kolom Beton Terkekang Tulangan BJTP Ø6 dan CFRP (KP5)	193
4.2.6. Kurva Hubungan Tegangan-regangan Beton Gabungan 4 Kolom....	197
4.3. Analisa Daktilitas Regangan Hasil Eksperimen	203

BAB V. KESIMPULAN DAN SARAN

5.1. Kesimpulan205

5.2. Saran206

DAFTAR PUSTAKA207

LAMPIRAN-LAMPIRAN

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1	: Aplikasi Penggunaan Carbon Fiber Reinforced Polimer (CFRP)	11
Tabel 2.2	: Tipe dan Spesifikasi FRP	12
Tabel 2.3	: Material perkuatan/perbaikan yang tersedia	12
Tabel 2.4	: Properti dari material FRP berbentuk plate	13
Tabel 2.5	: Properti dari material FRP berbentuk lembaran	14
Tabel 2.6	: Properti dari perekat epoxy (epoxy adhesives)	15
Tabel 2.7	: Properti dari resin pelapis (laminating resins)	15
Tabel 2.8	: Perbandingan performance FRP	16
Tabel 2.9	: Parameter pengujian kolom	28
Tabel 2.10	: Hasil Pengujian Kuat Tekan Kolom setelah dibungkus CFRP Aksial	29
Tabel 2.11	: Hasil Pengujian Kuat Lentur Kolom setelah dibungkus CFRP.....	32
Tabel 3.1	: Perincian Benda Uji	57
Tabel 3.2	: Peningkatan Kuat beban aksial dan momen pada kolom tak terkekang (KP1)	75
Tabel 3.3	: Peningkatan Kuat beban aksial dan momen pada kolom terkekang CFRP (KP2)	93
Tabel 3.4	: Peningkatan Kuat beban aksial dan momen pada kolom terkekang tulangan BJTP Ø 6 (KP3).....	108
Tabel 3.5	: Peningkatan Kuat tekan dan kuat momen pada kolom terkekang tulangan BJTP Ø8 (KP4).....	123
Tabel 3.6	: Peningkatan Kuat tekan dan kuat momen pada kolom terkekang tulangan BJTP Ø6 dan CFRP (KP5).....	143
Tabel 3.7	: Tegangan Regangan Kolom tak terkekang (KP1) menurut Hognestad	146
Tabel 3.8	: Tegangan Regangan Kolom Beton terkekang Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP) menurut Mander, dkk.	151
Tabel 3.9	: Tegangan Regangan Kolom Beton Terkekang Tulangan Transversal BJTP Ø6 (KP3) menurut Mander, dkk.	156

Tabel 3.10	: Tegangan Regangan Kolom Beton Terkekang Tulangan Transversal BJTP Ø8 (KP4) menurut Mander, dkk.	161
Tabel 3.11	: Tegangan Regangan Kolom Beton Terkekang Tulangan BJTP Ø6 dan CFRP menurut Mander, dkk.	169
Tabel 3.12	: Rekapitulasi Analisa Teoritis 5 kolom	173
Tabel 3.13	: Rekapitulasi Analisa Daktilitas Regangan Teoritis 5 kolom	174
Tabel 4.1	: Proporsi Campuran Beton Mutu 22,5 MPa	178
Tabel 4.2	: Hail Pengujian Tarik Baja Tulangan	180
Tabel 4.3	: Hasil tegangan-regangan analisa Teoritis dan eksperimen	199
Tabel 4.4	: Perbandingan tegangan-regangan kolom analisa eksperimen	200
Tabel 4.5	: Hasil Analisa Daktilitas Regangan kolom Eksperimen	203

DAFTAR GRAFIK

Grafik 2.1	: Hubungan Tegangan-Regangan hasil pengujian kuat tekan kolom setelah dibungkus CFRP	30
Grafik 2.2	: Hubungan Regangan-Daktilitas deformasi	30
Grafik 2.3	: Kurva hubungan tegangan-regangan beton tidak terkekang	38
Grafik 2.4	: Kurva hubungan tegangan-regangan untuk pembebanan monotonik beton tak dikekang dan beton terkekang	39
Grafik 2.5	: Kurva hubungan tegangan-regangan baja tulangan	41
Grafik 3.1	: Diagram interaksi kolom tak terkekang (KP1)	75
Grafik 3.2	: Diagram interaksi kolom tekekang CFRP (KP2)	93
Grafik 3.3	: Diagram interaksi Kolom Terkekang Tulangan BJTP Ø6 (KP3).109	
Grafik 3.4	: Diagram interaksi Kolom terkekang tulangan BJTP Ø8 (KP4) ...	124
Grafik 3.5	: Diagram interaksi Kolom terkekang tulangan BJTP Ø6 dan CFRP (KP5)	144
Grafik 3.6	: Diagram interaksi Gabungan 5 kolom	144
Grafik 3.7	: Kurva Hubungan Tegangan-Regangan Analisa Teoritis Kolom Tak terkekang (KP1) menurut Hognestad)	147
Grafik 3.8	: Kurva Hubungan Tegangan-Regangan Analisa Teoritis Kolom KP2	153
Grafik 3.9	: Kurva Hubungan Tegangan-Regangan Analisa Teoritis Kolom KP3	158
Grafik 3.10	: Kurva Hubungan Tegangan-Regangan Analisa Teoritis Kolom KP4	163
Grafik 3.11	: Kurva Hubungan Tegangan-Regangan Analisa Teoritis Kolom KP5	171
Grafik 3.12	: Kurva Tegangan-Regangan Kolom Beton Analisa Teoritis Gabungan	172
Grafik 4.1	: Kurva Tegangan Regangan Kolom Beton Polos (KP1) Analisis Teoritis dan Eksperimen	182
Grafik 4.2	: Kurva Tegangan-Regangan Kolom Beton terkekang CFRP (KP2)	185

Grafik 4.3	: Kurva Tegangan-Regangan Kolom Beton terkekang Tulangan BJTP Ø6 (KP3)	189
Grafik 4.4	: Kurva Tegangan-Regangan Kolom Beton terkekang Tulangan BJTP Ø8 (KP4)	192
Grafik 4.5	: Kurva Tegangan-Regangan Kolom Beton terkekang Tulangan BJTP Ø6 (KP5)	196
Grafik 4.6	: Kurva Tegangan-Regangan Kolom Beton Analisa Data Eksperimen	199

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	: Kolom yang rusak, retak	17
Gambar 2.2	: Mengolesi Resin atau perekat (<i>epoxy</i>) pada permukaan kolom menggunakan Roller atau kuas silinder	28
Gambar 2.3	: Pemasangan <i>CFRP</i> pada daerah paling berbahaya yang sudah diolesi resin atau perekat (<i>epoxy</i>)	23
Gambar 2.4	: Mesin alat pemasang <i>CFRP</i> kolom bulat	24
Gambar 2.5	: Panjang dan lebar confinement tertekan sedangkan sudut confinement tertarik	26
Gambar 2.6	: Dimensi kolom dan bentuk pembungkus	28
Gambar 2.7	: Kolom terkekang dengan sengkang (a) dan spiral (b)	33
Gambar 2.8	: Diagram Interkasi kolom	42
Gambar 2.9	: Batas Aman pada Diagram Interaksi	43
Gambar 2.10	: Pertambahan Momen atau Gaya Aksial	45
Gambar 2.11	: Tipe Keruntuhan pada Diagram Interaksi	46
Gambar 2.12	: Diagram regangan dan tegangan serta gaya-gaya dalam kolom sebelum dibungkus <i>CFRP</i>	48
Gambar 2.13	: Diagram regangan dan tegangan serta gaya-gaya dalam kolom setelah dibungkus <i>CFRP</i>	50
Gambar 3.1	: Gambar Tipe benda Uji Kolom	58
Gambar 3.2	: Ilustrasi set-up pengujian kolom	60
Gambar 3.3	: Gambar Penampang Kolom tak Terkekang (KP1)	63
Gambar 3.4	: Diagram regangan dan tegangan serta gaya-gaya dalam pada titik 1 kolom tak terkekang (KP1)	63
Gambar 3.5	: Diagram regangan dan tegangan serta gaya-gaya dalam pada titik 2 kolom tak terkekang (KP1)	64
Gambar 3.6	: Diagram regangan dan tegangan serta gaya-gaya dalam pada titik 3 kolom tak terkekang (KP1)	67
Gambar 3.7	: Diagram regangan dan tegangan serta gaya-gaya dalam pada titik 4 kolom tak terkekang (KP1)	71

Gambar 3.8 : Diagram regangan dan tegangan serta gaya-gaya dalam pada titik 5 kolom tak terkekang (KP1).....	74
Gambar 3.9 : Penampang kolom Beton terkekang <i>CFRP</i> (KP2)	79
Gambar 3.10 : Diagram regangan dan tegangan serta gaya-gaya dalam pada titik 1 kolom terkekang <i>CFRP</i> (KP2).....	79
Gambar 3.11 : Diagram regangan dan tegangan serta gaya-gaya dalam pada titik 2 kolom terkekang <i>CFRP</i> (KP2).....	80
Gambar 3.12 : Diagram regangan dan tegangan serta gaya-gaya dalam pada titik 3 kolom terkekang <i>CFRP</i> (KP2).....	85
Gambar 3.13 : Diagram regangan dan tegangan serta gaya-gaya dalam pada titik 4 kolom terkekang <i>CFRP</i> (KP2).....	89
Gambar 3.14 : Diagram regangan dan tegangan serta gaya-gaya dalam pada titik 5 kolom terkekang <i>CFRP</i> (KP2).....	92
Gambar 3.15 : Penampang Kolom Terkekang Tulangan BJTP Ø6 (KP3).....	96
Gambar 3.16 : Diagram regangan dan tegangan serta gaya-gaya dalam pada titik 1 kolom terkekang BJTP Ø6 (KP3).....	96
Gambar 3.17 : Diagram regangan dan tegangan serta gaya-gaya dalam pada titik 2 kolom terkekang BJTP Ø6 (KP3).....	97
Gambar 3.18 : Diagram regangan dan tegangan serta gaya-gaya dalam pada titik 3 kolom terkekang BJTP Ø6 (KP3).....	100
Gambar 3.19 : Diagram regangan dan tegangan serta gaya-gaya dalam pada titik 4 kolom terkekang BJTP Ø6 (KP3).....	104
Gambar 3.20 : Diagram regangan dan tegangan serta gaya-gaya dalam pada titik 5 kolom terkekang BJTP Ø6 (KP3).....	108
Gambar 3.21 : Gambar Penampang Kolom terkekang tulangan BJTP Ø8 (KP4).....	111
Gambar 3.22 : Diagram regangan dan tegangan serta gaya-gaya dalam pada titik 1 kolom terkekang BJTP Ø8 (KP4).....	111
Gambar 3.23 : Diagram regangan dan tegangan serta gaya-gaya dalam pada titik 2 kolom terkekang BJTP Ø8 (KP4).....	112
Gambar 3.24 : Diagram regangan dan tegangan serta gaya-gaya dalam pada titik 3 kolom terkekang BJTP Ø8 (KP4).....	115

Gambar 3.25 : Diagram regangan dan tegangan serta gaya-gaya dalam pada titik 4 kolom terkekang BJTP Ø8 (KP4).....	119
Gambar 3.26 : Diagram regangan dan tegangan serta gaya-gaya dalam pada titik 5 kolom terkekang BJTP Ø8 (KP4).....	123
Gambar 3.27: Gambar Penampang Kolom terkekang tulangan BJTP Ø6 dan CFRP (KP5).....	128
Gambar 3.28 : Diagram regangan dan tegangan serta gaya-gaya dalam pada titik 1 kolom terkekang BJTP Ø6 dan CFRP (KP5)	129
Gambar 3.29 : Diagram regangan dan tegangan serta gaya-gaya dalam pada titik 2 kolom terkekang BJTP Ø6 dan CFRP (KP5)	130
Gambar 3.30: Diagram regangan dan tegangan serta gaya-gaya dalam pada titik 3 kolom terkekang BJTP Ø6 dan CFRP (KP5)	134
Gambar 3.31 : Diagram regangan dan tegangan serta gaya-gaya dalam pada titik 4 kolom terkekang BJTP Ø6 dan CFRP (KP5)	139
Gambar 3.32: Diagram regangan dan tegangan serta gaya-gaya dalam pada titik 5 kolom terkekang BJTP Ø6 dan CFRP (KP5)	143
Gambar 3.33 : Barchart Daktilitas Regangan Teoritis Kolom	174
Gambar 3.34 : Bagan alir penelitian	177
Gambar 4.1 : Pengujian Kolom KP1	181
Gambar 4.2 : Pengujian Kolom terkekang CFRP (KP2)	184
Gambar 4.3 : Pengujian Kolom terkekang Tulangan BJTP Ø6 (KP3)	188
Gambar 4.4 : Pengujian kolom terkekang tulangan BJTP Ø8 (KP4).....	191
Gambar 4.5 : Pengujian kolom terkekang tulangan BJTP Ø6 Dan CFRP (KP5)	195
Gambar 4.6 : Foto Pengujian Kolom	202
Gambar 4.7 : Barchart Daktilitas Regangan Kolom Eksperimen.....	204

DAFTAR LAMPIRAN

LAMPIRAN I

Foto Dokumentasi Proses Penelitian

LAMPIRAN II

Tabel L.2.1 : Tabel Hasil Perancangan Campuran Beton 22,5 MPa

Tabel L.2.2 : Tabel Hasil Pengujian Tarik Baja Tulangan BJTP
Laporan Hasil Pengujian Tarik Baja Tulangan BJTP

Tabel L.2.3 : Tabel Hasil Pengujian Tekan Beton Silinder

LAMPIRAN III : Tabel Hasil Analisa Teoritis Kolom

Tabel L.3.1 : Tabel Hasil Analisa Teoritis Kolom KP1

Tabel L.3.2 : Tabel Hasil Analisa Teoritis Kolom KP2

Tabel L.3.3 : Tabel Hasil Analisa Teoritis Kolom KP3

Tabel L.3.4 : Tabel Hasil Analisa Teoritis Kolom KP4

Tabel L.3.5 : Tabel Hasil Analisa Teoritis Kolom KP5

LAMPIRAN IV : Tabel Hasil Pengamatan Eksperimen

Tabel L.4.1 : Tabel Hasil Pengamatan Eksperimen Kolom KP1

Tabel L.4.1-A : Hasil Pengamatan Eksperimen Kolom KP1-A

Tabel L.4.1-B : Hasil Pengamatan Eksperimen Kolom KP1-B

Tabel L.4.1-C : Hasil Pengamatan Eksperimen Kolom KP1-C

Tabel L.4.1-D : Rata-rata Hasil Eksperimen Pengamatan Kolom KP1

Tabel L.4.2 : Tabel Hasil Pengamatan Eksperimen Kolom KP2

Tabel L.4.2-A : Hasil Pengamatan Eksperimen Kolom KP2-A

Tabel L.4.2-B : Hasil Pengamatan Eksperimen Kolom KP2-B

Tabel L.4.2-C : Hasil Pengamatan Eksperimen Kolom KP2-C

Tabel L.4.2-D : Rata-rata Hasil Eksperimen Pengamatan Kolom KP2

Tabel L.4.3 : Tabel Hasil Pengamatan Eksperimen Kolom KP3

Tabel L.4.3-A : Hasil Pengamatan Eksperimen Kolom KP3-A

Tabel L.4.3-B : Hasil Pengamatan Eksperimen Kolom KP3-B

Tabel L.4.3-C : Hasil Pengamatan Eksperimen Kolom KP3-C

Tabel L.4.3-D : Rata-rata Hasil Eksperimen Pengamatan Kolom KP3

Tabel L.4.4 : Tabel Hasil Pengamatan Eksperimen Kolom KP4

Tabel L.4.4-A : Hasil Pengamatan Eksperimen Kolom KP4-A

Tabel L.4.4-B : Hasil Pengamatan Eksperimen Kolom KP4-B

Tabel L.4.4-C : Hasil Pengamatan Eksperimen Kolom KP4-C

Tabel L.4.4-D : Rata-rata Hasil Eksperimen Pengamatan Kolom KP4

Tabel L.4.5 : Tabel Hasil Pengamatan Eksperimen Kolom KP5

Tabel L.4.5-A : Hasil Pengamatan Eksperimen Kolom KP5-A

Tabel L.4.5-B : Hasil Pengamatan Eksperimen Kolom KP5-B

Tabel L.4.5-C : Hasil Pengamatan Eksperimen Kolom KP5-C

Tabel L.4.5-D : Rata-rata Hasil Eksperimen Pengamatan Kolom KP5

LEMBAR ASISTENSI

LEMBAR REVISI

DAFTAR NOTASI

BJTP = Baja Tulangan Polos

ρ_s = Rasio volumetrik tulangan spiral

m_1 = Jumlah tulangan BJTP arah longitudinal

f'_c = Kuat tekan beton rencana (MPa)

$f_{y\text{st}}$ = Kuat leleh tulangan spiral BJTP (MPa)

f_y = Kuat leleh tulangan longitudinal BJTP (MPa)

A_g = Luas total penampang kolom (mm^2)

ε_c = Regangan beton

ε_y = Regangan baja tulangan

f'_{lx} = Tegangan kekang efektif arah x penampang (MPa)

f'_{ly} = Tegangan kekang efektif arah y penampang (MPa)

ρ_x = Rasio luas penampang efektif sengkang terhadap inti beton terkekang arah x

ρ_y = Rasio luas penampang efektif sengkang terhadap inti beton terkekang arah y

K_e = Koefisien efektifitas pengekangan, penampang kolom persegi, $K_e = 0,75$

f'_{cc} = Kuat tekan beton terkekang (MPa)

ε_{c0} = Regangan beton tidak terkekang pada saat tegangan maksimum

ε'_{cc} = Regangan beton terkekang pada saat tegangan maksimum

ε'_{cu} = Regangan beton ultimit

ε_{sm} = Regangan baja tulangan pada tegangan tarik maksimum

ε_{cm} = regangan beton terkekang maksimum

E_s = Modulus elastisitas baja tulangan (MPa)

E_c = Modulus elastisitas beton (MPa)

n = Perbandingan Modulus elastisitas baja terhadap modulus elastisitas beton

A_s = Luas total tulangan longitudinal (mm^2)

K = Rasio kuat tekan beton terkekang

BAB I

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Semakin banyak keruntuhan bangunan yang disebabkan oleh beban gempa dan telah memakan banyak korban jiwa baik di dalam negeri maupun luar negeri, membuat para ahli Teknik Sipil terus melakukan penelitian-penelitian di bidang teknik sipil khususnya di bidang struktur. Sehingga diharapkan dari penelitian-penelitian tersebut, dapat ditemukan suatu solusi baru yang tepat untuk membuat struktur gedung yang dapat tetap berdiri kokoh walaupun telah diguncang gempa.

Keruntuhan bangunan yang terjadi banyak disebabkan oleh kegagalan struktur memikul beban gempa terutama pada elemen struktur kolom. Kegagalan kolom banyak disebabkan oleh beberapa faktor antara lain : perencanaan kolom yang tidak memperhitungkan daktilitas atau pengekangan, pelaksanaan kolom yang kurang baik sehingga mutu beton kolom tersebut menurun dari yang direncanakan. Selain itu para perencana yang masih mengabaikan konsep "*Strong Columns Weak Beams*".

Faktor kegagalan kolom di atas, membuat para praktisi mencoba dengan berbagai macam cara untuk membuat bangunan yang sudah ada khususnya elemen kolom menjadi lebih kuat tanpa harus merubah atau membongkar bangunan tersebut. Metode yang dapat dilakukan untuk meningkatkan kekuatan kolom adalah dengan mengadakan pembesaran dimensi kolom, melakukan grouting, melapisi dengan ferrocement,

membungkus kolom dengan carbon fiber/glass fiber/aramid fiber, dan lain sebagainya.

Salah satu bahan pembungkus kolom yang mudah didapat dan lebih praktis untuk dilaksanakan serta dapat meningkatkan kekuatan kolom yang cukup besar adalah menggunakan *Carbon Fiber-Reinforced Polymer (CFRP)*. Bila dibandingkan dengan metode lain yang disebutkan di atas, *CFRP* mempunyai keunggulan dari segi pelaksanaan yaitu : tidak perlu merusak bangunan, tidak perlu merubah ukuran kolom sesuai tuntutan arsitektur dan waktu pelaksanaan yang relatif lebih singkat.

Yang masih perlu diteliti adalah kinerja kolom persegi yang dibungkus dengan *CFRP*. Yang dimaksud dengan kinerja adalah peningkatan kuat tekan kolom beton, peningkatan daktilitas kurvatur, peningkatan daktilitas deformasi kolom beton dan perubahan bentuk kolom persegi pada saat dibebani beban aksial dan lentur.

Penelitian ini perlu dilakukan karena pada umumnya struktur gedung yang ada di Indonesia menggunakan penampang kolom berbentuk persegi dan sangat jarang menggunakan penampang kolom berbentuk bulat selain itu dari segi pelaksanaan kolom berbentuk segi empat lebih mudah untuk dilaksanakan. Selain itu banyak bangunan yang telah ada tapi pada waktu dibangun belum memenuhi standart perencanaan bangunan tahan gempa. Sehingga diharapkan hasil penelitian ini akan dapat bermanfaat untuk perkuatan bangunan-bangunan yang sudah di dalam negeri dan juga dapat diaplikasikan pada perencanaan dan pelaksanaan struktur bangunan yang baru.

1.2. Rumusan Masalah

Masalah penelitian yang akan saya teliti adalah “*Bagaimana peningkatan kinerja kolom persegi beton f_c 22,5 Mpa setelah dibungkus dengan Carbon Fiber-Reinforced Polymer (CFRP)*” dengan rincian permasalahan sebagai berikut :

1. Berapa besar peningkatan kuat tekan beton (f_c) kolom persegi setelah dibungkus *CFRP*?
2. Bagaimana model kurva hubungan tegangan-regangan kolom persegi beton mutu normal yang beri lapisan *CFRP*?
3. Bagaimana perubahan bentuk kolom yang dibungkus *CFRP* pada saat memikul gaya aksial?
4. Berapa besar peningkatan daktilitas kolom persegi beton f_c 22,5 MPa setelah dibungkus *CFRP*?

1.3. Tujuan Penelitian

Adapun Tujuan Penelitian ini adalah “*untuk mengetahui peningkatan kinerja kolom persegi beton f_c 22,5 Mpa dengan membungkus kolom menggunakan Carbon Fiber-Reinforced Polymer (CFRP)*” dengan perincian sebagai berikut :

1. Penelitian ini hanya untuk mengetahui peningkatan kekuatan kolom persegi setelah diperkuat dengan menggunakan *CFRP*.
2. Penelitian ini hanya akan mencari Model Kurva Hubungan Tegangan-regangan Beton Persegi beton Mutu Normal setelah diberi lapisan *CFRP*.

3. Penelitian ini hanya menyelidiki perubahan bentuk Kolom setelah diberi Lapisan *CFRP* saat memikul gaya aksial.
4. Penelitian ini hanya untuk mencari besar peningkatan daktilitas kolom persegi beton f'_c 22,5 Mpa setelah dibungkus *CFRP*.

1.4. Manfaat Penelitian

Saya harapkan dari penelitian yang akan saya lakukan nantinya akan bermanfaat bagi :

- a. Para praktisi, diharapkan untuk perencanaan dan pelaksanaan struktur gedung di masa yang akan datang, lebih memperhatikan masalah detailing dan konsep "*strong columns weak beams*".
- b. Masyarakat, hasil penelitian ini diharapkan dapat bermanfaat untuk perkuatan (*retrofit*) kolom beton pada bangunan lama yang belum direncanakan memikul beban gempa atau bangunan yang kurang daktil, terutama pada bangunan gedung yang terletak di wilayah gempa menengah dan gempa kuat. Sehingga dengan penggunaan *CFRP* sebagai bahan *retrofitting*, diharapkan dapat tercapainya konsep "*strong columns weak beams*", tanpa harus membongkar bangunan gedung tersebut.

1.5. Batasan Masalah

Agar penelitian tidak menyimpang dari tujuan, maka diberi batasan berupa parameter-parameter perencanaan yang dipakai dalam penelitian ini, yaitu sebagai berikut :

1. Mengetahui Peningkatan mutu beton (f'_{cc}) kolom persegi setelah diberi tambahan *CFRP*.
2. Mengetahui model kurva hubungan tegangan-regangan kolom beton bertulang yang beri lapisan *CFRP*.
3. Mengetahui perubahan bentuk kolom pada waktu dibebani beban aksial.
4. Mengetahui besarnya peningkatan daktilitas kolom persegi beton f'_c 22,5 MPa setelah dibungkus *CFRP*.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Umum

Perkembangan teknologi beton pada saat sekarang ini, membuat konstruksi beton semakin banyak dipilih sebagai bahan konstruksi. Konstruksi dari beton banyak memiliki keuntungan selain bahannya sangat mudah diperoleh, juga memiliki beberapa keuntungan antara lain harganya relatif lebih murah, mempunyai kekuatan tekan tinggi, mudah dalam pengangkutan dan pembentukan, serta mudah perawatannya, sehingga banyak bangunan – bangunan yang didirikan memilih konstruksi yang terbuat dari beton sebagai bahan materialnya.

Pemilihan beton sebagai konstruksi telah membuat para ahli beton menciptakan bahan tambahan (*admixture*) bagi beton. Bahan tambahan (*admixture*) merupakan bahan yang dianggap penting, terutama untuk konstruksi pada saat sekarang ini yang membutuhkan segala sesuatu yang serba praktis, efisien dan ekonomis, tanpa mengurangi mutu dari beton tersebut. Penggunaan bahan tambahan tersebut dimaksudkan untuk memperbaiki dan menambah sifat beton sesuai dengan sifat beton yang diinginkan.

Penggunaan bahan tambahan pada konstruksi belakangan ini telah berkembang dengan pesat seiring dengan pesatnya pembangunan di bidang konstruksi. Banyak penemuan baru yang dapat menggantikan cara-cara konvensional seperti dibidang perkuatan struktur, dimana telah ditemukan metode dan sistem yang semakin mudah diaplikasikan serta hanya sedikit

pertambahan dimensi dari struktur, sehingga tetap terjaga keindahan dari konstruksi tersebut

Gempa bumi merupakan salah satu penyebab kerusakan bangunan pemakaian struktur dengan berbagai fungsi dan kombinasi beban tergolong rentan, baik terhadap perubahan fungsi yang mengakibatkan pertambahan beban yang dipikul, maupun kemungkinan terjadinya kesalahan perhitungan pada saat perencanaan. Untuk mempertahankan dan meningkatkan kekuatan (*strengthening*) fungsi struktur tersebut, terutama struktur yang menahan beban aksial tekan dan momen lentur.

Ada beberapa cara yang lazim digunakan antara lain:

1. Dengan cara memberi penyelubungan pada struktur tersebut atau dikenal dengan metode Penyelubungan (*Jacketing Methods*) misalnya *FRP (Fiber Reinforced Plastic)* sebagai bahan kompositnya.
2. Memperpendek tinggi dari struktur dengan konstruksi beton.
3. Memperbesar dimensi pada konstruksi beton.
4. Dengan menambah jumlah tulangan pada kolom dan memperbesar dimensi kolom beton tersebut atau dikenal dengan metode penulangan luar (*Externally Reinforcement*).
5. Atau struktur tersebut harus dibongkar dan diganti dengan baru.

Perkuatan (*strengthening*) merupakan suatu kegiatan yang bertujuan meningkatkan perilaku komponen atau struktur agar menjadi lebih kuat dibanding sebelumnya. Pada penelitian untuk perkuatan (*strengthening*) dalam mempertahankan fungsi struktur dilakukan dengan menggunakan *Carbon Fiber Reinforced Polimer (CFRP)* dengan konsep dan metode

perbaikan/perkuatan lentur beton bertulang khususnya kolom yang diakibatkan oleh gempa beserta keuntungan dan kerugiannya.

2.1.1 Carbon Fiber Reinforced Polymer

CFRP merupakan suatu material komposit yang digunakan dalam konstruksi sipil. Bahan ini menggabungkan polimer resin, filler dan fiber. Resin yang digunakan adalah *polyester*, *vinylester* atau *epoxy* dan *filler* yang digunakan adalah *kaolin clay*, *calcium carbonate* dan *alumina*. Sedangkan *fiber* terdiri dari beberapa jenis seperti *glass*, *carbon*, dan *aramide*.

Material komposit punya beberapa kelebihan seperti berkekuatan tinggi, ringan dan punya daya tahan yang tinggi (BRE and Trend:2000). Selain itu *FRP* juga bahan non korosi, netral terhadap gaya magnet jika dibandingkan terhadap baja, *FRP* punya kuat tarik lebih besar, modulus elastisitas kecil dan hubungan tegangan-regangan adalah elastis. *FRP* terdiri dari beberapa jenis seperti *bar*, *wrap*, *grid* dan *strip*. Untuk struktur baru digunakan *FRP* bar sebagai pengganti baja tulangan. *FRP* dengan jenis *wrap* lebih banyak dipakai pada kolom sedangkan jenis *sheet* atau *strip* biasa digunakan pada balok, pelat dan kolom.

FRP dengan jenis *grid* digunakan untuk perkuatan pelat. Pengembangan penggunaan *FRP* pada rekayasa sipil terdiri dari dua bagian, pertama untuk rehabilitasi dan perbaikan struktur dan kedua untuk pembuatan konstruksi baru yang sepenuhnya menggunakan *FRP* ataupun komposit dengan beton. Penggunaan *FRP* dalam perkuatan struktur antara lain pada balok, pelat, jembatan, kolom (BRE and Trend 2000). Menurut

BRE and Trend 2000 ltd terdapat beberapa keuntungan menggunakan *FRP* sebagai bahan perkuatan struktur antara lain:

1. Teknik yang digunakan dalam pemasangan tidak mengganggu penggunaan struktur oleh pihak lain.
2. Meningkatkan kapasitas struktur dengan penambahan berat struktur sendiri adalah minimum.
3. Teknik yang digunakan relatif cepat, meminimalkan waktu bekerja.
4. Material *FRP* lebih tipis dan lebih ringan daripada menggunakan perkuatan dari baja.

Kuntungan pemakaian *FRP* menurut Hartono dan Santosa, 2003 antara lain:

1. Kuat tarik sangat tinggi (+7 - 10 kali lebih tinggi dari baja U39)
2. Sangat ringan (density: 1,4 – 2,4 gr/cm³, 4-6 kali lebih ringan dari baja.
3. Pelaksanaan sangat mudah dan cepat.
4. Memungkinkan tidak perlu penutupan lalu lintas.
5. Tidak perlu area kerja yang luas.
6. Tidak diperlukan join meskipun bentang yang diperekat cukup panjang.
7. Tidak berkarat.

Namun demikian perlu juga diperhatikan kelemahan – kelemahan pemakaian bahan ini, antara lain kurang tahan teradap suhu tinggi. Dengan suhu sekitar 700 °C bahan perekat *epoxy resin* akan berubah dari kondisi keras

menjadi lunak, bersifat plastis sehingga daya lekatnya akan menurun. Selain itu bahan ini juga tidak tahan terhadap sinar ultra violet. Untuk mengatasi kelemahan ini perlu dilakukan proteksi, misalnya pelapisan atau penutupan dengan mortar.

Carbon Fiber Reinforced Polymer (*CFRP*) merupakan salah satu jenis Fiber Reinforced Polimer (*FRP*). Carbon Fiber Reinforced Polymer (*CFRP*) merupakan sejenis plat baja tipis yang didalamnya terdapat serat – serat carbon dan fiber. *Carbon Fiber Reinforced Polymer* digunakan pada konstruksi struktur bangunan yang sudah ada. Pemakaian *CFRP* pada suatu konstruksi biasanya disebabkan oleh beberapa hal yaitu:

- Terjadinya kesalahan pada perencanaan.
- Adanya kerusakan – kerusakan dari bagian struktur sehingga dikhawatirkan tidak berfungsi sesuai dengan yang diharapkan.
- Adanya perubahan fungsi pada sistem struktur dan adanya penambahan beban yang melebihi beban rencana.

Perkuatan tambahan ini telah banyak digunakan diberbagai belahan dunia. Selain digunakan sebagai perkuatan tambahan untuk jembatan, juga digunakan pada gedung – gedung seperti pelat lantai, balok dan kolom hal ini hanya biasa diaplikasikan pada kolom yang bundar dan lain sebagainya. Disamping karena bahan tambahan ini lebih efektif, juga disebabkan karena keuntungannya lebih dari sistem perkuatan lainnya.

Tabel 2.1: Aplikasi Penggunaan *Carbon Fiber Reinforced Polimer (CFRP)*

Negara	Proyek	Jumlah	Kontraktor
Argentina	Metro Red	500 m ²	Caputo SA
Australia	Boiler House	500 m	Kane Construction
Australia	West and Shopping Mall	180 m	AB & MA Cick Pty. Ltd.
Australia	Te Glen Shopping Centre	300 m	Construction Engineering
Austria	IBM Building	1174 m	IBM
Austria	Bregenzerac Bridge	1100 m	Hembau Gesmbh
Austria	A10 Tauernautobahn	8500 m	Strabag AG
Hongkong	Six Bayan Temple	2800 m ²	Guanzhou Province No.1 Construction
Qatar	Qafco Prill Tower	3600 m ²	Apollo
Singapore	Main Upgrading Project	5500 m ²	Hong Lai Huat Construction
Turkey	Frtolay Turkey	1000 m ²	Detay Construction Co.Ltd
Turkey	PETKIM	2500 m ²	Ken Engineering
UK	Highway M11 Bridge	1400 m ²	Balvac
UK	West Burton	1600 m ²	Bierrum
UK	Leaden Hall Maket	400 m ²	Rusview

Sumber : www.scribd.com/CFRP_Strengthening.pdf

2.1.2 *CFRP* yang ada dipasaran

Pembagian tipe kekuatan *FRP* berdasarkan angka modulus elastisitasnya, angka modulus elastisitasnya terdiri dari tiga tipe yaitu:

1. High strength
2. High modulus
3. Ultra high modulus

Spesifikasi dari masing-masing tipe *FRP* ini dapat dilihat pada Tabel yang terdapat dibawah ini:

Tabel.2.2: Tipe dan Spesifikasi *FRP*

Carbon	Kuat Tarik (N/mm²)	Modulus Elastisitas (N/mm²)	Elongasi (%)
High Strenght	4300-4900	3100	155000
High Modulus	2740-5490	2400	210000
Ultra High Moulus	2600-4020	1600	300000

Sumber : Manual PT. SIKI Nusa Pratama.

Untuk perbaikan/perkuatan Struktur berikut ini akan uraikan *FRP* yang tersedia dipasaran termasuk kemampuan material *FRP* dan *Epoxy adhesives* agar penggunaannya dapat di lakukan dengan efisien dan tepat guna.

Tabel.2.3: Material perkuatan/perbaikan yang tersedia

Suplier	Trade Name	Type of Material
DML Composites	DML Composites	Carbon FRP Plate Carbon Fibre Sheet Glass Fibre Sheet Aramid Fibre Sheet
Du Pont de Nemours Int. S.A.	Kevlar Structural Reinforcement System	Aramid Fibre Tape or Sheet Aramid FRP Sheet
Exchem	Selfix Carbofibe	Carbon FRP Plate Carbon Fibre Sheet Glass Fibre Sheet Aramid Fibre Sheet
Feb MBT	Mbrace Mbrace Kevlar*	Carbon Fibre Sheet Carbon FRP Plate Aramid Fibre Tape or Sheet
Sumitomo Corporation Europe [#]	Replark	Carbon Fibre Prepeg
SBD	Enforce	Carbon FRP Plate Carbon Fibre Sheet Glass Fibre Sheet Aramid Fibre Sheet
Sika	Sika CarboDur SikaWrap Hex 230C SikaWrap Hex 100G	Carbon FRP Plate Carbon Fibre Sheet Glass Fibre Sheet
Toray Europe Ltd.	Torayca UT70	Carbon Fibre Sheet

*In association with Du Pont

[#] Agent for Mitsubishi Chemicals

Table.2.4: Properti dari material *FRP* berbentuk plate

Trade Name	Strenght (N/mm ²)	Modulus (kN/mm ²)	Thickness (mm)	Width (mm)
DML Composities	2100	140	Up to 30	Up to 1400
	1400	360	Up to 30	Up to 1400
Enforce	2200-2500	165	1,2, 1,4 2,1	10, 50, 80, 90, 100, 120
	2200-2500	210	1,2, 1,4 2,1	50, 80, 90, 100, 120, 150
Mbrace LM	>2200	150	1,2 1,4	50, 80, 90, 100, 120
Mbrace LM	>2200	200	1,4	50, 80, 90, 100, 120, 150, 200
Selfix Carbofibe S	2800	150	1,2 1,4	50, 80, 120
Selfix Carbofibe M	3200	200	1,2 1,4	50, 80, 120
Selfix Carbofibe H	1600	280	1,2 1,4	50, 80, 120
Sika CarboDur S	3050	165	1,2 1,4	50, 80, 90, 100, 120, 150
Sika CarboDur M	2900	210	1,4	60, 90, 100
Sika CarboDur H	1450	300	1,4	50

Sumber : Manual PT. SIKI Nusa Pratama.

Note: Properti ini diambil dari pabrik dan telah dikoreksi pada saat publikasi (summer 2000). Untuk mendesign properti actual harus diperoleh dari pabrikan. Karena Metode test yang bervariasi, informasi yang diperoleh harus detail (contoh:freku- Ensi test, standar deviasi).

Tabel.2.5: Properti dari material FRP berbentuk lembaran

Trade Name	Fibre	Strength (kN/mm ²)	Modulus (kN/mm ²)	Area Weight (g/m ²)	Effective Thickness* (mm ²)	Width (mm)
DML Composites	Carbon	4900	230	150,300,900 200,250 to 1200		300,500,1500 350,500,340
	Glass	3400	70			
	Aramid	2800	115			
Enforce	Carbon	3900	240	200	0,117	300
	Carbon	2650	640	400	0,235	300
	Glass	1700	65	350	0,135	680
	Aramid	2900	120	290,420	0,2 0,29	300
Kavlar [#] Structural Reinf. System	Aramid	2100	120	280, 420	0,193 0,286	100,300,500
Mbrace Tow Sheet	Carbon	3550	235	300	0,11 0,165	500
	Carbon	3000	380	300	0,165	500
	Glass	1550	74	915	0,118	500
Replark	Carbon	3400	230	200	0,11-0,167	250,330,500
	Carbon	2900	390	300	0,165	250,330,500
	Carbon	1900	640	300	0,143	250,330,500
Selfix	Glass	1099 ⁺	42 ⁺	432	0,167	150, 300
CarboFibreE	Carbon	1417 ⁺	120 ⁺	300	0,167	150, 300
Selfix	Aramid	1086 ⁺	61 ⁺	240	0,167	150, 300
CarboFibeC						
Selfix						
Carbofibe AR						
SikaWrap-Hex230C	Carbon	3500	230	230		610
SikaWrap : Hex230C	Glass	2250	70	840		1270
Torayca UT70-20	Carbon	4090	230	200	0,111	100,250,500,1000
Torayca UT70-20	Carbon	4220	235	300	0,167	100,250,500,1000

Sumber : Manual PT. SIKI Nusa Pratama.

Notes:

kecuali untuk hal ini, property untuk fibre kering. Nilai-nilai yang dimuat hanya yang diindikasikan. Perhatikan juga Note pada tabel 2.5

* Ketebalan efektif adalah area total *Cross-sectional* dari fiber yang dibagi lebar lembaran

+ Hasil normalisasi 55% volume menggunakan resin *Selfix Carbofibe* laminating.

Tabel.2.6: Properti dari perekat epoxy (epoxy adhesives)

Property	Supplier And Trade Name			
	Exchem	MBT	SDB	Sika
	Resifix 31	Mbrace Laminate Adhesive	Epoxy Plus	Sikadur
Tensile Strength (MPa)	24	30	19	30
Flexural Strength (MPa)	55	100	35	-
Shear Strength (MPa)	22			
Flexural Modulus (kN/mm ²)	6,5	3,5	9,8	12,8
Shear Modulus (kN/mm ²)	3,8	-	-	-
Glass transition temperature Tg (°C)	60	56	60,8	62

Tabel. 2.7: Properti dari resin pelapis (laminating resins)

Property	Supplier And Trade Name				
	MBT	SBD	DML	Sika	Sumitomo
Tensile Strength (MPa)	50	17	81	30	29
Flexural Strength (MPa)	120	28	-	-	-
Flexural Modulus (kN/mm ²)	3	5			
Glass transition temperature Tg (°C)	55	60,80	59	53	55

Sumber : Manual PT. SIKI Nusa Pratama.

2.1.3 Alasan Penggunaan CFRP Sebagai Elemen Retrofit

Carbon fiber lebih baik digunakan dibanding aramid fiber dan glass fiber. Dilihat dari kekuatan dan elastisitasnya yang jauh lebih bagus dari kedua bahan lain. Ini dapat dilihat dari tabel, yaitu :

Tabel 2.8: Perbandingan performance *FRP*

Performance	Carbon	Aramid	Glass
Alkaline Resistant	Good	Good	Bad
UV Resistant	Yes	No	yes
Electrical Conductivity	Yes	No	No
Compressive vs tensile Strength	Close to	Lower	Close to
Elastic Modulus vs Steel	Similar	Lower	Lower
Melting Point	650°C	200°C	1000°C
Creep Rupture	Best	Moderate	Bad

Sumber : Manual PT. SIKA Nusa Pratama.

Banyak alasan mengapa diperlukan kekuatan tambahan untuk struktur beton bertulang, yaitu:

1. Kapasitas beban hidup bertambah, seperti pada jembatan yang selalu menerima beban pada kendaraan atau gedung yang dulunya dijadikan tempat tinggal kemudian diganti untuk kepentingan umum.
2. Melakukan penambahan kebutuhan bangunan diluar dari desain yang dibuat atau kesalahan perancangan.
3. Memperbaiki kekuatan terhadap gempa, yang mana memberikan lapisan tambahan terhadap beton akibat tegangan, atau penambahan secara terus – menerus diantara lapisan.
4. Menganti perkuatan atau menambah zat paska perkuatan, seperti dampak dari kerusakan atau menutup (menghilangkan) korosi.

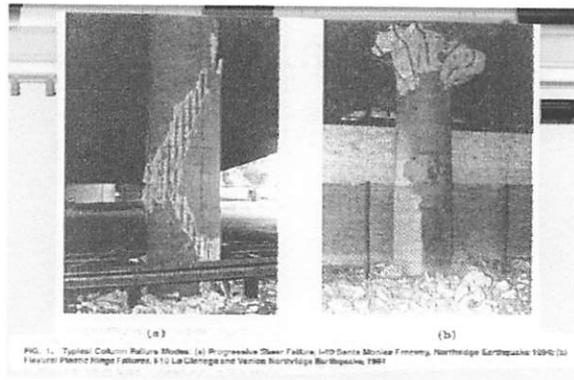
Dari semua kasus tersebut penambahan perkuatan pada bangunan dilakukan pada bagian bangunan yang menerima

beban hidup karena hal itu sangat membantu dalam kelangsungan bangunan.

2.1.4 Fungsi CFRP

Pada penggunaannya, CFRP fungsinya adalah :

1. Meningkatkan kekuatan kompresi dari kolom sirkular.
2. Meningkatkan kekuatan geser total kolom beton.
3. Meningkatkan kekuatan flextural dari kolom beton.
4. Menutup kondisi kolom yang sudah mengalami retak, retak sebelum diberikan bahan ini.



Gambar 2.1 : Kolom yang rusak, retak.

2.1.5 Metode Perbaikan Struktur

Metode perbaikan struktur yang pada umumnya dilakukan adalah :

a. *Patching*

Metode perbaikan ini adalah metode perbaikan konvensional, dimana kedalaman kerusakan tidak terlalu dalam (kurang dari selimut beton). Pada metode perbaikan ini, yang perlu diperhatikan adalah penekanan pada saat mortar ditempelkan; sehingga benar-benar didapatkan hasil yang padat. Material yang digunakan harus

memiliki sifat mudah dikerjakan dan tidak jatuh setelah terpasang (lihat maksimum ketebalan yang dapat dipasang tiap lapis).

b. Grouting

Metode perbaikan ini umumnya dilakukan apabila kerusakan melebihi selimut beton. Metode grouting ini dapat dilakukan secara manual (gravitasi) atau menggunakan pompa. Pada metode perbaikan ini yang perlu diperhatikan adalah bekisting yang terpasang harus benar-benar kedap, agar tidak ada kebocoran spesi yang mengakibatkan terjadinya keropos. Material yang digunakan harus memiliki sifat mengalir dan tidak susut.

c. Shotcrete (Beton Tembak)

Metode perbaikan ini umumnya digunakan untuk kerusakan yang sangat luas, dimana metode patching ataupun grouting sudah tidak efektif lagi. Dan pada metode ini tidak diperlukan bekisting lagi seperti halnya pengecoran pada umumnya.

Metode shotcrete ada dua system yaitu *dry-mix* dan *wet-mix*. Pada sistim *dry-mix*, campuran yang dimasukan dalam mesin berupa campuran kering, dan akan tercampur dengan air di ujung selang. Sehingga mutu dari beton yang ditembakkan sangat tergantung pada keahlian tenaga yang memegang selang, yang mengatur jumlah air. Tapi sistim ini sangat mudah dalam perawatan mesin *shotcrete*, karena tidak pernah terjadi '*blocking*'. Pada sistim *wet-mix*, campuran yang dimasukan dalam mesin berupa campuran basah,

sehingga mutu beton ditembakkan lebih seragam. Tapi sistim ini memerlukan perawatan mesin tinggi, apalagi bila sampai terjadi '*blocking*'. Pada metode *shotcrete*, umumnya digunakan additive untuk mempercepat pengeringan (*accelerator*), dengan tujuan mempercepat pengerasan dan mengurangi terjadinya banyaknya bahan yang terpantul dan jatuh (*rebound*).

d. Injection

Metode ini umumnya digunakan untuk kerusakan yang berupa keretakan. Dalam proses perbaikan dengan metode ini dapat digunakan alat manual ataupun mesin bertekanan. Material yang digunakan harus mempunyai viskositas yang rendah, sehingga mampu mengisi keretakan.

e. Coating

Metode ini berupa pemberian lapisan pada permukaan beton, dengan tujuan melindungi beton dari serangan bahan kimia ataupun air laut; biasanya digunakan pada waktu struktur didaerah laut atau struktur yang berada dilingkungan agresif.

2.1.6 Aplikasi CFRP pada bangunan

Penggunaan *FRP* kini telah banyak digunakan oleh bangunan-bangunan seperti jembatan, gedung-gedung (mall, pencakar langit, apartemen dst), stadion, rumah tinggal dan lain-lain. Di Inggris terdapat 150 lebih struktur bangunan menggunakan bahan ini sebagai bahan yang memperkuat struktur bangunan, data diambil

pada tahun 2000. Karena bahannya yang kuat, sederhana dan tidak mencemari lingkungan maka bahan ini banyak dipakai. Berikut jenis contoh bangunan yang menggunakan bahan ini.

Kolom bangunan yang menggunakan bahan ini, yaitu :

a. Kolom gedung

Berbeda halnya pada balok dan pelat, dikolom *FRP* digunakan untuk memikul beban axial. *FRP* diletakan sebagai *wrap* pada kolom atau sebagai pembungkus yang melingkari seluruh kolom hingga membuat kolom menjadi tertutup rapat dari bawah hingga atas kolom. *FRP* kolom merupakan perpaduan antara fiber karbon dengan resin. Bahan ini sangat baik digunakan pada kolom yang berbentuk bulat atau melingkar dibanding dengan kolom yang berbentuk bujur sangkar. Selain karena bentuknya yang tidak perlu dibentuk dengan sudut-sudut tertentu pada kolom bulat, material ini juga lebih rapat dan kuat ketika dipasangkan ke kolom melingkar. Hal tersebut mudah untuk dilakukan dikarenakan sewaktu melakukan pemasangan hanya diperlukan tinggi dan diameter kolom saja, sebagai gambaran sebelum dilakukan pemasangan.

Bahan ini sudah banyak membantu dalam perkembangan struktur bangunan terutama pada kolom seperti yang di Amerika dan di Jepang. Bahan ini sudah banyak membantu bagi kemajuan negara tersebut, dan hal ini juga dibuktikan dengan mengembangkan *CFRP* ini sebagai bahan yang

mampu memberi nilai lebih misalnya pada negara Jepang yang merupakan negara yang memiliki *seismic* yang tinggi dan negara Amerika yang sering terjadi peristiwa alam. Sebuah metode besar juga mulai dikembangkan dimana universitas yang ada di negara Eropa mulai menggunakan bahan ini sebagai kekuatan tambahan dari luar terhadap bangunannya seperti di Universitas Southampton, Inggris.

b. Kolom jembatan

Dalam bagian ini pekerjaan dilakukan secara berkelompok saat material ini digunakan. Material pada umumnya dikerjakan dengan menggunakan tangan. Untuk mesin digunakan pada material yang lebih luas dan yang banyak jumlah strukturnya seperti kolom jembatan. Sebelum dilakukan pemasangan pada kolom ada baiknya terlebih dahulu dipasang kait penjepit pada sekitar yang mau diletakan FRP dan disekitar lingkaran kolom pada bagian atas kolom. Mesin pada penggunaannya dapat menjangkau sekitar kolom, seperti ukuran yang terlalu tebal pada waktu pemasangan *fiber*.

2.1.7 Pekerjaan dan Pemasangan CFRP pada kolom

Sebelum dilakukan pemasangan material komposit (*FRP*) ini perlu adanya dilakukan koreksi. Selain karena perlu adanya koreksi, juga perlu dilakukan peninjauan terhadap kebutuhan pada waktu pemasangan seperti perlengkapan yang akan dipakai pada

pemasangan agar keselamatan dan kenyamanan pada waktu pemasangan dapat terjamin.

Pekerjaan Pada *CFRP*

Semua peralatan yang digunakan dalam pengabungan dan pengerjaan pada pemasangan *FRP* serta material harus dijaga kebersihan dan perawatannya sehingga mendapatkan hasil yang baik. Pengerjaan semuanya dilakukan dengan bantuan alat.

Pengerjaan dan pengaplikasian untuk mengabungkan bahan dalam membentuk selubung *FRP* ini harus sesuai dengan instruksi pabrik hal tersebut dapat dilihat dari panduan yang diberikan oleh perusahaan tersebut. Jumlah material pencampuran dilakukan hanya sekali saja tidak boleh melebihi jumlah yang ditentukan, seperti volume yang terlalu banyak hal ini dapat mempengaruhi tingginya temperatur pada waktu dilakukan pencampuran sehingga dapat merusak struktur pencampuran. Resin atau perekat terlebih dahulu diaduk agar struktur perekat tersebut merata kemudian resin dioleskan kepada permukaan kolom. *Resin* atau perekat tersebut berfungsi untuk menyatukan *wrap CFRP* dengan kolom beton. Bahan ini memiliki daya rekat yang kuat terhadap geser dan mampu memberikan rekatan terhadap *CFRP* akibat beban aksial yang besar. *Resin* yang digunakan adalah *epoxy* dengan ketebalan olesan berkisar antara 1,5-2,0mm dengan menggunakan roller dan ukuran ini cukup ideal untuk dibuat. Jenis perekat ini tidak bersifat

permanen atau mudah untuk dilepaskan dengan menggunakan scrub dan bahan pelarut.



Gambar 2.2. Mengolesi Resin atau perekat (*epoxy*) pada permukaan kolom menggunakan Roller atau kuas silinder

Pemasangan *CFRP* Pada Kolom

Sebelum dipasangkan ke kolom *wrap CFRP* ini terlebih dahulu dipotong dengan menggunakan alat pemotong. Alat pemotong material ini cukup sederhana, hanya dengan menggunakan gunting pemotong *fiber* atau dalam skala yang besar dengan menggunakan mesin pemotong *fiber*.

Setelah dilakukan pemotongan pada *fiber* untuk mendapatkan ukuran yang tepat pada kolom, material tersebut kemudian dipasangkan ke kolom dengan konvensional atau dengan mesin untuk daerah kolom yang lebih besar dan luas.



Gambar 2.3. Pemasangan *CFRP* pada daerah paling berbahaya yang sudah diolesi resin atau perekat (*epoxy*)

Agar bahan tersebut terikat dengan erat antara *FRP* tersebut dengan permukaan beton maka dipakai *epoxy*. *Epoxy* merupakan bahan perekat yang sangat kuat. Untuk jenis perekat ini ada dua macam dalam pemasangannya, yaitu:

- ‘*Dry system*’ (*FRP* tidak perlu dijenuhkan dulu dengan *epoxy*).
- ‘*Wet system*’ (*FRP* harus dijenuhkan dulu dengan *Epoxy* mesin saturator)

Untuk menentukan sistim mana yang akan digunakan, tergantung dari banyaknya fiber per m^2 . Pada umumnya *FRP* dengan banyaknya fiber kurang dari $300 \text{ gr}/m^2$ menggunakan ‘*dry sistem*’ dan sebaliknya menggunakan ‘*wet sistem*’.



Gambar 2.4. Mesin alat pemasang *CFRP* kolom bulat

2.1.8 Perumusan CFRP

Perumusan Tegangan – Regangan CFRP pada kolom

Bagian struktur beton akan mengalami reduksi saat memikul beban aksial yang besar, karena regangan pada beton mencapai batas ultimate 0,003. Untuk menghindari terjadinya deformasi lateral yang dapat mengakibatkan reduksi pada beton maka digunakan CFRP sebagai bahan yang dapat menahan gaya regangan tersebut. Selain mampu menambah kekuatan menahan gaya regangan pada kolom beton, bahan ini juga mampu melakukan ikatan terhadap kolom beton tersebut, sehingga akan membuat kolom beton dan CFRP akan menjadi linier dan bertambah kaku.

Pada area beton yang terlindungi oleh CFRP dapat bertambah kekuatan tekannya terhadap beban yang akan dipikul. Rumus yang digunakan dalam perhitungan kekuatan CFRP adalah menurut Mander, Priestley dan Park (1998) adalah sebagai berikut :

$$f_{cc'} = f'_c [1 + k_e (k_e - 1)] \dots\dots\dots (2.1)$$

Dimana k_e adalah rasio area efektif yang terlindung (persamaan 2.2), sedang k_c adalah faktor penambahan kekuatan beton (persamaan 2.3)

$$k_e = \frac{[bh - (4r^2 - \pi r^2)] - 1/3(b - 2r^2) - 1/3(h - 2r)^2}{bh - (4r^2 - \pi r^2)} \dots\dots(2.2)$$

$$k_c = \alpha_1 \alpha_2 \dots\dots\dots (2.3)$$

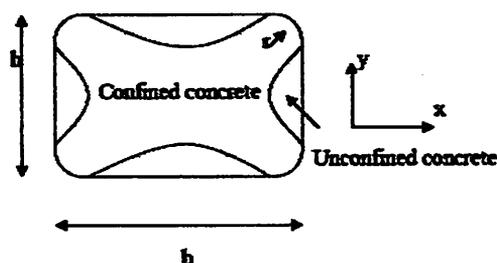
Dimana b dan h dimensi sisi luar potongan melintang kolom; r adalah radius pada keliling sudut; α_1 adalah faktor penambah kekuatan beton terhadap tegangan triaxial pada batas-batas tegangan (lihat persamaan 2.4); dan α_2 adalah faktor reduksi terhadap penjumlahan untuk beberapa deviasi (persamaan 2.5);

$$\alpha_1 = 1,25 \left\{ \left(1,8 \sqrt{1 + 7,94 \frac{F_t}{f'_c}} - 1,6 \frac{F_t}{f'_c} - 1 \right) \right\} \dots\dots\dots (2.4)$$

$$\alpha_2 = \left[1,4 \frac{f_l}{F_l} - 0,6 \left(\frac{f_l}{F_l} \right)^2 - 0,8 \right] \sqrt{\frac{F_l}{f'_c} + 1} \dots\dots\dots (2.5)$$

Dimana F_l dan f_l adalah maksimum dan minimum yang mengikat tegangan lateral.

Penahan tegangan lateral pada jaket CFRP f_{lj} dapat dihitung pada sumbu x dan y pada potongan melintang (perhatikan gambar 2.5).



Gambar 2.5. Panjang dan lebar confinement tertekan sedangkan sudut confinement tertarik.

$$f_{l,jx} = 2 \frac{t_j}{h} f_j \dots\dots\dots (2.6a)$$

$$f_{l,jy} = 2 \frac{t_j}{b} f_j \dots\dots\dots (2.6b)$$

Dimana t_j adalah ketebalan pada jaket FRP dan f_j adalah tegangan pada sisi dalam jaket FRP, yang dapat didefinisikan sebagai berikut :

$$f_j = E_j \varepsilon_t \quad \dots\dots\dots(2.7)$$

$$\rho_j = \frac{4t_j}{D} \quad \dots\dots\dots(2.7a)$$

Penambahan Kekuatan tekan kolom akibat kekangan CFRP

$$f'_{cc} = f'_{c0} \left\{ \left(2,254 \sqrt{1 + 7,94 \frac{F_t}{f'_{c0}}} \right) - 2 \frac{F_t}{f'_c} - 1,254 \right\} \dots\dots\dots(2.8)$$

Regangan Beton terkekang CFRP

$$\varepsilon_{ccj} = \frac{1,71 \cdot (5f'_{cc} - 4f'_c)}{E_c} \quad \dots\dots\dots(2.9)$$

Regangan ultimit beton terkekang CFRP

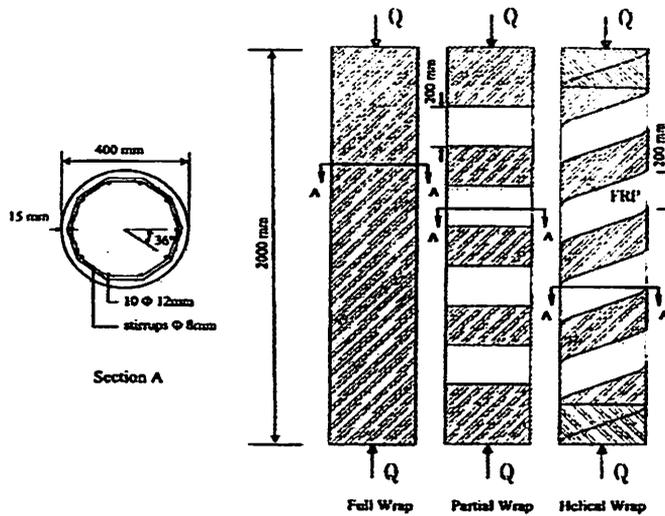
$$\varepsilon_{cu j} = 0,004 + \frac{2,8 \cdot \rho_j \cdot \emptyset_j \cdot f_{ju} \cdot \varepsilon_{uj}}{f'_{cc}} \quad \dots\dots\dots(2.10)$$

Dimana ε_t adalah regangan pada potongan melintang pada *FRP*. Untuk mencari nilai dari F_t sama halnya dengan mencari nilai dari f_l yang merupakan tegangan lateralnya.

2.2 Penelitian Terdahulu Tentang *CFRP*

Penelitian terdahulu tentang *Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP)* yang telah dilakukan adalah :

- a. Matthys dkk. 2005, Penelitian yang mereka lakukan membahas tentang peningkatan kuat tekan beton (f'_{cc}) setelah dibungkus *CFRP* dengan tiga tipe cara membungkus kolom yang dipakai seperti terlihat pada Gambar 2.6 yaitu : membungkus penuh (*full wrap*), membungkus sebagian (*partial wrap*), dan membungkus melilit (*helical wrap*).



Gambar 2.6. Dimensi kolom dan bentuk pembungkus

Penelitian tersebut mendapatkan hasil yaitu kolom beton yang dibungkus penuh dengan *CFRP* dapat meningkatkan kuat tekan beton kolom (f_{cc}) hingga mencapai 50 %, sedangkan kolom yang dibungkus sebagian dan melilit hanya meningkatkan kuat tekan beton kolom (f_{cc}) sekitar 20 %.

Hasil penelitian oleh Matthys dkk. (2001) dapat dilihat pada Tabel 2.9 dan Tabel 2.10 berikut ini :

Tabel 2.9. Parameter pengujian kolom

Specimen	Column diameter, mm	Concrete		Fiber-reinforced polymer confinement					
		Age at test, days	f'_c (28 days), N/mm ² *	Fiber-reinforced polymer type	No. of layers	Width, mm	Clear spacing, mm	Pitch, mm	Wrapping
K1	Ø400	29	31.8	—	—	—	—	—	—
K2	Ø400	28	34.3	C240 (CFRP)	5	300	0	0	Full
K3	Ø400	29	34.3	C640 (CFRP)	4	300	0	0	Full
K4	Ø400	29	39.3	TU600/25 (GFRP)	6	200	0	0	Full
K5	Ø400	32	39.3	TU600/25 (GFRP)	2	200	0	0	Full
K6	Ø400	28	35.8	TU600/25 (GFRP)	4	200	200	0	Partial
K7	Ø400	28	35.8	TU600/25 (GFRP)	4	200	200	400	Partial
K8	Ø400	32	39.1	TU360G160C/27G (HFRP)	4	50	0	0	Full

*N/mm² = MPa

**Tabel 2.10. Hasil Pengujian Kuat Tekan Kolom setelah dibungkus
CFRP**

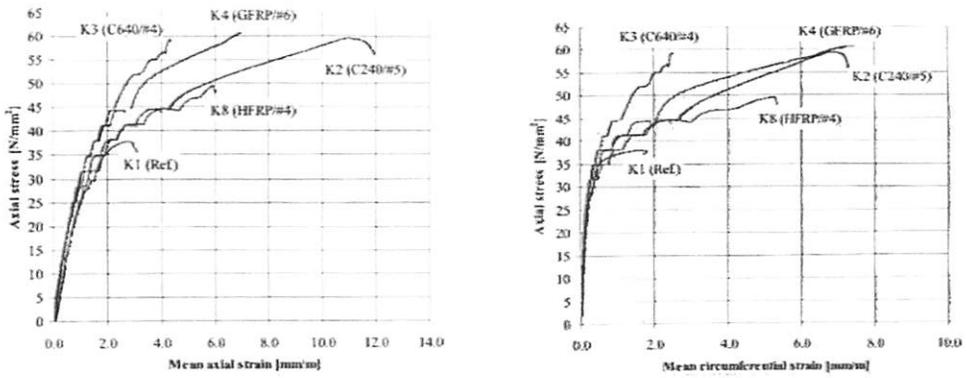
Specimen	Q_{max} , kN	Q_{max}/A , N/mm ²	(Q/Q_y)	ϵ_{c1} , mm/m	ϵ_{c2} , mm/m	ϵ_{c1} , mm/m	ϵ_{c2} , mm/m	$\epsilon_{cf}/\epsilon_{fu}$
K1 (Ø/Ref.)	4685	32	1.00	2.8	3.1*	1.7	1.8*	—
K2 (Ø/C24/#5/full)	7460	55.3	1.70	11.1	(12.0) [†]	6.9	(7.3) [†]	(0.61) [†]
K3 (Ø/C640/#4/full)	7490	54.5	1.70	4.3	4.3	2.5	2.5	1.14
K4 (Ø/G/#6/full)	7580	55.3	1.73	6.9	6.9	7.5	7.5	0.58
K5 (Ø/G/#2/full)	5325	37.2	1.16	3.8	3.8	6.8	8.0	0.62
K6 (Ø/G/#4/partial-circ.)	5000	34.6	1.08	2.8	3.3	1.6	3.3	0.25
K7 (Ø/G/#4/partial-helic.)	4810	33.2	1.04	2.2	2.2	3.1	3.3	0.25
K8 (Ø/H/#4/full)	6230	44.4	1.39	5.9	6.0	5.3	5.3	0.55

*Test stopped at axial strain of approximately 3.1 mm/m
[†]Problems with load control unit of actuator in postpeak region
 Notes: Q_{max} = maximum load, Q = point load, A = gross column section, A_c = total area of longitudinal steel, ϵ_{c1} = axial concrete strain at maximum load, ϵ_{c2} = ultimate concrete strain at extreme compression fiber, ϵ_{c1} = circumferential concrete strain at maximum load, ϵ_{c2} = circumferential ultimate concrete strain, and ϵ_{fu} = ultimate FRP strain

Keterangan benda uji :

- K1 = Kolom bulat yang tidak dibungkus dengan CFRP**
- K2 = Kolom bulat yang dibungkus penuh CFRP type C240 dengan 5 lapisan**
- K3 = Kolom bulat yang dibungkus penuh dengan CFRP type C640 dengan 4 lapisan**
- K4 = Kolom bulat yang dibungkus penuh dengan Glass FRP dengan 6 lapisan**
- K5 = Kolom bulat yang dibungkus penuh dengan Glass FRP dengan 2 lapisan**
- K6 = Kolom bulat yang dibungkus sebagian dengan Glass FRP dengan 4 lapisan**
- K7 = Kolom bulat yang dibungkus penuh dengan Glass FRP dengan 4 lapisan**
- K8 = Kolom bulat yang dibungkus melilit dengan Hybrid FRP dengan 4 lapisan**

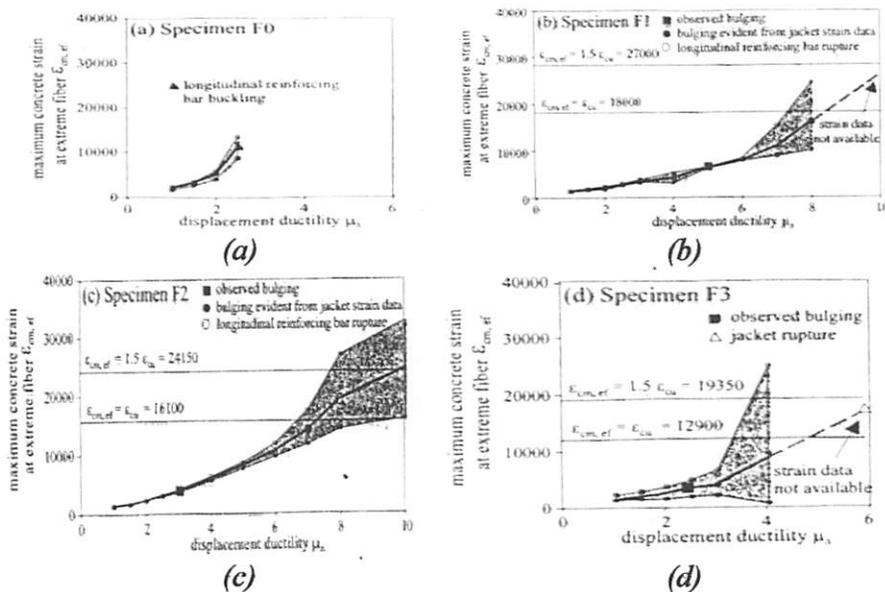
Dari hasil pengujian kuat tekan kolom setelah dibungkus CFRP pada Tabel 2.10 dapat digambarkan hubungan tegangan dan regangan kolom beton seperti pada Grafik 2.1 di bawah ini :



Grafik 2.1. Hubungan Tegangan-Regangan hasil pengujian kuat tekan kolom setelah dibungkus *CFRP*

b. Sause dkk. 2004, Penelitian yang mereka lakukan membahas tentang peningkatan daktilitas kurvatur (μ_ϕ) dan daktilitas deformasi (μ_Δ) setelah dibungkus *CFRP* dengan membungkus kolom hanya pada bagian ujung kolom dekat tumpuan, yang dibebani dengan beban aksial tekan dan beban lateral.

Hasil penelitian Sause dkk. dapat dilihat pada Grafik 2.2 (a,b,c dan d) serta tabel 2.11 seperti di bawah ini.



Grafik 2.2. Hubungan Regangan-Daktilitas deformasi

Pada *Grafik 2.2 (a)*, menunjukkan hasil pengujian kolom yang menggunakan tulangan longitudinal tanpa dibungkus dengan *CFRP* yang dibebani dengan beban aksial dan lateral hingga tulangan longitudinal mengalami tekuk. Pada *Grafik 2.2 (b dan c)*, menunjukkan bahwa setelah kolom dibungkus *CFRP* pada bagian ujung kolom dekat tumpuan dan dibebani dengan beban aksial dan lateral secara bersama-sama hingga tulangan longitudinal mencapai leleh, terlihat bahwa terjadi peningkatan daktilitas kurvatur (μ_ϕ) dan daktilitas deformasi (μ_Δ) mencapai 200 % bila dibandingkan dengan hasil pengujian kolom pada *Grafik 2.2 (a)*. Pada *Grafik 2.2 (d)* menunjukkan bahwa setelah kolom dibungkus *CFRP* pada bagian ujung kolom dekat tumpuan dan dibebani dengan beban aksial dan lateral secara bersama-sama hingga *CFRP* mengalami kerusakan, terlihat terjadi peningkatan daktilitas kurvatur (μ_ϕ) dan daktilitas deformasi (μ_Δ) mencapai 75 % bila dibandingkan dengan hasil pengujian kolom pada *Grafik 2.2 (a)*.

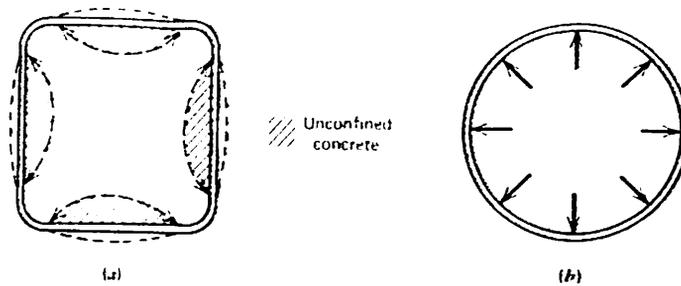
Tabel 2.11. Hasil Pengujian Kuat Lentur Kolom setelah dibungkus CFRP

Specimen Half cycle	F0		F1		F2		F3	
	N	S	N	S	N	S	N	S
Initial flexural cracking - predicted cracking moment = 114 kNm								
Interface cracking, ^a kNm	152		239		206		163	
Initial crack, ^b kNm	175	279	178	171	178	178	184	229
Location ^c of crack, mm	163	202	248	229	215	246	229	216
First cycle at yield, f_y								
Applied lateral load, kN	181	-178	185	167	169	-171	185	-151
Lateral displacement, mm	22	23	23	22	23	23	25	25
Curvature, 10 ⁻⁶ /mm	10.1	9.9	7.2	8.9	7.7	7.5	10.1	8.9
Predicted yield curvature	17 · 10 ⁻⁶ /mm							
Maximum lateral load								
Displacement ductility	2	1.5	7	5	6	3	5	3
Applied lateral load, kN	229	197	238	215	217	229	228	201
Lateral displacement, mm	51	40	172	113	139	67	125	76
Curvature, 10 ⁻⁶ /mm	28.6	25.2	87.3	62.3	91.7	27.9	Not available	45.3
Third cycle at maximum sustainable lateral load								
Displacement ductility	2	8	7	7	7	5	5	5
Applied lateral load, kN	200	-155	226	-200	205	-187	218	-192
Lateral displacement, mm	51	-52	177	-185	164	158	128	-126
Curvature, 10 ⁻⁶ /mm	31.0	-30.0	84.2	-153.3	112.3	-102.4	Not available	Not available
Predicted ultimate curvature, 10 ⁻⁶ /mm	35		104 to 158		81 to 130		59 to 78	
Observations of CFRP jacket behavior								
Maximum transverse strain in CFRP jacket, $\mu\epsilon$	Not applicable		2341	5249	9978	7236	5817	5509
Location ^d of jacket bulging	Not applicable		51 mm at 55 _y		102 mm at 30 _y		127 mm at 2 55 _y	
Location ^d of jacket buckling	Not applicable		None		300 mm at 55 _y		127 mm at 2 55 _y	
Jacket rupture	None		None		1st cycle at 10h _y		2nd cycle at 60 _y	
^a Initial cracking at column-basing interface								
^b Initial transverse crack in column away from column-basing interface								
^c Distances above column-basing interface								

2.3 Metode Pengekangan Beton.

2.3.1. Tulangan Transversal sebagai Pengekang Beton

Pengekangan pada beton dapat berupa tulangan sengkang yang berbentuk persegi dan tulangan spiral yang berbentuk bulat. Sengkang berfungsi untuk memikul gaya geser, mengekang beton agar mengurangi resiko pecahnya beton, mencegah terjadinya tekuk pada tulangan memanjang kolom dan membuat lebih kaku sambungan tulangan memanjang. Sengkang persegi hanya memberikan gaya kekang di daerah sudut-sudut sengkang, sedangkan lilitan sengkang pada penampang bulat memberikan gaya kekang pada semua sisi sengkang. Penampang beton yang diberikan tulangan sengkang (tulangan transversal) dengan detailing yang benar akan meningkatkan kuat tekan dan daktilitas beton. (Park and Paulay 1975).



Gambar 2.7 Kolom terkekang dengan sengkang (a) dan spiral (b)

2.3.2. Carbon Fiber sebagai Pengekang Beton

Perbaikan pengekangan pada kolom beton yang sudah ada dapat dilakukan dengan cara membungkus kolom tersebut dengan *carbon fiber reinforced polymer (CFRP)*. Pembungkusan dapat dilakukan pada bagian ujung-ujung kolom, atau dililitkan dengan jarak tertentu, atau pada seluruh permukaan kolom. Pembungkusan kolom beton dengan *CFRP* adalah berfungsi untuk memikul gaya aksial, lentur, gaya geser, mengekang beton agar mengurangi resiko pecahnya beton dan mencegah terjadinya tekuk pada tulangan memanjang kolom. Penampang kolom beton yang dibungkus *CFRP* akan meningkatkan kekuatan kolom terhadap kuat tekan, lentur, daktilitas kurvatur (μ_{ϕ}) dan daktilitas deformasi (μ_{Δ}). (Saussa dkk. 2004).

2.4 Syarat Pengekangan Beton

Persyaratan-persyaratan pengekangan kolom beton menurut SNI 03-2847-2002 adalah sebagai berikut :

1. Rasio volumetrik sengkang atau tulangan spiral ρ_s tidak boleh kurang dari :

$$\rho_s = 0,12 \frac{f'_c}{f_{yh}} \dots\dots\dots (2.7)$$

dimana :

f_{yh} = tegangan leleh tulangan sengkang tidak boleh lebih besar 420 MPa

Nilai ρ_s di atas tidak boleh kurang dari :

$$\rho_s = 0,45 \frac{\left(\frac{A_g}{A_c} - 1\right) f'_c}{f_y} \dots\dots\dots (2.8)$$

2. Total luas tulangan sengkang persegi tidak boleh kurang dari :

$$A_{sh} = 0,3 \left[\frac{s \cdot h_c \cdot f'_c}{f_{yh}} \right] \left[\frac{A_g}{A_{ch}} - 1 \right] \dots\dots\dots (2.9)$$

$$A_{sh} = 0,09 \frac{s \cdot h_c \cdot f'_c}{f_{yh}} \dots\dots\dots (2.10)$$

3. Tulangan sengkang dapat berupa tulangan tunggal atau hoops overlapping. Tulangan transversal dengan ukuran dan spasi sebagai hoops dapat digunakan.

4. Jika kekuatan desain beton cor memenuhi persyaratan kombinasi pembebanan yang ditetapkan termasuk gempa persamaan (2.9) tidak perlu dipakai.

5. Tulangan transversal memiliki spasi (s) tidak kurang dari :

a. Menahan gaya geser :

$$s \leq 16 \times \text{diameter tulangan longitudinal}$$

$$s \leq 48 \times \text{diameter tulangan transversal}$$

$$s \leq \text{dimensi terkecil penampang kolom}$$

b. Menciptakan Daktilitas beton :

$$s \leq \frac{1}{4} \text{ dimensi terkecil penampang kolom}$$

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

c. Mencegah tekuk tulangan longitudinal :

$$s \leq \frac{1}{4} \text{ dimensi terkecil penampang kolom}$$

$$s \leq 6 \times \text{diameter tulangan longitudinal}$$

$$s \leq s_x = 100 + \frac{350 - h_x}{3}$$

d. Melindungi sambungan lewatan tulangan longitudinal :

$$s \leq \frac{1}{4} \text{ dimensi terkecil penampang kolom}$$

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

2.5 Penulangan Kolom dan Persyaratan untuk Kolom

Persyaratan penulangan longitudinal kolom menurut menurut SNI 03-2847-2002 adalah sebagai berikut :

1. Batasan rasio tulangan longitudinal minimum :

$$\rho_{\min} = 1 \% \times A_g \quad \dots\dots\dots(2.11)$$

2. Batasan rasio tulangan longitudinal maksimum :

$$\rho_{\max} = 8 \% \times A_g \quad \dots\dots\dots (2.12)$$

3. Mempunyai gaya tekan aksial :

$$P > 0,10. A_g. f'_c \dots\dots\dots (2.13)$$

4. Jumlah minimum batang tulangan longitudinal pada komponen struktur tekan adalah 4 untuk batang tulangan di dalam sengkang ikat persegi, 3 untuk batang tulangan di dalam sengkang ikat segitiga dan 6 untuk batang tulangan yang dikelilingi oleh sengkang.
5. Dimensi penampang terpendek, diukur pada satu garis lurus yang melalui titik berat penampang, tidak boleh kurang dari 300 mm.
6. Rasio dimensi penampang terpendek terhadap dimensi yang tegak lurus padanya tidak boleh kurang dari 0,4.
7. Panjang efektif dari komponen struktur tekan :
 - Untuk komponen struktur tekan yang ditahan terhadap goyangan kesamping, faktor panjang efektif k harus diambil sama dengan 1,0 kecuali bila analisis menunjukkan bahwa suatu nilai yang lebih kecil boleh digunakan.
 - Untuk komponen struktur tekan yang tidak ditahan terhadap goyangan kesamping, faktor panjang efektif k harus ditentukan dengan mempertimbangkan pengaruh dari keretakan dan tulangan terhadap kekakuan relatif dan harus lebih besar dari 1,0.
8. Radius girasi (jari-jari inersia) :

Pada komponen struktur tekan persegi, radius girasi (r) penampang kolom, boleh diambil sama dengan 0,3 kali dimensi total dalam arah stabilitas kolom yang ditinjau, dan sama dengan 0,25 kali diameter penampang untuk komponen struktur tekan bulat. Untuk bentuk penampang lainnya, r boleh dihitung dari penampang bruto.

9. Persyaratan kelangsingan kolom :

- Untuk komponen struktur tekan yang ditahan terhadap goyangan kesamping, pengaruh dari kelangsingan boleh diabaikan bila :

$$\frac{k \cdot \lambda_u}{r} \leq 34 - 12 \left(\frac{M_1}{M_2} \right) \dots\dots\dots (2.14)$$

di mana :

k = faktor panjang tekuk

λ_u = tinggi kolom dari pusat lantai

M1 = momen terkecil pada ujung kolom

M2 = momen terbesar pada ujung kolom

- Untuk komponen struktur tekan yang tidak ditahan terhadap goyangan ke samping, pengaruh dari kelangsingan boleh diabaikan bila :

$$\frac{k \cdot \lambda_u}{r} < 22 \dots\dots\dots (2.15)$$

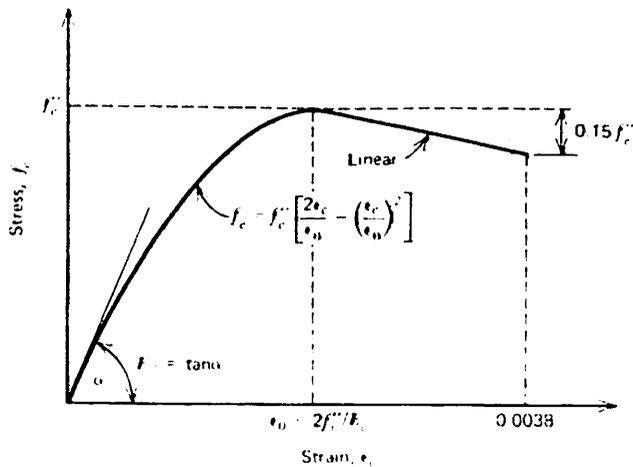
2.6 Kurva Hubungan Tegangan-Regangan Beton

Mengacu pada pustaka hasil penelitian kolom beton terdahulu, terdapat beberapa usulan kurva tegangan-regangan kolom beton tak terkekang dan terkekang, diantaranya adalah usulan Mander, dkk. (1988), Popovics (1928), Park & Paulay (1975) dan Noyan Alacali (1993). Usulan kurva dari peneliti-peneliti tersebut telah dilakukan penggambaran kurva, dan dipilih kurva hubungan tegangan-regangan kolom beton polos yang paling cocok untuk dipakai sebagai hipotesa pada penelitian ini adalah yang diusulkan oleh Hognestad, sedangkan kurva hubungan tegangan-regangan kolom beton terkekang yang cocok sebagai hipotesa untuk

pengekan menggunakan *tulangan sengkang* yang diberi lapisan *CFRP* adalah yang diusulkan oleh Mander, dkk.

2.6.1. Menurut Hognestad (1951)

Hasil penelitian Hognestad mengusulkan kurva tegangan-regangan beton tak dikekang seperti dalam Gambar 2.11 di bawah ini.



Grafik 2.3. Kurva hubungan tegangan-regangan beton tidak terkekang
 Pada kurva tersebut dapat dilihat karakteristik-karakteristik sebagai berikut :

1. Daerah $\epsilon_c \leq \epsilon_0$

$$f_c = f_c'' \left[\frac{2\epsilon_c}{\epsilon_0} - \left(\frac{\epsilon_c}{\epsilon_0} \right)^2 \right] \dots\dots\dots(2.16)$$

$$\epsilon_0 = \frac{2 \times f_c''}{E_c} \dots\dots\dots(2.17)$$

2. Daerah $\epsilon_0 \leq \epsilon_c \leq 0,0038$

$$f_c = f_c'' \left[\frac{2\epsilon_c}{\epsilon_0} - \left(\frac{\epsilon_c}{\epsilon_0} \right)^2 \right] \dots\dots\dots (2.18)$$

di mana :

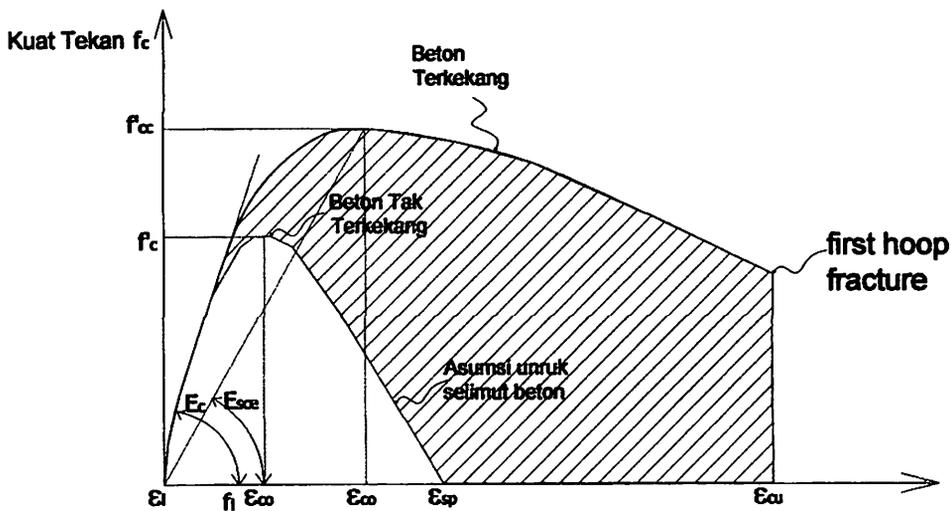
pada saat $\epsilon_c = 0,0038$ tegangan tekan beton puncak turun 15 %.

f'_c = kuat tekan silinder beton.

ϵ_0 = regangan beton pada saat tegangan tekan beton maksimum.

2.6.2. Menurut Mander, Priestley dan Park (1988)

Mander, Priestley dan Park (1988) memberikan gambaran hubungan tegangan-regangan tekan pada beton, kekuatan tekan dan regangan beton akan meningkat akibat adanya pengekangan, seperti terlihat dalam Grafik 2.4 di bawah ini.



Grafik 2.4. Kurva hubungan tegangan-regangan untuk pembebanan monotonik beton tak dikekang dan beton terkekang

Untuk penampang beton terkekang :

$$f'_{lx} = K_e \cdot \rho_x \cdot f_{yh} \dots\dots\dots(2.19)$$

$$f'_{ly} = K_e \cdot \rho_y \cdot f_{yh} \dots\dots\dots(2.20)$$

$$K = 1 + 2,05 \rho_s \left(\frac{f_{yh}}{f_c} \right) \dots\dots\dots(2.21)$$

$$f_c = \frac{f'_{cx} \times x \times r}{r - 1 + x^r} \dots\dots\dots(2.22)$$

$$x = \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{cc}} \dots\dots\dots (2.23)$$

$$r = \frac{E_c}{E_c - E_{sec}} \dots\dots\dots (2.24)$$

$$E_{sec} = \frac{f'_{cc}}{\varepsilon_{cc}} \dots\dots\dots (2.25)$$

Regangan tekan puncak beton terkekang

$$\varepsilon'_{cc} = 0,002 [1 + 5(f'_{cc} / f'_c - 1)] \dots\dots\dots (2.26)$$

Regangan ultimit beton terkekang adalah

$$\varepsilon'_{cu} = 0,004 + 1,4 \cdot \rho_s \cdot f_{yh} \cdot \frac{\varepsilon_{sm}}{f'_{cc}} \dots\dots\dots (2.27)$$

Dimana :

f'_{tx} = tegangan kekang efektif arah x penampang

f'_{ty} = tegangan kekang efektif arah y penampang

ρ_x = rasio luas penampang efektif sengkang terhadap inti beton terkekang arah x

ρ_y = rasio luas penampang efektif sengkang terhadap inti beton terkekang arah y

ρ_s = $\rho_x + \rho_y$

K_e = Koefisien efektifitas pengekangan untuk penampang kolom segiempat, $K_e = 0,75$

K_e = Koefisien efektifitas pengekangan untuk penampang kolom bulat, $K_e = 0,95$

f_{yh} = tegangan leleh tulangan transversal

f'_{cc} = kuat tekan beton terkekang penampang bulat/segiempat

f'_c = kuat tekan karakteristik beton

ε'_{cc} = regangan tekan beton pada saat tegangan maksimum

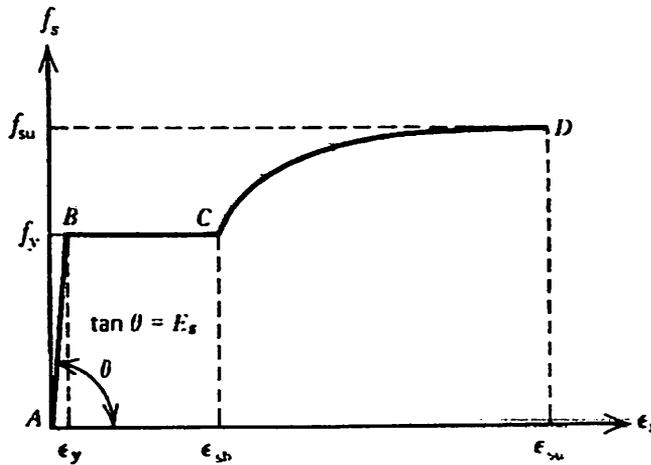
ε'_{cu} = regangan tekan beton ultimit

ϵ_{sh} = regangan baja pada saat pengerasan baja (*strain hardening*)

ϵ_{sm} = regangan baja tulangan pada tegangan tarik maksimum

2.7 Diagram Tegangan-Regangan Baja Tulangan

Park and Paulay 1975, memberikan bentuk diagram hubungan tegangan dan regangan baja tulangan pada saat menerima gaya tarik atau gaya tekan seperti terlihat dalam Grafik 2.5 di bawah ini :



Grafik 2.5. Kurva hubungan tegangan-regangan baja tulangan

Pada kurva tersebut dapat dilihat karakteristik-karakteristik sebagai berikut :

Daerah AB : $\epsilon_s \leq \epsilon_y$

$$f_s = \epsilon_s E_s \dots \dots \dots (2.28)$$

Daerah BC : $\epsilon_y \leq \epsilon_s \leq \epsilon_{sh}$

$$f_s = f_y \dots \dots \dots (2.29)$$

Daerah CD : $\epsilon_{sh} \leq \epsilon_s \leq \epsilon_{sm}$

$$f_s = f_y \left[\frac{m(\epsilon_s - \epsilon_{sh}) + 2}{60(\epsilon_s - \epsilon_{sh}) + 2} + \frac{(\epsilon_s - \epsilon_{sh})(60 - m)}{2(30.r + 1)^2} \right] \dots \dots \dots (2.30)$$

$$m = \frac{\left(\frac{f_{su}}{f_y}\right)(30r+1)^2 - 60r - 1}{15r^2} \dots\dots\dots (2.31)$$

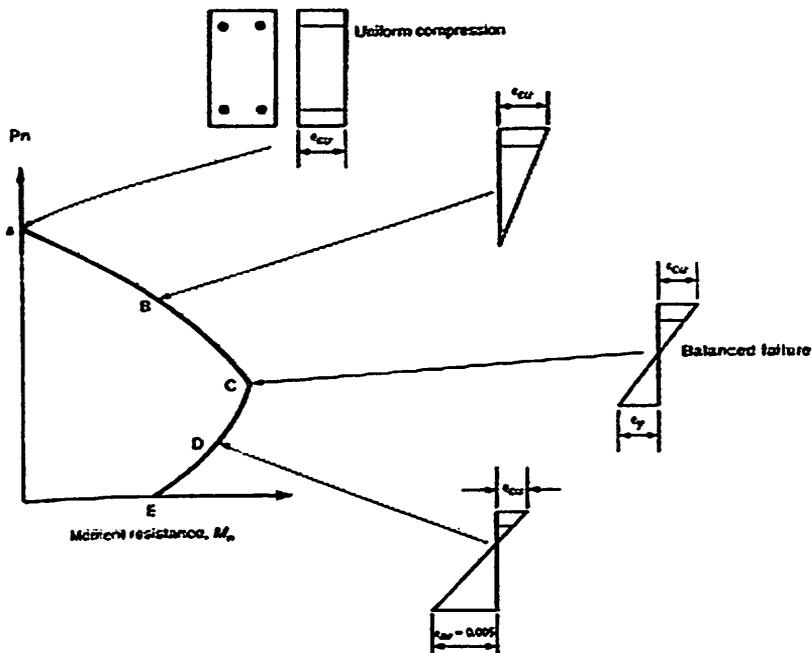
di mana :

$$r = \epsilon_{su} - \epsilon_{sh} \dots\dots\dots (2.32)$$

2.8 Diagram Interaksi Kolom

2.8.1 Pengertian Diagram Interaksi

Diagram Interaksi adalah Diagram yang menunjukkan hubungan momen lentur dan gaya aksial tekan yang dapat dipikul elemen tekan pada kondisi batas.



Gambar 2.8. Diagram Interaksi kolom

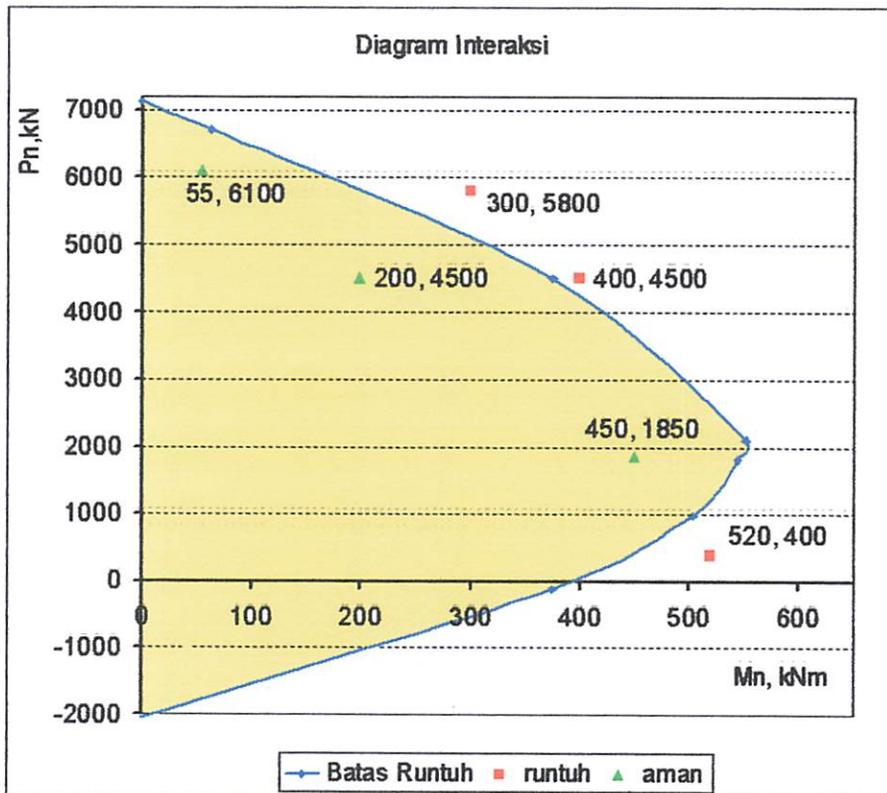
- Setiap titik pada kurva diagram interaksi menunjukkan satu kombinasi/pasangan M_n dan P_n pada kondisi batas yang dapat dipikul penampang.

- Titik-titik pasangan M dan P yang terletak di dalam area kurva merupakan pasangan M dan P yang sanggup dipikul penampang (daerah aman).
- Titik-titik pasangan M dan P yang terletak di luar area kurva merupakan pasangan M dan P yang tidak dapat dipikul penampang (daerah runtuh).

2.8.2 Kegunaan diagram inetraksi

Dari diagram interkasi, dapat diketahui :

- Batas aman pasangan momen dan gaya tekan aksial suatu kolom.
- Sebagai contoh, suatu kolom mempunyai diagram interaksi seperti Gambar 2.10.



Gambar 2.9. Batas Aman pada Diagram Interaksi

Daerah berwarna kuning pada Gambar 2.9 yang berada di dalam diagram merupakan lokasi titik-titik dengan koordinat M_n , P_n yang aman. Artinya jika nilai pasangan momen dan gaya aksial yang bekerja pada kolom mempunyai koordinat yang berada di dalam daerah aman tersebut, maka kolom tidak akan runtuh, dan sebaliknya jika berada di luar daerah tersebut, maka kolom akan runtuh.

Dari gambar tersebut, titik-titik berwarna hijau dengan

- $M_n = 55 \text{ kNm}$, $P_n = 6100 \text{ kN}$
- $M_n = 200 \text{ kNm}$, $P_n = 4500 \text{ kN}$
- $M_n = 450 \text{ kNm}$, $P_n = 1850 \text{ kN}$

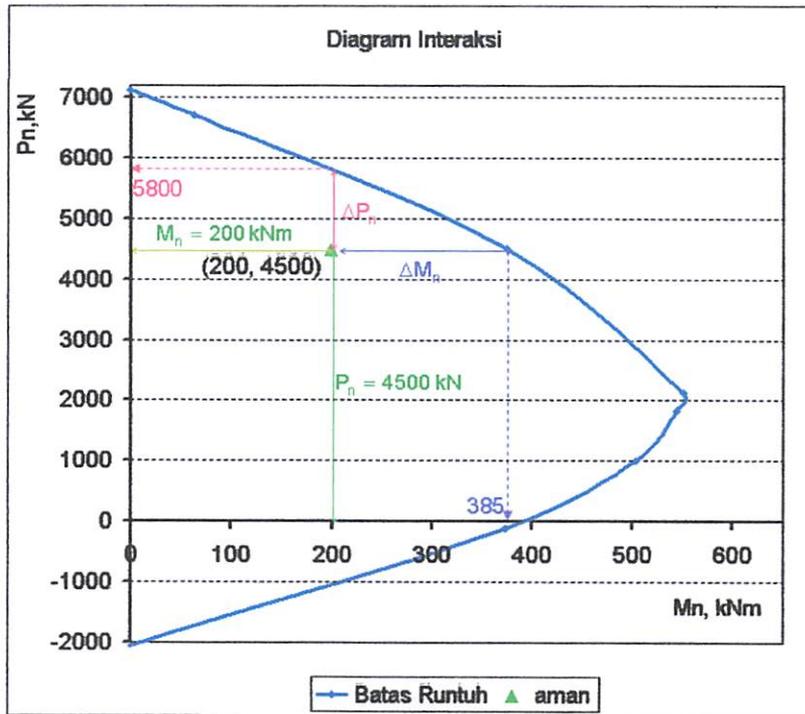
merupakan titik-titik pasangan nilai momen dan gaya aksial yang aman bekerja pada kolom tersebut.

Sedangkan titik-titik berwarna merah dengan

- $M_n = 300 \text{ kNm}$, $P_n = 5800 \text{ kN}$
- $M_n = 400 \text{ kNm}$, $P_n = 4500 \text{ kN}$
- $M_n = 520 \text{ kNm}$, $P_n = 400 \text{ kN}$

merupakan titik-titik pasangan nilai momen dan gaya aksial yang tidak sanggup dipikul kolom, sehingga kolom akan runtuh jika diberi momen dan gaya normal dengan pasangan seperti itu.

- Pertambahan momen yang masih dapat dipikul penampang untuk suatu gaya tekan aksial tertentu, sebaliknya dapat ditentukan gaya aksial tekan yang masih dapat dipikul penampang untuk suatu momen tertentu.



Gambar 2.10. Pertambahan Momen atau Gaya Aksial

Artinya suatu kolom dengan bentuk diagram interaksi seperti Gambar 2.10 dan hanya diberi beban $M_n = 200$ kNm dan $P_n = 4500$ kN, masih mampu menerima beban tambahan sebesar :

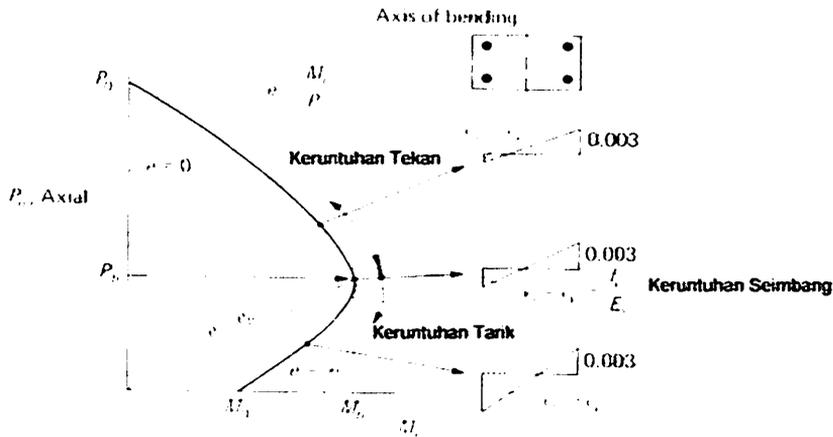
- $P_n = 6300 - 4500 = 1800$ kN, jika momen yang diberikan tetap sebesar $M_n = 200$ kNm, atau
- $M_n = 385 - 200 = 185$ kNm, jika gaya aksial yang diberikan tetap sebesar $P_n = 4500$ kN.

2.8.3 Tipe batas keruntuhan pada diagram interaksi

Batas keruntuhan yang tergambar pada diagram interaksi, terdiri dari :

1. Keruntuhan Tekan
2. Keruntuhan Seimbang.
3. Keruntuhan Tarik

Type keruntuhan ini tergantung dari besarnya regangan pada daerah tarik yang terjadi (ϵ_s) dibandingkan dengan regangan leleh baja (ϵ_y).



Gambar 2.11. Tipe Keruntuhan pada Diagram Interaksi

Batas Keruntuhan Tekan

Jika regangan pada daerah tarik penampang (ϵ_s) lebih kecil dari regangan leleh baja (ϵ_y), $\epsilon_s < \epsilon_y$; maka jika terjadi keruntuhan pada penampang. Keruntuhan yang akan terjadi adalah keruntuhan tekan (overreinforced), yakni beton runtuh terlebih dahulu sebelum baja tarik leleh.

Diagram interaksi yang terletak antara titik A dan C (gambar 2.8) merupakan daerah keruntuhan tekan. Sehingga jika pasangan momen dan gaya aksial yang bekerja pada kolom terletak antara titik A dan C pada diagram interaksi pada Gambar 2.9 di atas, maka keruntuhan yang akan terjadi pada kolom merupakan keruntuhan tekan.

Dengan kata lain titik-titik yang terletak antara A dan C merupakan batas keruntuhan tekan.

Ada 2 pendekatan dalam penentuan batas keruntuhan tekan :

- Untuk nilai e tertentu, dimana $e < e_b$, yang dicari \bar{P}_n penampang.
- Untuk nilai P_n tertentu, dimana $P_n > P_{nb}$, dicari nilai e atau M_n penampang.

Keruntuhan Seimbang

Pada keruntuhan seimbang, beton yang tertekan runtuh bersamaan dengan tulangan tarik mencapai tegangan lelehnya.

Jadi pada kondisi seimbang ini :

- Regangan beton maks, $\varepsilon_{cu} = 0,003$.
- Regangan tulangan tarik : $\varepsilon_s = \varepsilon_y$, dan tegangannya $f_s = f_y$.

Sedangkan tegangan tulangan tekan tergantung dari regangannya. Jika regangan yang terjadi pada tulangan tekan melebihi regangan lelehnya ($\varepsilon_y = f_y / E_s$, $E_s =$ modulus elastisitas baja = 2×10^5 MPa), maka tulangan tekan sudah mencapai lelehnya, sehingga tegangan tulangan tekan $f'_s = f_y$.

Batas Keruntuhan Tarik

Keruntuhan tarik adalah sebaliknya dari keruntuhan tekan. Pada keruntuhan tarik, $\varepsilon_s > \varepsilon_y$

Daerah C- E pada diagram interaksi kolom merupakan daerah keruntuhan tarik.

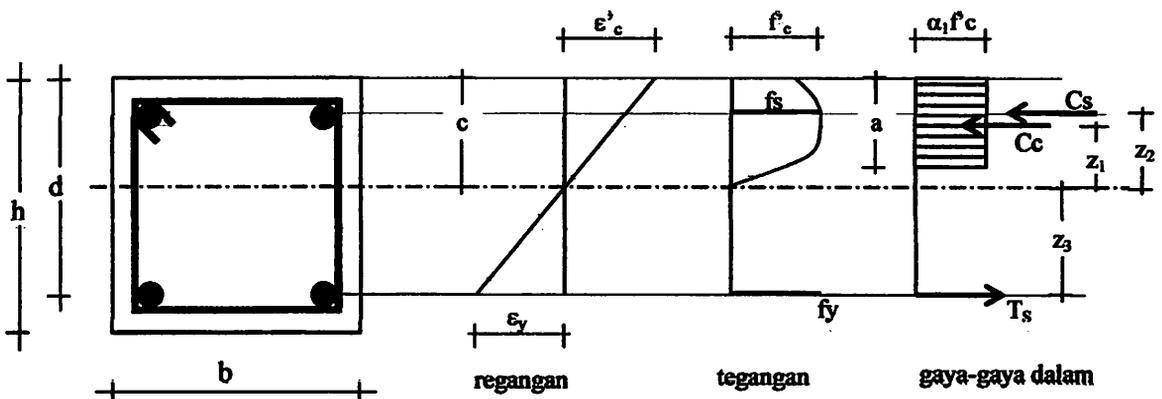
Ada dua pendekatan dalam penentuan batas keruntuhan tarik :

- Untuk nilai e tertentu, dimana $e > e_b$, yang dicari P_n penampang.
- Untuk nilai P_n tertentu, dimana $P_n < P_{nb}$, dicari nilai e atau M_n penampang.

2.9 Analisa Kekuatan Kolom

2.9.1 Kolom Persegi tanpa menggunakan CFRP

Perhitungan perencanaan kolom tanpa menggunakan $\bar{C}\bar{F}\bar{R}\bar{P}$ seperti terlihat pada Gambar 2.18 adalah menjelaskan perhitungan kolom mula-mula yang mana penampang kolom belum dibungkus dengan $\bar{C}\bar{F}\bar{R}\bar{P}$ sehingga pada diagram gaya-gaya dalam terlihat bahwa kekuatan kolom hanya disumbangkan oleh tulangan tarik (\bar{T}_s), tulangan Tekan (\bar{C}_s) dan daerah blok tegangan tekan (C_c). (Salmon and Wang 1984).



Gambar 2.12. Diagram regangan dan tegangan serta gaya-gaya dalam kolom sebelum dibungkus CFRP

Tinggi garis netral dari serat tekan terluar (c) :

$$c = \frac{d \cdot \varepsilon'_c}{(\varepsilon'_c + \varepsilon_y)} \quad \dots\dots\dots (2.33)$$

Tinggi blok tegangan (a) :

$$a = \beta_1 \cdot c \quad \dots\dots\dots (2.34)$$

di mana :

$$\beta_1 = 0,85 \text{ jika } f'_c \leq 30 \text{ Mpa, dan}$$

$$\beta_1 = \{0,85 - [(f'_c - 30) \cdot 0,008]\}, \text{ jika } f'_c > 30 \text{ Mpa}$$

Gaya tekan beton (C_c):

$$\check{C}_c = \alpha \cdot f'_c \cdot b \cdot a \quad \dots\dots\dots (2.35)$$

Gaya Tekan baja tulangan (C_{s1}) :

$$C_s = A'_s (f_y - 0,85 \cdot f'_c) \quad \dots\dots\dots (2.36)$$

Gaya tarik baja tulangan (\bar{T}_s) :

$$T_s = A_s \cdot f_y \quad \dots\dots\dots (2.37)$$

Gaya tekan seimbang P_b :

$$\bar{P}_b = \check{C}_c + \check{C}_{s1} - \bar{T}_s \leq \phi \cdot \bar{P}_{n(maks)} \quad \dots\dots\dots (2.38)$$

Kuat Momen M_n :

$$M_n = \check{C}_c \cdot z_1 + \check{C}_s \cdot z_2 + \bar{T}_s \cdot z_3 \quad \dots\dots\dots (2.39)$$

di mana :

$$z_1 = c - \frac{a}{2} \quad \dots\dots\dots (2.40a)$$

$$z_2 = c - d' \quad \dots\dots\dots (2.40b)$$

$$z_3 = d - c \quad \dots\dots\dots (2.40c)$$

A_s = luas tulangan longitudinal pada daerah tarik

A'_s = Luas tulangan longitudinal pada daerah tekan

Syarat kuat beban aksial untuk kolom dengan tulangan sengkang adalah :

$$\phi \cdot P_{n(maks)} = 0,80 \cdot \phi \cdot \{0,85 \cdot f'_c \cdot (A_g - A_{st}) + f_y \cdot A_{st}\} \quad \dots\dots\dots (2.41)$$

di mana:

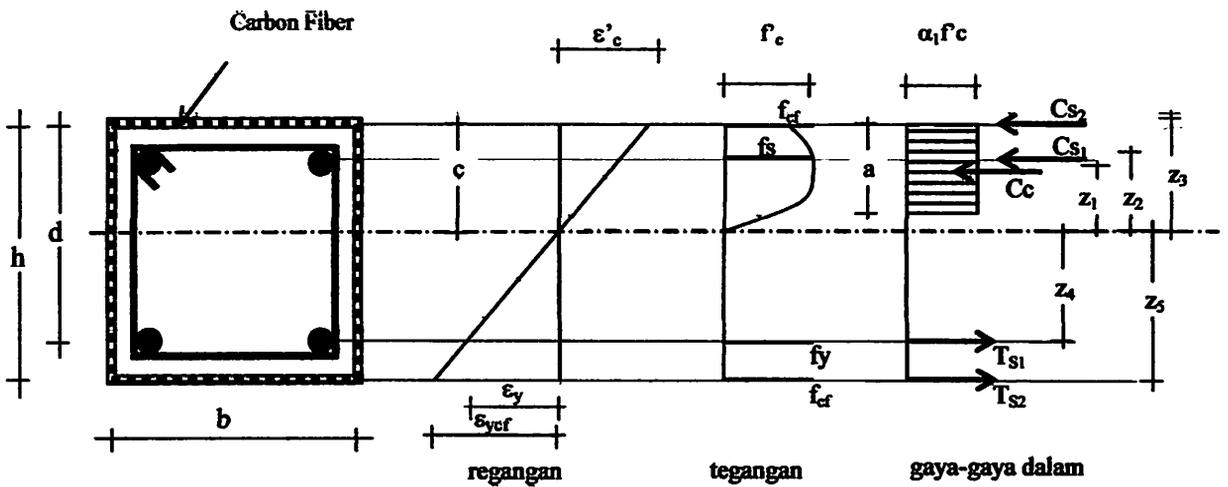
ϕ = faktor reduksi kekuatan ($\phi = 0,65$ untuk tulangan sengkang)

A_g = Luas bruto penampang melintang kolom

A_{st} = luas total tulangan longitudinal

2.9.2 Kolom Persegi dengan menggunakan \bar{CFRP}

Perhitungan perencanaan kolom dengan menggunakan $CFRP$ seperti terlihat pada Gambar 2.19, yang mana penampang kolom sudah di bungkus dengan $CFRP$ sehingga pada diagram gaya-gaya dalam terlihat bahwa selain kekuatan kolom yang disumbangkan oleh tulangan tarik (\bar{T}_s), tulangan Tekan (C_s) dan daerah blok tegangan tekan (C_c) juga disumbangkan oleh \bar{CFRP} berupa tambahan gaya tarik (\bar{T}_{S2}) dan gaya tekan (C_{S2}) yang akan meningkatkan kinerja dari kolom beton tersebut. (Salmon dan Wang 1984, Saussa dkk. 2004).



Gambar 2.13. Diagram regangan dan tegangan serta gaya-gaya dalam kolom setelah dibungkus $CFRP$

Tinggi garis netral dari serat tekan terluar (c) :

$$c = \frac{h \cdot \varepsilon'_c}{(\varepsilon'_c + \varepsilon_{ycf})} \dots\dots\dots (2.42)$$

Tinggi blok tegangan (a) :

$$a = \beta_1 \cdot c \dots\dots\dots (2.43)$$

di mana :

$$\beta l = 0,85 \text{ jika } f'c \leq 30 \text{ Mpa, dan}$$

$$\beta l = \{0,85 - [(f'c-30) \cdot 0,008]\}, \text{ jika } f'c > 30 \text{ Mpa}$$

Gaya tekan beton (C_c):

$$C_c = \alpha \cdot f'_c \cdot b \cdot a \quad \dots\dots\dots (2.44)$$

Gaya Tekan baja tulangan (C_{s1}) :

$$C_{s1} = A'_s (f_y - 0,85 \cdot f'_c) \quad \dots\dots\dots (2.45)$$

Gaya Tekan Carbon Fiber (C_{s2}) :

$$C_{s2} = A_{sf} (f_{cf}) \quad \dots\dots\dots (2.46)$$

Gaya tarik baja tulangan (T_{s1}) :

$$T_{s1} = A_s \cdot f_y \quad \dots\dots\dots (2.47)$$

Gaya tarik Carbon Fiber (T_{s2}) :

$$T_{s2} = A_{sf} \cdot f_{cf} \quad \dots\dots\dots (2.48)$$

Gaya tekan seimbang P_b :

$$P_b = C_c + C_{s1} + C_{s2} - T_{s1} - T_{s2} \leq \phi \cdot P_{n(\text{maks})} \quad \dots\dots\dots (2.49)$$

Kuat Momen M_n :

$$M_n = C_c \cdot z_1 + C_{s1} \cdot z_2 + C_{s2} \cdot z_3 + T_{s1} \cdot z_4 + T_{s2} \cdot z_5 \quad \dots\dots\dots (2.50)$$

di mana :

$$z_1 = c - \frac{a}{2} \quad \dots\dots\dots (2.51a)$$

$$z_2 = c - d' \quad \dots\dots\dots (2.51b)$$

$$z_3 = c \quad \dots\dots\dots (2.51c)$$

$$z_4 = d - c \quad \dots\dots\dots (2.51d)$$

$$z_s = h - c \quad \dots\dots\dots (2.51e)$$

A_s = luas tulangan longitudinal pada daerah tarik

$A's$ = Luas tulangan longitudinal pada daerah tekan

Syarat kuat beban aksial untuk kolom dengan tulangan sengkang adalah :

$$\phi \cdot P_{n(max)} = 0,80 \cdot \phi \cdot \{ 0,85 \cdot f'_c \cdot (A_g - A_{st}) + f_y \cdot A_{st} \} \quad \dots\dots\dots (2.52)$$

di mana:

ϕ = faktor reduksi kekuatan ($\phi = 0,65$ untuk tulangan sengkang)

A_g = Luas bruto penampang melintang kolom

A_{st} = luas total tulangan longitudinal.

BAB III

METODE PENELITIAN

3.1. Studi Pustaka

Studi pustaka dilakukan dengan mendalami materi yang relevan dengan penelitian ini. Kepustakaan ini meliputi berbagai buku teks, jurnal, peraturan dan Standar Nasional Indonesia maupun standar Internasional.

3.2. Analisis Preliminary Penelitian

Penelitian dan pengujian dilakukan di Laboratorium Struktur dan Jalan Raya Institut Teknologi Nasional (ITN) Malang dan Laboratorium Beton Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS) Surabaya mulai dari pengujian bahan dasar sampai pada pelaksanaan pengecoran, pembuatan benda uji, perawatan dan pengujian benda uji.

Pemilihan spesimen didasarkan pada kondisi dan kapasitas alat pengujian kolom yaitu *Universal Testing Machine (UTM)* yang ada di Laboratorium Beton jurusan Teknik Sipil, ITS Surabaya. Sesuai dengan kondisi alat tersebut, diperoleh tinggi maksimum specimen yang dapat diletakkan pada alat *UTM* adalah 100 cm, sehingga tinggi spesimen yang dibuat pada penelitian ini adalah 50 cm. Kapasitas beban maksimum alat *Universal Testing Machine (UTM)* adalah 200 ton.

3.3. Parameter Penelitian

Parameter-parameter perencanaan yang dipakai dalam penelitian ini adalah sebagai berikut :

- a. Kolom dengan penampang berbentuk persegi dengan ukuran penampang 150 x 150 mm dan tinggi $h = 500$ mm
- b. Selimut beton kolom = 20 mm.
- c. Kuat tekan beton $f'_c = 22,5$ MPa.
- d. Tegangan leleh baja tulangan polos $f_y = 240$ MPa
- e. *Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP)* tipe SikaWrap Hex-C230 dengan ketebalan 0,13 mm.
- f. Lapisan *CFRP* partial sebanyak 1 (satu) lapis.
- g. Baja tulangan transversal adalah BJTP $\varnothing 6$ mm dan BJTP $\varnothing 10$ mm, sedangkan tulangan Longitudinal adalah BJTP $\varnothing 10$ mm
- h. Rasio tulangan transversal (sempang) sebagai pengekanan beton pada kolom mula-mula (ρ_s).
- i. Rasio tulangan longitudinal sebagai kekuatan tarik dan tekan pada kolom mula-mula (ρ).
- j. Kurva hubungan tegangan dan regangan untuk beton terkekang mutu normal yang digunakan adalah dari Mander, Priestley dan R. Park (1988).

3.4. Model Analisis

Model analisa yang akan dilakukan pada penelitian ini adalah sebagai berikut :

- a. Analisa kinerja kolom secara teoritis sebelum dibungkus *CFRP* terhadap kekuatan tekan, regangan beton, perubahan bentuk.
- b. Analisa kinerja kolom secara teoritis setelah dibungkus *CFRP* terhadap kekuatan tekan, regangan beton, perubahan bentuk.
- c. Analisa data eksperimen peningkatan kuat tekan beton (f_c) kolom persegi terkekang.
- d. Analisa data eksperimen tegangan-regangan beton kolom persegi terkekang.
- e. Analisa data eksperimen perubahan bentuk kolom.
- f. Pembuatan grafik hubungan tegangan-regangan beton sebelum dan setelah dibungkus *CFRP*.
- g. Analisa rasio tulangan longitudinal kolom persegi.
- h. Analisa rasio tulangan transversal kolom persegi.
- i. Hasil analisa teoritis dan hasil analisa data eksperimen, ditarik suatu kesimpulan.

3.5. Pengujian di Laboratorium

3.5.1. Spesifikasi Material

Tulangan longitudinal menggunakan baja tulangan dengan diameter $\varnothing 10$ mm, tulangan transversal sengkang menggunakan diameter $\varnothing 6$ mm dengan jarak $s = 100$ mm, diameter $\varnothing 8$ mm dengan jarak $s = 100$ mm, tegangan leleh baja tulangan $f_y = 240$ Mpa, kuat tekan beton mutu normal $22,5$ MPa, *Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP)* SikaWrap-Hex C230 dengan tebal $0,13$ mm dengan jumlah lapisan *CFRP* sebanyak 1 (satu) lapis.

3.5.2. Benda Uji

Pengujian terdiri dari pengujian kolom beton kolom dengan tulangan longitudinal dan tulangan transversal. Untuk menguji kuat tekan beton digunakan benda uji silinder. Sedangkan untuk pengujian kekuatan dan daktilitas kolom digunakan benda uji kolom terkekang dengan tulangan transversal dan kolom dengan menggunakan pengekangan tambahan yang dibungkus dengan *Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP)*.

Tabel 3.1. Perincian Benda Uji

Kode Benda Uji	Dimensi Kolom	Tulangan Longitudinal	Tulangan Transversal	Jumlah Lapis CFRP	Jumlah Sampel
KP-1	150x150 mm	4 Ø 10	-	-	3
KP-2	150x150 mm	4 Ø 10	-	Partial 1 Lapis	3
KP-3	150x150 mm	4 Ø 10	Ø 6 - 100	-	3
KP-4	150x150 mm	4 Ø 10	Ø 8 - 100	-	3
KP-5	150x150 mm	4 Ø 10	Ø 6 - 100	Partial 1 Lapis	3

Keterangan :

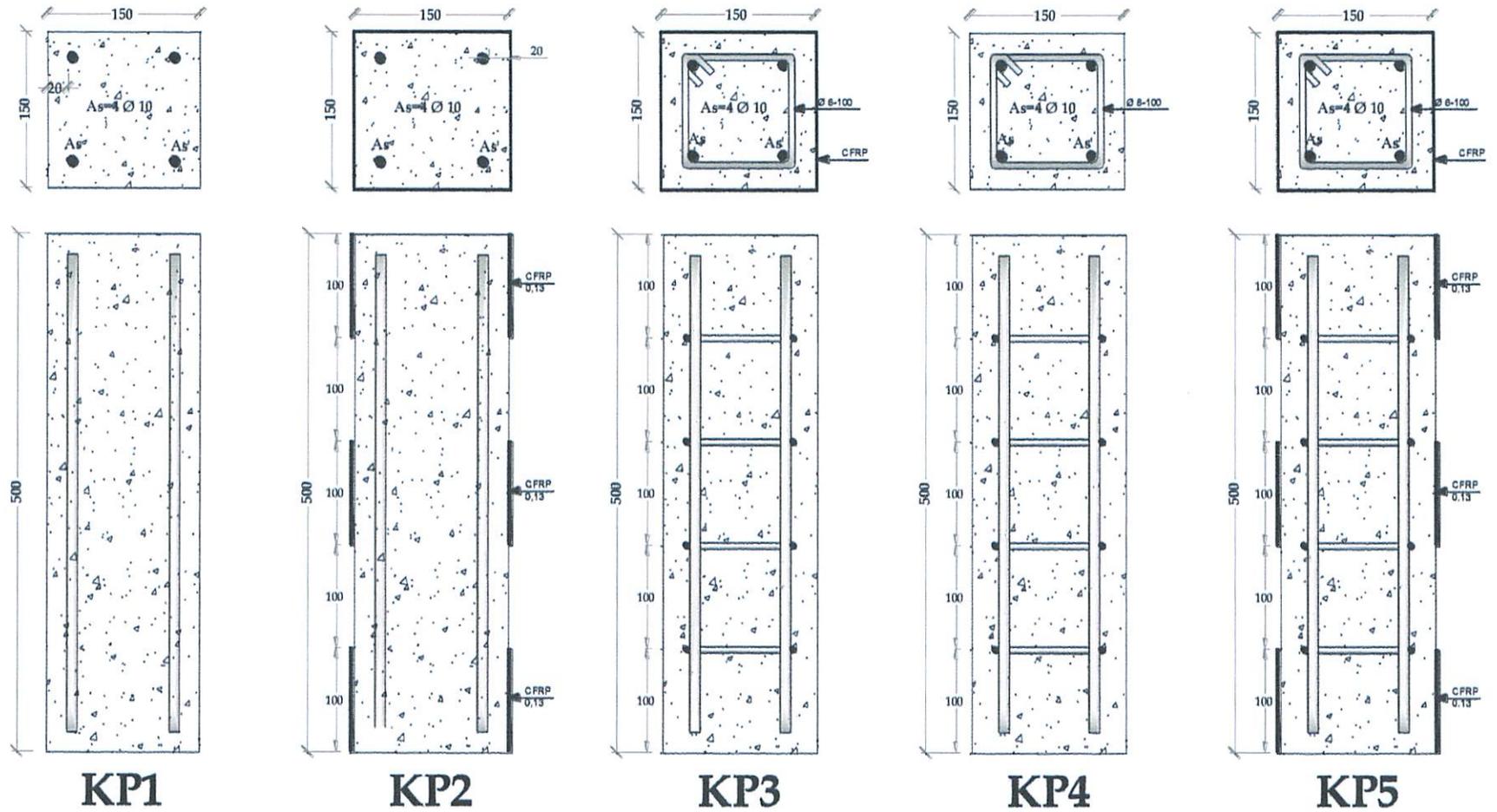
KP1 = Kolom persegi dengan 4 (empat) tulangan longitudinal BJTP diameter 10 mm

KP2 = Kolom persegi dengan 4 (empat) tulangan longitudinal BJTP diameter 10 mm yang bungkus dengan CFRP tipe SikaWrap Hex 230C dengan ketebalan 0,13 mm.

KP3 = Kolom persegi dengan 4 (empat) tulangan longitudinal diameter 10 mm dan tulangan transversal BJTP diameter 6 mm pada tiap jarak 100 mm.

KP4 = Kolom persegi dengan 4 (empat) tulangan longitudinal diameter 10 mm dan tulangan transversal BJTP diameter 8 mm pada tiap jarak 100 mm.

KP5 = Kolom persegi dengan 4 (empat) tulangan longitudinal diameter 10 mm dan tulangan transversal BJTP diameter 6 mm pada tiap jarak 100 mm. Kolom dibungkus CFRP tipe SikaWrap Hex 230C dengan ketebalan 0,13 mm

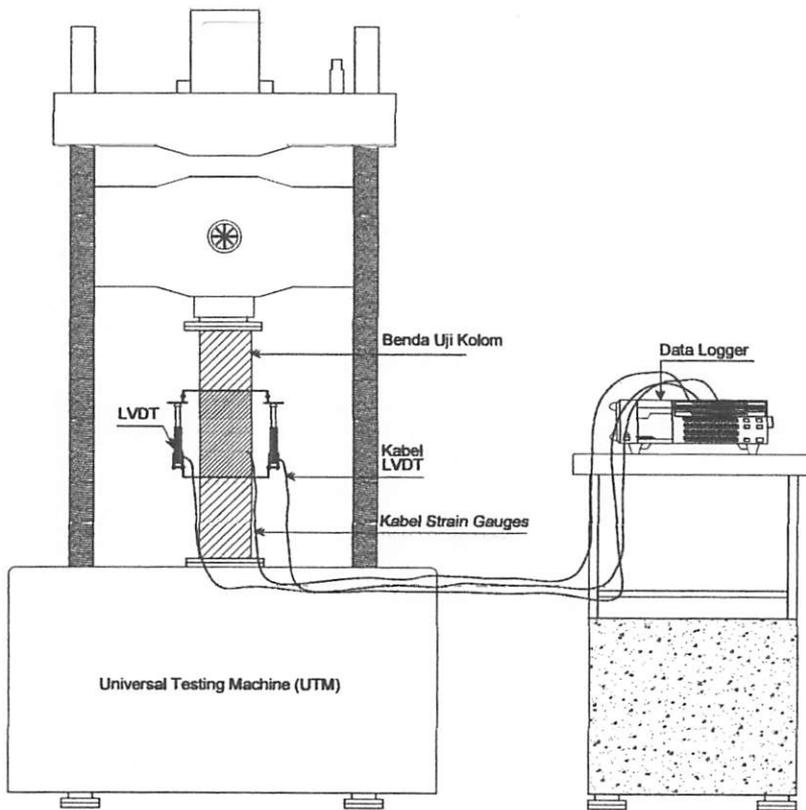


Gambar 3.1 Gambar Tipe benda Uji Kolom
(Gambar tidak diskala)

3.5.3. Peralatan Pengujian Silinder dan Kolom

Untuk menguji kolom, masing-masing kolom diuji dengan beban aksial konstan pada bagian ujung atas kolom. Beban aksial konstan diperoleh dari alat *Universal Testing Machine (UTM)* dengan kapasitas 200 ton.

Ilustrasi set-up instrument yang telah digunakan dapat dilihat pada Gambar 3.2. Pada Gambar 3.2, memperlihatkan ilustrasi set up instrument pada waktu melakukan pengujian benda uji kolom, yang mana kolom telah dipasangkan *dial gauges* untuk pembacaan *displacement* arah vertikal dan pada kolom sudah terpasang *strain gauges* untuk pembacaan regangan pada tulangan longitudinal dan transversal *BJTP* maupun *CFRP* menggunakan alat *data logger*.



Gambar 3.2. Ilustrasi set-up pengujian kolom

3.5.4. Tahap Pelaksanaan Eksperimen

Langkah-langkah dalam membuat benda uji sampai pada pengujian adalah sebagai berikut :

1. Melakukan uji tarik baja tulangan polos (BJTP).
2. Melakukan penelitian untuk mendapatkan mix desain campuran beton sesuai dengan kuat tekan rencana.
3. Melakukan penelitian analisa material untuk mendapatkan mix desain campuran beton sesuai dengan kuat tekan rencana $f'_c = 22,5$ MPa.
4. Melakukan pekerjaan begisting kolom persegi ukuran 150 x 150 mm sebanyak 15 buah.

5. Membuat benda uji silinder sebanyak 12 buah dan benda uji kolom persegi sebanyak 5 jenis.
6. Setelah 2 x 24 jam atau beton telah cukup kering, cetakan kolom dibuka.
7. Setelah cetakan dibuka, akan dilakukan perawatan beton dengan cara merendam benda uji silinder ke dalam bak yang berisi air dan kolom dibungkus dengan karung goni yang selalu dalam keadaan basah.
8. Setelah benda uji silinder berumur 28 hari, dilakukan pengangkatan benda uji ke tempat pengujian di laboratorium beton untuk dilakukan pengujian tekan.
9. Setelah benda uji kolom berumur 28 hari, selanjutnya kolom dibungkus dengan *CFRP* sebanyak 1 (satu) lapis.
10. Setelah kolom dibungkus *CFRP* selama 2 hari (menunggu hingga perekat antara *CFRP* dan permukaan kolom beton mengering), dilakukan pengujian kuat tekan.
11. Pengujian dilakukan dengan sistem *load control* dan *displacement control*.
12. Nilai regangan aksial kolom diperoleh dari harga rata-rata 2 buah *Dial* yang dibagi dengan tinggi pemasangan kolom mula-mula yaitu 500 mm.
13. Selama pembebanan dilakukan pengamatan, pemotretan dan pencatatan data.
14. Data yang akan dicatat adalah :
 - a. Pencatatan data pembebanan naik dan turun.

- b. Pencatatan fenomena retak dan besar beban pada awal retak
- c. Lompatan beban dan besar beban pada saat kolom runtuh.

3.6. Prediksi Analitis

Dari kepustakaan yang ada, telah saya lakukan analisis teoritis kurva hubungan tegangan regangan beton tidak terkekang dan beton terkekang. Dari beberapa model kurva tersebut, saya pilih yang paling cocok untuk dipakai sebagai hipotesa perilaku $\bar{C}\bar{F}\bar{R}\bar{P}$ adalah menggunakan usulan Hognestad untuk model hubungan tegangan-regangan beton tidak terkekang sedangkan untuk model hubungan tegangan-regangan beton terkekang menggunakan usulan Mander, dkk.(1988).

3.6.1. Analisa Teoritis Kekuatan Kolom Terhadap Beban Eksentris

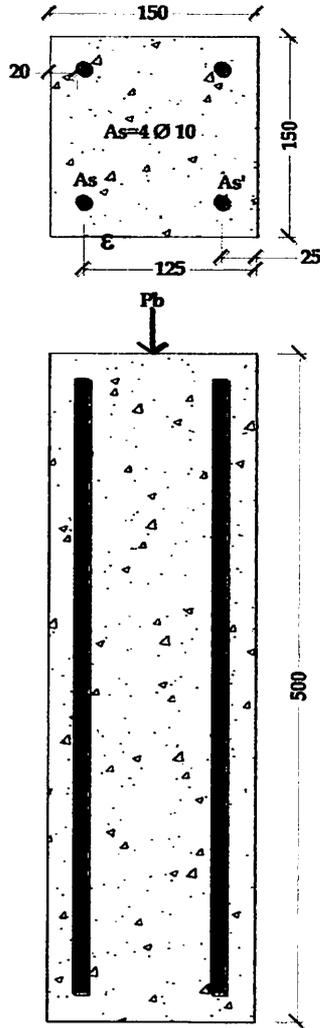
a. Kolom Tak Terkekang (KP1)

Kolom Bujur sangkar memiliki karakteristik sebagai berikut :

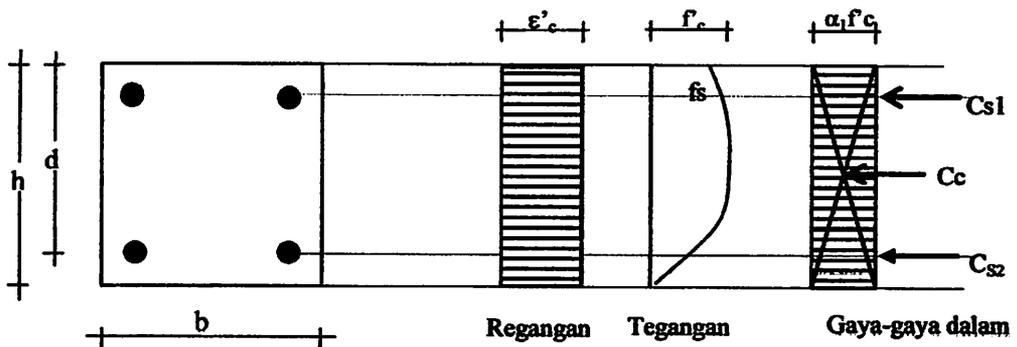
Dimensi Kolom	: 150 mm x 150 mm
Kuat Tekan (f_c)	: 22,5 Mpa
Diameter Tulangan Longitudinal	: 10 mm
f_y tulangan longitudinal	: 240 Mpa
Regangan beton tak terkekang	: 0,003
Modulus Elastisitas beton (E_s)	: 2×10^5
Tebal selimut Beton	: 20 mm

Dari data diatas, maka kekuatan kolom beton dapat dihitung dengan cara sebagai berikut :

1) Titik 1. Ekstrensitas kecil ($M_n = 0$; $P_n =$ Aksial tekan Maksimum)



Gambar 3.3. Gambar Penampang Kolom tak Terkekang (KP1)

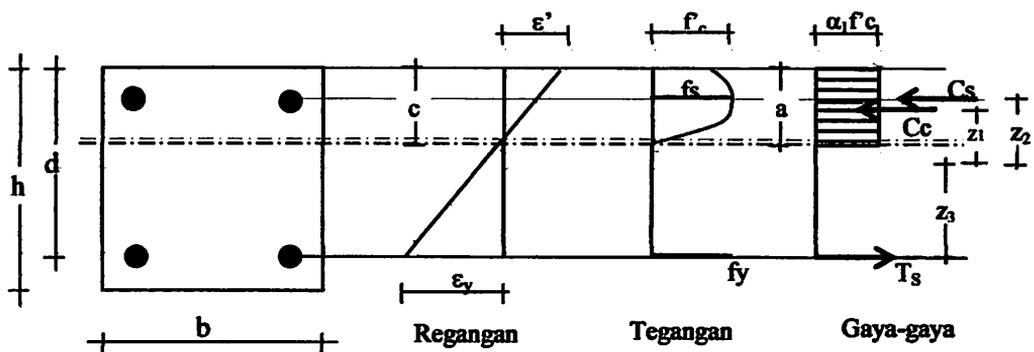


Gambar 3.4. Diagram regangan dan tegangan serta gaya-gaya dalam pada titik 1 kolom tak terkekang (KP1)

Beban Aksial yang bekerja pada kolom

$$\begin{aligned} \phi P_n &= \phi P_n (\text{maks}) = 0,80 \cdot \phi \cdot \{0,85 \cdot f_c \cdot (A_g - A_{st}) + f_y \cdot A_{st}\} \quad \dots (\text{pers. 2.41}) \\ &= 0,8 \cdot 0,65 \cdot \{0,85 \cdot 22,5 \cdot (22500 - 314,1593) + 240 \cdot 314,1593\} \\ &= 259845,2624 \text{ N} \\ &= 259,8453 \text{ kN} \end{aligned}$$

2) Titik 2. Momen Lentur Murni ($M_{\text{murni}} = \text{Maksimum}; P_n = 0$)



Gambar 3.5. Diagram regangan dan tegangan serta gaya-gaya dalam pada titik 2 kolom tak terkekang (KP1)

Kolom seperti ini tidak mengalami aksial atau sama dengan 0, disebut juga dengan *full beam condition*.

$$\epsilon_c = 0,003$$

Kuat tekan (f_c) kolom ini adalah sama dengan kuat tekan karakteristik beton ini sendiri karena tidak ada penambahan kekuatan dari tulangan reinforced.

➤ Tulangan 1- Ø 10 mengalami tekan

$$\begin{aligned} C_{s1} &= A_{s1}(f_y - 0,85 f_c) \quad \dots (\text{pers. 2.36}) \\ &= 157,0796[240 - 0,85(22,5)] \\ &= 34694,497 \text{ N} \end{aligned}$$

- Beton mengalami tekan

$$C_c = 0,85f'_{cc} a \cdot b \quad \dots\dots\dots(\text{pers. 2.35})$$

$$= 0,85(22,5)(0,85 \cdot x)(150)$$

$$= 2438,4375x$$

- Tulangan 2- Ø 10 mengalami tarik

$$\frac{\epsilon_{s2}}{(125 - x)} = \frac{0,003}{x}$$

$$\epsilon_{s2} = \frac{0,003}{x}(125 - x)$$

$$T = A_{s2}(f_{s2} - 0,85f'_{cc}) \quad \dots\dots\dots(\text{pers. 2.37})$$

$$= 157,0796327 \left[\frac{0,003}{x}(125 - x)200000 - 0,85(22,5) \right]$$

$$= 157,0796327 \left[\frac{75000 - 600x}{x} - 19,125 \right]$$

$$= \frac{11780972,45 - 94247,780x}{x} - 3004,148$$

- Garis netral, x dicari dengan persamaan gaya aksial sama dengan 0 (nol)

$$\Sigma v = 0$$

$$C_{s1} + C_c - T = 0 \quad \dots\dots\dots(\text{pers. 2.38})$$

$$34694,497 + 2438,4375x - \left[\frac{11780972,45 - 94247,880x}{x} - 3004,148 \right] = 0$$

Dari hasil iterasi didapat nilai $x = 47,526$ mm

Jadi tinggi garis netral = 47,526 mm

Hasil garis netral diatas diput kembali kepersamaan sebelumnya

- Tulangan 1- Ø10 tertekan

$$\frac{\epsilon_{s1}}{(47,526 - 25)} = \frac{0,003}{47,526}$$

$$\varepsilon_{s1} = 0,001421916$$

$$\varepsilon_{s1} = 0,001421916 > \varepsilon_y = 0,0012$$

Karena regangan pada tulangan baja 1 - Ø 10 lebih besar dari pada regangan leleh bajanya sehingga dipakai $f_y = 240 \text{ Mpa}$

$$C_{s1} = A_{s1}(f_{s1} - 0,85f'_c) \quad \text{.....(pers. 2.36)}$$

$$= 157,0796327 \cdot (240 - 0,85(22,5))$$

$$= 34694,96387 \text{ N}$$

$$= 34,69496387 \text{ kN}$$

➤ Beton mengalami tekan

$$C_c = 0,85f'_c a \cdot b \quad \text{.....(pers. 2.35)}$$

$$= 0,85(22,5)(0,85 \cdot 47,526)(150)$$

$$= 115889,1806 \text{ N}$$

$$= 115,8891806 \text{ kN}$$

➤ Tulangan 2 - Ø 10 mengalami tarik

$$\varepsilon_{s2} = \frac{0,003}{x} (125 - x)$$

$$= \frac{0,003}{47,526} (125 - 47,526)$$

$$= 0,004890418 > \varepsilon_y = 0,0012.$$

Tegangan yang dipakai $f_{s2} = f_y = 240 \text{ MPa}$.

$$T = A_{s2}(f_2 - 0,85f_c) \quad \text{.....(pers. 2.38)}$$

$$= 157,0796327 \cdot [240 - 0,85(22,5)]$$

$$= 34694,96387 \text{ N}$$

$$= 34,69496387 \text{ kN}$$

➤ Momen yang terjadi pada kolom

Dari nilai tinggi garis netral diatas (x), didapat nilai-nilai sebagai berikut :

$$a = \beta \cdot x \quad \text{.....(pers. 2.34)}$$

$$= 0,85 \cdot 47,526$$

$$= 40,3971 \text{ mm}$$

$$z_1 = c - \frac{a}{2} \quad \text{.....(pers. 2.40a)}$$

$$= 75 - \frac{40,3971}{2} = 54,8015 \text{ mm}$$

$$z_2 = c - d' \quad \text{.....(pers. 2.40b)}$$

$$= 75 - 25 = 50 \text{ mm}$$

$$z_3 = d - c \quad \text{.....(pers. 2.40c)}$$

$$= 125 - 75 = 50 \text{ mm}$$

$$M_n = C_{s1}(z_2) + C_c(z_1) - T \cdot (z_3) \quad \text{.....(pers. 2.39)}$$

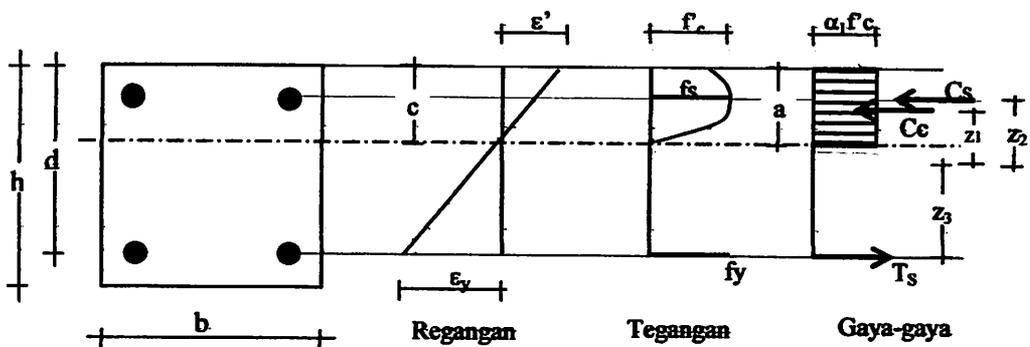
$$M_n = 34694,96387 (50) + 115889,1806 (54,8015) - 34694,96387(50)$$

$$= 6350895,138 \text{ Nmm}$$

$$= 6,350895138 \text{ kNm}$$

$$M_R = \phi M_n = (0,65)(6,350895138) = 4,128081839 \text{ kNm}$$

3) Titik 3 : Eksentrisitas, $e = 35 \text{ mm}$



Gambar 3.6. Diagram regangan dan tegangan serta gaya-gaya dalam pada titik 3 kolom tak terkekang (KPI)

- Tulangan 1- Ø 10 mengalami tekan

$$\begin{aligned}
 C_{s1} &= A_{s1}(f_y - 0,85 f_c) && \dots\dots\dots(\text{pers. 2.36}) \\
 &= 157,0796[240 - 0,85(22,5)] \\
 &= 34694,497 \text{ N}
 \end{aligned}$$

- Beton mengalami tekan

$$\begin{aligned}
 C_c &= 0,85 f'_{cc} a \cdot b && \dots\dots\dots(\text{pers. 2.35}) \\
 &= 0,85(22,5)(0,85 \cdot x)(150) \\
 &= 2438,4375x
 \end{aligned}$$

- Tulangan 2- Ø 10 mengalami tarik

$$\begin{aligned}
 \frac{\epsilon_{s2}}{(125 - x)} &= \frac{0,003}{x} \\
 \epsilon_{s2} &= \frac{0,003}{x} (125 - x) \\
 T &= A_{s2}(f_{s2} - 0,85 f'_c) && \dots\dots\dots(\text{pers. 2.37}) \\
 &= 157,0796327 \left[\frac{0,003}{x} (125 - x) 200000 - 0,85(22,5) \right] \\
 &= 157,0796327 \left[\frac{75000 - 600x}{x} - 19,125 \right] \\
 &= \frac{11780972,45 - 94247,780x}{x} - 3004,148
 \end{aligned}$$

- Momen yang terjadi pada kolom

Daerah momen sangat kecil yang terjadi pada daerah plastis. Daerah momen tersebut bergeser ke daerah ecentrisitas, $e = 35 \text{ mm}$.

Untuk mencari tinggi garis netral, digunakan Persamaan :

$$\Sigma M = 0$$

$$C_{s1}(z_2) + C_c(z_1) - T(z_3) = 0 \quad \dots\dots\dots(\text{pers. 2.39})$$

$$34694,497(50) + 2438,4375x \cdot \left(75 - \frac{0,85x}{2}\right) - \left[\frac{11780972,45 - 94247,780x}{x} - 3004,148\right] \cdot (50) = 0$$

Dari hasil iterasi didapat nilai $x = 45,9682$ mm

Jadi tinggi garis netral = 45,9682 mm

Hasil garis netral diatas diinput kembali kepersamaan sebelumnya

➤ Tulangan 1- Ø10 tertekan

$$\frac{\varepsilon_{s1}}{(x - 25)} = \frac{0,003}{x}$$

$$\frac{\varepsilon_{s1}}{(45,9682 - 25)} = \frac{0,003}{45,9682}$$

$$\varepsilon_{s1} = 0,001368437$$

$$\varepsilon_{s1} = 0,001368437 > \varepsilon_y = 0,0012$$

Karena regangan pada tulangan baja 1 - Ø 10 lebih besar dari pada regangan leleh bajanya sehingga dipakai tegangan (f_{st}), dimana $f_{st} = f_y = 240$ Mpa

$$C_{s1} = A_{s1}(f_{s1} - 0,85f'c) \quad \dots\dots\dots(\text{pers. 2.36})$$

$$= 157,0796327 \cdot (240 - 0,85(22,5))$$

$$= 34694,497 \text{ N}$$

$$= 34,694497 \text{ kN}$$

➤ Beton mengalami tekan

$$C_c = 0,85f'_{cc} a \cdot b \quad \dots\dots\dots(\text{pers. 2.35})$$

$$= 0,85(22,5)(0,85 \cdot x)(150)$$

$$= 0,85(22,5)(0,85 \cdot 45,9682)(150)$$

$$= 112090,5827 \text{ N}$$

$$= 112,0905827 \text{ kN}$$

- Tulangan 2 - Ø 10 mengalami tarik

$$\epsilon_{s2} = \frac{0,003}{x} (125 - x)$$

$$\epsilon_{s2} = \frac{0,003}{45,9682} (125 - 45,9682)$$

$$= 0,005157813 > \epsilon_y = 0,0012.$$

Tegangan yang dipakai $f_{s2} = f_y = 240$ MPa.

$$\bar{T} = A_{s2} (f_2 - 0,85 f_c) \quad \dots\dots\dots(\text{pers. 2.37})$$

$$= 157,0796327 \cdot [240 - 0,85(22,5)]$$

$$= 34694,96387 \text{ N}$$

$$= 34,69496387 \text{ kN}$$

- Momen yang terjadi pada daerah eksentrisitas kolom

Dari nilai tinggi garis netral $x = 35,63493$ mm, didapat nilai-nilai sebagai berikut :

$$a = \beta \cdot x \quad \dots\dots\dots(\text{pers. 2.34})$$

$$= 0,85 \cdot 45,9682$$

$$= 39,0730 \text{ mm}$$

$$z_1 = c - \frac{a}{2} \quad \dots\dots\dots(\text{pers. 2.40a})$$

$$= 75 - \frac{39,0730}{2} = 55,4635 \text{ mm}$$

$$z_2 = c - e \quad \dots\dots\dots(\text{pers. 2.40b})$$

$$= 50 - 35 = 15 \text{ mm}$$

$$z_3 = 50 + 35 \quad \dots\dots\dots(\text{pers. 2.40c})$$

$$= 85 \text{ mm}$$

$$M_n = C_{s1} (z_2) + C_c \cdot (z_1) - T \cdot (z_3) \quad \dots\dots\dots(\text{pers. 2.39})$$

$$= 5860,145 (15) + 117417,107 (55,4635) - 34694,96387 (85)$$

$$= 8645585,1853 \text{ Nmm}$$

$$= 8,6455851853 \text{ kNm}$$

$$M_R = \phi M_u = (0,65) (8,6455851853)$$

$$= 5,61963037 \text{ kNm}$$

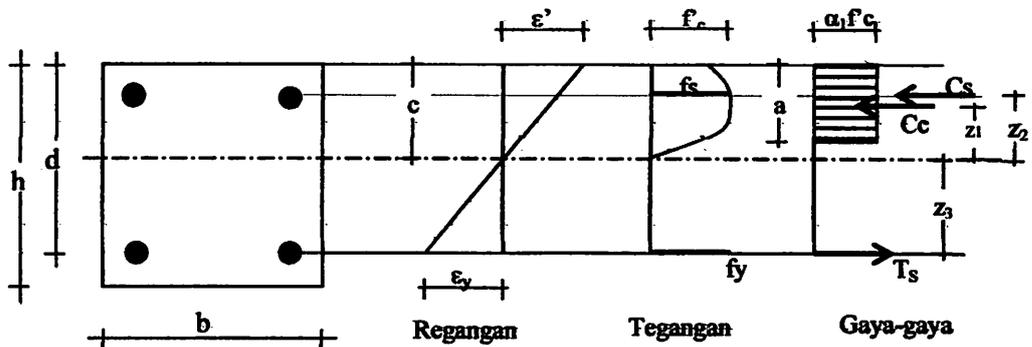
➤ **Beban aksial yang terjadi pada pusat eksentrisitas kolom**

$$P_n = \frac{5619630,3705}{35} = 160560,8677 \text{ N}$$

$$= 160,5608677 \text{ kN}$$

4) **Titik 4. Keadaan seimbang ($M_{nbalanced}$; $P_{nbalanced}$)**

Regangan beton tak terkekang adalah 0,003 berlaku pada seluruh permukaan kolom dan baja tulangan dianggap telah mengalami leleh regangan 0,0012; maka dari hubungan ini diperoleh nilai dari garis netral balanced (x_b) dengan rumus perbandingan segi tiga.



Gambar 3.7. Diagram regangan dan tegangan serta gaya-gaya dalam pada titik 4 kolom tak terkekang (KP1)

➤ **Beton yang terkekang tulangan Transversal**

$$\epsilon_{cu} = \epsilon_c = 0,003$$

Nilai ini digunakan sebagai nilai jarak perbandingan.

$$\frac{x}{0,003} = \frac{125}{0,0012 + 0,003}$$

$$x = 89,28571429 \text{ mm}$$

Jadi garis netral berada pada 89,28571429 mm

- Tulangan 1- Ø 10 mengalami tekan.

$$\frac{\epsilon_{s1}}{(x - 25)} = \frac{\epsilon_{cu}}{x}$$

$$\frac{\epsilon_{s1}}{(89,28571429 - 25)} = \frac{0,003}{89,28571429}$$

$$= 0,00216 > \epsilon_y = 0,0012$$

Karena regangan pada tulangan baja 1 - Ø 10 lebih besar dari pada regangan leleh bajanya sehingga dipakai tegangan (f_{st}), dimana $f_{st} = f_y$.

$$C_{s1} = A_{s1}(f_{s1} - 0,85f'c) \quad \dots\dots\dots(\text{pers. 2.36})$$

$$= 157,0796327 \cdot (240 - 0,85(22,5))$$

$$= 34694,96387 \text{ N}$$

$$= 34,69496387 \text{ KN}$$

- Beton mengalami tekan

$$C_c = 0,85f'_{cc}ab) \quad \dots\dots\dots(\text{pers. 2.35})$$

$$= 0,85(22,5)(0,85)(89,28571429)(150)$$

$$= 217717,6339 \text{ N}$$

$$= 217,7176339 \text{ kN}$$

- Tulangan 2 - Ø10 mengalami tarik

$$\frac{\epsilon_{s2}}{(125 - 89,28571429)} = \frac{0,003}{89,28571429}$$

$$\epsilon_{s2} = 0,0012$$

$$\epsilon_{s2} = \epsilon_y = 0,0012$$

Regangan yang terjadi pada tulangan ini sama besar dengan tegangan luluh baja ($f_{s2} = f_y = 240 \text{ Mpa}$).

$$T = A_{s2}(f_{s2} - 0,85f'c) \quad \text{.....(pers. 2.37)}$$

$$= 157,0796327[240 - 0,85(22,5)]$$

$$= 34694,96387N$$

$$= 34694,96387 \text{ kN}$$

Beban aksial seimbang yang terjadi pada kolom

$$P_{\text{balanced}} = C_{s1} + C_c - T \quad \text{.....(pers. 2.38)}$$

$$= 34694,96387 + 217717,6339 - 34694,96387$$

$$= 148327,7062 N$$

$$= 148,3277062 \text{ kN}$$

Momen seimbang yang terjadi pada kolom

$$M_{\text{balance}} = C_{s1}(z_2) + C_c(z_1) - T(z_3) \quad \text{.....(pers. 2.39)}$$

Tinggi blok tegangan (a)

$$a = \beta \cdot c \quad \text{.....(pers. 2.34)}$$

$$= 0,85 \cdot 89,28571429$$

$$= 75,8929 \text{ mm}$$

$$z_1 = c - \frac{a}{2} \quad \text{.....(pers. 2.40a)}$$

$$= 75 - \frac{75,8929}{2} = 37,0536 \text{ mm}$$

$$z_2 = c - d' \quad \text{.....(pers. 2.40b)}$$

$$= 75 - 25 = 50 \text{ mm}$$

$$z_3 = d - c \quad \text{.....(pers. 2.40c)}$$

$$= 125 - 75 = 50 \text{ mm}$$

$$= 34694,96387 (50) + 217717,63 (37,0536) - 34694,96387 (50)$$

$$= 4597719,513 \text{ Nmm}$$

$$= 45,97719513 \text{ kNm}$$

$$M_{balanced} = \bar{P}_{balanced} \cdot e$$

$$4597719,513 = 148327,7062 \cdot e$$

$$e = 30,99703778 \text{ mm}$$

eksentrisitas dalam keadaan seimbang, maka $e_b = e + 75$

$$e_b = 105,9970378 \text{ mm}$$

$$\phi P_b = 0,65 (148327,7062) = 70745,96747 \text{ N}$$

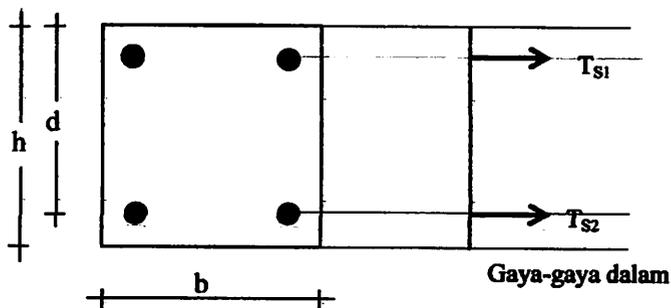
$$= 70,74596747 \text{ kN}$$

$$M_R = \phi P_b e_b = 70745,96747 \cdot (105,9970378)$$

$$M_R = 7498862,9867 \text{ Nmm}$$

$$= 7,4988629867 \text{ kNm}$$

- 5) Titik 5. Eksentrisitas besar ($\bar{M}_n = 0$; $\bar{P}_n =$ aksial tarik maksimum atau tekan minimum)



Gambar 3.8. Diagram regangan dan tegangan serta gaya-gaya dalam pada titik 5 kolom tak terkekang (KP1)

Beban aksial yang bekerja pada kolom

$$\phi P_n = \phi P_{n(max)}$$

$$= (0,65) \cdot [f_y \cdot A_{st}]$$

$$= (0,65) \cdot [(-240)(157,0796327)]$$

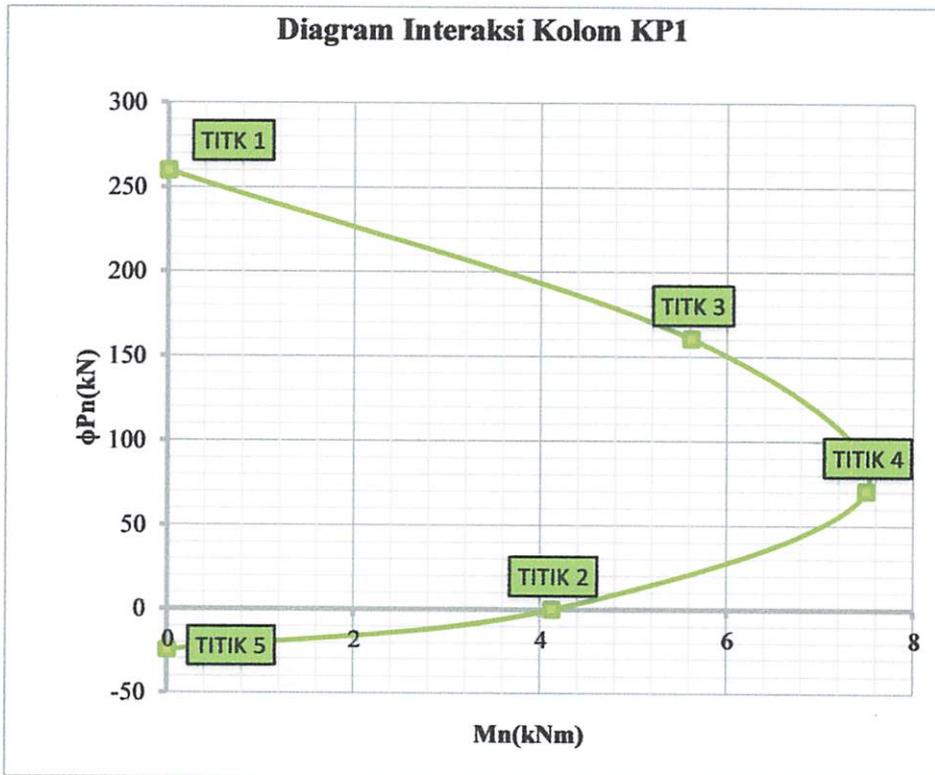
$$= -24504,4227 \text{ N}$$

$$= -24,5044227$$

Dari hasil perhitungan yang diatas, maka perhitungannya dapat tabulasi dalam tabel berikut :

Tabel 3.2 Peningkatan Kuat beban aksial dan momen pada kolom tak terkekang (KP1)

e (mm)	Kuat Beban Aksial ϕP_n (kN)	Kuat Momen $\phi P_n e$ (kNm)
0	259,8453	0
Kecil	0	4,128081839
35	160,5608677	5,61963037
105,9970378	70,7459675	7,498862987
besar	-24,5044227	0



Grafik 3.1. Diagram interaksi kolom tak terkekang (KP1)

b. Kolom Terkekang CFRP (KP2)

Kolom Bujur sangkar memiliki karakteristik sebagai berikut :

Dimensi Kolom	: 150 mm x 150 mm
Kuat Tekan (f'_c)	: 22,5 Mpa
Diameter Tulangan Longitudinal	: 10 mm
f_y tulangan longitudinal	: 240 Mpa
Jarak Tulangan Sengkang	: 100 mm
Regangan beton tak terkekang	: 0,03
Modulus Elastisitas Beton (E_s)	: 2×10^5
Tebal selimut Beton	: 20 mm

Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP) yang digunakan adalah jenis

Sika Wrap Hex-230C dengan spesifikasi sebagai berikut :

Ketebalan (<i>thickness</i>)	: 0,13 mm
Kuat tarik (<i>tensile strength</i>)	: 3500 MPa
Modulus Elastisitas (<i>Tensile E-modulus</i>)	: 230000 MPa
Regangan CFRP (<i>allowable strain, ϵ_j</i>)	: 0,004
Regangan Ultimit CFRP (<i>Ultimate Strain ϵ_{uj}</i>)	: 0,011

Dari data diatas, maka kekuatan kolom beton bujur sangkar dapat dihitung dengan cara sebagai berikut :

- Kuat tekan beton akan bertambah akibat pengaruh kekangan dari luar beton (f'_{cc}) dengan kuat beton tak terkekang (f'_c).

$$f'_{cc} = f'_{c0} \left\{ \left(2,254 \sqrt{1 + 7,94 \frac{F_t}{f'_{c0}}} \right) - 2 \frac{F_t}{f'_c} - 1,254 \right\} \dots\dots(\text{pers. 2.8})$$

$$f_j = \bar{E}_j \varepsilon_t \quad \dots\dots\dots(\text{pers. 2.7})$$

$$\varepsilon_j = 0,004$$

$$\varepsilon_{uj} = 0,004$$

$$\begin{aligned} f_j &= 0,004 \bar{E}_j \\ &= 0,004(230000) \\ &= 920 \text{ N/mm}^2 \end{aligned}$$

Jaket CFRP yang mengikat tegangan lateral, $f_{i,j}$

$$\begin{aligned} f_{i,jx} &= 2 \frac{t_j}{h} f_j \\ &= 2 \frac{(0,13)}{150} (920) \\ &= 1,593285819 \text{ N/mm}^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} f_{i,jy} &= 2 \frac{t_j}{b} f_j \\ &= 2 \frac{(0,13)}{150,13} (920) \\ &= 1,593285819 \text{ N/mm}^2 \end{aligned}$$

$$f'_{cc} = f'_{c0} \left\{ \left(2,254 \sqrt{1 + 7,94 \frac{F_t}{F'_{c0}}} \right) - 2 \frac{F_t}{f'_c} - 1,254 \right\}$$

$$f'_{cc} = 24,52 \left\{ \left(2,254 \sqrt{1 + 7,94 \frac{1,593}{24,52}} \right) - 2 \frac{1,593}{24,52} - 1,254 \right\}$$

$$f'_{cc} = 34,11 \text{ MPa}$$

$$E_c = 4700 \sqrt{f'_{cc}}$$

$$= 4700 \sqrt{34,11}$$

$$= 27449,77 \text{ MPa}$$

$$\varepsilon_{ccj} = \frac{1,71 \cdot (5f'_{cc} - 4f'_c)}{E_c} \quad \dots\dots\dots(\text{pers. 2.9})$$

$$= \frac{1,71 \cdot (5 \cdot 34,11 - 4 \cdot 34,11)}{27449,77}$$

$$= 0,002125$$

$$r = \frac{E_c}{E_c - E_{cc}} \quad \dots\dots\dots(\text{pers 2.24})$$

$$= 1,2662$$

$$\varepsilon_{cu j} = 0,004 + \frac{2,8 \cdot \rho_j \cdot \emptyset_j \cdot f_{ju} \cdot \varepsilon_{uj}}{f'_{cc}} \quad \dots\dots\dots(\text{pers 2.10})$$

$$\varepsilon_{uj} = 0,011$$

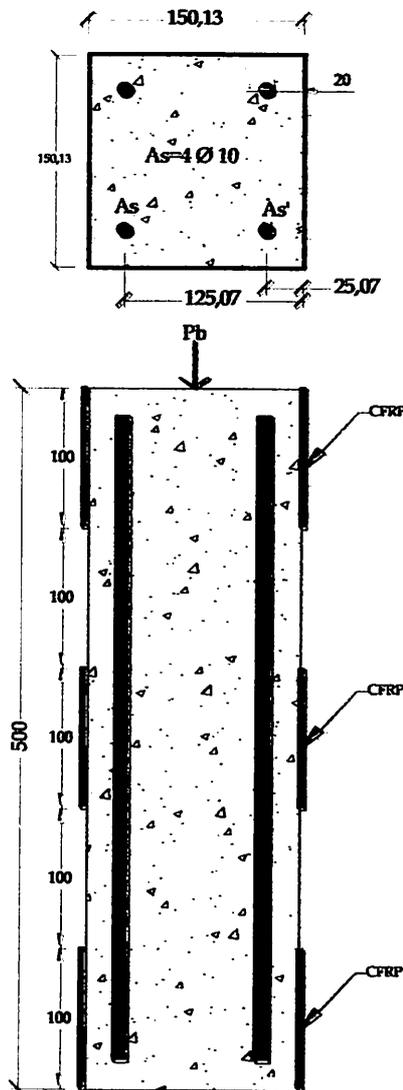
$$f_{ju} = 230000 \cdot 0,011 = 2530 \text{ MPa}$$

$$\emptyset_j = 0,9$$

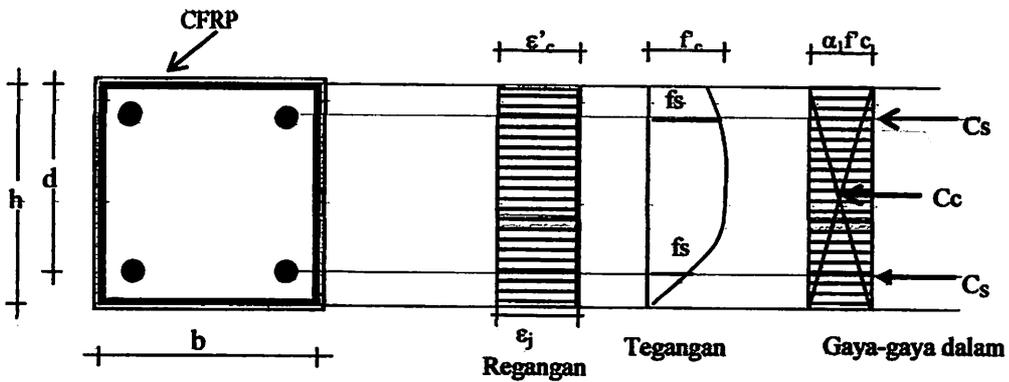
$$\varepsilon_{eu j} = 0,004 + \frac{2,8 \cdot 0,003464 \cdot 0,9 \cdot 2530 \cdot 0,011}{34,11}$$

$$\varepsilon_{eu j} = 0,011127613$$

1) Titik 1. Ekstrensitas kecil ($M_n = 0$; $P_n =$ Aksial tekan Maksimum)



Gambar 3.9. Gambar Penampang kolom Beton terkekang CFRP (KP2)



Gambar 3.10. Diagram regangan dan tegangan serta gaya-gaya dalam pada titik 1 kolom terkekang CFRP (KP2)

Beban Aksial yang bekerja pada kolom

$$\phi P_n = \phi P_n \text{ (maks)}$$

$$\phi \bar{P}_n = \phi \bar{P}_n \text{ (maks)} = 0,80 \cdot \phi \cdot \{0,85 \cdot f'_c \cdot (A_g - A_{st}) + f_y \cdot A_{st} + A_j \cdot f_j\} \dots \text{(pers. 2.41)}$$

$$= 0,8 \cdot 0,65 \cdot \{0,85 \cdot 34,11 \cdot (22500 - 314,1593) + 240 \cdot 314,1593$$

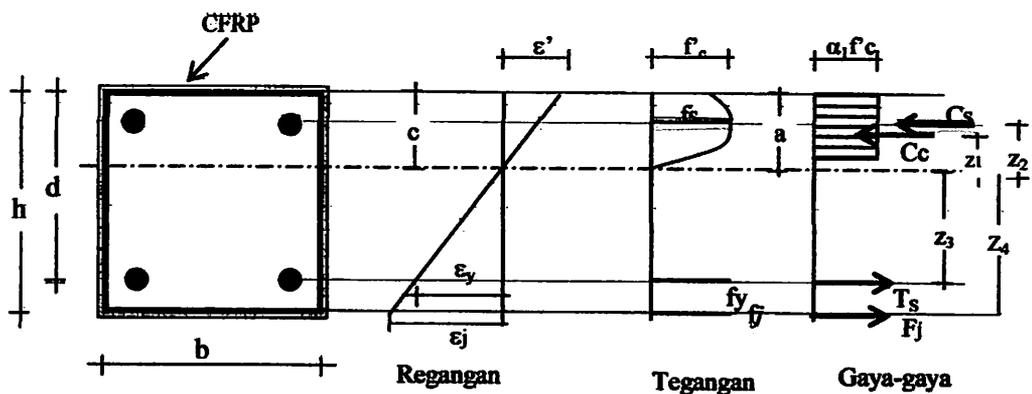
$$+ 4 \cdot 0,13 \cdot 150,13 \cdot 920 \}$$

$$= 481707,9136 \text{ N}$$

$$= 481,7079136 \text{ kN}$$

2) Titik 2. Momen Lentur Murni ($M_{\text{murni}} = \text{Maksimum}; P_n = 0$)

Kolom mengalami *full beam condition* atau mengalami gaya akibat momen seutuhnya dan tidak terjadi gaya aksial. Kondisi seperti ini akan menyebabkan beton mengalami kehancuran. Kehancuran pada kondisi ini sama dengan kehancuran pada beton.



Gambar 3.11. Diagram regangan dan tegangan serta gaya-gaya dalam pada titik 2 kolom terkekang CFRP (KP2)

Karena kolom terkekang oleh CFRP dari luar permukaan kolom sendiri maka regangan (ϵ_{cc}) untuk tegangan kolom yang terkekang oleh tulangan transversal (f'_{cc}) menggunakan perbandingan segi tiga.

$$\epsilon_{cc} = \frac{0,004}{x} (x - d)$$

- Tulangan 1 – Ø 10 mengalami tekan

$$C_{s1} = A_s'(f_y - 0,85 f_{cc}') \quad \text{.....(pers. 2.46)}$$

$$= 157,0796327[240 - 0,85(30,75071376)]$$

$$= 33593,34765 \text{ N}$$

$$= 33,59334765 \text{ kN}$$

- Beton mengalami tekan

$$C_c = 0,85 f'_c ab \quad \text{.....(pers. 2.44)}$$

$$= 0,85(34,11)(0,85x)(150,13)$$

$$= 3335,496865x \text{ N}$$

- Diasumsikan 2 – Ø 10 mengalami tarik

$$\frac{\epsilon_{s2}}{(125,07 - x)} = \frac{0,004}{x}$$

$$\epsilon_{s2} = \frac{0,004}{x} (125,07 - x)$$

$$T = A_{s2}(f_{s2} - 0,85 f'_{cc}) \quad \text{.....(pers. 2.47)}$$

$$= 157,0796327 \left[\frac{0,004}{x} (125,07 - x) 200000 - 0,85(30,75071376) \right]$$

$$= 157,0796327 \left[\frac{95304 - 800x}{x} - 26,138 \right]$$

$$= \frac{15716759,73 - 125663,7062x}{x} - 4105,7642$$

- CFRP mengalami tarik

$$\frac{\epsilon_{CFRP}}{(150,13 - x)} = \frac{0,004}{x}$$

$$\epsilon_{CFRP} = \frac{0,004}{x} (150,13 - x)$$

$$F = A_f F_f \quad \text{.....(pers. 2.48)}$$

$$= (0,13)(150,13) \left[\frac{0,004}{x} (150,13 - x)(230000) \right]$$

$$= \frac{2695666,421 - 17955,548x}{x}$$

Dari persamaan gaya aksial yang terjadi pada kolom, maka garis netral dapat dicari melalui persamaan dibawah ini;

$$P_n = 0$$

$$C_{s1} + C_c - T - F = 0 \quad \text{.....(pers. 2.49)}$$

$$33593,34765 + 3335,496865x$$

$$- \left[\frac{15716759,73 - 125663,7062x}{x} - 4105,7642 \right]$$

$$- \left[\frac{2695666,421 - 17955,548x}{x} \right] = 0$$

$$x = 51,9281 \text{ mm}$$

Dari garis netral yang telah didapat dibuktikanlah daerah yang mengalami tekan dan daerah yang mengalami tarik.

➤ Tulangan 1 - $\phi 10$ mengalami Tekan

$$\varepsilon_{s1} = \frac{0,004}{x} (x - 25,07)$$

$$\varepsilon_{s1} = \frac{0,004}{51,9281} (51,9281 - 25,07)$$

$$\varepsilon_{s1} = 0,001602069 > \varepsilon_y = 0,0012$$

Karena regangan pada tulangan baja 1- $\phi 10$ lebih besar dari pada regangan leleh bajanya sehingga dipakai $f_y = 240$.

$$C_{s1} = A_s' [240 - 0,85(f_{cc}')] \quad \text{.....(pers. 2.49)}$$

$$= 157,0796327(240 - 0,85(30,751))$$

$$= 33593,34765 \text{ N}$$

$$= 33,59334765 \text{ kN}$$

➤ Beton yang mengalami Tekan

$$C_c = 0,85f'_c ab \quad \text{.....(pers. 2.44)}$$

$$= 0,85 (34,11) (0,85) (51,9281)(150,13)$$

$$= 173206,0148 \text{ N}$$

$$= 173,2060148 \text{ kN}$$

➤ Tulangan 2 – Ø 10

$$\varepsilon_{s2} = \frac{0,004}{x} (125,07 - x)$$

$$= \frac{0,004}{51,9281} (125,07 - 51,9281)$$

$$= 0,005171913 > \varepsilon_y = 0,0012.$$

Tegangan yang dipakai $f_{s2} = f_y = 240 \text{ MPa}$.

$$\bar{T}_1 = A_{s2}(f_s - 0,85f_c) \quad \text{.....(pers. 2.47)}$$

$$= 157,0796327 \cdot [240 - 0,85(30,75071376)]$$

$$= 33593,34765 \text{ N}$$

$$= 33,59334765 \text{ kN}$$

➤ Pembungkus kolom CFRP

$$\varepsilon_{CFRP} = \frac{0,004}{x} (150,13 - x)$$

$$= \frac{0,004}{51,9281} (150,13 - 51,9281)$$

$$= 0,007564452 > \varepsilon_j = 0,004, \text{ sehingga dipakai } f_j = 920 \text{ N/mm}^2$$

$$F = A_j F_j \quad \text{.....(pers. 2.48)}$$

$$= (0,13)(150,13) \cdot (920)$$

$$= 17955,548 \text{ N}$$

$$= 17,955548 \text{ kN}$$

Momen yang terjadi pada kolom

Dari nilai tinggi garis netral diatas (x), didapat nilai-nilai sebagai berikut :

$$a = \beta \cdot x \quad \text{.....(pers. 2.43)}$$

$$= 0,85 \cdot 51,9281$$

$$= 44,1389 \text{ mm}$$

$$z_1 = c - \frac{a}{2} \quad \text{.....(pers. 2.51a)}$$

$$= 75,07 - \frac{44,1389}{2} = 52,9956 \text{ mm}$$

$$z_2 = c - d' \quad \text{.....(pers. 2.51b)}$$

$$= 75,07 - 25,07 = 50 \text{ mm}$$

$$z_3 = d - c \quad \text{.....(pers. 2.51c)}$$

$$= 125,07 - 75,07 = 50 \text{ mm}$$

$$z_4 = b - c \quad \text{.....(pers. 2.51d)}$$

$$= 150,13 - 75,07 = 75,07 \text{ mm}$$

$$M_n = C_{s1}(z_2) + C_c(z_1) + T(z_3) + F(z_4) \quad \text{.....(pers. 2.50)}$$

$$= C_{s1}(50) + C_c(52,9956) + T(50) + F(75,07)$$

$$= 33593,34765 (50) + 173206,0148 (52,9956)$$

$$+ 33593,34765 (50) + 17955,548 (75,07)$$

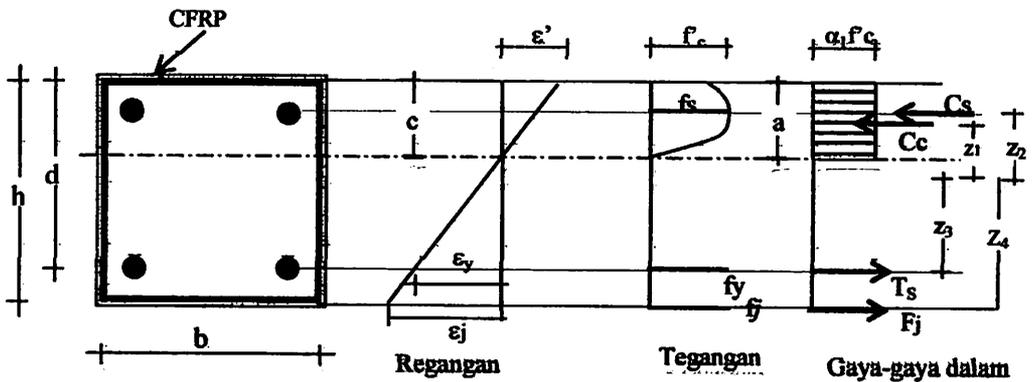
$$= 11190650,869 \text{ Nmm}$$

$$M_R = \phi M_n$$

$$= (0,65) (11190650,869)$$

$$= 7,273923065 \text{ kNm}$$

3) Titik 3. Ekstrensitas, $e = 35 \text{ mm}$



Gambar 3.12. Diagram regangan dan tegangan serta gaya-gaya dalam pada titik 3 kolom terkekang CFRP (KP2)

➤ Tulangan 1 – Ø 10 mengalami tekan

$$C_{s1} = A_s (f_y - 0,85 f_{cc}') \quad \dots\dots\dots(\text{pers. 2.46})$$

$$= 157,0796327 [240 - 0,85(30,75071376)]$$

$$= 33593,34765 \text{ N}$$

$$= 33,59334765 \text{ kN}$$

➤ Beton mengalami tekan

$$C_c = 0,85 f'_c ab \quad \dots\dots\dots(\text{pers. 2.44})$$

$$= 0,85(34,11)(0,85x)(150,13)$$

$$= 3335,496865x \text{ N}$$

➤ Diasumsikan 2 – Ø 10 mengalamai tarik

$$\frac{\epsilon_{s2}}{(125,07 - x)} = \frac{0,004}{x}$$

$$\epsilon_{s2} = \frac{0,004}{x} (125,07 - x)$$

$$T = A_{s2} (f_{s2} - 0,85 f'_c c) \quad \dots\dots\dots(\text{pers. 2.47})$$

$$= 157,0796327 \left[\frac{0,004}{x} (125,07 - x) 200000 - 0,85(30,75071376) \right]$$

$$= 157,0796327 \left[\frac{95304 - 800x}{x} - 26,138 \right]$$

$$= \frac{15716759,73 - 125663,7062x}{x} - 4105,7642$$

➤ CFRP mengalami tarik

$$\frac{\varepsilon_{CFRP}}{(150,13 - x)} = \frac{0,004}{x}$$

$$\varepsilon_{CFRP} = \frac{0,004}{x} (150,13 - x)$$

$$F = A_f F_f \quad \dots\dots\dots(\text{pers. 2.48})$$

$$= (0,13)(150,13) \left[\frac{0,004}{x} (150,13 - x)(230000) \right]$$

$$= \frac{2695666,421 - 17955,548x}{x}$$

Daerah momen sangat kecil yang terjadi pada daerah plastis. Daerah momen tersebut bergeser ke daerah ekentrisitas, $e = 35$ mm.

Untuk mencari tinggi garis netral, digunakan Persamaan :

$$\Sigma M = 0$$

$$C_{s1}(z_2) + C_c(z_1) - T(z_3) - F.(z_4) = 0 \quad \dots\dots\dots(\text{pers. 2.50})$$

$$33593,34765(50) + 3335,496865x \left(75,07 - \frac{0,85x}{2} \right)$$

$$- \left[\frac{15716759,73 - 125663,7062x}{x} - 4105,7642 \right] \cdot (50)$$

$$- \left[\frac{2695666,421 - 17955,548x}{x} \right] \cdot 75,07 = 0$$

Dari hasil iterasi didapat nilai $x = 52,6488$ mm.

Hasil garis netral diatas diinput kembali kepersamaan sebelumnya

- Tulangan 1 Ø 10 mengalami tekan

$$\begin{aligned}\epsilon_{s1} &= \frac{0,004}{x}(x - 25,07) \\ &= \frac{0,004}{52,6488}(52,6488 - 25,07)\end{aligned}$$

$$\epsilon_{s1} = 0,002095683 > \epsilon_y = 0,0012$$

Karena regangan pada tulangan baja 1 Ø 10 lebih besar dari pada regangan leleh bajanya sehingga dipakai tegangan dimana $f_y = 240$

$$\begin{aligned}C_{s1} &= A_s'(f_y - 0,85f_{cc}') && \dots\dots\dots(\text{pers. 2.46}) \\ &= 157,0796327(240 - 0,85(30,751)) \\ &= 33593,34765 \text{ N} \\ &= 33,59334765 \text{ kN}\end{aligned}$$

- Beton mengalami tekan

$$\begin{aligned}C_c &= 0,85f'_c ab && \dots\dots\dots(\text{pers. 2.35}) \\ &= 0,85(34,11)(0,85)(52,6488)(150,13) \\ &= 175609,9073 \text{ N} \\ &= 175,6099073 \text{ kN}\end{aligned}$$

- Tulangan 2 – Ø 10 mengalami tarik

$$\frac{\epsilon_{s2}}{(125,07 - 52,6488)} = \frac{0,004}{52,6488}$$

$$\epsilon_{s2} = 0,005501831 > f_y = 0,0012$$

Karena regangan pada tulangan baja 2 Ø 10 lebih besar dari pada regangan leleh bajanya sehingga dipakai tegangan dimana $f_y = 240$

$$\begin{aligned}T_1 &= A_{s2}(f_{s2} - 0,85f'_{cc}) && \dots\dots\dots(\text{pers. 2.37}) \\ &= 157,0796327 \cdot [240 - 0,85(30,75071376)] \\ &= 33593,34765 \text{ N}\end{aligned}$$

$$= 33,59334765 \text{ kN}$$

- CFRP mengalami tarik

$$\begin{aligned} \varepsilon_{CFRP} &= \frac{0,004}{x} (150,13 - x) \\ &= \frac{0,004}{52,6488} (150,13 - 52,6488) \end{aligned}$$

$$= 0,007406148 > \varepsilon_j = 0,004, \text{ sehingga dipakai } f_j = 920 \text{ Mpa}$$

$$F = A_j F_j \quad \text{.....(pers. 2.37)}$$

$$= (0,13)(150,13). (920)$$

$$= 17955,548 \text{ N}$$

$$= 17,955548 \text{ kN}$$

- Momen yang terjadi pada daerah eksentrisitas kolom

Dari nilai tinggi garis netral $x = 52,6488 \text{ mm}$, didapat nilai-nilai sebagai berikut :

$$a = \beta \cdot x \quad \text{.....(pers. 2.34)}$$

$$= 0,85 \cdot 52,6488$$

$$= 44,7515 \text{ mm}$$

$$z_1 = 75,07 - \frac{a}{2} \quad \text{.....(pers. 2.40a)}$$

$$= 52,6943 \text{ mm}$$

$$z_2 = c - d' \quad \text{.....(pers. 2.40b)}$$

$$= 50 - e = 15 \text{ mm}$$

$$z_3 = 50 + e \quad \text{.....(pers. 2.40c)}$$

$$= 50 + 35$$

$$= 85 \text{ mm}$$

$$z_4 = b - 40,07 \quad \text{.....(pers. 2.40c)}$$

$$= 150,13 - 40,07$$

$$= 110,07 \text{ mm}$$

$$M_n = C_{s1}(z_2) + C_c(z_1) + T(z_3) + F(z_4) \quad \dots\dots\dots(\text{pers. 2.39})$$

$$= 33593,34765 (15) + 227104,6422 (52,6943) + 33593,34765(85) + 17955,548 (110,07)$$

$$= 14589156,4941 \text{ Nmm}$$

$$\bar{M}_R = \phi \bar{M}_n = (0,65)(14589156,4941)$$

$$= 9482951,7212 \text{ Nmm}$$

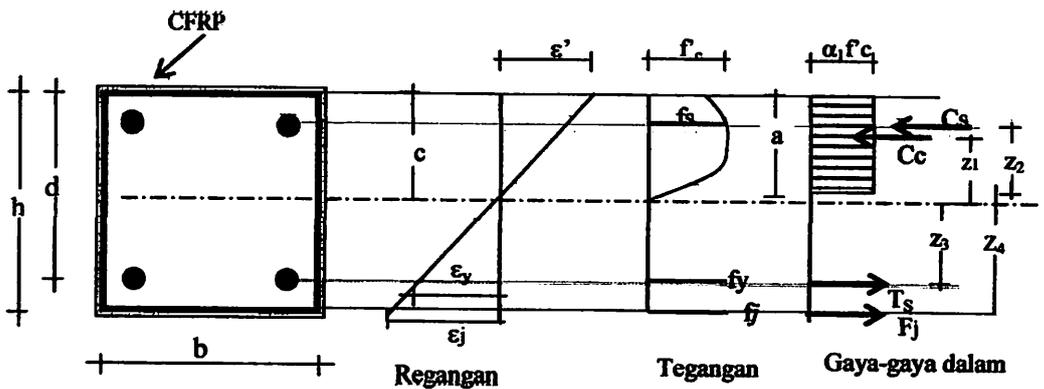
➤ Beban aksial yang terjadi pada pusat eksentrisitas kolom

$$P_n = \frac{9482951,7212}{35}$$

$$= 270,9414777 \text{ kN}$$

4) Titik 4. Keadaan seimbang ($\bar{M}_{nbalanced}$; $\bar{P}_{nbalanced}$)

Dimana keadaan ini regangan maksimum saat terluar dari beton tak terkekang adalah 0,003 sedangkan beton terkekang dengan CFRP dicari. Baja tulangan dianggap telah mengalami leleh regangan 0,0012. Dari hubungan ini diperoleh nilai dari garis netral balanced (x_b) dengan rumus perbandingan segi tiga.



Gambar 3.13. Diagram regangan dan tegangan serta gaya-gaya dalam pada titik 4 kolom terkekang CFRP (KP2)

- Tegangan untuk Beton yang tidak terkekang tulangan Transversal atau berada pada kekangan CFRP adalah $f_{cc}' = 30,75071376 \text{ N/mm}^2$

$$\varepsilon'_{cu} = 0,004 + \frac{2,5\rho_{ss}f_{uj}\varepsilon_{uj}}{f_{cc}'} \quad \dots\dots\dots(\text{pers. 2.27})$$

$\varepsilon_{uj} = \varepsilon_t =$ direncanakan $0,004$ sehingga;

$$f_j = 0,004 \varepsilon_j = 0,004(230000) = 920 \text{ MPa}$$

$$\rho_{ss} = \frac{4t_j}{D} = \frac{4(0,13)}{150,13} = 0,003464$$

$$f_{cc}' = 30,75071376 \text{ MPa}$$

$$\varepsilon_{cu} = 0,004 + \frac{2,5(0,003464)(920)(0,004)}{30,75071376}$$

$= 0,00493$ (regangan terlindung CFRP daerah tekan).

Garis netral (x_b) dicari dengan menggunakan perbandingan segi tiga,

regangan beton $\varepsilon_c = 0,003$ (daerah tarik).

$$\frac{x_b}{0,00493} = \frac{b}{(0,00493 + 0,004)}$$

$$x_b = \frac{150,13}{(0,00493 + 0,004)} (0,00493)$$

$$x = 82,90305141 \text{ mm}$$

- Tulangan 1 Ø 10 mengalami tekan.

$$\frac{\varepsilon_{s1}}{(90,2234 - 25,07)} = \frac{0,0045182}{82,90305141}$$

$$\varepsilon_{s1} = 0,003441361 > \varepsilon_y = 0,0012$$

Pakai $f_{s1} = f_y = 240 \text{ MPa}$

$$C_{s1} = A_s'(f_y - 0,85f_{cc}') \quad \dots\dots\dots(\text{pers. 2.46})$$

$$= 157,0796327 \cdot (240 - 0,85(30,75071376))$$

$$= 33593,34765 \text{ N}$$

➤ Beton mengalami tekan

$$C_c = 0,85f'_{cc}ab \quad \text{.....(pers. 2.44)}$$

$$= 0,85(34,11)(0,85)(82,90305141)(150,13)$$

$$= 276522,8681 \text{ N}$$

➤ Tulangan 2 - $\emptyset 10$ mengalami tarik

$$\frac{\epsilon_{s2}}{(125,07 - 82,90305141)} = \frac{0,0045182}{82,90305141}$$

$$\epsilon_{s2} = 0,0025086$$

$$\epsilon_{s2} > \epsilon_y = 0,0012, \text{ pakai } f_y = 240 \text{ Mpa}$$

$$T = A_{s2}(f_{s2} - 0,85f'_{cc}) \quad \text{.....(pers. 2.47)}$$

$$= 157,0796327[240 - 0,85(30,75071376)]$$

$$= 33593,34765 \text{ N}$$

$$= 33,59334765 \text{ kN}$$

➤ CFRP mengalami tarik

$$\epsilon_{CFRP} = \frac{0,004}{x} (150,13 - x)$$

$$= \frac{0,004}{82,90305141} (150,13 - 82,90305141)$$

$$0,004 = \epsilon_{ju} = 0,004$$

$$F = A_j F_j \quad \text{.....(pers. 2.48)}$$

$$= (0,13)(150,13) \cdot (0,0040)(230000)$$

$$= 17955,548 \text{ N}$$

$$= 17,955548 \text{ kN}$$

Beban aksial seimbang yang terjadi pada kolom

$$P_{\text{balanced}} = C_{s1} + C_c - T - F \quad \text{.....(pers. 2.49)}$$

$$= 33593,34765 + 276522,8681 - 33593,34765 - 17955,548$$

$$= 191380,6248 \text{ N}$$

Momen seimbang yang terjadi pada kolom

$$M_{bal} = C_{s1}(50) + C_c \left(75,07 - \frac{0,85x}{2} \right) - T(50) - F(75,07)$$

$$= 33593,34765 (50) + 276522,8681 (39,8362)$$

$$- 33593,34765(50) - 17955,548 (75,07)$$

$$= 9667787,938 \text{ Nmm}$$

$$e = \frac{M_{balanced}}{P_{balanced}}$$

$$= \frac{9667787,938}{191380,6248}$$

$$e = 50,51602245 \text{ mm}$$

Eksentrisitas dalam keadaan seimbang, maka $e_b + 75,07 = 125,5860 \text{ mm}$

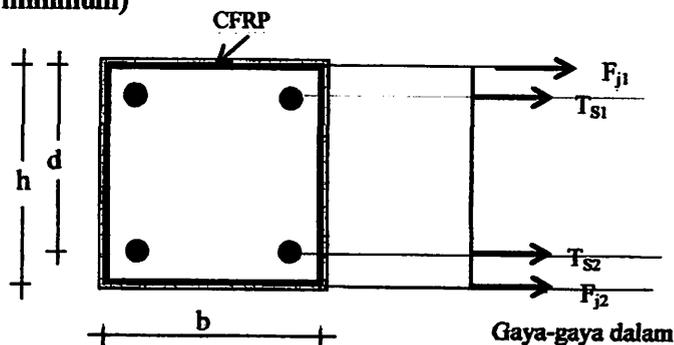
$$\phi \bar{P}_b = 0,65 \cdot (191380,6248) = 124397,4061 \text{ N}$$

$$= 124,3974061 \text{ kN}$$

$$\bar{M}_R = \phi \bar{P}_b e_b = 124397,4061 (125,5860) = 15622575,4373 \text{ Nmm}$$

$$= 15,6225754373 \text{ kNm}$$

5) Titik 5. Eksentrisitas besar ($\bar{M}_n = 0$; $\bar{P}_n =$ aksial tarik maksimum atau tekan minimum)



Gambar 3.14. Diagram regangan dan tegangan serta gaya-gaya dalam pada titik 5 kolom terkekang CFRP (KP2)

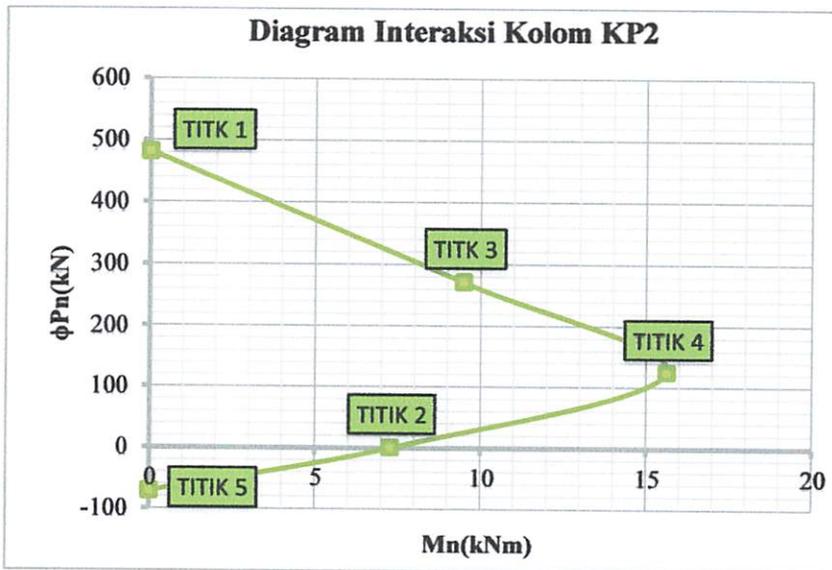
Beban aksial yang bekerja pada kolom

$$\begin{aligned}
 \phi P_n &= \phi P_{n(\text{maks})} \\
 &= (0,65) \cdot [f_y A_{st} + A_f f_j] \\
 &= -(0,65) \cdot [(240 \cdot 157,0796327) + (4 \cdot 0,13 \cdot 150,13 \cdot 920)] \\
 &= -71188,8475 \text{ N} \\
 &= -71,1888475 \text{ kN}
 \end{aligned}$$

Dari hasil perhitungan yang diatas, maka perhitungannya dapat tabulasi dalam tabel berikut :

Tabel 3.3. Peningkatan Kuat beban aksial dan momen pada kolom tekekang CFRP (KP2)

e (mm)	Kuat Beban Aksial ϕP_n (kN)	Kuat Momen $\phi P_n e$ (kNm)
0	448,766	0
kecil	0	7,273923065
35	270,9414777	9,482951721
123,454	124,3974061	15,62257544
besar	-71,1888475	0



Grafik 3.2. Diagram interaksi kolom tekekang CFRP (KP2)

c. Kolom Terkekang Tulangan BJTP Ø6 (KP3)

Kolom Bujur sangkar memiliki karakteristik sebagai berikut :

Dimensi Kolom	: 150 mm x 150 mm
Kuat Tekan (f'_c)	: 22,5 Mpa
Diameter Tulangan Longitudinal	: 10 mm
Diamter tulangan sengkang	: 6 mm
f_y tulangan longitudinal	: 240 Mpa
f_{yh} tulangan sengkang	: 240 Mpa
Jarak Tulangan Sengkang	: 100 mm
Regangan beton tak terkekang	: 0,003
Modulus Elastisitas beton (E_s)	: 2×10^5
Tebal selimut Beton	: 20 mm

Dari data diatas, maka kekuatan kolom beton bujur sangkar dapat dihitung dengan cara sebagai berikut :

- Penambahan Kuat tekan beton akibat Kekangan Tulangan Transversal

Tulangan transversal yang terpasang pada kolom KP3 adalah Ø6 –100.

Rasio tulangan transversal yang terpasang adalah :

$$\begin{aligned} \rho_{sterpasang} &= \frac{4A_{sp}}{D'_c \cdot s} \\ &= \frac{4 \left(\frac{1}{4}\right) \pi \cdot \varnothing^2}{D'_s} = \frac{\pi(6)^2}{110 (100)} \\ &= 0,0103 \end{aligned}$$

$$\rho_x = \rho_y = 0,0103$$

$$f'_{lx} = K_e \cdot \rho_x \cdot f_{yh} \dots\dots\dots(\text{pers. 2.19})$$

$$f'_{ly} = K_e \cdot \rho_y \cdot f_{yh}$$

$$K_e = 0,75$$

$$f'_{lx} = f'_{ly} = 0,75 \times 0,0103 \times 240 \\ = 1,854 \text{ MPa}$$

$$\frac{f'_{lx}}{f'_c} = \frac{f'_{ly}}{f'_c} = \frac{1,854}{24,52} = 0,0824$$

$$K = 1 + 2,05 \rho_s \left(\frac{f_{yh}}{f'_c} \right) \quad \dots\dots\dots(\text{pers. 2.21})$$

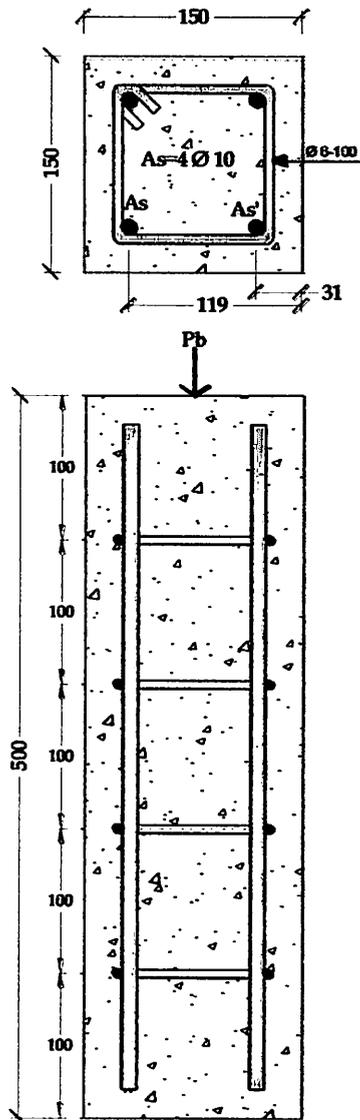
$$K = 1 + 2,05 \times 0,0103 \times \left(\frac{240}{22,5} \right) = 1,225$$

$$K = \frac{f'_{\alpha}}{f'_c}$$

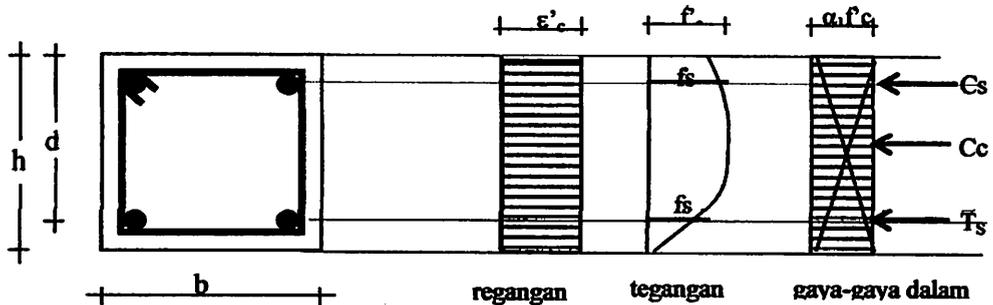
$$f'_{\alpha} = \bar{K} \cdot f'_c$$

$$f'_{\alpha} = 1,225 \times 22,5 = 27,57 \text{ MPa}$$

1) Titik 1. Ekstrensitas kecil ($M_n = 0$; $P_n =$ Aksial tekan Maksimum)



Gambar 3.15 Penampang Kolom Terkekang Tulangan BJTP Ø6 (KP3)



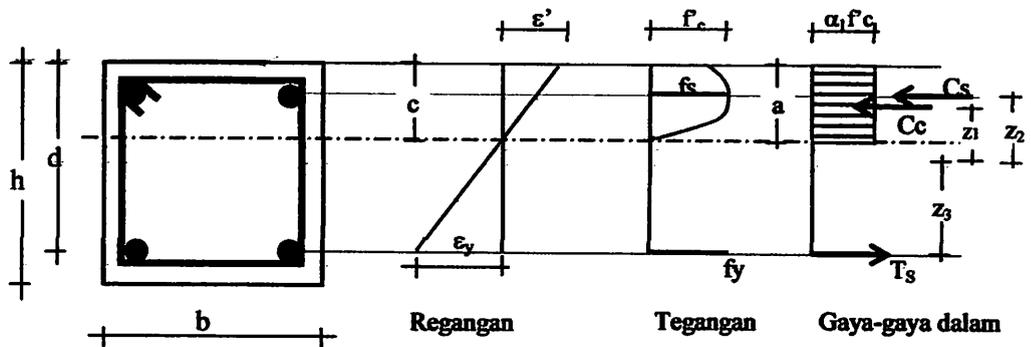
Gambar 3.16. Diagram regangan dan tegangan serta gaya-gaya dalam pada titik 1 kolom terkekang BJTP Ø6 (KP3)

Beban Aksial yang bekerja pada kolom

$$\begin{aligned} \phi P_n &= \phi P_n (\text{maks}) = 0,80 \cdot \phi \cdot \{0,85 \cdot f'_c \cdot (A_g - A_{st}) + f_y \cdot A_{st}\} \quad \dots(\text{pers. 2.41}) \\ &= 0,8 \cdot 0,65 \cdot \{0,85 \cdot 27,57 \cdot (22500 - 314,1593) + 240 \cdot 314,1593\} \\ &= 345753,5556 \text{ N} \\ &= 345,7535556 \text{ kN} \end{aligned}$$

2) Titik 2. Momen Lentur Murni ($M_{\text{murni}} = \text{Maksimum}; P_n = 0$)

Kolom seperti ini tidak mengalami aksial atau sama dengan 0, disebut juga dengan *full beam condition*.



Gambar 3.17. Diagram regangan dan tegangan serta gaya-gaya dalam pada titik 2 kolom terkekang BJTP Ø6 (KP3)

➤ Tulangan 1- Ø 10 mengalami tekan

$$\begin{aligned} \bar{C}_{s1} &= A_{s1}(f_y - 0,85 f'_c) \quad \dots\dots\dots(\text{pers. 2.36}) \\ &= 157,0796[240 - 0,85(22,5)] \\ &= 33148,83165 \text{ N} \end{aligned}$$

➤ Beton mengalami tekan

$$\begin{aligned} C_c &= 0,85 f'_{cc} a \cdot b \quad C_c = 0,85 f'_{cc} a \cdot b \quad \dots\dots\dots(\text{pers. 2.35}) \\ &= 0,85(27,57)(0,85 \cdot x)(150) \\ &= 2970,440097x \end{aligned}$$

- Tulangan 2- Ø 10 mengalami tarik

$$\frac{\varepsilon_{s2}}{(119 - x)} = \frac{0,003}{x}$$

$$\varepsilon_{s2} = \frac{0,003}{x} (119 - x)$$

$$T = A_{s2}(f_{s2} - 0,85f'c) \quad \dots\dots\dots(\text{pers. 2.37})$$

$$= 157,0796327 \left[\frac{0,003}{x} (119 - x) 200000 - 0,85(22,5) \right]$$

$$= 157,0796327 \left[\frac{71400 - 600x}{x} - 19,125 \right]$$

$$= \frac{11215485,77 - 94247,780x}{x} - 3004,148$$

- Garis netral, x dicari dengan persamaan gaya aksial sama dengan 0

(nol)

$$\Sigma V = 0$$

$$C_{s1} + C_c - T = 0 \quad \dots\dots\dots(\text{pers. 2.38})$$

$$33148,83 + 2970,440097x$$

$$- \left[\frac{11215485,77 - 94247,880x}{x} - 3004,148 \right] = 0$$

Dari hasil iterasi didapat nilai $x = 43,3$ mm

Jadi tinggi garis netral = 43,3 mm. Hasil garis netral ini diinput kembali kepersamaan sebelumnya

- Tulangan 1- Ø10 tertekan

$$\frac{\varepsilon_{s1}}{(43,3 - 31)} = \frac{0,003}{43,3}$$

$$\varepsilon_{s1} = 0,000852194$$

$$\varepsilon_{s1} = 0,000852194 < \varepsilon_y = 0,0012$$

Karena regangan pada tulangan baja 1 - Ø 10 lebih kecil dari pada regangan leleh bajanya sehingga dipakai tegangan (f_{st}), dimana $f_{st} < f_y$.

$$C_{s1} = A_{s1}(f_{s1} - 0,85f'_c) \quad \text{.....(pers. 2.36)}$$

$$= 157,0796327 \cdot (0,000852194 \cdot 200000 - 0,85(22,5))$$

$$= 23768,31598 \text{ N}$$

➤ Beton mengalami tekan

$$C_c = 0,85f'_c a \cdot b \quad \text{.....(pers. 2.35)}$$

$$= 0,85(27,57)(0,85 \cdot 43,3)(150)$$

$$= 128620,0562 \text{ N}$$

➤ Tulangan 2 - Ø 10 mengalami tarik

$$\epsilon_{s2} = \frac{0,003}{x}(119 - x)$$

$$= \frac{0,003}{43,3}(119 - 43,3)$$

$$= 0,005244804 > \epsilon_y = 0,0012.$$

Tegangan yang dipakai $f_{s2} = f_y = 240 \text{ MPa}$.

$$T = A_{s2}(f_2 - 0,85f_c) \quad \text{.....(pers. 2.38)}$$

$$= 157,0796327 \cdot [240 - 0,85(22,5)]$$

$$= 34694,96387 \text{ N}$$

$$= 34,69496387 \text{ kN}$$

➤ Momen yang terjadi pada kolom

Dari nilai tinggi garis netral diatas (x), didapat nilai-nilai sebagai berikut :

$$a = \beta \cdot x \quad \dots\dots\dots(\text{pers. 2.34})$$

$$= 0,85 \cdot 43,3$$

$$= 36,8050 \text{ mm}$$

$$z_1 = c - \frac{a}{2} \quad \dots\dots\dots(\text{pers. 2.40a})$$

$$= 75 - \frac{36,8050}{2} = 56,5975 \text{ mm}$$

$$z_2 = c - d' \quad \dots\dots\dots(\text{pers. 2.40b})$$

$$= 75 - 31 = 44 \text{ mm}$$

$$z_3 = d - c \quad \dots\dots\dots(\text{pers. 2.40c})$$

$$= 119 - 75 = 44 \text{ mm}$$

$$M_n = C_{s1}(z_2) + C_c(z_1) - T \cdot (z_3) \quad \dots\dots\dots(\text{pers. 2.39})$$

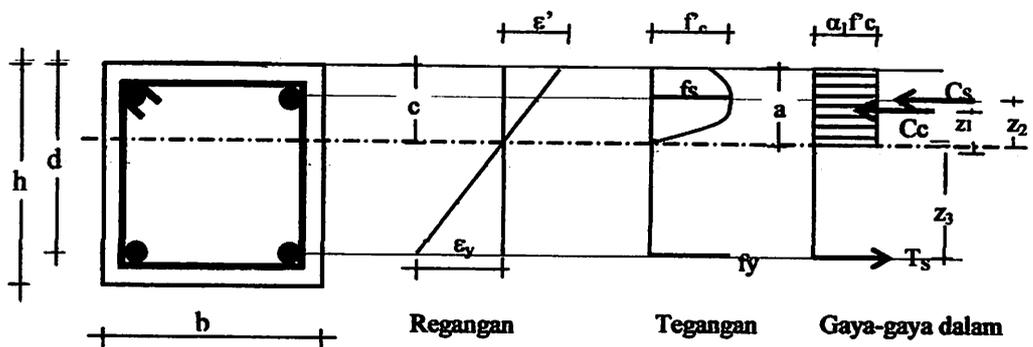
$$M_n = 23768,31598(44) + 128620,0562 (56,5975) - 34694,96387 (44)$$

$$= 6798801,123 \text{ Nmm}$$

$$= 6,798801123 \text{ kNm}$$

$$M_R = \phi M_n = (0,65) (6,798801123) = 4,41922073 \text{ kNm}$$

3) Titik 3 : Eksentrisitas, $e = 35 \text{ mm}$



Gambar 3.18. Diagram regangan dan tegangan serta gaya-gaya dalam pada titik 3 kolom terkekang BJTP Ø6 (KP3)

- Tulangan 1- Ø 10 mengalami tekan

$$C_{s1} = A_{s1}(f_y - 0,85 f'_c) \quad \text{.....(pers. 2.36)}$$

$$= 157,0796[240 - 0,85(22,5)]$$

$$= 33148,83165 N$$

- Beton mengalami tekan

$$C_c = 0,85 f'_c a \cdot b \quad \text{.....(pers. 2.35)}$$

$$= 0,85(27,57)(0,85 \cdot x)(150)$$

$$= 2970,440097x$$

- Tulangan 2- Ø 10 mengalamai tarik

$$\frac{\epsilon_{s2}}{(119 - x)} = \frac{0,003}{x}$$

$$\epsilon_{s2} = \frac{0,003}{x}(119 - x)$$

$$T = A_{s2}(f_{s2} - 0,85 f'_c) \quad \text{.....(pers. 2.37)}$$

$$= 157,0796327 \left[\frac{0,003}{x}(119 - x)200000 - 0,85(22,5) \right]$$

$$= 157,0796327 \left[\frac{71400 - 600x}{x} - 19,125 \right]$$

$$= \frac{11215485,77 - 94247,780x}{x} - 3004,148$$

- Momen yang terjadi pada kolom

Daerah momen sangat kecil yang terjadi pada daerah plastis. Daerah momen tersebut bergeser kedaerah ekentrisitas, $e = 35 \text{ mm}$.

Untuk mencari tinggi garis netral, digunakan Persamaan :

$$\Sigma M = 0$$

$$C_{s1}(z_2) + C_c(z_1) - T(z_3) = 0 \quad \text{.....(pers. 2.39)}$$

$$33148,83165 (44) + 2970,440097x \left(75 - \frac{0,85x}{2}\right) - \left[\frac{11215485,77 - 94247,780x}{x} - 3004,148\right] \cdot (44) = 0$$

Dari hasil iterasi didapat nilai $x = 39,3307$ mm

Jadi tinggi garis netral = 39,3307 mm

Hasil garis netral diatas diinput kembali kepersamaan sebelumnya

➤ Tulangan 1- Ø10 tertekan

$$\frac{\varepsilon_{s1}}{(x - 31)} = \frac{0,003}{x}$$

$$\frac{\varepsilon_{s1}}{(39,3307 - 31)} = \frac{0,003}{39,3307}$$

$$\varepsilon_{s1} = 0,000635435$$

$$\varepsilon_{s1} = 0,000635435 < \varepsilon_y = 0,0012$$

Karena regangan pada tulangan baja 1 - Ø 10 lebih kecil dari pada regangan leleh bajanya sehingga dipakai tegangan (f_{st}),

dimana $f_{st} < f_y$.

$$C_{s1} = A_{s1}(f_{s1} - 0,85f'c) \quad \text{.....(pers. 2.36)}$$

$$= 157,0796327 \cdot (0,000635435 \cdot 200000 - 0,85(22,5))$$

$$= 16958,62863 \text{ N}$$

➤ Beton mengalami tekan

$$C_c = 0,85f'_{cc} a \cdot b \quad \text{.....(pers. 2.35)}$$

$$= 0,85(27,57)(0,85 \cdot x)(150)$$

$$= 0,85(27,57)(0,85 \cdot 39,3307)(150)$$

$$= 116829,4883 \text{ N}$$

- Tulangan 2 - Ø 10 mengalami tarik

$$\epsilon_{s2} = \frac{0,003}{x} (119 - x)$$

$$\epsilon_{s2} = \frac{0,003}{39,3307} (119 - 39,3307)$$

$$= 0,006076879 > \epsilon_y = 0,0012.$$

Tegangan yang dipakai $f_{s2} = f_y = 240$ MPa.

$$\bar{T} = A_{s2}(f_2 - 0,85f_c) \quad \text{.....(pers. 2.37)}$$

$$= 157,0796327 \cdot [240 - 0,85(22,5)]$$

$$= 34694,96387 \text{ N}$$

$$= 34,69496387 \text{ kN}$$

- Momen yang terjadi pada daerah eksentrisitas kolom

Dari nilai tinggi garis netral $x = 39,3307$ mm, didapat nilai-nilai sebagai berikut :

$$a = \beta \cdot x \quad \text{.....(pers. 2.34)}$$

$$= 0,85 \cdot 39,3307$$

$$= 33,4311 \text{ mm}$$

$$z_1 = c - \frac{a}{2} \quad \text{.....(pers. 2.40a)}$$

$$= 75 - \frac{33,4311}{2} = 58,2845 \text{ mm}$$

$$z_2 = c - e \quad \text{.....(pers. 2.40b)}$$

$$= 40 - 31 = 9 \text{ mm}$$

$$z_3 = 50 + 35 \quad \text{.....(pers. 2.40c)}$$

$$= 79 \text{ mm}$$

$$M_n = C_{s1}(z_2) + C_c(z_1) - T \cdot (z_3) \quad \text{.....(pers. 2.39)}$$

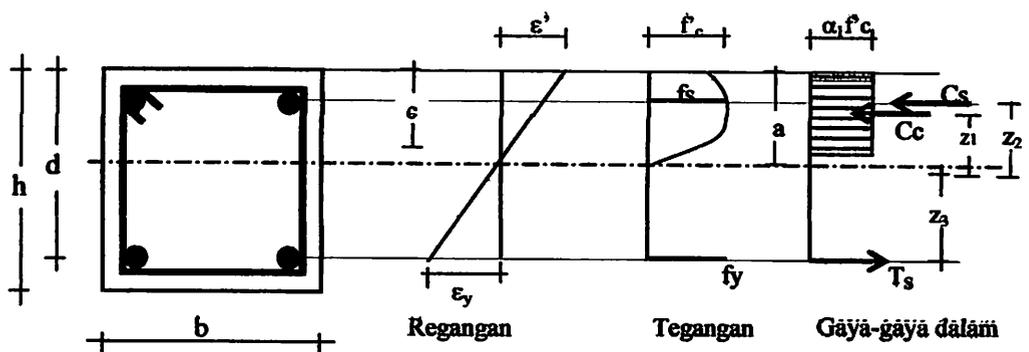
$$\begin{aligned}
&= 16958,62863 (9) + 116829,4883(59,2699) + 34694,96387(79) \\
&= 9702872,5660 \text{ Nmm} \\
&= 9,7028725660 \text{ kNm} \\
M_R &= \phi M_n = (0,65)(9702872,5660) \\
&= 6306867,1679 \text{ Nmm} \\
&= 6,3068671679 \text{ kNm}
\end{aligned}$$

➤ Beban aksial yang terjadi pada pusat eksentrisitas kolom

$$\begin{aligned}
P_n &= \frac{6,3068671679}{35} = 180196,2048 \text{ N} \\
&= 180,1962048 \text{ kN}
\end{aligned}$$

4) Titik 4. Keadaan seimbang ($\bar{M}_{nbalanced}$; $\bar{P}_{nbalanced}$)

Dimana regangan maksimum saat terluar dari beton tak terkekang adalah 0,003 sedangkan beton terkekang tulangan transversal regangan dicari. Baja tulangan dianggap telah mengalami leleh regangan 0,0012. Dari hubungan ini diperoleh nilai dari garis netral balanced (x_b) dengan rumus perbandingan segi tiga.



Gambar 3.19. Diagram regangan dan tegangan serta gaya-gaya dalam pada titik 4 kolom terkekang BJTP Ø6 (KP3)

➤ Beton yang terkekang tulangan Transversal

$$\varepsilon_{cu} = 0,004 + 1,4 \cdot \rho_s \cdot \frac{f_{yh} \varepsilon_{su}}{f'_{cc}}$$

$$\rho_s = \frac{4A_{sp}}{D's} = \frac{4 \left(\frac{1}{4}\right) \pi D_{sp}^2}{D's} = \frac{\pi(6)^2}{133(100)} = 0,008503559$$

$$\varepsilon_{su} = \frac{f_{yh}}{E_s} = \frac{240}{200000} = 0,0012$$

$$\varepsilon_{cu} = 0,004 + \frac{1,4(0,008503559)(240)(0,0012)}{27,57}$$

$$= 0,0041251$$

Nilai ini digunakan sebagai nilai jarak perbandingan.

$$\frac{x}{0,0041251} = \frac{(119 - x)}{0,003}$$

$$x = 92,18356194 \text{ mm}$$

Jadi garis netral berada pada jarak 92,18356194 mm

➤ Tulangan 1- Ø 10 mengalami tekan.

$$\frac{\varepsilon_{s1}}{(x - 31)} = \frac{\varepsilon_{cu}}{x}$$

$$\frac{\varepsilon_{s1}}{(92,18356194 - 31)} = \frac{0,0041251}{92,18356194}$$

$$= 0,002737883 > \varepsilon_y = 0,0012$$

Karena regangan pada tulangan baja 1 - Ø 10 lebih besar dari pada regangan leleh bajanya sehingga dipakai tegangan (f_{st}),

dimana $f_{st} = f_y$.

$$C_{s1} = A_{s1}(f_{s1} - 0,85f'c) \quad \dots\dots\dots(\text{pers. 2.36})$$

$$= 157,0796327 \cdot (240 - 0,85(22,5))$$

$$= 34694,96387 \text{ N}$$

$$= 34,69496387 \text{ KN}$$

➤ Beton mengalami tekan

$$C_c = 0,85f'_{cc}ab \quad C_c = 0,85f'_{cc}ab \quad \dots\dots\dots(\text{pers. 2.35})$$

$$= 0,85(27,57)(0,85)(92,63647595)(150)$$

$$= 273825,7487 \text{ N}$$

➤ Tulangan 2 - $\phi 10$ mengalami tarik

$$\frac{\varepsilon_{s2}}{(119 - 92,18356194)} = \frac{0,0041251}{92,18356194}$$

$$\varepsilon_{s2} = 0,0012$$

$$\varepsilon_{s2} = \varepsilon_y = 0,0012$$

Regangan yang terjadi pada tulangan ini sama besar dengan tegangan luluh baja ($f_{s2} = f_y = 240 \text{ Mpa}$).

$$T = A_{s2}(f_{s2} - 0,85f'c) \quad \dots\dots\dots(\text{pers. 2.37})$$

$$= 157,0796327[240 - 0,85(22,5)]$$

$$= 34694,96387 \text{ N}$$

$$= 34694,96387 \text{ kN}$$

Beban aksial seimbang yang terjadi pada kolom

$$P_{\text{balanced}} = C_{s1} + C_c - T \quad \dots\dots\dots(\text{pers. 2.38})$$

$$= 34694,96387 + 273825,7487 - 34694,96387$$

$$= 273825,7487 \text{ N}$$

$$= 273,8257487 \text{ kN}$$

Momen seimbang yang terjadi pada kolom

$$M_{\text{balance}} = C_{s1}(z_2) + C_c(z_1) - T(z_3) \quad \dots\dots\dots(\text{pers. 2.39})$$

Tinggi blok tegangan (a)

$$a = \beta \cdot c \quad \dots\dots\dots(\text{pers. 2.34})$$

$$= 0,85 \cdot 92,18356194$$

$$= 78,3560 \text{ mm}$$

$$z_1 = c - \frac{a}{2} \quad \text{.....(pers. 2.40a)}$$

$$= 75 - \frac{78,3560}{2} = 35,8220 \text{ mm}$$

$$z_2 = c - d' \quad \text{.....(pers. 2.40b)}$$

$$= 75 - 31 = 44 \text{ mm}$$

$$z_3 = d - c \quad \text{.....(pers. 2.40c)}$$

$$= 119 - 75 = 44 \text{ mm}$$

$$= 34694,96387 (44) + 273825,7487(35,8220) - 34694,0316 \cdot (44)$$

$$= 9808982,183 \text{ Nmm}$$

$$= 9,808982183 \text{ kNm}$$

$$M_{balanced} = P_{balanced} \cdot e$$

$$9808982,183 = 273825,7487 \cdot e$$

$$e = 35,82198617 \text{ mm}$$

eksentrisitas dalam keadaan seimbang, maka $e_b = e + \bar{75}$

$$e_b = 110,8219862 \text{ mm}$$

$$\phi \bar{P}_b = 0,65 (273825,7487) = 72111,44617 \text{ N}$$

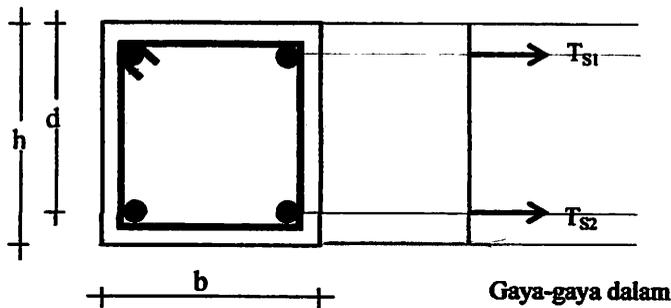
$$= 72,11144617 \text{ kN}$$

$$\bar{M}_R = \phi \bar{P}_b e_b = 72111,44617 \cdot (110,6294977)$$

$$M_R = 7991533,6899 \text{ Nmm}$$

$$= 7,9915336899 \text{ kNm}$$

- 5) Titik 5. Eksentrisitas besar ($M_n = 0$; $P_n =$ aksial tarik maksimum atau tekan minimum)



Gambar 3.20. Diagram regangan dan tegangan serta gaya-gaya dalam pada titik 5 kolom terkekang BJTP Ø6 (KP3)

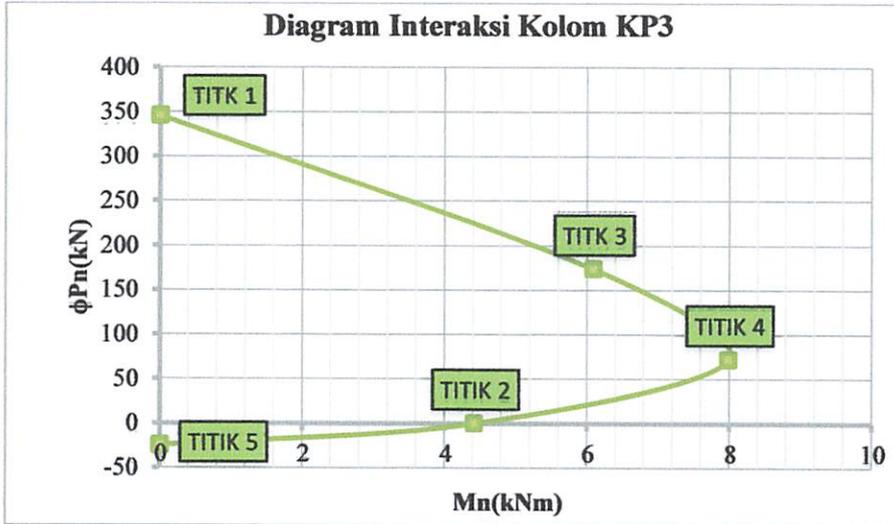
- Beban aksial yang bekerja pada kolom

$$\begin{aligned} \phi P_n &= \phi P_{n(\text{maks})} \\ &= (0,65) \cdot [f_y \cdot A_{st}] \\ &= (0,65) \cdot [-(240)(157,0796327)] \\ &= -24504,4227 \text{ N} \\ &= -24,5044227 \end{aligned}$$

Dari hasil perhitungan yang diatas, maka perhitungannya dapat tabulasi dalam tabel berikut :

Tabel 3.4. Peningkatan Kuat beban aksial dan momen pada kolom terkekang tulangan BJTP Ø 6 (KP3)

e (mm)	Kuat Beban Aksial ϕP_n (kN)	Kuat Momen $\phi P_n e$ (kNm)
0	345,754	0
Kecil	0	4,41922073
35	173,9751589	6,089130563
110,8219862	72,11144617	7,99153369
besar	-24,5044227	0



Grafik 3.3. Diagram interaksi kolom terkekang tulangan BJTP $\varnothing 6$ (KP3)

d. Peningkatan Kuat Tekan dan Kuat Momen Kolom Terkekang BJTP $\varnothing 8$ (KP4)

Kolom Bujur sangkar memiliki karakteristik sebagai berikut :

Dimensi Kolom	: 150 mm x 150 mm
Kuat Tekan (f^c)	: 22,5 Mpa
Diameter Tulangan Longitudinal	: 10 mm
Diamter tulangan sengkang	: 8 mm
f_y tulangan longitudinal	: 240 Mpa
f_{yh} tulangan sengkang	: 240 Mpa
Jarak Tulangan Sengkang	: 100 mm
Regangan beton tak terkekang	: 0,003
Modulus Elastisitas beton (E_s)	: 2×10^5
Tebal selimut Beton	: 20 mm

Dari data diatas, maka kekuatan kolom beton bujur sangkar dapat dihitung dengan cara sebagai berikut :

➤ Penambahan Kuat Tekan Beton Akibat Kekangan tulangan transversal

$$\rho_{sterpasang} = \frac{4A_{sp}}{D'_c \cdot s}$$

$$= \frac{4 \left(\frac{1}{4}\right) \pi \cdot \emptyset^2}{D'_s} = \frac{\pi(8)^2}{110(100)}$$

$$= 0,01828$$

$$\rho_x = \rho_y = 0,01828$$

$$f'_{lx} = K_e \cdot \rho_x \cdot f_{yh} \quad \dots\dots\dots(\text{pers. 2.19})$$

$$f'_{ly} = K_e \cdot \rho_y \cdot f_{yh}$$

$$K_e = 0,75$$

$$f'_{lx} = f'_{ly} = 0,75 \times 0,01828 \times 240$$

$$= 3,29 \text{ MPa}$$

$$\frac{f'_{lx}}{f'_c} = \frac{f'_{ly}}{f'_c} = \frac{3,29}{22,5} = 0,146$$

$$K = 1 + 2,05 \rho_s \left(\frac{f_{yh}}{f'_c} \right) \quad \dots\dots\dots(\text{pers. 2.21})$$

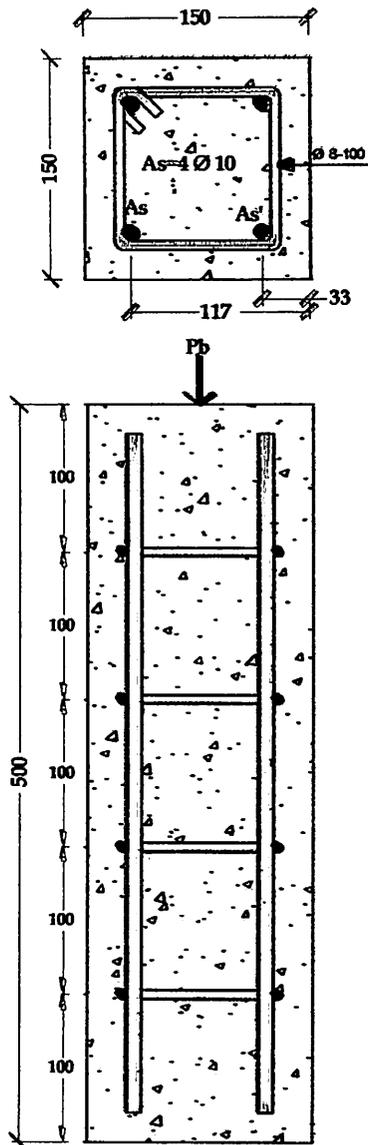
$$K = 1 + 2,05 \times 0,01828 \times \left(\frac{240}{22,5} \right) = 1,4$$

$$K = \frac{f'_\alpha}{f'_c}$$

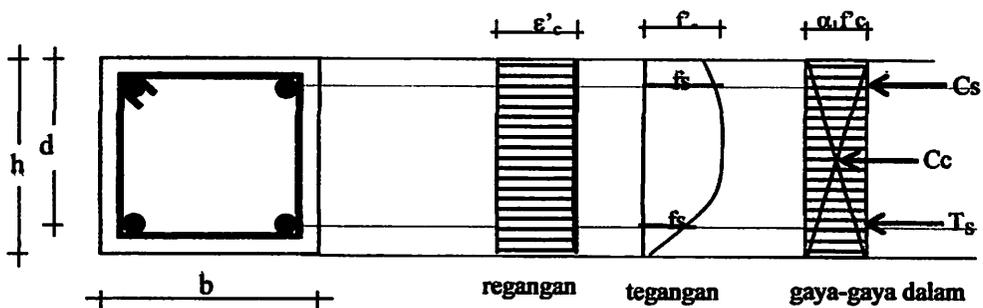
$$f'_\alpha = K \cdot f'_c$$

$$f'_\alpha = 1,4 \times 22,5 = 31,49 \text{ MPa}$$

1) Titik 1. Ekstrensitas kecil ($M_n = 0$; $P_n =$ Aksial tekan Maksimum)



Gambar 3.21. Gambar Penampang Kolom terkekang tulangan BJTP Ø8 (KP4)



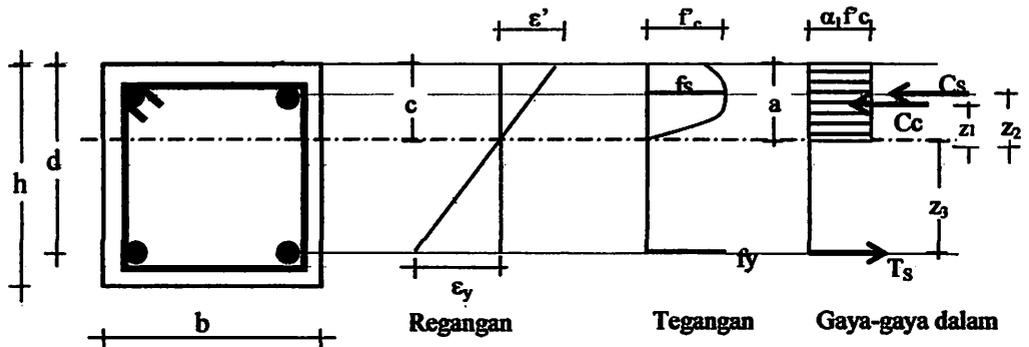
Gambar 3.22. Diagram regangan dan tegangan serta gaya-gaya dalam pada titik 1 kolom terkekang BJTP Ø8 (KP4)

Beban Aksial yang bekerja pada kolom

$$\begin{aligned} \phi P_n &= \phi P_n \text{ (maks)} = 0,80 \cdot \phi \cdot \{0,85 \cdot f'_c \cdot (A_g - A_{st}) + f_y \cdot A_{st}\} \dots \text{(pers. 2.41)} \\ &= 0,8 \cdot 0,65 \cdot \{0,85 \cdot 31,494 \cdot (22500 - 314,1593) + 240 \cdot 314,1593\} \\ &= 384232,8552 \text{ N} \\ &= 384,2328552 \text{ kN} \end{aligned}$$

2) Titik 2. Momen Lentur Murni ($M_{\text{murni}} = \text{Maksimum}; P_n=0$)

Kolom seperti ini tidak mengalami aksial atau sama dengan 0, disebut juga dengan *full beam condition*.



Gambar 3.23. Diagram regangan dan tegangan serta gaya-gaya dalam pada titik 2 kolom terkekang BJTP Ø8 (KP4)

Regangan kolom yang terkekang tulangan transversal

➤ Tulangan 1- Ø 10 mengalami tekan

$$\begin{aligned} C_{s1} &= A_{s1}(f_y - 0,85 f'_c) \dots \dots \dots \text{(pers. 2.36)} \\ &= 157,0796[240 - 0,85(22,5)] \\ &= 34694,497 \text{ N} \end{aligned}$$

➤ Beton mengalami tekan

$$\begin{aligned} C_c &= 0,85 f'_c a \cdot b \dots \dots \dots \text{(pers. 2.35)} \\ &= 0,85(31,494)(0,85 \cdot x)(150) \\ &= 3334,051509x \end{aligned}$$

- Tulangan 2- Ø 10 mengalami tarik

$$\frac{\epsilon_{s2}}{(117 - x)} = \frac{0,003}{x}$$

$$\epsilon_{s2} = \frac{0,003}{x} (117 - x)$$

$$T = A_{s2}(f_{s2} - 0,85f'c) \quad \text{.....(pers. 2.37)}$$

$$= 157,0796327 \left[\frac{0,003}{x} (117 - x) 200000 - 0,85(22,5) \right]$$

$$= 157,0796327 \left[\frac{70200 - 600x}{x} - 19,125 \right]$$

$$= \frac{11026990,22 - 94247,780x}{x} - 3004,148$$

- Garis netral, x dicari dengan persamaan gaya aksial sama dengan 0

(nol)

$$\Sigma v = 0$$

$$C_{s1} + C_c - T = 0 \quad \text{.....(pers. 2.38)}$$

$$34694,497 + 3334,05151x - \left[\frac{11026990,22 - 94247,880x}{x} - 3004,148 \right] = 0$$

Dari hasil iterasi didapat nilai $x = 41,5$ mm

Jadi tinggi garis netral = 41,5 mm. Hasil garis netral diatas diinput

kembali kepersamaan sebelumnya

- Tulangan 1- Ø10 tertekan

$$\frac{\epsilon_{s1}}{(41,5 - 33)} = \frac{0,003}{41,5}$$

$$\epsilon_{s1} = 0,000614458$$

$$\epsilon_{s1} = 0,000614458 < \epsilon_y = 0,0012$$

Karena regangan pada tulangan baja 1 - Ø 10 lebih kecil dari pada

regangan leleh bajanya sehingga dipakai tegangan (f_{st}),

dimana $f_{st} < f_y$.

$$C_{s1} = A_{s1}(f_{s1} - 0,85f'_c) \quad \text{.....(pers. 2.36)}$$

$$= 157,0796327 \cdot (0,000614458 \cdot 200000 - 0,85(22,5))$$

$$= 16299,61412 \text{ N}$$

➤ Beton mengalami tekan

$$C_c = 0,85f'_c a \cdot b \quad \text{.....(pers. 2.35)}$$

$$= 0,85(30,76402777)(0,85 \cdot x)(150)$$

$$= 0,85(31,494)(0,85 \cdot 41,5)(150)$$

$$= 138363,1376 \text{ N}$$

➤ Tulangan 2 - Ø 10 mengalami tarik

$$\varepsilon_{s2} = \frac{0,003}{x}(117 - x)$$

$$= \frac{0,003}{41,5}(117 - 41,5)$$

$$= 0,005457831 > \varepsilon_y = 0,0012.$$

Tegangan yang dipakai $f_{s2} = f_y = 240 \text{ MPa}$.

$$T = A_{s2}(f_2 - 0,85f_c) \quad \text{.....(pers. 2.38)}$$

$$= 157,0796327 \cdot [240 - 0,85(22,5)]$$

$$= 34694,96387 \text{ N}$$

$$= 34,69496387 \text{ kN}$$

➤ Momen yang terjadi pada kolom

Dari nilai tinggi garis netral diatas (x), didapat nilai-nilai sebagai berikut :

$$a = \beta \cdot x \quad \text{.....(pers. 2.34)}$$

$$= 0,85 \cdot 41,5$$

$$= 35,2750 \text{ mm}$$

$$z_1 = c - \frac{a}{2} \quad \dots\dots\dots(\text{pers. 2.40a})$$

$$= 75 - \frac{35,2750}{2} = 57,3625 \text{ mm}$$

$$z_2 = c - d' \quad \dots\dots\dots(\text{pers. 2.40b})$$

$$= 75 - 33 = 42 \text{ mm}$$

$$z_3 = d - c \quad \dots\dots\dots(\text{pers. 2.40c})$$

$$= 117 - 75 = 42 \text{ mm}$$

$$M_n = C_{s1} (z_2) + C_c (z_1) - T (z_3) \quad \dots\dots\dots(\text{pers. 2.39})$$

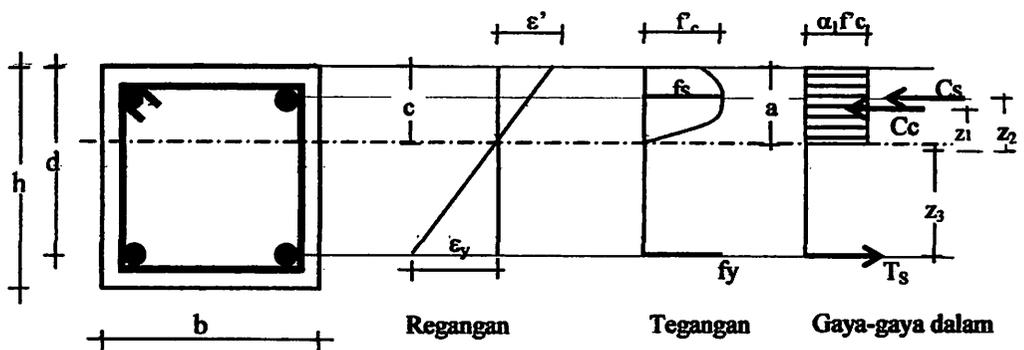
$$M_n = 16299,614 (42) + 138363,1376 (57,3625) - 34694,96387 (42)$$

$$= 7164250,793 \text{ Nmm}$$

$$= 7,164250793 \text{ kNm}$$

$$M_R = \phi M_n = (0,65)(7164250,793) = 4,656763015 \text{ kNm}$$

3) Titik 3 : Eksentrisitas, $e = 35 \text{ mm}$



Gambar 3.24. Diagram regangan dan tegangan serta gaya-gaya dalam pada titik 3 kolom terkekang BJTP Ø8 (KP4)

- Tulangan 1- Ø 10 mengalami tekan

$$\begin{aligned}
 C_{s1} &= A_{s1}(f_y - 0,85 f_c) && \text{.....(pers. 2.36)} \\
 &= 157,0796[240 - 0,85(22,5)] \\
 &= 34694,497 N
 \end{aligned}$$

- Beton mengalami tekan

$$\begin{aligned}
 C_c &= 0,85 f'_{cc} a \cdot b && \text{.....(pers. 2.35)} \\
 &= 0,85(31,494)(0,85 \cdot x)(150) \\
 &= 3334,051509x
 \end{aligned}$$

- Tulangan 2- Ø 10 mengalami tarik

$$\frac{\epsilon_{s2}}{(117 - x)} = \frac{0,003}{x}$$

$$\epsilon_{s2} = \frac{0,003}{x} (117 - x)$$

$$T = A_{s2}(f_{s2} - 0,85 f' c) \quad \text{.....(pers. 2.37)}$$

$$= 157,0796327 \left[\frac{0,003}{x} (117 - x) 200000 - 0,85(22,5) \right]$$

$$= 157,0796327 \left[\frac{70200 - 600x}{x} - 19,125 \right]$$

$$= \frac{11026990,22 - 94247,780x}{x} - 3004,148$$

- Momen yang terjadi pada kolom

Daerah momen sangat kecil yang terjadi pada daerah plastis. Daerah momen tersebut bergeser ke daerah ekentrisitas, $e = 35$ mm.

Untuk mencari tinggi garis netral, digunakan Persamaan :

$$\Sigma M = 0$$

$$C_{s1} (z_2) + C_c(z_1) - T(z_3) = 0 \quad \text{.....(pers. 2.39)}$$

$$34694,497(42) + 3334,051509x \left(75 - \frac{0,85x}{2} \right) - \left[\frac{11026990,2 - 94247,7796x}{x} - 3004,148 \right] \cdot (42) = 0$$

Dari hasil iterasi didapat nilai $x = 37,438$ mm

Jadi tinggi garis netral = 37,438 mm. Hasil garis netral diatas diinput kembali kepersamaan sebelumnya.

► Tulangan 1- Ø10 tertekan

$$\frac{\varepsilon_{s1}}{(x - 33)} = \frac{0,003}{x}$$

$$\frac{\varepsilon_{s1}}{(37,438 - 33)} = \frac{0,003}{37,438}$$

$$\varepsilon_{s1} = 0,000355628$$

$$\varepsilon_{s1} = 0,000355628 < \varepsilon_y = 0,0012$$

Karena regangan pada tulangan baja 1 - Ø 10 lebih kecil dari pada regangan leleh bajanya sehingga dipakai tegangan (f_{st}),

dimana $f_{st} < f_y$.

$$C_{s1} = A_{s1}(f_{s1} - 0,85f'c) \quad \text{.....(pers. 2.36)}$$

$$= 157,0796327 \cdot (0,000355628 \cdot 200000 - 0,85(22,5))$$

$$= 8168,234255 \text{ N}$$

$$= 8,168234255 \text{ kN}$$

► Beton mengalami tekan

$$C_c = 0,85f'_{cc} a \cdot b \quad \text{.....(pers. 2.35)}$$

$$= 0,85(31,494)(0,85 \cdot x)(150)$$

$$= 0,85(30,764)(0,85 \cdot 37,438)(150)$$

$$= 124820,2204 \text{ N}$$

- Tulangan 2 - Ø 10 mengalami tarik

$$\varepsilon_{s2} = \frac{0,003}{x} (117 - x)$$

$$\varepsilon_{s2} = \frac{0,003}{37,438} (117 - 37,438)$$

$$= 0,006375501 > \varepsilon_y = 0,0012.$$

Tegangan yang dipakai $f_{s2} = f_y = 240$ MPa.

$$T = A_{s2}(f_s - 0,85f_c) \quad \text{.....(pers. 2.37)}$$

$$= 157,0796327 \cdot [240 - 0,85(22,5)]$$

$$= 34694,96387N$$

$$= 34,69496387 \text{ kN}$$

- Momen yang terjadi pada daerah eksentrisitas kolom

Dari nilai tinggi garis netral $x = 35,63493$ mm, didapat nilai-nilai sebagai berikut :

$$a = \beta \cdot x \quad \text{.....(pers. 2.34)}$$

$$= 0,85 \cdot 37,438$$

$$= 31,8223 \text{ mm}$$

$$z_1 = c - \frac{a}{2} \quad \text{.....(pers. 2.40a)}$$

$$= 75 - \frac{31,8223}{2} = 59,0889 \text{ mm}$$

$$z_2 = c - e \quad \text{.....(pers. 2.40b)}$$

$$= 40 - 33 = 7 \text{ mm}$$

$$z_3 = 50 + 35 \quad \text{.....(pers. 2.40c)}$$

$$= 77 \text{ mm}$$

$$M_n = C_{s1}(z_2) + C_c(z_1) - T \cdot (z_3) \quad \text{.....(pers. 2.39)}$$

$$= 8168,234255 (7) + 124820,2204 (59,0889) - 34694,96387 (77)$$

$$= 10104173,1385 \text{ Nmm}$$

$$= 10,1041731385 \text{ kNm}$$

$$M_R = \phi M_n = (0,65)(10104173,1385)$$

$$= 6567712,5400 \text{ Nmm}$$

$$= 6,5677125400 \text{ kNm}$$

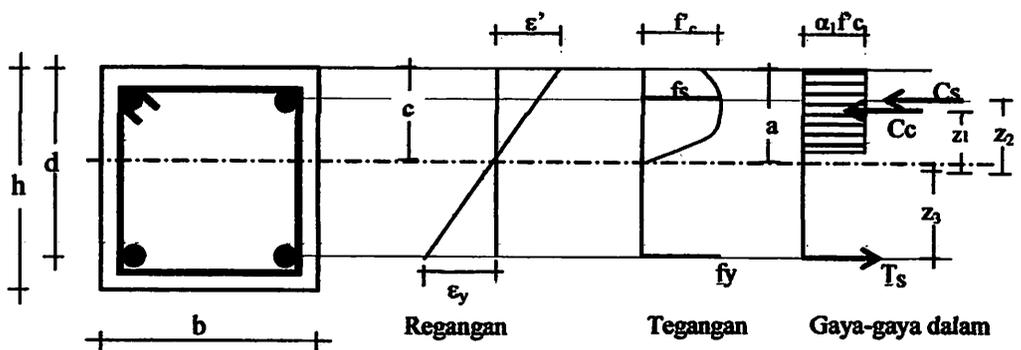
➤ Beban aksial yang terjadi pada pusat eksentrisitas kolom

$$P_n = \frac{6567712,5400}{35} = 187648,9297 \text{ N}$$

$$= 187,6489297 \text{ kN}$$

4) Titik 4. Keadaan seimbang ($M_{nbalanced}$; $P_{nbalanced}$)

Dimana regangan maksimum saat terluar dari beton tak terkekang adalah 0,003 sedangkan beton terkekang tulangan transversal regangan dicari. Baja tulangan dianggap telah mengalami leleh regangan 0,0012. Dari hubungan ini diperoleh nilai dari garis netral balanced (x_b) dengan rumus perbandingan segi tiga.



Gambar 3.25. Diagram regangan dan tegangan serta gaya-gaya dalam pada titik 4 kolom terkekang BJTP Ø8 (KP4)

➤ Beton yang terkekang tulangan Transversal

$$\epsilon_{cu} = 0,004 + 1,4 \cdot \rho_s \cdot \frac{f_{yh} \epsilon_{su}}{f'_{cc}}$$

$$\rho_s = \frac{4A_{sp}}{D's} = \frac{4 \left(\frac{1}{4}\right) \pi D_{sp}^2}{D's} = \frac{\pi(8)^2}{133(100)} = 0,015117438$$

$$\epsilon_{su} = \frac{f_{yh}}{E_s} = \frac{240}{200000} = 0,0012$$

$$\epsilon_{cu} = 0,004 + \frac{1,4(0,015117438)(240)(0,0012)}{31,494}$$

$$= 0,0041981$$

Nilai ini digunakan sebagai nilai jarak perbandingan.

$$\frac{x}{0,0041981} = \frac{(117 - x)}{0,0012}$$

$$x = 90,99100482 \text{ mm}$$

Jadi garis netral berada pada jarak 90,99100482 mm

Dari hasil garis Netral diatas, diinput kembali kedalam persamaan sebelumnya :

➤ Tulangan 1- Ø 10 mengalami tekan.

$$\frac{\epsilon_{s1}}{(x - 33)} = \frac{\epsilon_{cu}}{x}$$

$$\frac{\epsilon_{s1}}{(90,99100482 - 33)} = \frac{0,0041981}{90,99100482}$$

$$= 0,002675582 > \epsilon_y = 0,0012$$

Karena regangan pada tulangan baja 1 - Ø 10 lebih besar dari pada regangan leleh bajanya sehingga dipakai tegangan (f_{st}),

dimana $f_{st} = f_y$.

$$C_{s1} = A_{s1}(f_{s1} - 0,85f'_{c}) \quad \dots\dots\dots(\text{pers. 2.36})$$

$$= 157,0796327 \cdot (240 - 0,85(22,5))$$

$$= 34694,96387 \text{ N}$$

$$= 34,69496387 \text{ kN}$$

➤ Beton mengalami tekan

$$C_c = 0,85f'_{cc}ab) \quad \text{.....(pers. 2.35)}$$

$$= 0,85(31,494)(0,85)(90,99100482)(150)$$

$$= 303368,6969 \text{ N}$$

➤ Tulangan 2 - $\phi 10$ mengalami tarik

$$\frac{\varepsilon_{s2}}{(117 - 90,99100482)} = \frac{0,0041981}{90,99100482}$$

$$\varepsilon_{s2} = 0,0012$$

$$\varepsilon_{s2} = \varepsilon_y = 0,0012$$

Regangan yang terjadi pada tulangan ini sama besar dengan tegangan leleh baja ($f_{s2} = f_y = 240 \text{ Mpa}$).

$$T = A_{s2}(f_{s2} - 0,85f'c) \quad \text{.....(pers. 2.37)}$$

$$= 157,0796327[240 - 0,85(22,5)]$$

$$= 34694,96387 \text{ N}$$

$$= 34,69496387 \text{ kN}$$

Beban aksial seimbang yang terjadi pada kolom

$$P_{\text{balanced}} = C_{s1} + C_c - T \quad \text{.....(pers. 2.38)}$$

$$= 34694,96387 + 303368,6969 - 34694,96387$$

$$= 303368,6969 \text{ N}$$

$$= 303,3686969 \text{ kN}$$

Momen seimbang yang terjadi pada kolom

$$M_{\text{balance}} = C_{s1}(z_2) + C_c \cdot (z_1) - T \cdot (z_3) \quad \text{.....(pers. 2.39)}$$

Tinggi blok tegangan (a)

$$a = \beta \cdot c \quad \text{.....(pers. 2.34)}$$

$$= 0,85 \cdot 90,99100482$$

$$= 77,3424 \text{ mm}$$

$$z_1 = c - \frac{a}{2} \quad \text{.....(pers. 2.40a)}$$

$$= 75 - \frac{77,3424}{2} = 36,3288 \text{ mm}$$

$$z_2 = c - d' \quad \text{.....(pers. 2.40b)}$$

$$= 75 - 33 = 42 \text{ mm}$$

$$z_3 = d - c \quad \text{.....(pers. 2.40c)}$$

$$= 117 - 75 = 42 \text{ mm}$$

$$= 34694,96387 (42) + 303368,6969 (36,3288) - 34694,0316 (42)$$

$$= 11021027,68 \text{ Nmm}$$

$$M_{balance} = 11,02102768 \text{ kNm}$$

$$M_{balanced} = P_{balanced} \cdot e$$

$$11021027,68 = 303368,6969 \cdot e$$

$$e = 36,32882295 \text{ mm}$$

eksentrisitas dalam keadaan seimbang, maka $e_b = e + 75$

$$e_b = 111,328823 \text{ mm}$$

$$\phi P_b = 0,65 (303368,6969)$$

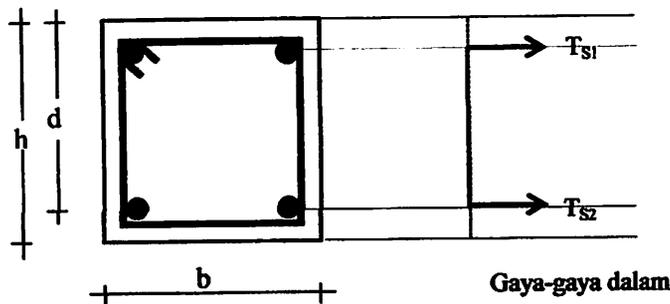
$$= 81362,69458 \text{ kN}$$

$$M_R = \phi P_b e_b = 81362,69458 \cdot (111,328823)$$

$$M_R = 9058013,0199 \text{ Nmm}$$

$$= 9,0580130199 \text{ kNm}$$

- 5) Titik 5. Eksentrisitas besar ($M_n = 0$; $P_n =$ aksial tarik maksimum atau tekan minimum)



Gambar 3.26. Diagram regangan dan tegangan serta gaya-gaya dalam pada titik 5 kolom terkekang BJTP Ø8 (KP4)

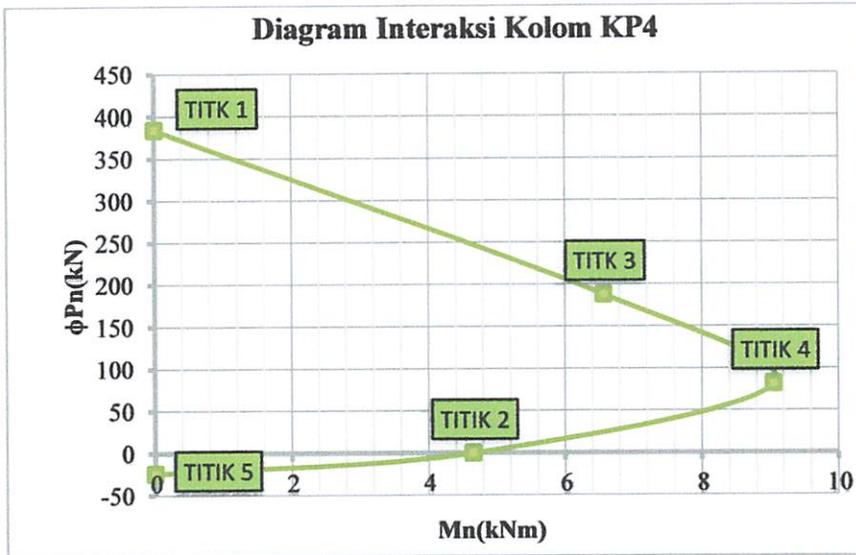
Beban aksial yang bekerja pada kolom

$$\begin{aligned}
 \phi P_n &= \phi P_{n(\text{maks})} \\
 &= (0,65) \cdot [f_y \cdot A_{st}] \\
 &= (0,65) \cdot [-(240)(157,0796327)] \\
 &= -24504,4227 \text{ N} \\
 &= -24,5044227
 \end{aligned}$$

Dari hasil perhitungan yang diatas, maka perhitungannya dapat tabulasi dalam tabel berikut :

Tabel 3.5. Peningkatan Kuat tekan dan kuat momen pada kolom terkekang tulangan BJTP Ø8 (KP4)

e (mm)	Kuat Beban Aksial ϕP_n (kN)	Kuat Momen $\phi P_n e$ (kNm)
0	384,2328552	0
Kecil	0	4,656763015
35	187,6489297	6,56771254
111,0722548	81,36269458	9,05801302
besar	-24,5044227	0



Grafik 3.4. Diagram interaksi kolom terkekang tulangan BJTP Ø8 (KP4)

e. Kolom Terkekang BJTP Ø 6 dan CFRP (KP5)

Kolom KP5 memiliki spesifikasi sebagai berikut :

Dimensi Kolom : 150 mm x 150 mm

Kuat Tekan (f'_c) : 22,5 Mpa

Diameter Tulangan Longitudinal : 10 mm

Diamter tulangan sengkang : 6 mm

f_y tulangan longitudinal : 240 Mpa

f_{yh} tulangan sengkang : 240 Mpa

Jarak Tulangan Sengkang : 100 mm

Regangan beton tak terkekang : 0,03

Modulud Elastisitas Beton (E_s) : 2×10^5

Tebal selimut Beton : 20 mm

Karakteristik CFRP SikaWrap Hex-230C sebagai berikut :

Areal Weight : 225 g/m²

Fabric design thickness : 0,13 mm

Tensile strength of fibers (f_f)	: 3500 Mpa
Tensile E-modulus of fibers	: 230.000 Mpa
Elongation at break	: 1,5%
Fabric width	: 305/610 mm
Shelf life	: Unlimited
Allowable jacket Strain	: 0,004
Ultimate Strain	: 0,011

Dari data diatas, maka kekuatan kolom beton bujur sangkar dapat dihitung dengan cara sebagai berikut :

➤ Kuat tekan beton akan bertambah akibat pengaruh kekangan dari luar beton (f'_{cc}) dengan kuat beton tak terkekang (f'_c).

➤ Tulangan spiral yang terpasang pada kolom KP5 adalah Ø6-100.

$$\begin{aligned}
 D_c &= D - (2 \times \text{selimut beton}) - \text{Ø tulangan transversal} \\
 &= 150 - (2 \times 20) - 6 \\
 &= 104 \text{ mm}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 D'_c &= D - (2 \times \text{selimut beton}) \\
 &= 150 - (2 \times 20) \\
 &= 110 \text{ mm}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 A_s &= m_1 \cdot \frac{1}{4} \cdot \pi \cdot \text{Ø}^2 \\
 &= 4 \cdot \frac{1}{4} \cdot \pi \cdot 6^2 \\
 &= 113,097 \text{ mm}^2
 \end{aligned}$$

➤ Rasio tulangan transversal yang terpasang adalah :

$$\rho_{sterpasang} = \frac{4A_{sp}}{D'_c \cdot s}$$

$$= \frac{4 \left(\frac{1}{4}\right) \pi \cdot \emptyset^2}{D's} = \frac{\pi(6)^2}{110(100)}$$

$$= 0,01028$$

$$f'_{lx} = K_e \cdot \rho_x \cdot f_{yh} \quad \dots\dots\dots(\text{pers.2.19})$$

$$f'_{ly} = K_e \cdot \rho_y \cdot f_{yh}$$

$$K_e = 0,75$$

$$f'_{lx} = f'_{ly} = 0,75 \times 0,01028 \times 240$$

$$= 1,85 \text{ MPa}$$

$$\frac{f'_{lx}}{f'_c} = \frac{f'_{ly}}{f'_c} = \frac{1,85}{22,5} = 0,0823$$

$$K = 1 + 2,05 \rho_s \left(\frac{f_{yh}}{f'_c} \right) \quad \dots\dots\dots(\text{pers. 2.21})$$

$$K = 1 + 2,05 \times 0,01028 \times \left(\frac{240}{22,5} \right) = 1,225$$

$$K = \frac{f'_{\alpha}}{f'_c}$$

$$f'_{\alpha} = K \cdot f'_c$$

$$f'_{\alpha} = 1,225 \times 22,5 = 27,57 \text{ MPa}$$

➤ Rasio CFRP :

$\epsilon_j = \epsilon_t$, direncanakan 0,004 sehingga;

$$f_j = 0,004 E_j = 0,004(230000) = 920 \text{ MPa}$$

$$\rho_j = \frac{4t_j}{D} \quad \dots\dots\dots(\text{pers. 2.7a})$$

$$= \frac{4(0,13)}{150,13} = 0,003464$$

► Penambahan Kuat tekan beton Akibat kekangan CFRP dan tulangan Transversal :

$$f'_{cc} = f'_{c0} \left\{ \left(2,254 \sqrt{1 + 7,94 \frac{F_t}{f'_{c0}}} \right) - 2 \frac{F_t}{f'_c} - 1,254 \right\} \dots\dots(\text{pers. 2.8})$$

$$f_j = E_j \varepsilon_t \dots\dots\dots(\text{pers. 2.7})$$

$$\varepsilon_j = 0,004$$

$$\varepsilon_{uj} = 0,004$$

$$\begin{aligned} f_j &= 0,004 E_j \\ &= 0,004(230000) \\ &= 920 \text{ N/mm}^2 \end{aligned}$$

Jaket CFRP yang mengikat tegangan lateral, f_{ij}

$$\begin{aligned} f_{i,jx} &= 2 \frac{t_j}{h} f_j \\ &= 2 \frac{(0,13)}{150} (920) \\ &= 1,593285819 \text{ N/mm}^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} f_{i,jy} &= 2 \frac{t_j}{b} f_j \\ &= 2 \frac{(0,13)}{150,13} (920) \\ &= 1,593285819 \text{ N/mm}^2 \end{aligned}$$

Tegangan Lateral Total akibat Kekangan Tulangan transversal dan CFRP

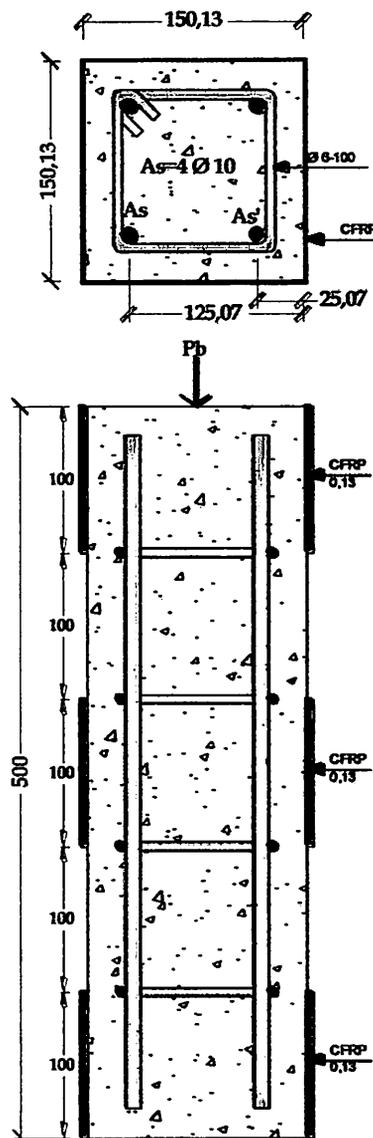
$$\begin{aligned} F_t &= f_{ij} + f_t \\ &= 1,85 + 1,5933 \\ &= 3,44 \end{aligned}$$

$$f'_{cc} = f'_{c0} \left\{ \left(2,254 \sqrt{1 + 7,94 \frac{F_t}{f'_{c0}}} \right) - 2 \frac{F_t}{f'_c} - 1,254 \right\}$$

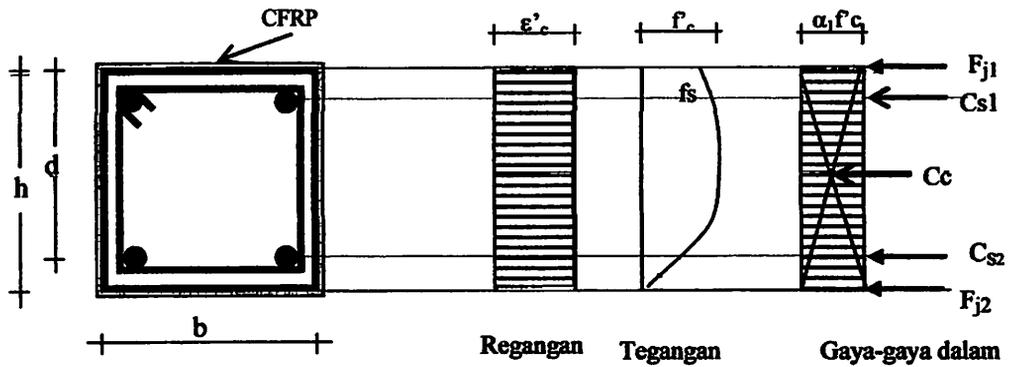
$$f'_{cc} = 22,5 \left\{ \left(2,254 \sqrt{1 + 7,94 \frac{3,44}{22,5}} \right) - 2 \frac{3,44}{22,5} - 1,254 \right\}$$

$$f'_{cc} = 40,385 \text{ MPa}$$

1) Titik 1. Ekstrensitas kecil ($M_n = 0$; $P_n =$ Aksial tekan Maksimum)



Gambar 3.27. Penampang Kolom terkekang tulangan BJTP Ø6 dan CFRP (KP4)



Gambar 3.28. Diagram regangan dan tegangan serta gaya-gaya dalam pada titik 1 kolom terkekang BJTP Ø6 dan CFRP (KP5)

Beban Aksial yang bekerja pada kolom

$$\phi P_n = \phi P_n (\text{maks})$$

$$\phi P_n = \phi P_n (\text{maks}) = 0,80 \cdot \phi \cdot \{0,85 \cdot f_c \cdot (A_g - A_{st}) + f_y \cdot A_{st} + A_j \cdot f_j\} \dots (\text{pers. 2.41})$$

$$= 0,8 \cdot 0,65 \cdot \{0,85 \cdot 40,385 \cdot (22500 - 314,1593) + 240 \cdot$$

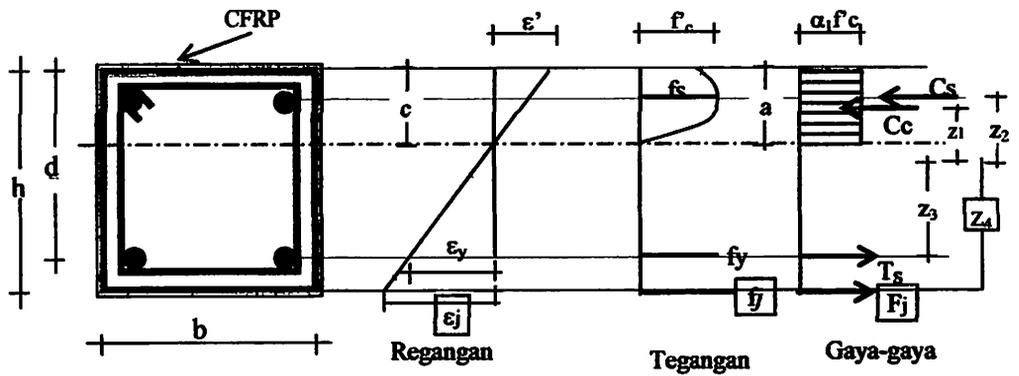
$$314,1593 + 4 \cdot 0,13 \cdot 150,13 \cdot 920\}$$

$$= 543241,4521 \text{ N}$$

$$= 543,2414521 \text{ kN}$$

2) Titik 2. Momen Lentur Murni ($M_{\text{murni}} = \text{Maksimum}; P_n = 0$)

Kolom mengalami *full beam condition* atau mengalami gaya akibat momen seutuhnya dan tidak terjadi gaya aksial. Kondisi seperti ini akan menyebabkan beton mengalami kehancuran. Kehancuran pada kondisi ini sama dengan kehancuran pada beton.



Gambar 3.29. Diagram regangan dan tegangan serta gaya-gaya dalam pada titik 2 kolom terkekang BJTP Ø6 dan CFRP (KP5)

Karena kolom terkekang oleh CFRP dari luar permukaan kolom sendiri maka regangan (ϵ_{cc}) untuk tegangan kolom yang terkekang oleh tulangan transversal (f'_{cc}) menggunakan perbandingan segi tiga.

$$\epsilon_{cc} = \frac{0,004}{x} (x - d)$$

- Tulangan 1 – Ø 10 mengalami tekan

$$C_{s1} = A_{s1}(f_y - 0,85 f'_c) \quad \dots\dots\dots(\text{pers. 2.36})$$

$$= 157,0796327[240 - 0,85(40,385)]$$

$$= 33593,34765 \text{ N}$$

- Beton mengalami tekan

$$C_c = 0,85 f'_{cc} a . b \quad C_c = 0,85 f'_{cc} a . b \quad \dots\dots\dots(\text{pers. 2.35})$$

$$= 0,85(40,385)(0,85x)(150,13)$$

$$= 3878,840189x \text{ N}$$

- Diasumsikan 2 – Ø 10 mengalamai tarik

$$\frac{\epsilon_{s2}}{(119,13 - x)} = \frac{0,004}{x}$$

$$\epsilon_{s2} = \frac{0,004}{x} (119,13 - x)$$

$$T = A_{s2}(f_{s2} - 0,85f'c) \quad \text{.....(pers. 2.38)}$$

$$= 157,0796327 \left[\frac{0,004}{x} (119,13 - x) 200000 - 0,85(40,385) \right]$$

$$= 157,0796327 \left[\frac{95304 - 800x}{x} - 26,138 \right]$$

$$= \frac{14970317,31 - 125663,7062x}{x} - 4105,7642$$

➤ CFRP mengalami tarik

$$\frac{\varepsilon_{CFRP}}{(150,13 - x)} = \frac{0,004}{x}$$

$$\varepsilon_{CFRP} = \frac{0,004}{x} (150,13 - x)$$

$$F = A_j F_j \quad \text{.....(pers. 2.48)}$$

$$= (0,13)(150,13) \left[\frac{0,004}{x} (150,13 - x) (230000) \right]$$

$$= \frac{2695666,421 - 17955,548x}{x}$$

Dari persamaan gaya aksial yang terjadi pada kolom, maka garis netral dapat dicari melalui persamaan dibawah ini;

$$P_n = 0$$

$$C_{s1} + C_c - T - F = 0 \quad \text{.....(pers. 2.49)}$$

$$33593,34765 + 3878,840189x$$

$$- \left[\frac{14970317,31 - 125663,7062x}{x} - 4105,7642 \right]$$

$$- \left[\frac{2695666,421 - 17955,548x}{x} \right] = 0$$

$$x = 48,04 \text{ mm}$$

Dari garis netral yang telah didapat dibuktikanlah daerah yang mengalami tekan dan daerah yang mengalami tarik.

➤ Regangan Pada CFRP

$$\varepsilon_{cc} = \frac{0,004}{x}(x - d)$$

$$\varepsilon_{cc} = \frac{0,004}{48,04}(48,04 - 31,07) = 0,001407993$$

$\varepsilon_{cc} < \varepsilon_{CFRP}$, CFRP mengalami Tekan.

➤ Tulangan 1 – Ø 10 mengalami tarik

$$\varepsilon_{s1} = \frac{0,004}{x}(x - 31,07)$$

$$\varepsilon_{s1} = \frac{0,004}{48,04}(48,04 - 31,07)$$

$$\varepsilon_{s1} = 0,001407993 > \varepsilon_y = 0,0012$$

Karena regangan pada tulangan baja 1-Ø10 lebih besar dari pada regangan leleh bajanya sehingga dipakai $f_y = 240$.

$$C_{s1} = A_s'[240 - 0,85(f_{cc}')] \quad \text{.....(pers. 2.49)}$$

$$= 157,0796327(240 - 0,85(40,385))$$

$$= 33593,34765 \text{ N}$$

$$= 33,59334765 \text{ kN}$$

➤ Beton yang mengalami Tekan

$$C_c = 0,85f'_c ab \quad \text{.....(pers. 2.44)}$$

$$= 0,85(40,385)(0,85)(48,04)(150,13)$$

$$= 186339,4827 \text{ N}$$

➤ Tulangan 2 – Ø 10

$$\varepsilon_{s2} = \frac{0,004}{x}(119,13 - x)$$

$$= \frac{0,004}{48,04}(119,13 - 48,04)$$

$$= 0,005914238 > \epsilon_y = 0,0012.$$

Tegangan yang dipakai $f_{s2} = f_y = 240 \text{ MPa}$.

$$T_1 = A_{s2}(f_2 - 0,85f_c) \quad \text{.....(pers. 2.47)}$$

$$= 157,0796327 \cdot [240 - 0,85(40,385)]$$

$$= 33593,34765 \text{ N}$$

$$= 33,59334765 \text{ kN}$$

➤ Pembungkus kolom CFRP

$$\epsilon_{CFRP} = \frac{0,004}{x}(150,13 - x)$$

$$= \frac{0,004}{48,04}(150,13 - 48,04)$$

$$= 0,008500416 > \epsilon_j = 0,004, \text{ sehingga dipakai } f_j = 920 \text{ N/mm}^2$$

$$F = A_j F_j \quad \text{.....(pers. 2.48)}$$

$$= (0,13)(150,13) \cdot (920)$$

$$= 17955,548 \text{ N}$$

$$= 17,955548 \text{ kN}$$

Momen yang terjadi pada kolom

Dari nilai tinggi garis netral diatas (x), didapat nilai-nilai sebagai berikut :

$$a = \beta \cdot x \quad \text{.....(pers. 2.43)}$$

$$= 0,85 \cdot 48,04$$

$$= 40,8340 \text{ mm}$$

$$z_1 = c - \frac{a}{2} \quad \text{.....(pers. 2.51a)}$$

$$= 75,13 - \frac{40,8340}{2} = 54,6480 \text{ mm}$$

$$z_2 = c - d' \quad \dots\dots\dots(\text{pers. 2.51b})$$

$$= 75,13 - 31,13 = 44 \text{ mm}$$

$$z_3 = d - c \quad \dots\dots\dots(\text{pers. 2.51c})$$

$$= 119,13 - 75,13 = 44 \text{ mm}$$

$$z_4 = b - c \quad \dots\dots\dots(\text{pers. 2.51d})$$

$$= 150,13 - 75,07 = 75,07 \text{ mm}$$

$$M_n = C_{s1}(z_2) + C_c(z_1) + T(z_3) + F(z_4) \quad \dots\dots\dots(\text{pers. 2.50})$$

$$= C_{s1}(44) + C_c(53,7944) - T(44) - F(75,07)$$

$$= 33,593(44) + 186,339(54,648) - 33,471(44) - 17,956(75,07)$$

$$= 11787094,298 \text{ Nmm}$$

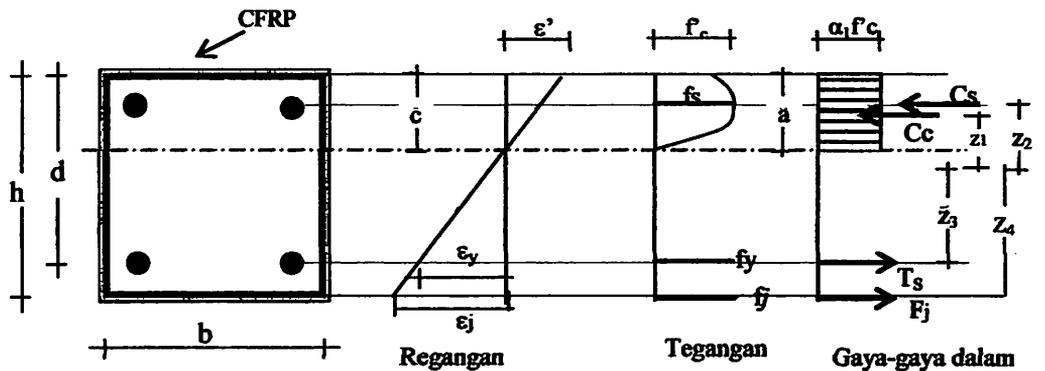
$$= 11,787094298 \text{ KNm}$$

$$M_R = \phi M_n$$

$$= (0,65)(11787094,298)$$

$$= 7,661611293 \text{ kNm}$$

3) Titik 3. Ekstrensitas, $e = 35 \text{ mm}$



Gambar 3.30. Diagram regangan dan tegangan serta gaya-gaya dalam pada titik 3 kolom terkekang BJTP Ø6 dan CFRP (KP5)

➤ Tulangan 1 – Ø 10 mengalami tekan

$$C_{s1} = A_s (f_y - 0,85 f_{cc}') \quad \text{.....(pers. 2.46)}$$

$$= 157,0796327 [240 - 0,85(40,385)]$$

$$= 33593,34765 \text{ N}$$

➤ Beton mengalami tekan

$$C_c = 0,85 f'_c ab \quad \text{.....(pers. 2.44)}$$

$$= 0,85(40,385)(0,85x)(150,13)$$

$$= 3878,840189x \text{ N}$$

➤ Diasumsikan 2 – Ø 10 mengalami tarik

$$\frac{\epsilon_{s2}}{(119,13 - x)} = \frac{0,004}{x}$$

$$\epsilon_{s2} = \frac{0,004}{x} (119,13 - x)$$

$T = A_{s2} (f_{s2} - 0,85 f'_{cc})$ (pers. 2.47)

$$= 157,0796327 \left[\frac{0,004}{x} (119,13 - x) 200000 - 0,85(40,385) \right]$$

$$= 157,0796327 \left[\frac{95304 - 800x}{x} - 26,138 \right]$$

$$= \frac{14970317,31 - 125663,7062x}{x} - 4105,7642$$

➤ CFRP mengalami tarik

$$\frac{\epsilon_{CFRP}}{(150,13 - x)} = \frac{0,004}{x}$$

$$\epsilon_{CFRP} = \frac{0,004}{x} (150,13 - x)$$

$F = A_j F_j$ (pers. 2.48)

$$= (0,13)(150,13) \left[\frac{0,004}{x} (150,13 - x) (230000) \right]$$

$$= \frac{2695666,421 - 17955,548x}{x}$$

Daerah momen sangat kecil yang terjadi pada daerah plastis. Daerah momen tersebut bergeser ke daerah ektentrisitas, $e = 35$ mm.

Untuk mencari tinggi garis netral, digunakan Persamaan :

$$\Sigma M = 0$$

$$C_{s1}(z_2) + C_c(z_1) - T(z_3) - F.(z_4) = 0 \quad \text{.....(pers. 2.50)}$$

$$3878,840189x \left(75,07 - \frac{0,85x}{2} \right) + 33593,34765(44) \\ - \left[\frac{14970317,31 - 125663,706x}{x} - 4105,7642 \right] \cdot (44) \\ - \left[\frac{2695666,421 - 17955,548x}{x} \right] \cdot 75,07 = 0$$

Dari hasil iterasi didapat nilai $x = 46,497$ mm

Hasil garis netral diatas diinput kembali kepersamaan sebelumnya

➤ Regangan Pada CFRP

$$\epsilon_{cc} = \frac{0,004}{x} (x - d)$$

$$\epsilon_{cc} = \frac{0,004}{46,497} (46,497 - 30,07) = 0,001321978$$

$\epsilon_{cc} < \epsilon_{CFRP}$, CFRP mengalami Tekan.

➤ Tulangan 1 Ø 10 mengalami tekan

$$\epsilon_{s1} = \frac{0,004}{x} (x - 31,13)$$

$$= \frac{0,004}{46,497} (46,497 - 31,07)$$

$$\epsilon_{s1} = 0,001321978 > \epsilon_y = 0,0012$$

Karena regangan pada tulangan baja 1 Ø 10 lebih besar dari pada regangan leleh bajanya sehingga dipakai tegangan dimana $f_y = 240$

$$\begin{aligned}
 C_{s1} &= A_s'(f_y - 0,85f_{cc}') && \text{.....(pers. 2.46)} \\
 &= 157,0796327(240 - 0,85(40,385)) \\
 &= 33593,34765 \text{ N} \\
 &= 33,59334765 \text{ kN}
 \end{aligned}$$

➤ Beton mengalami tekan

$$\begin{aligned}
 C_c &= 0,85f'_c ab && \text{.....(pers. 2.35)} \\
 &= 0,85(40,385)(0,85)(46,497)(150,13) \\
 &= 180354,4323 \text{ N}
 \end{aligned}$$

➤ Tulangan 2 – Ø 10

$$\frac{\epsilon_{s2}}{(119,07 - 46,497)} = \frac{0,004}{46,497}$$

$$\epsilon_{s2} = 0,006243241 > f_y = 0,0012$$

Karena regangan pada tulangan baja 1 Ø 10 lebih besar dari pada regangan leleh bajanya sehingga dipakai tegangan dimana $f_y = 240$

$$\begin{aligned}
 T_1 &= A_{s2}(f_{s2} - 0,85f'_{cc}) && \text{.....(pers. 2.37)} \\
 &= 157,0796327(240 - 0,85(40,385)) \\
 &= 33593,34765 \text{ N} \\
 &= 33,59334765 \text{ kN}
 \end{aligned}$$

➤ CFRP mengalami tarik

$$\begin{aligned}
 \epsilon_{CFRP} &= \frac{0,004}{x}(150,13 - x) \\
 &= \frac{0,004}{46,497}(150,13 - 46,497)
 \end{aligned}$$

$=0,008915242 > \epsilon_j = 0,004$, sehingga dipakai $F_j = 920$ Mpa

$$F = A_j F_j \quad \dots\dots\dots(\text{pers. 2.37})$$

$$= (0,13)(150,13). (920)$$

$$= 17955,548 \text{ N}$$

➤ Momen yang terjadi pada daerah eksentrisitas kolom

Dari nilai tinggi garis netral $x = 48,8066$ mm, didapat nilai-nilai sebagai berikut :

$$a = \beta \cdot x \quad \dots\dots\dots(\text{pers. 2.34})$$

$$= 0,85 \cdot 46,497$$

$$= 39,5225 \text{ mm}$$

$$z_1 = 75,07 - \frac{a}{2} \quad \dots\dots\dots(\text{pers. 2.40a})$$

$$= 55,3088 \text{ mm}$$

$$z_2 = c - d' \quad \dots\dots\dots(\text{pers. 2.40b})$$

$$= 44 - 35 = 9 \text{ mm}$$

$$z_3 = 50 + e \quad \dots\dots\dots(\text{pers. 2.40c})$$

$$= 119,13 - 40,07$$

$$= 79 \text{ mm}$$

$$z_4 = b - 40,07 \quad \dots\dots\dots(\text{pers. 2.40c})$$

$$= 150,13 - 40,07$$

$$= 110,07 \text{ mm}$$

$$M_n = C_{s1} (z_2) + C_c (z_1) + T(z_3) + F(z_4) \quad \dots\dots\dots(\text{pers. 2.39})$$

$$= 180354,4323 (54,3272) + 33593,34765(9)$$

$$+ 33593,34765(79) + 17955,548 (110,07)$$

$$= 16905401,3538 \text{ Nmm}$$

$$M_R = \phi M_n = (0,65) (14905401,3538)$$

$$= 107188510,8 \text{ Nmm}$$

$$= 10,71885108 \text{ kNm}$$

➤ Beban aksial yang terjadi pada pusat eksentrisitas kolom

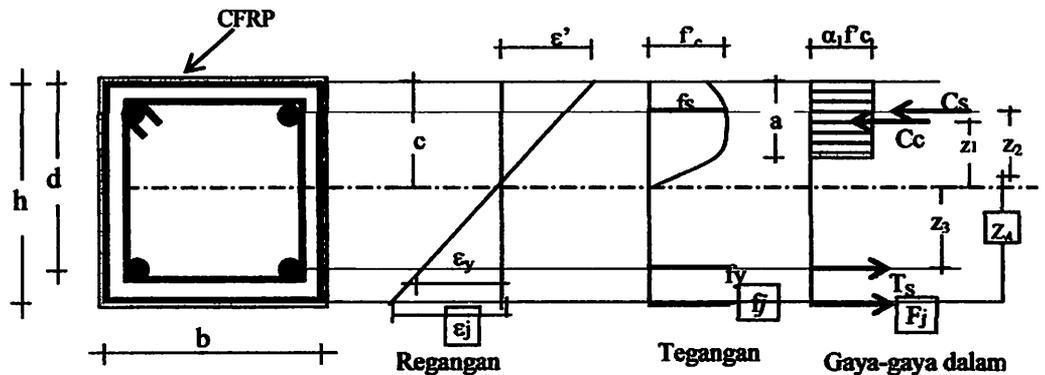
$$P_n = \frac{9688510,88}{35}$$

$$= 3062528,88 \text{ N}$$

$$= 306,252888 \text{ kN}$$

4) Titik 4. Keadaan seimbang ($M_{nbalanced}$; $P_{nbalanced}$)

Dimana keadaan ini regangan maksimum saat terluar dari beton tak terkekang adalah 0,003 sedangkan beton terkekang tulangan transversal dan beton terkekang dengan CFRP dicari. Baja tulangan dianggap telah mengalami leleh regangan 0,0012. Dari hubungan ini diperoleh nilai dari garis netral balanced (x_b) dengan rumus perbandingan segi tiga.



Gambar 3.31. Diagram regangan dan tegangan serta gaya-gaya dalam pada titik 4 kolom terkekang BJTP Ø6 dan CFRP (KP5)

- Tegangan untuk Beton yang tidak terkekang tulangan Transversal atau berada pada kekangan CFRP adalah $f_{cc}' = 30,75071376 \text{ N/mm}^2$

$$\varepsilon'_{cu} = 0,004 + \frac{2,5\rho_{ss}f_{uj}\varepsilon_{uj}}{f_{cc}'} \quad \text{.....(pers. 2.27)}$$

$\varepsilon_{uj} = \varepsilon_t =$ direncanakan 0,004 sehingga;

$$f_j = 0,004 \varepsilon_j = 0,004(230000) = 920 \text{ MPa}$$

$$\rho_{ss} = \frac{4t_j}{D} = \frac{4(0,13)}{150,13} = 0,003464$$

$$f'_{cc} = 40,385 \text{ MPa}$$

$$\varepsilon_{cu} = 0,004 + \frac{2,5(0,003464)(920)(0,004)}{40,385}$$

= 0,00493 (regangan terlindung CFRP daerah tekan).

Garis netral (x_b) dicari dengan menggunakan perbandingan segi tiga, regangan beton $\varepsilon_c = 0,003$ (daerah tarik).

$$\frac{x_b}{0,00493} = \frac{b}{(0,00493 + 0,003)}$$

$$x_b = \frac{150,13}{(0,00493 + 0,003)} (0,00493)$$

$$x = 93,3538142 \text{ mm}$$

- Regangan Pada CFRP

$$\varepsilon_{cc} = \frac{0,004}{x} (x - d)$$

$$\varepsilon_{cc} = \frac{0,004}{93,3538142} (93,3538142 - 30,07) = 0,003287848$$

$\varepsilon_{cc} < \varepsilon_{CFRP}$, CFRP mengalami Tekan.

- Tulangan 1 Ø 10 mengalami tekan.

$$\frac{\varepsilon_{s1}}{(93,3538142 - 31,07)} = \frac{0,00493}{93,3538142}$$

$$\varepsilon_{s1} = 0,003287848 > \varepsilon_y = 0,0012 .$$

Tulangan ini mengalami tarik.

Pakai $f_{sl} = f_y = 240$ MPa

$$C_{s1} = A_s'(f_y - 0,85f_{cc}') \quad \text{.....(pers. 2.46)}$$

$$= 157,0796327 \cdot (240 - 0,85(40,385))$$

$$= 33593,34765 \text{ N}$$

➤ Beton mengalami tekan

$$C_c = 0,85f'_{cc}ab \quad \text{.....(pers. 2.44)}$$

$$= 0,85(40,385)(0,85)(93,3538142)(150,13)$$

$$= 362104,5263 \text{ N}$$

➤ Tulangan 2 - Ø10 mengalami tarik

$$\frac{\varepsilon_{s2}}{(119,07 - 93,3538142)} = \frac{0,0049}{93,3538142}$$

$$\varepsilon_{s2} = 0,0013588$$

$$\varepsilon_{s2} > \varepsilon_y = 0,0012, \text{ pakai } f_y = 240 \text{ Mpa}$$

$$T = A_{s2}(f_{s2} - 0,85f'_{cc}) \quad \text{.....(pers. 2.47)}$$

$$= 157,0796327[240 - 0,85(40,385)]$$

$$= 33593,34765 \text{ N}$$

$$= 33,59334765 \text{ kN}$$

➤ CFRP mengalami tarik

$$\varepsilon_{CFRP} = \frac{0,004}{x} (150,13 - x)$$

$$= \frac{0,004}{93,3538142} (150,13 - 93,3538142)$$

$$= 0,002432731 < \varepsilon_j = 0,004, \text{ sehingga dipakai } \varepsilon_{CFRP}$$

$$F = A_j F_j \quad \text{.....(pers. 2.48)}$$

$$= (0,13)(150,13) \cdot (0,002432731)(230000)$$

$$= 10920,25578 \text{ N}$$

Beban aksial seimbang yang terjadi pada kolom

$$P_{\text{balanced}} = C_{s1} + C_c - T - F \quad \text{.....(pers. 2.49)}$$

$$= 362104,5263 + 33593,34765 - 33593,34765 - 10920,25578$$

$$= 283997,5753 \text{ N}$$

Momen seimbang yang terjadi pada kolom

$$M_{\text{bal}} = C_{s1}(44) + C_c \left(75,07 - \frac{0,85x}{2} \right) - T(44) + F(75,07)$$

$$= 34694,96387(44) + 309861,5761 (36,7251) - 33593,34765(44)$$

$$- 11922,14687(75,07)$$

$$= 9042627,364 \text{ Nmm}$$

$$= 9,042627364 \text{ kNm}$$

$$e = \frac{M_{\text{balanced}}}{P_{\text{balanced}}}$$

$$= \frac{9042627,364}{283997,5753}$$

$$e = 31,84050905 \text{ mm}$$

Eksentrisitas dalam keadaan seimbang, maka $e_b + 75,07 = 106,911 \text{ mm}$

$$\phi P_b = 0,65(235470,4639) = 129508,7551 \text{ N}$$

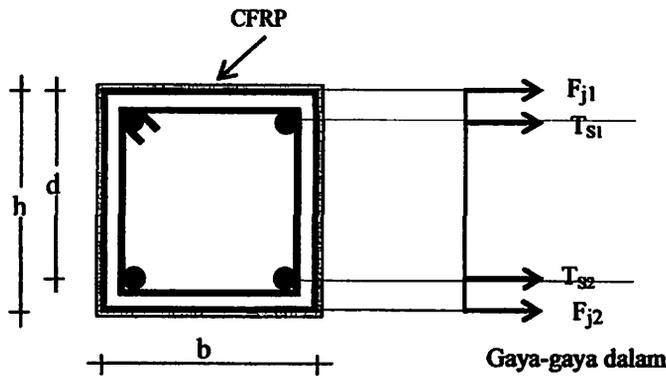
$$= 129,5087551 \text{ kN}$$

$$M_R = \phi P_b e_b = 129508,7551 (106,910509) = 13597486,8317 \text{ Nmm}$$

$$= 18217395,2036 \text{ Nm}$$

$$= 18,2173952036 \text{ kNm}$$

- 5) Titik 5. Eksentrisitas besar ($M_n = 0$; $P_n =$ aksial tarik maksimum atau tekan minimum)



Gambar 3.32. Diagram regangan dan tegangan serta gaya-gaya dalam pada titik 5 kolom terkekang BJTP Ø6 dan CFRP (KP5)

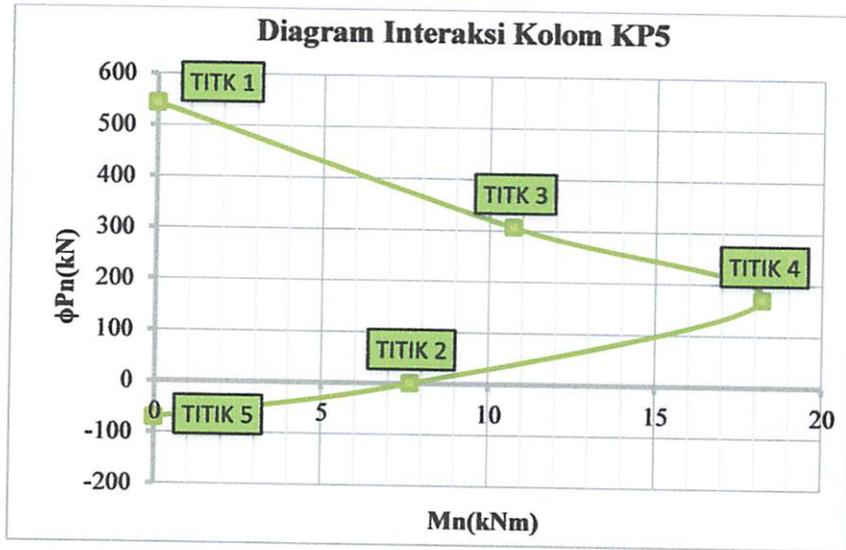
Beban aksial yang bekerja pada kolom

$$\begin{aligned}
 \phi P_n &= \phi P_{n(\text{maks})} \\
 &= (0,65) \cdot [f_y A_{st} + A_{fj}] \\
 &= -(0,65) \cdot [(240 \cdot 157,0796327) + (4 \cdot 0,13 \cdot 150,13 \cdot 920)] \\
 &= -71188,8475 \text{ N} \\
 &= -71,1888475 \text{ kN}
 \end{aligned}$$

Dari hasil perhitungan yang diatas, maka perhitungannya dapat tabulasi dalam tabel berikut :

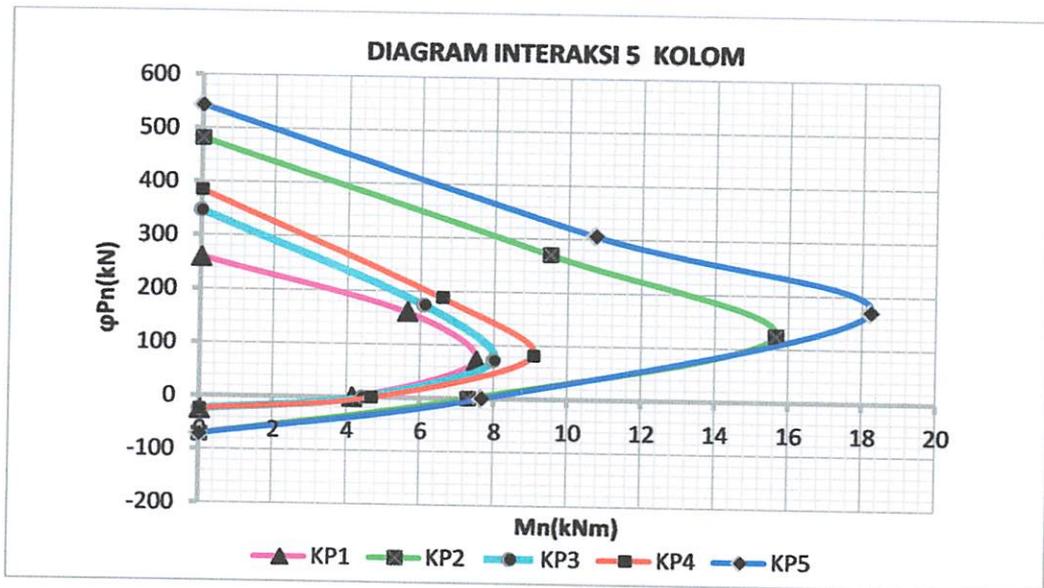
Tabel 3.6. Peningkatan Kuat tekan dan kuat momen pada kolom terkekang tulangan BJTP Ø6 dan CFRP (KP5)

e (mm)	Kuat Beban Aksial ϕP_n (kN)	Kuat Momen $\phi P_n e$ (kNm)
0	543,242	0
Kecil	0	7,661611293
35	306,253	10,7189
104,9928	170,3985452	18,2173952
besar	-71,1888475	0



Grafik 3.5. Diagram interaksi kolom KP5

f. Diagram Interaksi Gabungan 5 Kolom



Grafik 3.6. Diagram interaksi Gabungan 5 kolom

3.6.2. Analisa Teoritis Kekuatan Kolom Terhadap Beban Sentris

a. Kolom Beton Tak Terkekang (KP1)

$$\begin{aligned}
 A_{st} &= 4 \cdot \frac{1}{4} \cdot \pi \cdot D^2 \\
 &= \frac{1}{4} \cdot \pi \cdot 9,75^2 \\
 &= 298,65 \text{ mm}^2
 \end{aligned}$$

$$A_g = 150 \cdot 150$$

$$= 22500 \text{ mm}^2$$

$$P_{maks} = (f'_c \cdot (A_g - A_{st}) + A_{st} \cdot f_y) \dots\dots\dots(\text{pers. 2.41})$$

$$= 24,52 \cdot ((22500 - 298,65) + (349,64 \cdot 298,65))$$

$$= 648797,15 \text{ N} = 64,88 \text{ Ton}$$

$$E_c = 4700 \sqrt{f'_c}$$

$$= 4700 \sqrt{24,52}$$

$$= 23273,307 \text{ MPa}$$

$$\varepsilon_o = \frac{2f'_c}{E_c} \dots\dots\dots(\text{pers.2.17})$$

$$= \frac{2 \times 24,52}{23273,307}$$

$$= 0,002107135$$

$$f_c = f'_c \left[\frac{2\varepsilon_c}{\varepsilon_o} - \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_o} \right)^2 \right] \dots\dots\dots(\text{pers.2.16})$$

$$f'_c = \frac{f_c}{\left[\frac{2\varepsilon_c}{\varepsilon_o} - \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_o} \right)^2 \right]}$$

$$= \frac{24,52}{\left[\frac{2 \times 0,002107}{0,002107} - \left(\frac{0,002107}{0,002107} \right)^2 \right]}$$

$$= 24,52 \text{ MPa}$$

Tabel 3.7. Tegangan Regangan Kolom tak terkekang (KPI) menurut Hognestad

No	ϵ_c	f_c (Mpa)
1	2	3
1	0	0
2	0,00021	4,659
3	0,00042	8,827
4	0,00063	12,505
5	0,00084	15,693
6	0,00105	18,390
7	0,00126	20,597
8	0,00147	22,313
9	0,00169	23,539
10	0,00190	24,275
11	0,00211	24,520
12	0,00221	23,694
13	0,00231	22,867
14	0,00241	22,041
15	0,00251	21,214
16	0,00262	20,388
17	0,00272	19,561
18	0,00282	18,735
19	0,00292	17,908
20	0,00302	17,082
21	0,00313	16,255

Keterangan pengisian kolom pada Tabel 3.7

- Kolom 1

Nomor urut.

- Kolom 2

Regangan beton naik (no urut 1 s/d 11)

$$\epsilon_c = \frac{0,002}{10}$$

Regangan beton turun (no urut 11 s/d 21)

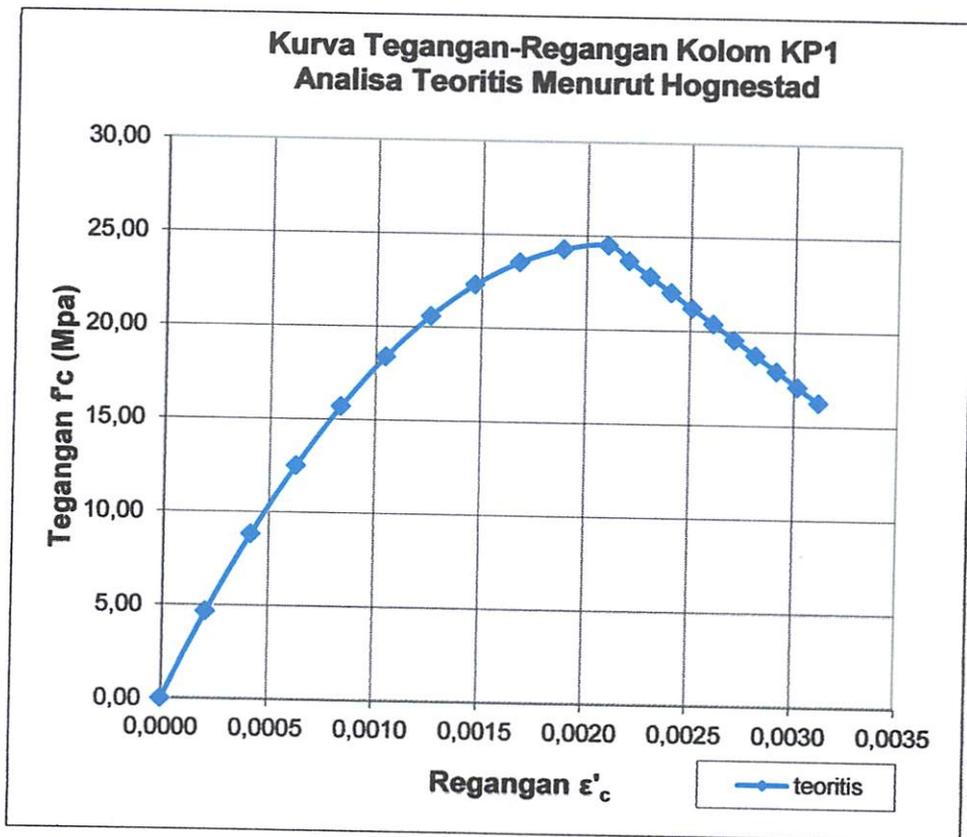
$$\epsilon_{50u} = \frac{3 + 0,002 \cdot f'_c}{f'_c - 1000}$$

➤ Kolom 3

Kuat tekan beton kolom untuk Kurva naik dan kurca turun

$$f_c = f'_c \left[\frac{2\varepsilon_c}{0,002} - \left(\frac{\varepsilon_c}{0,002} \right)^2 \right] \quad \text{..... (pers. 2.16)}$$

Kurva tegangan-regangan beton kolom beton tak terkekang (KPI) yang terlihat pada Grafik 3.7. di bawah ini adalah hasil analisa teoritis yang digambarkan dengan cara menghubungkan angka-angka pada Tabel 3.7 yaitu angka-angka pada kolom 2 untuk arah horisontal (regangan) dan kolom 3 untuk arah vertikal (tegangan).



Grafik 3.7 . Kurva Hubungan Tegangan-Regangan Analisa Teoritis Kolom Tak terkekang (KPI) menurut Hognestad

b. Kolom Beton Terkekang CFRP (KP2)

Kolom KP2 adalah kolom dibuat yang dibuat sama persis dengan KP1 namun diberi tambahan lapisan CFRP pada bagian luar kolom. Penambahan lapisan CFRP ini bertujuan untuk mengetahui karakteristik dan peningkatan kekuatan dari KP1 jika dikekang CFRP dari luar kolom.

Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP) yang digunakan adalah jenis SikaWrap Hex-230C dengan spesifikasi sebagai berikut :

- Ketebalan (*thickness*) : 0,13 mm
- Kuat tarik (*tensile strength*) : 3500 MPa
- Modulus Elastisitas (*Tensile E-modulus*) : 230000 MPa
- Regangan CFRP (*allowable strain, ϵ_j*) : 0,004
- Regangan Ultimit CFRP (*Ultimate Strain ϵ_{uj}*) : 0,011

Metode pengekangan dengan CFRP yang digunakan adalah metode diskrit, dimana kolom dibungkus dengan CFRP dengan lebar 100 mm pada setiap jarak 100 mm arah vertikal kolom.

- Kuat tekan beton akan bertambah akibat pengaruh kekangan dari luar beton (Kekangan Akibat CFRP)

Rasio CFRP :

$$\begin{aligned} \epsilon_j &= \epsilon_t, \text{ direncanakan } 0,004 \text{ sehingga;} \\ f_j &= 0,004 E_j = 0,004(230000) = 920 \text{ MPa} \\ \rho_j &= \frac{4t_j}{D} \dots\dots\dots(\text{pers. 2.7a}) \\ &= \frac{4(0,13)}{150,13} = 0,003464 \end{aligned}$$

➤ Penambahan Kuat tekan beton Akibat kekangan CFRP

$$f'_{cc} = f'_{c0} \left\{ \left(2,254 \sqrt{1 + 7,94 \frac{F_t}{f'_{c0}}} \right) - 2 \frac{F_t}{f'_c} - 1,254 \right\} \dots\dots(\text{pers. 2.8})$$

$$f_j = E_j \varepsilon_t \dots\dots\dots(\text{pers. 2.7})$$

$$\varepsilon_j = 0,004$$

$$\varepsilon_{uj} = 0,004$$

$$\begin{aligned} f_j &= 0,004 E_j \\ &= 0,004(230000) \\ &= 920 \text{ N/mm}^2 \end{aligned}$$

Jaket CFRP yang mengikat tegangan lateral, f_{ij}

$$\begin{aligned} f_{ijx} &= 2 \frac{t_j}{h} f_j \\ &= 2 \frac{(0,13)}{150} (920) \\ &= 1,593285819 \text{ N/mm}^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} f_{i,jy} &= 2 \frac{t_j}{b} f_j \\ &= 2 \frac{(0,13)}{150,13} (920) \\ &= 1,593285819 \text{ N/mm}^2 \end{aligned}$$

$$f'_{cc} = f'_{c0} \left\{ \left(2,254 \sqrt{1 + 7,94 \frac{F_t}{f'_{c0}}} \right) - 2 \frac{F_t}{f'_c} - 1,254 \right\}$$

$$f'_{cc} = 24,52 \left\{ \left(2,254 \sqrt{1 + 7,94 \frac{1,593}{24,52}} \right) - 2 \frac{1,593}{24,52} - 1,254 \right\}$$

$$f'_{cc} = 34,11 \text{ MPa}$$

$$E_c = 4700 \sqrt{f'_{cc}}$$

$$= 4700 \sqrt{34,11}$$

$$= 27449,77 \text{ MPa}$$

$$\varepsilon_{ccj} = \frac{1,71 \cdot (5f'_{cc} - 4f'_c)}{E_c} \quad \dots\dots\dots(\text{pers. 2.9})$$

$$= \frac{1,71 \cdot (5 \cdot 34,11 - 4 \cdot 34,11)}{27449,77}$$

$$= 0,002125$$

$$r = \frac{E_c}{E_c - E_{cc}} \quad \dots\dots\dots(\text{pers 2.24})$$

$$= 1,2662$$

$$\varepsilon_{cu j} = 0,004 + \frac{2,8 \cdot \rho_j \cdot \emptyset_j \cdot f_{ju} \cdot \varepsilon_{uj}}{f'_{cc}} \quad \dots\dots\dots(\text{pers 2.10})$$

$$\varepsilon_{uj} = 0,011$$

$$f_{ju} = 230000 \cdot 0,011 = 2530 \text{ Mpa}$$

$$\emptyset_j = 0,9$$

$$\varepsilon_{eu j} = 0,004 + \frac{2,8 \cdot 0,003464 \cdot 0,9 \cdot 2530 \cdot 0,011}{34,11}$$

$$\varepsilon_{eu j} = 0,011127613$$

Beban maksimum kolom KP2 adalah :

$$P_{n(\text{maks})} = f'_{cc} \cdot (A_g - A_{st}) + (f_y \cdot A_{st}) + (A_j \cdot f_j) \quad \dots\dots\dots(\text{pers. 2.41})$$

$$A_g = b \cdot h$$

$$= 150 \cdot 150 = 22500 \text{ mm}^2$$

$$A_{st} = 4 \cdot \frac{1}{4} \Pi D^2$$

$$= 4 \cdot \frac{1}{4} \Pi (9,75)^2$$

$$= 298,65 \text{ mm}^2$$

$$A_j = 4 \cdot 150 \cdot 0,13$$

$$= 78 \text{ mm}^2$$

$$= 34,11 \cdot ((22500-298,65) + (349,64 \cdot 298,65) + (78 \cdot 920))$$

$$= 933468,03 \text{ N} = 93,35 \text{ Ton}$$

Tabel 3.8. Tegangan Regangan Kolom Beton terkekang Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP) menurut Mander, dkk.

No	ϵ_c	X	f _c (Mpa)
1	2	3	4
1	0	0	0
2	0,00021	0,10000	5,817
3	0,00042	0,20000	11,496
4	0,00064	0,30000	16,840
5	0,00085	0,40000	21,640
6	0,00106	0,50000	25,724
7	0,00127	0,60000	28,984
8	0,00149	0,70000	31,390
9	0,00170	0,80000	32,981
10	0,00191	0,90000	33,849
11	0,00212	1,00000	34,110
12	0,00303	1,42368	33,598
13	0,00393	1,84735	33,094
14	0,00483	2,27103	32,598
15	0,00573	2,69471	32,109
16	0,00663	3,11838	31,627
17	0,00753	3,54206	31,153
18	0,00843	3,96573	30,686
19	0,00933	4,38941	30,225
20	0,01023	4,81309	29,772
21	0,01113	5,23676	29,325

Keterangan pengisian kolom pada Tabel 3.8

➤ Kolom 1

Nomorurut.

➤ Kolom 2

Regangan beton naik (nourut 1 s/d 11)

$$\varepsilon_c = \frac{0,00242}{10}$$

Regangan beton turun (no urut 11 s/d 21)

$$\varepsilon_{50u} = \frac{3 + 0,002 \cdot f'_c}{f'_c - 1000} \dots\dots\dots (\text{pers.2.25})$$

➤ Kolom 3

Rasio perbandingan regangan beton terhadap regangan saat tegangan mencapai maksimum

$$x = \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{cc}}$$

$$\varepsilon_{cc} = 0,002 [1 + 5(f'_{cc} / f'_c - 1)] \dots\dots\dots (\text{pers.2.26})$$

➤ Kolom 4

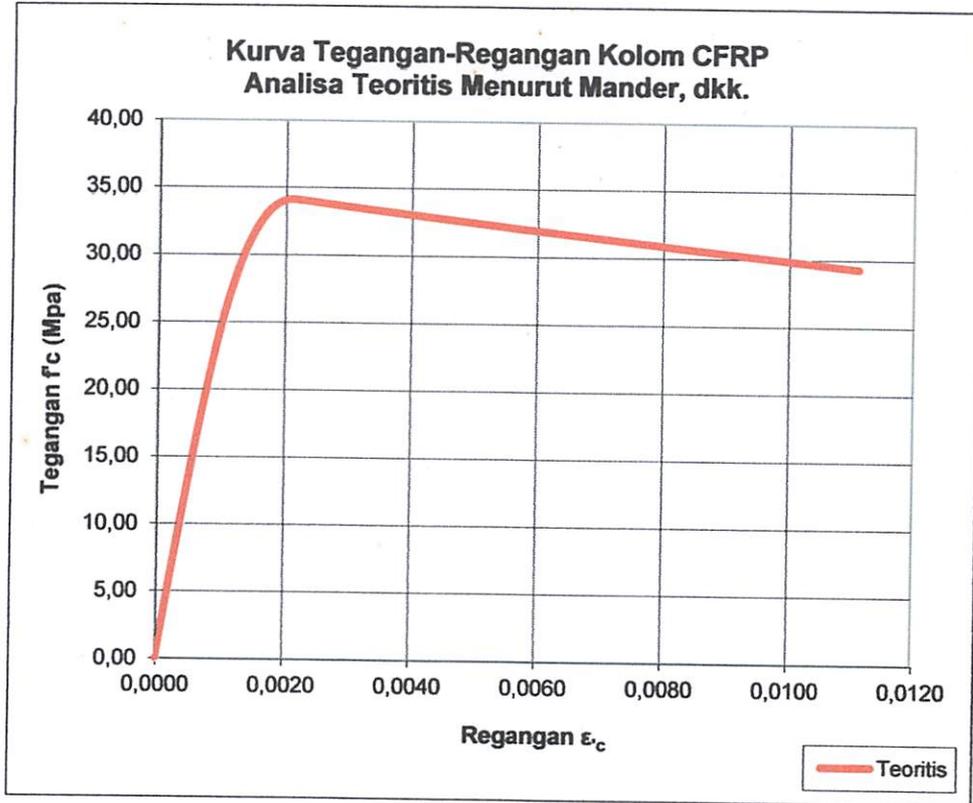
Kuat tekan beton kolom

$$f'_c = \frac{f'_{cc} \times x \times r}{r - 1 + x^r} \dots\dots\dots (\text{pers.2.22})$$

$$r = \frac{E_c}{E_c - E_{sec}} \dots\dots\dots (\text{pers.2.24})$$

$$E_{sec} = \frac{f'_{cc}}{\varepsilon_{cc}} \dots\dots\dots (\text{pers.2.25})$$

Kurva tegangan-regangan beton kolom terkekang *CFRP* yang terlihat pada grafik 3.8. di bawah ini adalah hasil analisa teoritis yang digambarkan dengan cara menghubungkan angka-angka pada Tabel 3.8 yaitu angka-angka pada kolom 2 untuk arah horisontal (regangan) dan kolom 4 untuk arah vertikal (tegangan).



Grafik 3.8. Kurva Hubungan Tegangan-Regangan Analisa Teoritis
Kolom KP2

c. Kolom Beton Terkekang Tulangan BJTP $\varnothing 6$ (KP3)

Kolom KP3 adalah kolom beton yang terkekang tulangan transversal $\varnothing 6 - 100$, yang mana tulangan transversal yang terpasang pada kolom KP3 belum memenuhi syarat pengekangan untuk kolom yang memikul beban gempa sesuai SNI 03-2847-2002 pasal 23.4.4. Namun kolom KP3 ini dibuat agar dapat digunakan sebagai pembanding dengan KP5.

Kolom KP5 adalah kolom yang sama persis dengan kolom KP3 namun diberi perkuatan dengan *Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP)* sehingga diharapkan kekuatannya dapat sama atau melebihi kekuatan kolom yang memenuhi syarat SNI 03-2847-2002 pasal 23.4.4.

$$\begin{aligned}
 D_c &= D - (2 \times \text{selimut beton}) - \varnothing \text{ tulangan transversal} \\
 &= 150 - (2 \times 20) - 5,8 \\
 &= 104,2 \text{ mm}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 D'_c &= D - (2 \times \text{selimut beton}) \\
 &= 150 - (2 \times 20) \\
 &= 110 \text{ mm}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 A_s &= m \cdot \frac{1}{4} \cdot \pi \cdot \varnothing^2 \\
 &= 4 \cdot \frac{1}{4} \cdot \pi \cdot 5,8^2 \\
 &= 105,68 \text{ mm}^2
 \end{aligned}$$

Tulangan transversal yang terpasang pada kolom KP3 adalah $\varnothing 10 - 100$.

Rasio tulangan transversal yang terpasang adalah :

$$\begin{aligned}
 \rho_{sterpasang} &= \frac{4A_{sp}}{D'_c \cdot s} \\
 &= \frac{4 \left(\frac{1}{4}\right) \pi \cdot \varnothing^2}{D'_c \cdot s} = \frac{\pi(5,8)^2}{110(100)} \\
 &= 0,00961
 \end{aligned}$$

$$\rho_x = \rho_y = 0,00961$$

$$f'_{lx} = K_e \cdot \rho_x \cdot f_{yh} \quad \dots\dots\dots(\text{pers. 2.19})$$

$$f'_{ly} = K_e \cdot \rho_y \cdot f_{yh}$$

$$K_e = 0,75$$

$$\begin{aligned}
 f'_{lx} = f'_{ly} &= 0,75 \times 0,00961 \times 269,28 \\
 &= 1,94 \text{ MPa}
 \end{aligned}$$

$$\frac{f'_{lx}}{f'_c} = \frac{f'_{ly}}{f'_c} = \frac{1,94}{24,52} = 0,0791$$

$$K = 1 + 2,05 \rho_s \left(\frac{f_{yh}}{f_c} \right) \quad \dots\dots\dots(\text{pers. 2.21})$$

$$K = 1 + 2,05 \times 0,00961 \times \left(\frac{269,28}{24,52} \right) = 1,216$$

$$K = \frac{f'_{cc}}{f_c}$$

$$f'_{cc} = K \cdot f_c$$

$$f'_{cc} = 1,216 \times 24,52 = 29,823 \text{ MPa}$$

$$\varepsilon'_{cc} = 0,002 \left[1 + 5 \left(\frac{f'_{cc}}{f_c} - 1 \right) \right] \quad \dots\dots\dots(\text{pers. 2.26})$$

$$\varepsilon'_{cc} = 0,002 \left[1 + 5 \left(\frac{29,823}{24,52} - 1 \right) \right] = 0,00416$$

$$\varepsilon'_{cu} = 0,004 + 1,4 \cdot \rho_s \cdot f_{yh} \cdot \frac{\varepsilon_{sm}}{f'_{cc}} \quad \dots\dots\dots(\text{pers. 2.27})$$

$$\rightarrow \rho_s = 0,00961$$

$$\varepsilon'_{cu} = 0,004 + 1,4 \times 0,00961 \times 269,28 \times \frac{0,15}{29,823} = 0,022$$

Beban maksimum kolom KP3 adalah :

$$P_{(\text{maks})} = f'_{cc} \cdot (A_g - A_{st}) + (f_y \cdot A_{st}) \quad \dots\dots\dots(\text{pers. 2.41})$$

$$= 29,823 \cdot (22500 - 298,65) + (349,64 \cdot 298,65)$$

$$= 766530,85 \text{ N} = 76,65 \text{ Ton}$$

Tabel 3.9. Tegangan Regangan Kolom Beton Terkekang Tulangan Transversal BJTP Ø6 (KP3) menurut Mander, dkk.

No	ϵ_c	X	f'c (Mpa)
1	2	3	4
1	0	0	0
2	0,00042	0,10000	9,663
3	0,00083	0,20000	16,736
4	0,00125	0,30000	21,571
5	0,00167	0,40000	24,785
6	0,00208	0,50000	26,883
7	0,00250	0,60000	28,225
8	0,00291	0,70000	29,051
9	0,00333	0,80000	29,526
10	0,00375	0,90000	29,760
11	0,00416	1,00000	29,825
12	0,00597	1,43370	29,141
13	0,00777	1,86740	27,938
14	0,00958	2,30111	26,708
15	0,01139	2,73481	25,573
16	0,01319	3,16851	24,553
17	0,01500	3,60221	23,643
18	0,01680	4,03591	22,830
19	0,01861	4,46962	22,100
20	0,02042	4,90332	21,441
21	0,02222	5,33702	20,844

Keterangan pengisian kolom pada Tabel 3.9.

➤ Kolom 1

Nomor urut.

➤ Kolom 2

Regangan beton naik (no urut 1 s/d 11)

$$\epsilon_c = \frac{0,002}{10}$$

Regangan beton turun (no urut 11 s/d 21)

$$\epsilon_{50u} = \frac{3 + 0,002 \cdot f'_c}{f'_c - 1000} \dots\dots\dots (\text{pers.2.25})$$

➤ Kolom 3

Rasio perbandingan regangan beton terhadap regangan saat tegangan mencapai maksimum

$$x = \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{\alpha}}$$

$$\varepsilon_{\alpha} = 0,002 [1 + 5(f'_{\alpha} / f'_c - 1)] \quad \dots\dots\dots \text{(pers.2.26)}$$

➤ Kolom 4

Kuat tekan beton kolom

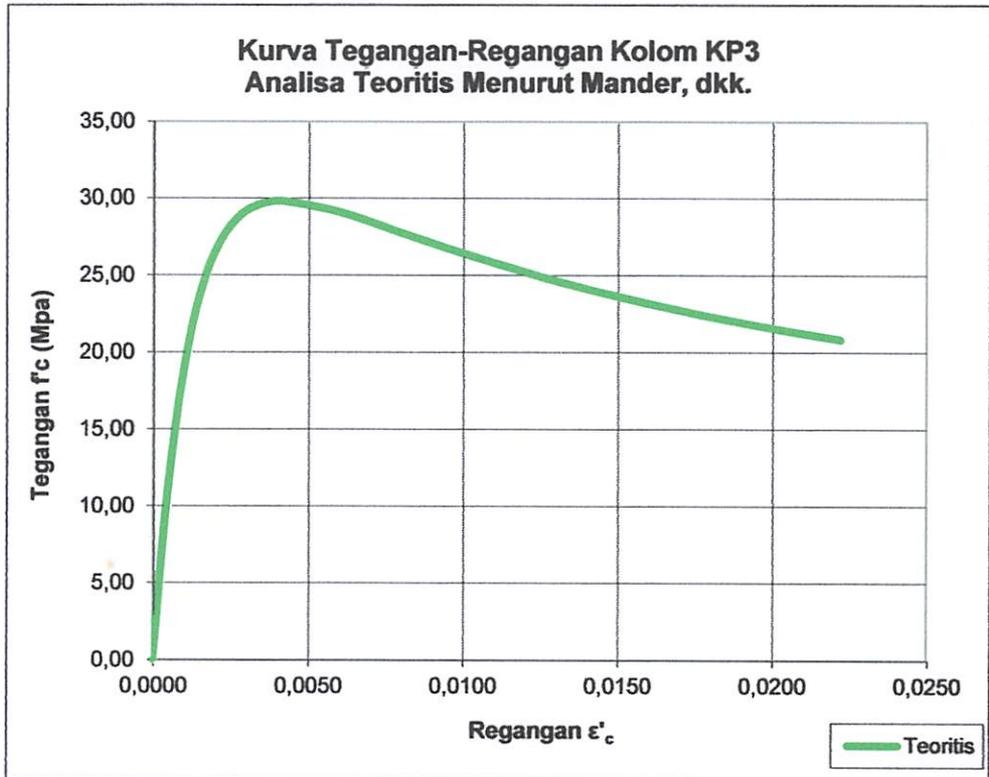
$$f_c = \frac{f'_{\alpha} \times x \times r}{r - 1 + x^r} \quad \dots\dots\dots \text{(pers.2.22)}$$

$$r = \frac{E_c}{E_c - E_{sec}} \quad \dots\dots\dots \text{(pers.2.24)}$$

$$E_{sec} = \frac{f'_{\alpha}}{\varepsilon_{\alpha}} \quad \dots\dots\dots \text{(pers.2.25)}$$

$$f'_{\alpha} = K * f'_c$$

Kurva tegangan-regangan beton kolom terkekang *tulangan transversal* (KP3) yang terlihat pada Grafik 3.9. di bawah ini adalah hasil analisa teoritis yang digambarkan dengan cara menghubungkan angka-angka pada Tabel 3.9 yaitu angka-angka pada kolom 2 untuk arah horisontal (regangan) dan kolom 4 untuk arah vertikal (tegangan).



Grafik 3.9. Kurva Hubungan Tegangan-Regangan Analisa Teoritis Kolom KP3

d. Kolom Beton Terkekang Tulangan BJTP Ø8 (KP4)

Kolom KP4 adalah kolom beton yang terkekang tulangan transversal BJTP Ø8 – 100, yang mana tulangan transversal yang terpasang pada kolom KP4 sudah memenuhi syarat pengekanan untuk kolom yang memikul beban gempa sesuai SNI 03-2847-2002 pasal 23.4.4.

Kolom KP3 ini dibuat agar dapat digunakan sebagai pembanding dengan dengan kolom KP3 dan KP5 yang belum memenuhi syarat SNI 03-2847-2002 pasal 23.4.4.

$$\begin{aligned}
 D_c &= D - (2 \times \text{selimut beton}) - \varnothing \text{tulangan transversal} \\
 &= 150 - (2 \times 20) - 7,60 \\
 &= 102,4 \text{ mm}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 D'_c &= D - (2 \times \text{selimut beton}) \\
 &= 150 - (2 \times 20) \\
 &= 110 \text{ mm}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 A_s &= m_1 \cdot \frac{1}{4} \cdot \pi \cdot \varnothing^2 \\
 &= 4 \cdot \frac{1}{4} \cdot \pi \cdot 7,6^2 \\
 &= 181,458 \text{ mm}^2
 \end{aligned}$$

Tulangan transversal pada kolom KP4 adalah $\varnothing 8 - 100$.

Rasio tulangan transversal yang terpasang adalah :

$$\begin{aligned}
 \rho_{\text{sterpasang}} &= \frac{4A_{sp}}{D'_c \cdot s} \\
 &= \frac{4 \left(\frac{1}{4}\right) \pi \cdot \varnothing^2}{D'_c \cdot s} = \frac{\pi(7,60)^2}{110(100)} \\
 &= 0,0165
 \end{aligned}$$

$$\rho_x = \rho_y = 0,0165$$

$$f'_{lx} = K_e \cdot \rho_x \cdot f_{yh} \quad \dots\dots\dots(\text{pers. 2.19})$$

$$f'_{ly} = K_e \cdot \rho_y \cdot f_{yh}$$

$$K_e = 0,75$$

$$\begin{aligned}
 f'_{lx} = f'_{ly} &= 0,75 \times 0,0165 \times 312,88 \\
 &= 3,871 \text{ MPa}
 \end{aligned}$$

$$\frac{f'_{lx}}{f'_c} = \frac{f'_{ly}}{f'_c} = \frac{3,871}{24,52} = 0,158$$

$$K = 1 + 2,05 \rho_s \left(\frac{f_{yh}}{f'_c} \right) \quad \dots\dots\dots(\text{pers. 2.21})$$

$$K = 1 + 2,05 \cdot 0,0165 \cdot \left(\frac{312,88}{24,52} \right) = 1,432$$

$$K = \frac{f'_{\alpha}}{f'_c}$$

$$f'_{cc} = K \cdot f'_c$$

$$f'_{cc} = 1,432 \times 24,52 = 35,10 \text{ MPa}$$

$$\varepsilon'_{cc} = 0,002 \left[1 + 5 \left(\frac{f'_{cc}}{f'_c} - 1 \right) \right] \quad \dots\dots\dots(\text{pers. 2.26})$$

$$\varepsilon'_{cc} = 0,002 \left[1 + 5 \left(\frac{35,10}{24,52} - 1 \right) \right] = 0,00632$$

$$\varepsilon'_{cu} = 0,004 + 1,4 \cdot \rho_s \cdot f_{yh} \cdot \frac{\varepsilon_{sm}}{f'_{cc}} \quad \dots\dots\dots(\text{pers. 2.27})$$

$$\rightarrow \rho_s = 0,0165$$

$$\varepsilon'_{cu} = 0,004 + 1,4 \times 0,0165 \times 312,88 \times \frac{0,15}{35,10} = 0,034884$$

Beban maksimum kolom KP4 adalah :

$$P_{(\text{maks})} = f'_{cc} \cdot (A_g - A_{st}) + (f_y \cdot A_{st}) \quad \dots\dots\dots(\text{pers. 2.41})$$

$$= 35,10 \cdot (22500 - 298,65) + (349,64 \cdot 298,65)$$

$$= 883687,371 \text{ N} = 88,369 \text{ Ton}$$

Tabel 3.10. Tegangan Regangan Kolom Beton Terkekang Tulangan Transversal BJTP Ø8 (KP4) menurut Mander, dkk.

No	ϵ_c	X	f_c (Mpa)
1	2	3	4
1	0	0	0
2	0,00063	0,10000	14,348
3	0,00126	0,20000	22,887
4	0,00189	0,30000	27,901
5	0,00253	0,40000	30,904
6	0,00316	0,50000	32,729
7	0,00379	0,60000	33,840
8	0,00442	0,70000	34,502
9	0,00505	0,80000	34,874
10	0,00568	0,90000	35,053
11	0,00632	1,00000	35,103
12	0,00917	1,45230	34,554
13	0,01203	1,90460	33,601
14	0,01489	2,35690	32,628
15	0,01774	2,80920	31,722
16	0,02060	3,26151	30,900
17	0,02346	3,71381	30,159
18	0,02631	4,16611	29,489
19	0,02917	4,61841	28,881
20	0,03203	5,07071	28,327
21	0,03488	5,52301	27,820

Keterangan pengisian kolom pada Tabel 3.10

➤ Kolom 1

Nomor urut.

➤ Kolom 2

Regangan beton naik (no urut 1 s/d 11)

$$\epsilon_c = \frac{0,002}{10}$$

Regangan beton turun (no urut 11 s/d 21)

$$\epsilon_{s_{0u}} = \frac{3 + 0,002 \cdot f'_c}{f'_c - 1000} \quad \dots\dots\dots \text{(pers.2.25)}$$

➤ Kolom 3

Rasio perbandingan regangan beton terhadap regangan saat tegangan mencapai maksimum

$$x = \frac{\epsilon_c}{\epsilon_{oc}}$$

$$\varepsilon_{\alpha} = 0,002 [1 + 5(f'_{\alpha} / f'_c - 1)] \quad \dots\dots\dots \text{(pers.2.26)}$$

➤ Kolom 4

Kuat tekan beton kolom

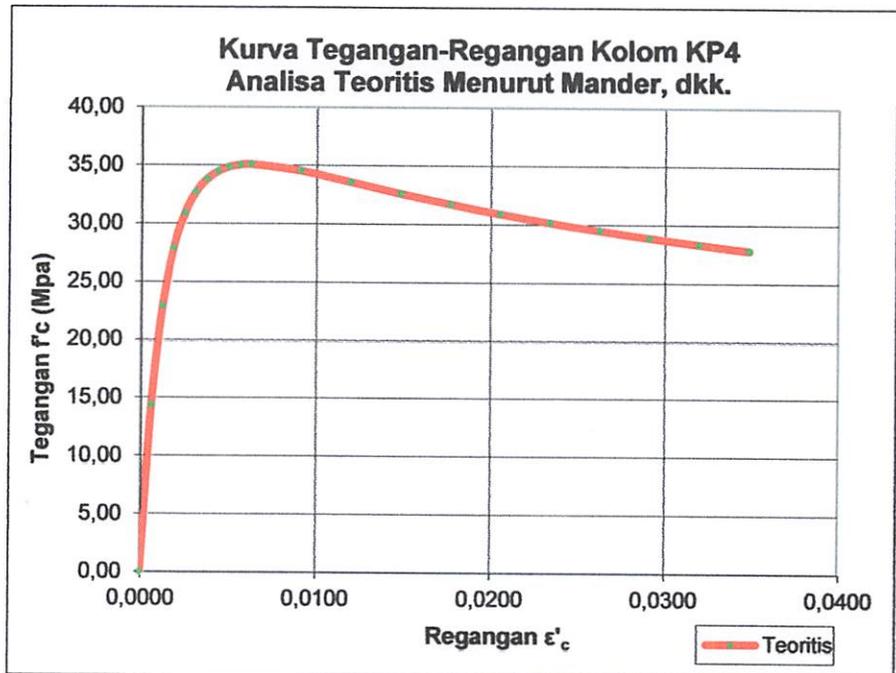
$$f_c = \frac{f'_{\alpha} \times x \times r}{r - 1 + x'} \quad \dots\dots\dots \text{(pers.2.22)}$$

$$r = \frac{E_c}{E_c - E_{sec}} \quad \dots\dots\dots \text{(pers.2.24)}$$

$$E_{sec} = \frac{f'_{\alpha}}{\varepsilon_{\alpha}} \quad \dots\dots\dots \text{(pers.2.25)}$$

$$f'_{\alpha} = K * f'_c$$

Kurva tegangan-regangan beton kolom terkekang *tulangan transversal (KP4)* yang terlihat pada Grafik 3.10. di bawah ini adalah hasil analisa teoritis yang digambarkan dengan cara menghubungkan angka-angka pada Tabel 3.10 yaitu angka-angka pada kolom 2 untuk arah horisontal (regangan) dan kolom 4 untuk arah vertikal (tegangan).



Grafik 3.10. Kurva Hubungan Tegangan-Regangan Analisa Teoritis Kolom KP4

e. Kolom Beton Terkekang Tulangan BJTP Ø6 dan CFRP (KP5)

Kolom KP5 adalah kolom beton yang terkekang tulangan transversal BJTP Ø6-100, yang mana tulangan transversal yang terpasang pada kolom KP5 belum memenuhi syarat pengekangan untuk kolom yang memikul beban gempa sesuai SNI 03-2847-2002 pasal 23.4.4 sehingga perlu dibungkus lagi menggunakan *Carbon Fiber Reinforced Polymer* pada bagian luar kolom agar diharapkan kekuatannya setara atau melebihi kekuatan kolom KP4 yang telah memenuhi persyaratan Tahan gempa dalam SNI 03-2847-2002 pasal 23.4.4.

Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP) yang digunakan adalah jenis SikaWrap Hex-230C dengan spesifikasi sebagai berikut :

Ketebalan (<i>thickness</i>)	: 0,13 mm
Kuat tarik (<i>tensile strength</i>)	: 3500 MPa
Modulus Elastisitas (<i>Tensile E-modulus</i>)	: 230000 MPa
Regangan CFRP (<i>allowable strain, ϵ_j</i>)	: 0,004
Regangan Ultimit CFRP (<i>Ultimate Strain ϵ_{uj}</i>)	: 0,011

Metode pengekangan dengan CFRP yang digunakan adalah metode diskrit, dimana kolom dibungkus dengan CFRP dengan lebar 100 mm pada setiap jarak 100 mm arah vertikal kolom.

$$\begin{aligned}
 A_{sj} &= m_2 \cdot t_j \cdot b \\
 &= 4 \cdot 0,13 \cdot 150 \\
 &= 78 \text{ mm}^2
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 A_s &= m_1 \cdot \frac{1}{4} \cdot \pi \cdot \phi^2 \\
 &= 8 \cdot \frac{1}{4} \cdot \pi \cdot 9,9^2 \\
 &= 615,815 \text{ mm}^2
 \end{aligned}$$

➤ Tulangan spiral yang terpasang pada kolom KP5 adalah Ø6-100.

$$\begin{aligned}
 D_c &= D - (2 \times \text{selimut beton}) - \phi \text{ tulangan transversal} \\
 &= 150 - (2 \times 20) - 5,8 \\
 &= 104,2 \text{ mm}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 D'_c &= D - (2 \times \text{selimut beton}) \\
 &= 150 - (2 \times 20)
 \end{aligned}$$

$$= 110 \text{ mm}$$

$$A_s = m_1 \cdot \frac{1}{4} \cdot \pi \cdot \varnothing^2$$

$$= 4 \cdot \frac{1}{4} \cdot \pi \cdot 5,8^2$$

$$= 105,68 \text{ mm}^2$$

➤ Rasio tulangan transversal yang terpasang adalah :

$$\rho_{sterpasang} = \frac{4A_{sp}}{D'_c \cdot s}$$

$$= \frac{4 \left(\frac{1}{4} \right) \pi \cdot \varnothing^2}{D'_c \cdot s} = \frac{\pi (5,8)^2}{110 (100)}$$

$$= 0,00961$$

$$\rho_{s\varnothing6} = 0,00961 < \rho_{s\varnothing8} = 0,0165$$

$$f'_{lx} = K_e \cdot \rho_x \cdot f_{yh} \quad \dots\dots\dots(\text{pers.2.19})$$

$$f'_{ly} = K_e \cdot \rho_y \cdot f_{yh}$$

$$K_e = 0,75$$

$$f'_{lx} = f'_{ly} = 0,75 \times 0,00961 \times 269,28$$

$$= 1,94 \text{ MPa}$$

$$\frac{f'_{lx}}{f'_c} = \frac{f'_{ly}}{f'_c} = \frac{1,94}{24,52} = 0,0791$$

$$K = 1 + 2,05 \rho_s \left(\frac{f_{yh}}{f'_c} \right) \quad \dots\dots\dots(\text{pers. 2.21})$$

$$K = 1 + 2,05 \times 0,00961 \times \left(\frac{269,28}{24,52} \right) = 1,216$$

$$K = \frac{f'_\alpha}{f'_c}$$

$$f'_\alpha = K \cdot f'_c$$

$$f'_{cc} = 1,216 \times 24,52 = 29,823 \text{ MPa}$$

$$\varepsilon'_{cc} = 0,002 \left[1 + 5 \left(\frac{f'_{cc}}{f'_c} - 1 \right) \right] \quad \dots\dots\dots(\text{pers. 2.26})$$

$$\varepsilon'_{cc} = 0,002 \left[1 + 5 \left(\frac{29,823}{24,52} - 1 \right) \right] = 0,00416$$

$$\varepsilon'_{cu} = 0,004 + 1,4 \cdot \rho_s \cdot f_{yh} \cdot \frac{\varepsilon_{sm}}{f'_{cc}} \quad \dots\dots\dots(\text{pers. 2.27})$$

$$\rightarrow \rho_s = 0,00961$$

$$\varepsilon'_{cu} = 0,004 + 1,4 \times 0,00961 \times 269,28 \times \frac{0,15}{29,823} = 0,022$$

► Rasio CFRP :

$\varepsilon_j = \varepsilon_t$, direncanakan 0,004 sehingga;

$$f_j = 0,004 E_j = 0,004(230000) = 920 \text{ MPa}$$

$$\rho_j = \frac{4t_j}{D} \quad \dots\dots\dots(\text{pers. 2.7a})$$

$$= \frac{4(0,13)}{150,13} = 0,003464$$

► Penambahan Kuat tekan beton Akibat kekangan CFRP dan tulangan Transversal :

$$f'_{cc} = f'_{c0} \left\{ \left(2,254 \sqrt{1 + 7,94 \frac{F_t}{f'_{c0}}} \right) - 2 \frac{F_t}{f'_c} - 1,254 \right\} \dots\dots(\text{pers. 2.8})$$

$$f_j = E_j \varepsilon_t \quad \dots\dots\dots(\text{pers. 2.7})$$

$$\varepsilon_j = 0,004$$

$$\varepsilon_{uj} = 0,004$$

$$\begin{aligned} f_j &= 0,004 E_j \\ &= 0,004(230000) \\ &= 920 \text{ N/mm}^2 \end{aligned}$$

Jaket CFRP yang mengikat tegangan lateral, f_{ij}

$$\begin{aligned} f_{ijx} &= 2 \frac{t_j}{h} f_j \\ &= 2 \frac{(0,13)}{150} (920) \\ &= 1,593285819 \text{ N/mm}^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} f_{i,y} &= 2 \frac{t_j}{b} f_j \\ &= 2 \frac{(0,13)}{150,13} (920) \\ &= 1,593285819 \text{ N/mm}^2 \end{aligned}$$

Tegangan Lateral Total akibat Kekangan Tulangan transversal dan CFRP

$$\begin{aligned} F_t &= f_{ij} + f_l \\ &= 1,94 + 1,5933 \\ &= 3,533 \end{aligned}$$

$$f'_{cc} = f'_{c0} \left\{ \left(2,254 \sqrt{1 + 7,94 \frac{F_t}{f'_{c0}}} \right) - 2 \frac{F_t}{f'_c} - 1,254 \right\}$$

$$f'_{cc} = 24,52 \left\{ \left(2,254 \sqrt{1 + 7,94 \frac{3,533}{24,52}} \right) - 2 \frac{3,533}{24,52} - 1,254 \right\}$$

$$f'_{cc} = 43,11 \text{ MPa}$$

$$\begin{aligned} E_c &= 4700 \sqrt{f'_{cc}} \\ &= 4700 \sqrt{43,11} \\ &= 30859,36 \text{ MPa} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \varepsilon_{ccj} &= \frac{1,71 \cdot (5f'_{cc} - 4f'_c)}{E_c} \\ &= \frac{1,71 \cdot (5 \cdot 43,11 - 4 \cdot 43,11)}{30859,36} \end{aligned}$$

$$= 0,0024$$

$$r = \frac{E_c}{E_c - E_{cc}} \quad \dots\dots\dots(\text{pers 2.24})$$

$$= 1,1876$$

$$\varepsilon_{cu_j} = 0,004 + \frac{2,8 \cdot \rho_j \cdot \emptyset_j \cdot f_{ju} \cdot \varepsilon_{uj}}{f'_{cc}} \quad \dots\dots\dots(\text{pers 2.10})$$

$$\varepsilon_{uj} = 0,011$$

$$f_{ju} = 230000 \cdot 0,011 = 2530 \text{ Mpa}$$

$$\emptyset_j = 0,9$$

$$\varepsilon_{eu_j} = 0,004 + \frac{2,8 \cdot 0,003464 \cdot 0,9 \cdot 2530 \cdot 0,011}{43,11}$$

$$\varepsilon_{eu_j} = 0,0099635$$

Beban maksimum kolom KP2 adalah :

$$P_{n(\text{maks})} = f_{cc} \cdot (A_g - A_{st}) + (f_y \cdot A_{st}) + (A_j \cdot f_j) \quad \dots\dots\dots(\text{pers. 2.41})$$

$$A_g = b \cdot h$$

$$= 150 \cdot 150 = 22500 \text{ mm}^2$$

$$A_{st} = 4 \cdot \frac{1}{4} \Pi D^2$$

$$= 4 \cdot \frac{1}{4} \Pi (9,75)^2$$

$$= 298,65 \text{ mm}^2$$

$$A_j = 4 \cdot 150 \cdot 0,13$$

$$= 78 \text{ mm}^2$$

$$= 43,11 \cdot ((22500 - 298,65) + (349,64 \cdot 298,65) + (78 \cdot 920))$$

$$= 1133283,171 \text{ N} = 113,33 \text{ Ton}$$

Tabel 3.11. Tegangan Regangan Kolom Beton Terkekang Tulangan BJTP Ø6 dan CFRP menurut Mander, dkk.

No	ϵ_c	X	f_c (Mpa)
1	2	3	4
1	0	0	0
2	0,00024	0,1	21,189
3	0,00048	0,2	31,284
4	0,00072	0,3	36,487
5	0,00096	0,4	39,369
6	0,00119	0,5	41,038
7	0,00143	0,6	42,023
8	0,00167	0,7	42,597
9	0,00191	0,8	42,916
10	0,00215	0,9	43,068
11	0,00239	1,0	43,110
12	0,00384	1,61	41,817
13	0,00529	2,21	40,562
14	0,00674	2,82	39,345
15	0,00819	3,43	38,165
16	0,00964	4,04	37,020
17	0,01109	4,64	35,909
18	0,01254	5,25	34,832
19	0,01399	5,86	33,787
20	0,01544	6,46	32,774
21	0,01689	7,07	31,790

Keterangan pengisian kolom pada Tabel 3.11.

➤ Kolom 1

Nomor urut.

➤ Kolom 2

Regangan beton naik (no urut 1 s/d 11)

$$\epsilon_c = \frac{0,002}{10}$$

Regangan beton turun (no urut 11 s/d 21)

$$\epsilon_{50u} = \frac{3 + 0,002 \cdot f'_c}{f'_c - 1000} \quad \dots\dots\dots \text{(pers.2.25)}$$

➤ Kolom 3

Rasio perbandingan regangan beton terhadap regangan saat tegangan mencapai maksimum

$$x = \frac{\epsilon_c}{\epsilon_{cc}}$$

$$\varepsilon_{cc} = 0,002 [1 + 5(f'_{cc} / f'_c - 1)] \quad \dots\dots\dots (\text{pers.2.26})$$

➤ Kolom 4

Kuat tekan beton kolom

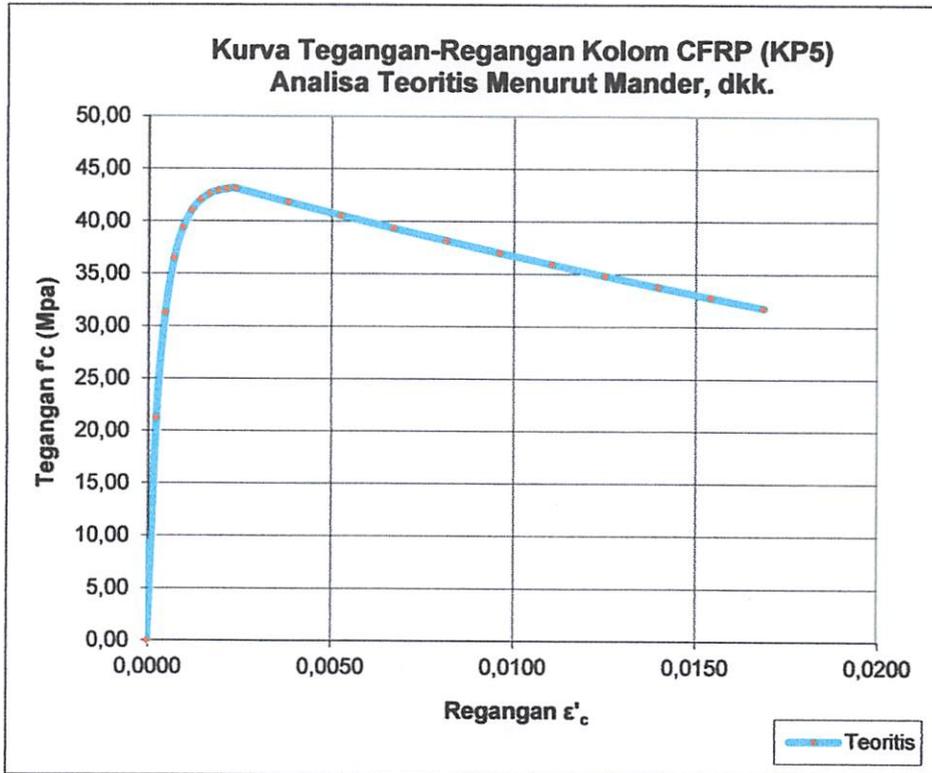
$$f_c = \frac{f'_{cc} \times x \times r}{r - 1 + x^r} \quad \dots\dots\dots (\text{pers.2.22})$$

$$r = \frac{E_c}{E_c - E_{scc}} \quad \dots\dots\dots (\text{pers.2.24})$$

$$E_{scc} = \frac{f'_{cc}}{\varepsilon_{cc}} \quad \dots\dots\dots (\text{pers.2.25})$$

$$f'_{cc} = K^* f'_c$$

Kurva tegangan-regangan beton kolom terkekang *tulangan BJTP* yang dibungkus dengan *Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP)* yang terlihat pada Grafik 3.11. di bawah ini adalah hasil analisa teoritis yang digambarkan dengan cara menghubungkan angka-angka pada Tabel 3.11 yaitu angka-angka pada kolom 2 untuk arah horisontal (regangan) dan kolom 4 untuk arah vertikal (tegangan).

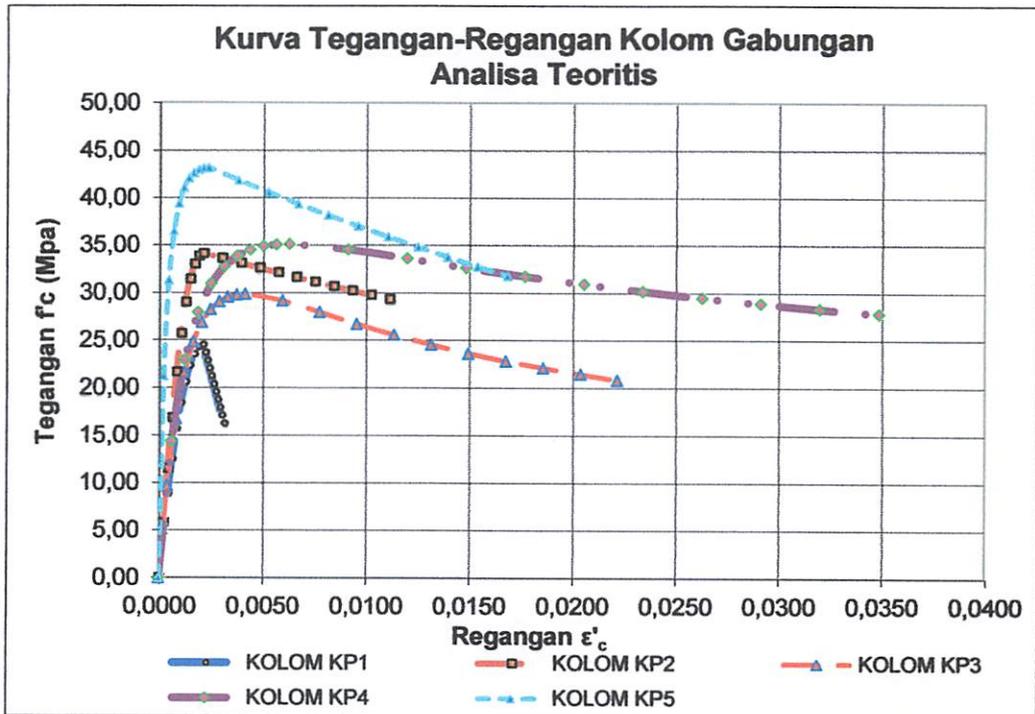


Grafik 3.11. Kurva Hubungan Tegangan-Regangan Analisa Teoritis Kolom KP5

Grafik 3.12 adalah gambar kurva tegangan-regangan hasil analisa teoritis kolom KP1 (Gambar 3.1a), KP2 (Gambar 3.1b), KP3 (Gambar 3.c), KP4 (Gambar 3.1d) dan KP5 (Gambar 3.1e) yang digabungkan ke dalam satu kurva. Terlihat pada kurva, kolom beton polos (KP1) yang tak terkekang (unconfined) mempunyai tegangan dan regangan puncak yang lebih kecil daripada kolom beton yang terkekang (confined). Kolom beton polos (KP1) setelah mencapai tegangan puncak langsung mengalami keruntuhan, sedangkan kolom beton terkekang setelah mencapai tegangan puncak masih mengalami displacement yang besar hingga mencapai regangan ultimit kemudian baru mengalami keruntuhan.

Pada Kurva tegangan regangan Kolom yang terkekang tulangan BJTP $\emptyset 6$ dan CFRP (KP5), terlihat terjadi peningkatan Kuat tekan yang

signifikan dan juga mengalami peningkatan nilai regangan ultimit hingga mendekati nilai regangan ultimit kolom yang terkekang tulangan BJTP Ø8 (KP4).



Grafik 3.12. Kurva Tegangan-Regangan Kolom Beton Analisa Teoritis Gabungan

Mengacu pada Tabel 3.12. dibawah, terlihat bahwa hasil analisa teoritis kolom KP5 mempunyai efektifitas pengekangan yang jauh baik bila dibanding dengan kolom KP1, Kolom KP2, Kolom KP3 dan Kolom KP4. Dimana Akibat penambahan CFRP pada kolom KP5 mampu meningkatkan kekuatan kolom terhadap beban Aksial (P_{maks}) sebesar 113 ton, kuat tekan beton (f'_{cc}) sebesar 43,11 MPa, regangan puncak beton terkekang (ϵ'_{cc}) sebesar 0,00964 dan regangan beton ultimit (ϵ'_{cu}) sebesar 0,0169. Terlihat pada prosentase perbedaan, meskipun kolom KP5 mempunyai efektifitas

yang baik pada parameter Kuat Beban aksial (P_{maks}), kuat tekan beton (f'_{cc}), dan regangan puncak (ϵ'_{cc}), namun masih memiliki inefektifitas pada parameter regangan ultimit (ϵ'_{cu}) jika dibandingkan dengan kolom KP4. Dimana regangan ultimit (ϵ'_{cu}) KP5 masih berbeda 106,53% dari KP4. Sehingga dapat disimpulkan : penambahan CFRP pada kolom KP5 hanya mampu meningkatkan Kuat Beban Aksial, Kuat tekan beton dan regangan puncak beton; namun belum mampu memberi penambahan regangan ultimit yang lebih baik dari kekangan tulangan BJTP Ø8 pada KP4.

Tabel 3.12. Rekapitulasi Kekuatan Kolom Hasil Analisa Teoritis 5 kolom

No.	Tipe Kolom	ρ_s	ρ_{CFRP}	Teoritis				Perbedaan (%)				
				f'_{cc}	ϵ_{cc}	ϵ_{cu}	P_{maks} (Ton)	P_{maks}	f'_{cc}	ϵ_{cc}	ϵ_{cu}	ρ_s
1	KP1	-	-	24,52	0,00211	0,0031	64,88	57,25	56,88	21,86	18,51	-
2	KP2	-	0,0035	34,11	0,00212	0,0111	93,35	82,37	79,12	22,04	65,88	-
3	KP3	0,010	-	29,82	0,00416	0,0222	76,66	67,64	69,18	43,19	131,56	58,24
4	KP4	0,017	-	35,10	0,00632	0,0349	88,38	77,98	81,43	65,52	206,53	100,00
5	KP5	0,010	0,0035	43,11	0,00964	0,0169	113,33	100,00	100,00	100,00	100,00	58,24

3.7. Analisa Daktilitas Regangan Teoritis Kolom

Faktor Daktilitas regangan atau perbandingan antara regangan maksimum kolom pada saat kolom mencapai kondisi diambang keruntuhan (ϵ_{cu}) dan regangan kolom pada saat kolom mencapai tegangan puncak (ϵ_{cc}), maka besarnya faktor daktalitas regangan dapat dihitung sebagai berikut :

$$\mu = \frac{\epsilon_{cc}}{\epsilon_{cu}}$$

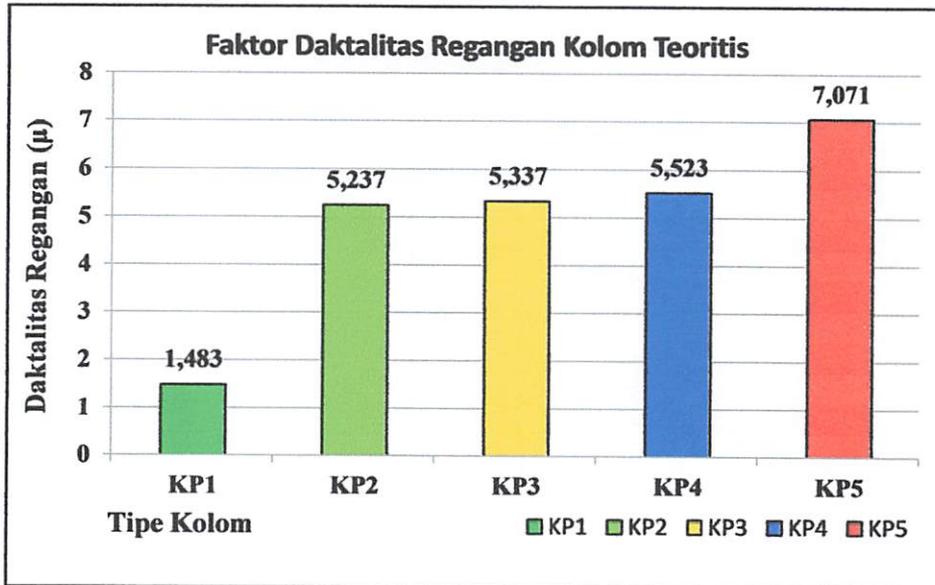
Dari hasil analisa kekuatan kolom secara teoritis pada Tabel 3.12 diatas didapatkan nilai daktalitas regangan kolom sebagai berikut :

Tabel 3.13. Rekapitulasi Analisa Daktilitas Regangan Teoritis 5 kolom

TIBE KOLOM	Regangan Maks. ϵ_{cu}	Regangan Leleh ϵ_{cc}	Daktilitas μ	Perbedaan (%)
KP1	0,003125682	0,002107135	1,48337987	100
KP2	0,011127613	0,002124903	5,23676279	353,0291118
KP3	0,022220783	0,00416352	5,33701876	359,7877296
KP4	0,034884086	0,006316136	5,52301041	372,3260991
KP5	0,016890346	0,002388841	7,07051885	476,6492379

Pada tabel 3.13 diatas terlihat daktilitas regangan kolom tak terkekang (KP1) mengalami peningkatan nilai daktilitas yang signifikan jika diberi tambahan kekangan dengan CFRP (KP2), yaitu meningkat dari 1,48 menjadi 5,2. Demikian juga daktilitas regangan kolom yang terkekang tulangan BJTP Ø6 (KP3) mengalami peningkatan nilai Faktor daktilitas setelah diperkuat dengan CFRP (KP5), yaitu meningkat dari 3,337 menjadi 7,07.

Untuk visualisai yang lebih jelas tentang peningkatan daktilitas regangan kolom hasil analisa teoritis, dapat dilihat pada barchart dibawah ini :



Gambar 3.33. Barchart Daktilitas Regangan Teoritis Kolom

3.8. Laporan Yang Akan Dikerjakan

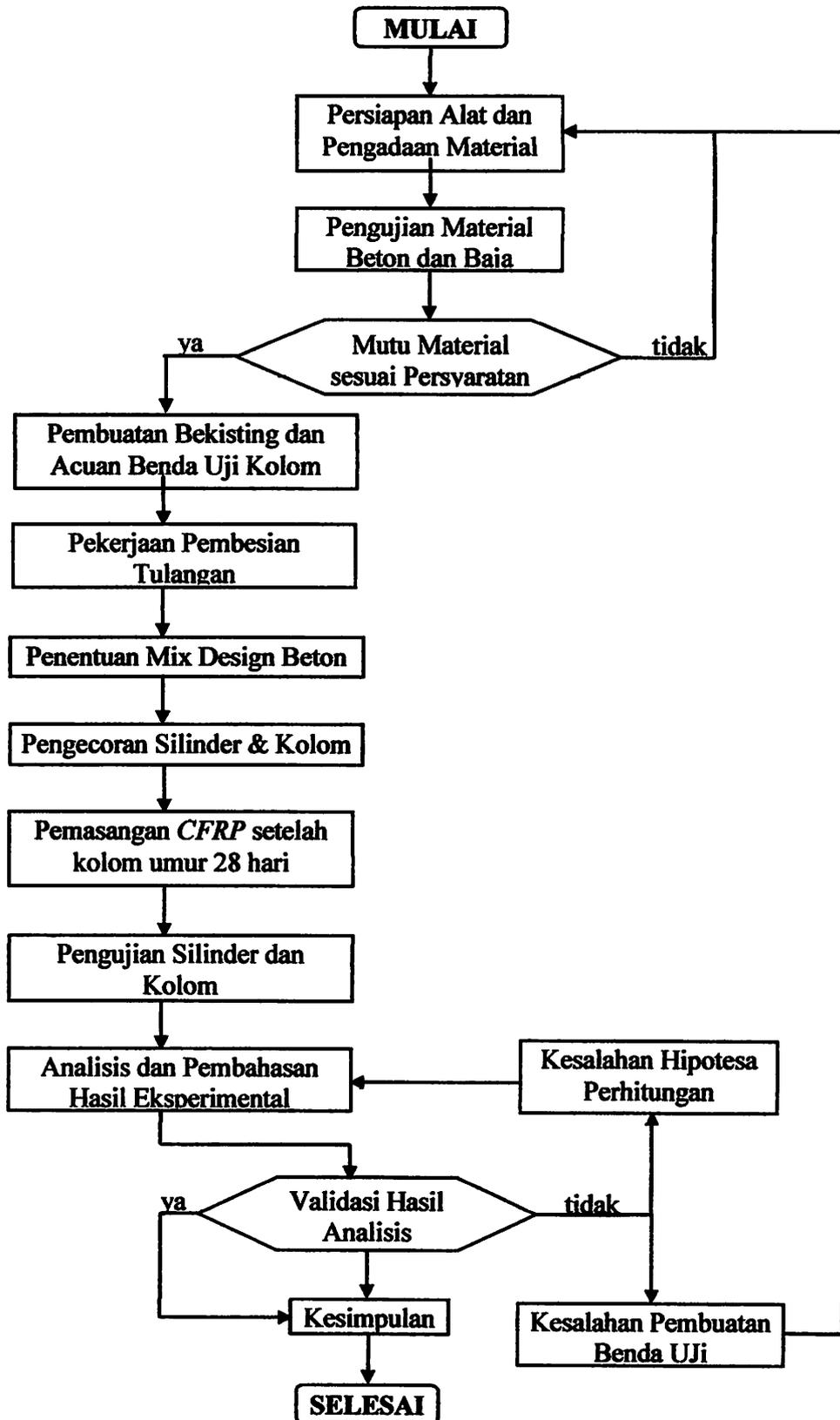
Pada tahap ini dilakukan pengolahan dan analisa data. Analisa terhadap data hasil eksperimen meliputi pengkajian terhadap peningkatan kuat tekan beton, regangan tekan beton pada saat tegangan maksimum (ϵ'_{cc}) dan regangan tekan beton ultimit (ϵ'_{cu}), dengan membandingkan f_c - ϵ_c diagram ke-tujuh sampel, khususnya f'_{cc} , K , ϵ'_{cc} , ϵ'_{cu} .

Penyajian data-data yang akan dilakukan dari hasil penelitian ini antara lain adalah :

1. Pengaruh rasio volumetrik, spasi, diameter, *CFRP* terhadap kurva hubungan tegangan-regangan hasil eksperimen.
2. Pengaruh rasio volumetrik, spasi, diameter, *tulangan sengkang* terhadap kurva hubungan tegangan-regangan hasil eksperimen.
3. Pengaruh rasio volumetrik, spasi, diameter, *tulangan sengkang* yang diberi lapisan *CFRP* terhadap kurva hubungan tegangan-regangan hasil eksperimen.
4. Pengaruh rasio volumetrik, spasi, diameter dan *CFRP* terhadap regangan tekan ultimit (ϵ'_{cu}) penampang beton.
5. Pengaruh rasio volumetrik, spasi, diameter dan *tulangan sengkang BJTP* terhadap regangan tekan ultimit (ϵ'_{cu}) penampang beton.
6. Pengaruh rasio volumetrik, spasi, diameter dan *tulangan sengkang* yang dibungkus *CFRP* terhadap regangan tekan ultimit (ϵ'_{cu}) penampang beton.
7. Faktor penambahan kekuatan beton terkekang terhadap efektifitas *CFRP*.

8. Faktor penambahan kekuatan beton terkekang terhadap efektifitas *tulangan sengkang BJTP*.
9. Faktor penambahan kekuatan beton terkekang terhadap efektifitas *tulangan sengkang BJTP* yang diberi lapisan *CFRP*.
10. Pengaruh efektifitas pengekangan dengan *CFRP* terhadap regangan pada tegangan respon puncak kolom.
11. Pengaruh efektifitas pengekangan dengan *tulangan sengkang BJTP* terhadap regangan pada tegangan respon puncak kolom.
12. Pengaruh efektifitas pengekangan dengan *tulangan sengkang BJTP* yang diberi lapisan *CFRP* terhadap regangan pada tegangan respon puncak kolom.
13. Pengaruh rasio volumetrik, kapasitas pengekangan dan spasi *CFRP* terhadap rasio penambahan kekuatan kolom.
14. Pengaruh rasio volumetrik, kapasitas pengekangan dan spasi *tulangan sengkang BJTP* terhadap rasio penambahan kekuatan kolom.
15. Pengaruh rasio volumetrik, kapasitas pengekangan dan spasi *tulangan sengkang BJTP* yang diberi lapisan *CFRP* terhadap rasio penambahan kekuatan kolom.

3.9. Bagan Alir Penelitian



Gambar 3.34. Bagan alir penelitian

BAB IV

HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

4.1. Hasil Pengujian Laboratorium

4.1.1. Perancangan Campuran Beton

Kuat tekan beton mutu normal direncanakan sebesar $f'_c = 22,5$ MPa dengan pengadukan menggunakan molen. Mix desain diperhitungkan menggunakan MCP 211-ACI-2006 dengan menggunakan material pasir Pasuruan dan kerikil dari Jawa Timur serta Semen Gresik tipe 1. Hasil perancangan campuran beton untuk 1 m^3 dengan komposisi material seperti terlihat pada Tabel 4.1. Hasil perancangan campuran beton selengkapnya dapat dilihat pada *Lampiran L.2.1*

Tabel 4.1. Proporsi Campuran Beton Mutu 22,5 MPa

No.	Material	Volume	Satuan
1	Air	205	kg/m^3
2	Semen	315,4	kg/m^3
3	Agregat Kasar	1008	kg/m^3
4	Agregat Halus	816,6	kg/m^3

4.1.2. Pengujian Kuat Tekan Beton Silinder

Pelaksanaan pengujian berdasarkan standard ASTM C39-93a (*Standard Test Method for Compressive Strength of Cylinder Concrete Specimen*). Alat uji tekan yang digunakan adalah *Universal Testing Machine (UTM)*. Untuk mendapatkan kuat tekan beton (f'_c) yang akan dipakai dalam menganalisa data eksperimen, maka dilakukan pengujian

kuat tekan beton menggunakan benda uji silinder dengan ukuran 150 x 300 mm. Pengujian dilakukan setelah beton silinder berumur 28 hari, dengan jumlah silinder sebanyak 12 buah. Hasil kuat tekan silinder yang diperoleh sebesar $f'_c = 24,52$ MPa. Perhitungan kuat tekan silinder selengkapnya dapat dilihat pada *Lampiran II, Tabel L.2.3*.

4.1.3. Pengujian Tarik Baja Tulangan

Pelaksanaan pengujian kuat tarik baja menggunakan SNI 07-2052-2002. Alat uji yang digunakan adalah *Universal Testing Machine (UTM)*. Sebagaimana lazimnya, pengujian spesimen baja hanya dilakukan dengan tarikan saja, sedang pengujian tekan tidak dilakukan. Tulangan longitudinal dan spiral yang digunakan adalah Baja Tulangan Polos (BJTP) diameter 8 mm dan 10 mm dengan panjang awal BJTP adalah 800 mm serta. Diameter aktual benda uji BJTP adalah diameter 5,80 mm, diameter 7,60 mm dan diameter 9,75 dengan kuat leleh rata-rata hasil pengujian dapat dilihat pada tabel 4.2 dibawah ini. Selengkapnya untuk hasil pengujian dan laporan pengujian tarik baja tulangan dapat dilihat pada *Lampiran II, Tabel L.2.2*.

Tabel 4.2 Hasil Pengujian Tarik Baja Tulangan

Diameter Pengenal (mm)	Diameter Pengukuran (mm)	Kuat Leleh (MPa)	Kuat Putus (MPa)
6	5,80	277,3	411,15
6	5,80	250,6	402,78
6	5,80	280,3	417,21
8	7,60	326,4	449,99
8	7,60	313,8	442,86
8	7,60	298,3	438,71
10	9,75	353,2	488,12
10	9,75	335,1	472,68
10	9,75	360,5	496,11

4.2. Hasil Pengujian Tekan Kolom

4.2.1. Kolom Beton Tak Terkekang (KP1)

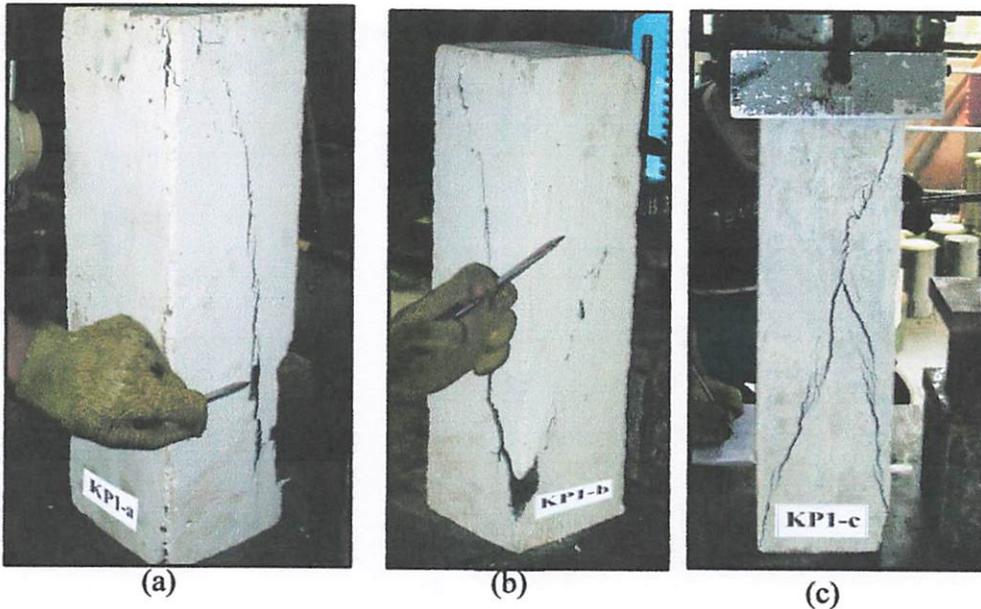
1. Mekanisme Keruntuhan.

Mekanisme keruntuhan kolom KP1-A diawali dengan terjadinya retak halus arah memanjang kolom pada saat beban mencapai $P = 46$ ton kemudian lebar retak bertambah seiring dengan penambahan beban tekan P hingga beban puncak. Seperti terlihat dalam Gambar 4.1a, gambar ini diambil pada saat beban mendekati beban puncak $P = 54,5$ ton dan beban tekan tetap diberikan hingga beban turun menjadi $P = 32,6$ ton kemudian kolom pecah karena batas regangan tarik dilampui.

Terlihat pada Gambar 4.1b kehancuran kolom KP1-B diawali dengan retak membelah ke arah memanjang kolom pada saat beban mencapai $P = 44$ ton, gambar ini diambil pada saat beban P telah

mendekati beban puncak $P = 53,8$ ton dan beban tekan tetap diberikan hingga melampaui beban puncak dan beban kembali turun menjadi $P = 34,2$ ton kemudian kolom pecah karena batas regangan tarik dilampaui.

Pada KP1-C kolom mengalami pola retak yang hampir sama dengan KP1-A dan KP1-B, dimana kolom mengalami retak kearah memanjang kolom pada saat beban mencapai $P = 46$ ton. Beban terus diberikan hingga kolom runtuh pada saat beban P turun menjadi 32,7 Ton.



Gambar 4.1. Pengujian Kolom KP1

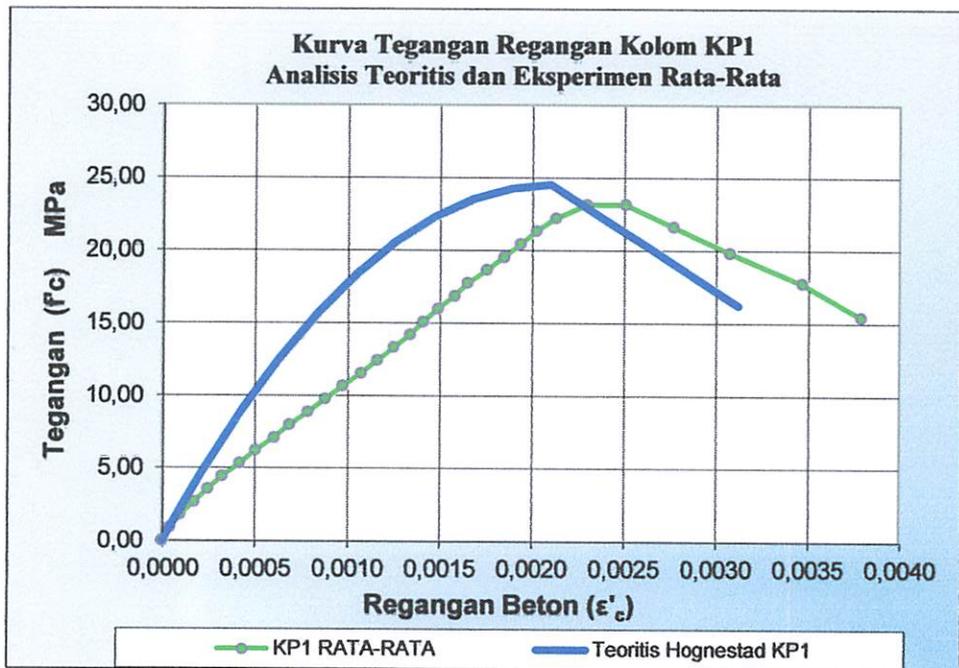
(a) Kolom KP1-a, (b) Kolom KP1-b (b) dan (c) Kolom KP1-c

2. Kurva Hubungan Tegangan-Regangan Beton

Hasil eksperimen yang diperoleh adalah besar beban tekan (P) dan besar displacement yang diukur menggunakan alat Dial sebanyak 2 buah. Nilai displacement yang dipakai adalah nilai rata-rata dari hasil pembacaan 2 buah Dial yang dibagi dengan tinggi kolom

mula-mula yaitu $L = 500$ mm untuk memperoleh nilai regangan. Hasil eksperimen dan tabel angka-angka hasil pengamatan dapat dilihat pada Lampiran 4.1a.

Kurva tegangan-regangan beton kolom *KP1* hasil analisa eksperimen dapat digambarkan dengan cara menghubungkan angka-angka pada *Lampiran IV Tabel L.4.1* yaitu angka-angka pada kolom 9 dan kolom 6. Sedangkan kurva tegangan-regangan beton kolom *KP1* hasil analisa teoritis menurut Hognestad. diambil dari *Grafik 3.7*. *Kurva tegangan-regangan beton kolom KP1* hasil analisa eksperimen dan teoritis tersebut digabungkan dalam satu gambar seperti terlihat pada Grafik 4.1 dibawah ini.



Grafik 4.1. Kurva Tegangan Regangan Kolom Beton Polos (KP1) Analisis Teoritis dan Eksperimen

4.2.2. Kolom Beton terkekang CFRP (KP2)

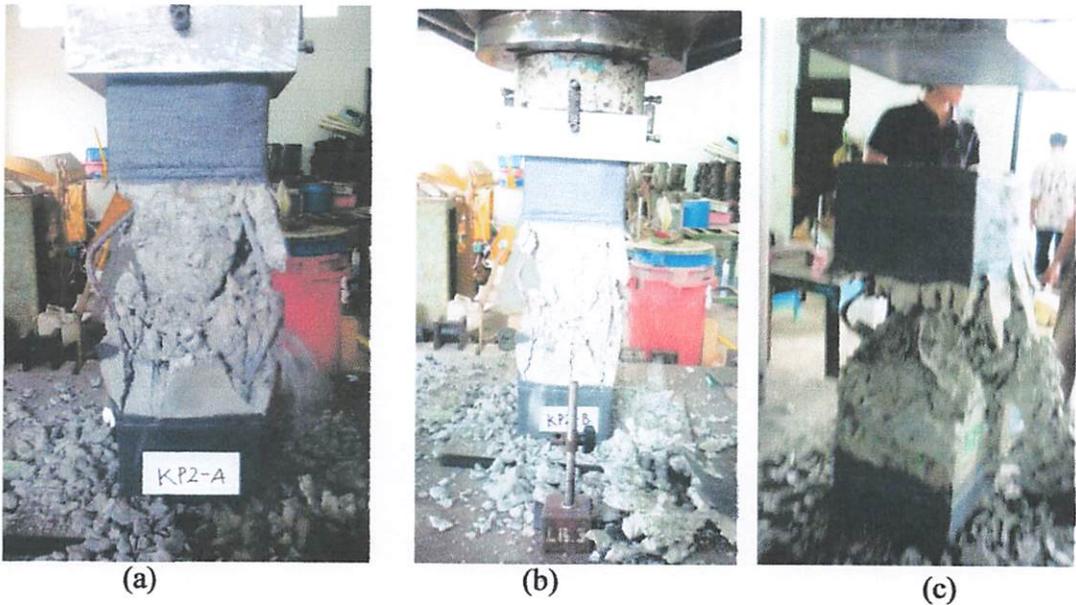
1. Mekanisme Keruntuhan.

Mekanisme keruntuhan kolom KP2-A diawali dengan retak arah membelah memanjang kolom pada tengah kolom saat beban mencapai $P = 73,3 \text{ ton}$, kemudian lebar retak bertambah seiring dengan dengan penambahan beban tekan P hingga beban puncak. Seperti terlihat dalam Gambar 4.3a, gambar ini diambil pada saat beban P telah melewati beban puncak tapi kolom tetap ditekan hingga beban turun menjadi $P = 52 \text{ ton}$ yang ditandai dengan lepasnya selimut beton dan putusnya CFRP, kemudian bagian inti beton mulai pecah karena pengaruh pengekangan CFRP pada bagian tengah kolom sudah tidak ada. Beban tekan tetap diberikan hingga beban turun mencapai $P = 45 \text{ ton}$. Setelah itu kolom hancur hingga bagian inti beton dengan yang ditandai dengan terlepasnya CFRP.

Pada kolom KP2-B, keruntuhan juga diawali dengan retak arah membelah memanjang kolom pada tengah kolom saat beban mencapai $P = 73 \text{ ton}$, kemudian lebar retak bertambah seiring dengan dengan penambahan beban tekan P hingga beban puncak. Seperti terlihat dalam Gambar 4.3b, gambar ini diambil pada saat beban P telah melewati beban puncak tapi kolom tetap ditekan hingga beban turun menjadi $P = 51 \text{ ton}$ yang ditandai dengan lepasnya selimut beton dan putusnya CFRP, kemudian bagian inti beton mulai pecah karena pengaruh pengekangan CFRP pada bagian tengah kolom sudah tidak ada. Beban tekan tetap diberikan hingga beban turun mencapai $P =$

44,7 ton. Setelah itu CFRP pada bagian tengah kolom mulai terlepas dan kolom hancur hingga bagian inti beton.

Kehancuran pada Kolom KP2-C bermula retak dari bagian tengah kolom yang tak terkekang pada saat beban tekan mendekati beban Puncak $P=73$ ton. Keretakan pada kolom bertambah besar dan CFRP mulai terlihat sobek pada saat CFRP mencapai regangan ultimitnya. Pada saat beban tekan menjadi $P=51$ ton, CFRP putus dan terlepas dari kolom kemudian diikuti oleh hancurnya inti beton.



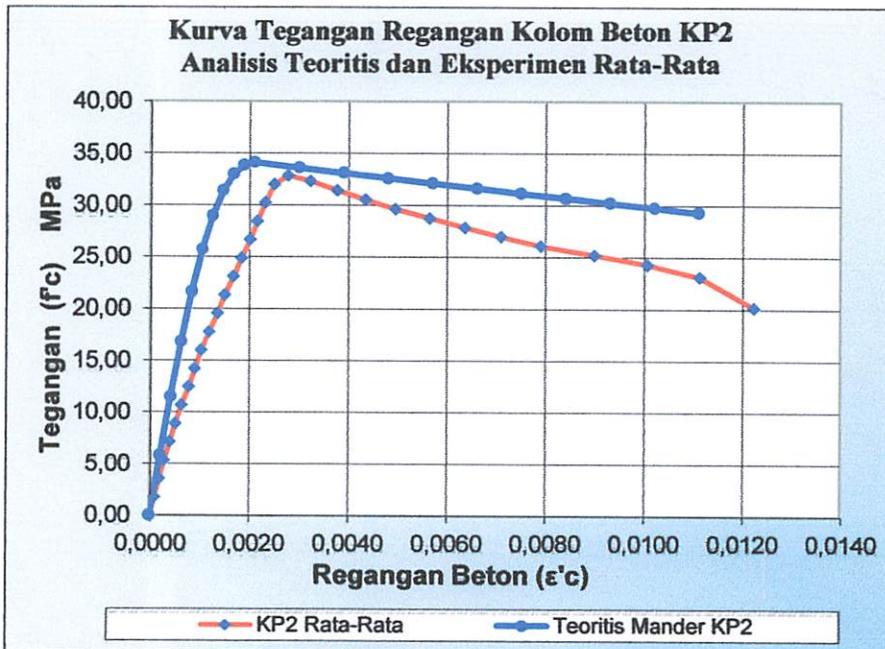
Gambar 4.2. Pengujian Kolom terkekang CFRP (KP2)
(a) Kolom KP2-A (b) Kolom KP2-B (c) Kolom KP2-C

2. Kurva Hubungan Tegangan-Regangan Beton

Hasil eksperimen yang diperoleh adalah besar beban tekan (P) dan besar displacement yang diukur menggunakan alat Dial sebanyak 2 buah. Nilai displacement yang dipakai adalah nilai rata-rata dari hasil pembacaan 2 buah Dial yang dibagi dengan tinggi kolom

mula-mula yaitu $L = 500$ mm untuk memperoleh nilai regangan. Hasil eksperimen dan tabel angka-angka hasil pengamatan dapat dilihat pada *Lampiran IV Tabel 4.2*

Kurva tegangan-regangan beton kolom *KP2* hasil analisa eksperimen dapat digambarkan dengan cara menghubungkan angka-angka pada *Lampiran IV Tabel L.4.2* yaitu angka-angka pada kolom 9 dan kolom 6. Sedangkan kurva tegangan-regangan beton kolom *KP2* hasil analisa teoritis menurut Mander, dkk. diambil dari *Grafik 3.8. Kurva Tegangan-Regangan Beton Kolom KP2* hasil analisa eksperimen dan teoritis tersebut digabungkan dalam satu gambar seperti terlihat pada *Grafik 4.2* dibawah ini.



Grafik 4.2. Kurva Tegangan-Regangan Kolom Beton terkekang CFRP (KP2)

Berdasarkan bentuk kurva gabungan dalam Grafik 4.2, terlihat ada perbedaan nilai f'_{cc} , ϵ'_{cc} dan ϵ'_{cu} pada kurva tegangan-

regangan beton kolom *KP2* eksperimen dan teoritis, sehingga rincian perbedaan nilai f'_{cc} , ε'_{cc} dan ε'_{cu} dapat diuraikan sebagai berikut :

Kurva hasil analisa eksperimen mempunyai nilai tegangan beton f'_{cc} maksimum sebesar 32,84 MPa sedangkan f'_{cc} hasil analisa teoritis sebesar 34,11 MPa sehingga terdapat perbedaan kuat tekan sebesar 3,71 %. Nilai regangan beton ε'_{cc} hasil analisa eksperimen sebesar 0,00281 sedangkan ε'_{cc} hasil analisa teoritis sebesar 0,00212 atau mengalami peningkatan sebesar 32,03 %. Nilai regangan beton ultimit ε'_{cu} hasil analisa eksperimen sebesar 0,01225 sedangkan ε'_{cu} hasil analisa teoritis sebesar 0,1113 atau mengalami peningkatan sebesar 10,07 %. Sehingga dapat disimpulkan bahwa pengekanan kolom dengan *CFRP* (analisa eksperimen) mempunyai peningkatan daktilitas jika dibandingkan dengan hasil analisa eksperimen kolom tanpa kekangan (*KP1*) karena terjadi displacement yang besar sebelum beton kolom pecah. Kurva hasil eksperimen *KP2* mempunyai kemiringan sudut kurva naik yang lebih kecil dari kurva hasil analisis eksperimen *KP1*. Hal ini disebabkan karena pembacaan hasil displacement pada Dial dan beban tekan UTM yang secara manual. Tabel angka-angka hasil pengamatan dapat dilihat pada *Lampiran IV Tabel L.4.2*.

4.2.3. Kolom Beton terkekang Tulangan BJTP Ø6 (KP3)

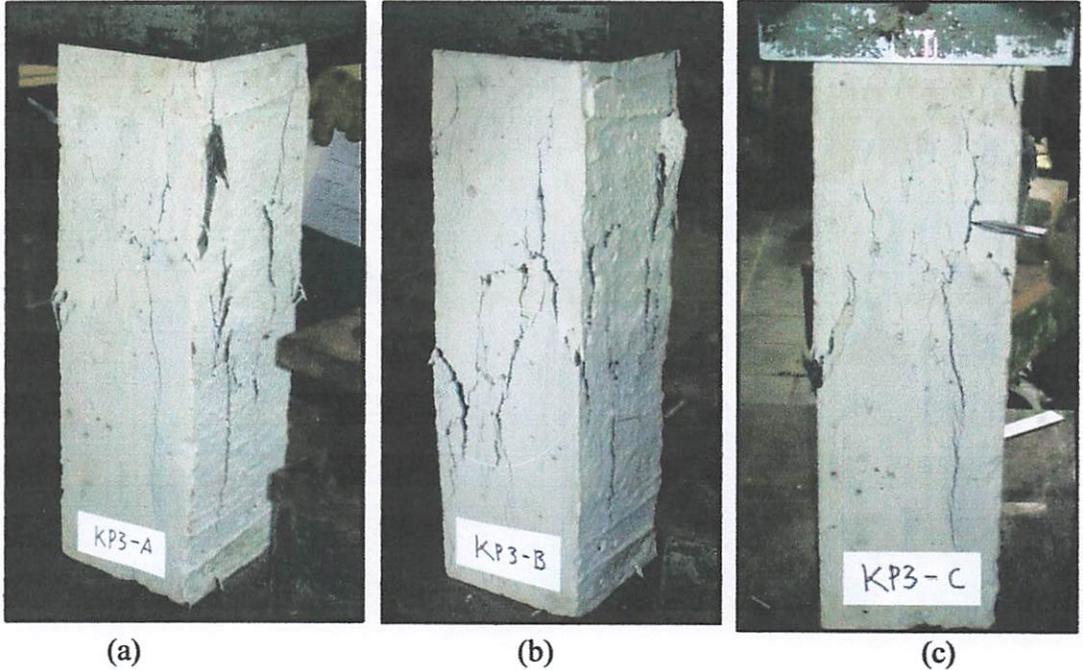
1. Mekanisme Keruntuhan.

Mekanisme keruntuhan kolom KP3-A diawali dengan retak arah memanjang kolom pada saat beban mencapai $P = 48$ ton, kemudian lebar retak bertambah seiring dengan penambahan beban tekan P hingga beban puncak. Seperti terlihat dalam Gambar 4.6a, gambar ini diambil pada saat beban P mendekati beban puncak. Beban puncak tercapai pada beban tekan $P=66,8$ ton, yang ditandai dengan lepasnya selimut beton, kemudian bagian inti beton mulai pecah karena efek pengekanan berkurang. Beban tekan tetap diberikan hingga tulangan transversal BJTP Ø6 leleh dan inti beton mulai runtuh sehingga pengujian kolom KP3-A dihentikan.

Pada kolom KP3-B, keruntuhan juga diawali dengan retak arah membelah memanjang kolom dibagian tengah kolom saat beban mencapai $P = 46$ ton, kemudian lebar retak bertambah seiring dengan penambahan beban tekan P hingga beban puncak. Seperti terlihat dalam Gambar 4.3b, gambar ini diambil pada saat beban P mendekati beban puncak tapi kolom tetap ditekan hingga beban turun menjadi $P = 38,8$ ton yang ditandai dengan lepasnya selimut beton dan putusnya lelehnya tulangan transversal BJTP Ø6, kemudian bagian inti beton mulai pecah.

Kehancuran pada Kolom KP3-C bermula retak dari bagian tengah kolom. Pada saat beban tekan mencapai beban Puncak $P=65$ ton, keretakan pada kolom bertambah besar. Beban tekan terus

diberikan hingga menjadi $P = 43,4$ ton. Pada saat itu tulangan transversal BJTP $\varnothing 6$ leleh dan inti kolom mulai runtuh.



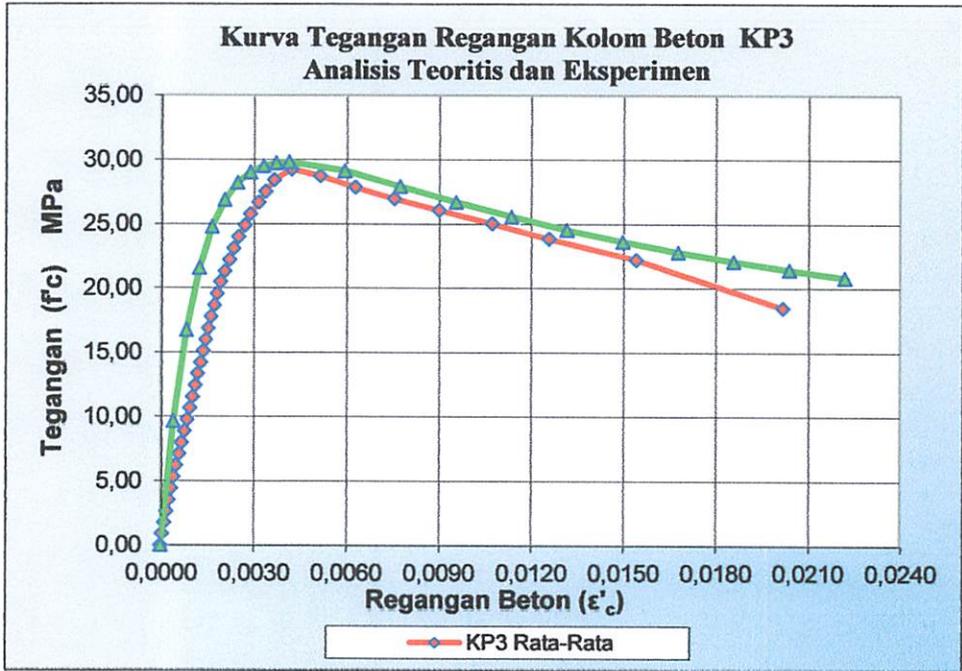
Gambar 4.3. Pengujian Kolom terkekang Tulangan BJTP $\varnothing 6$ (KP3)
(a) Kolom KP3-A (b) Kolom KP3-B (c) Kolom KP3-C

2. Kurva Hubungan Tegangan-Regangan Beton

Hasil eksperimen yang diperoleh adalah besar beban tekan (P) dan besar displacement yang diukur menggunakan alat Dial sebanyak 2 buah. Nilai displacement yang dipakai adalah nilai rata-rata dari hasil pembacaan 2 buah Dial yang dibagi dengan tinggi kolom mula-mula yaitu $L = 500$ mm untuk memperoleh nilai regangan.

Kurva tegangan-regangan beton kolom *KP3* hasil analisa eksperimen dapat digambarkan dengan cara menghubungkan angka-angka pada *Lampiran IV Tabel L.4.3* yaitu angka-angka pada kolom 9 dan kolom 6. Sedangkan kurva tegangan-regangan beton kolom *KP3*

hasil analisa teoritis menurut Mander, dkk. diambil dari *Grafik 3.9. Kurva tegangan-regangan beton kolom KP3* hasil analisa eksperimen dan teoritis tersebut digabungkan dalam satu gambar seperti terlihat pada *Grafik 4.3* dibawah ini.



Grafik 4.3. Kurva Tegangan-Regangan Kolom Beton terkekang Tulangan BJTP Ø6 (KP3)

Berdasarkan bentuk kurva gabungan dalam Grafik 4.3, terlihat ada perbedaan nilai f'_{cc} , ϵ'_{cc} dan ϵ'_{cu} pada kurva tegangan-regangan beton kolom *KP3* eksperimen dan teoritis, sehingga rincian perbedaan nilai f'_{cc} , ϵ'_{cc} dan ϵ'_{cu} dapat diuraikan sebagai berikut :

Kurva hasil analisa eksperimen mempunyai nilai tegangan beton f'_{cc} maksimum sebesar 29,20 MPa sedangkan f'_{cc} hasil analisa teoritis sebesar 29,82 MPa sehingga terdapat perbedaan kuat tekan sebesar 2,10 %. Nilai regangan beton ϵ'_{cc} hasil analisa eksperimen

sebesar 0,00444 sedangkan ε'_{cc} hasil analisa teoritis sebesar 0,00416 atau mengalami peningkatan sebesar 6,4 %. Nilai regangan beton ultimit ε'_{cu} hasil analisa eksperimen sebesar 0,02009 sedangkan ε'_{cu} hasil analisa teoritis sebesar 0,02222 atau terdapat perbedaan sebesar 9,60 %. Kurva hasil eksperimen KP3 mempunyai kemiringan sudut kurva naik yang lebih kecil dari kurva hasil analisis teoritisnya. Hal ini disebabkan karena pembacaan hasil displacement pada Dial dan beban tekan UTM yang secara manual. Tabel angka-angka hasil pengamatan dapat dilihat pada *Lampiran IV, Tabel L.4.3*

4.2.4. Kolom Beton terkekang Tulangan BJTP Ø8 (KP4)

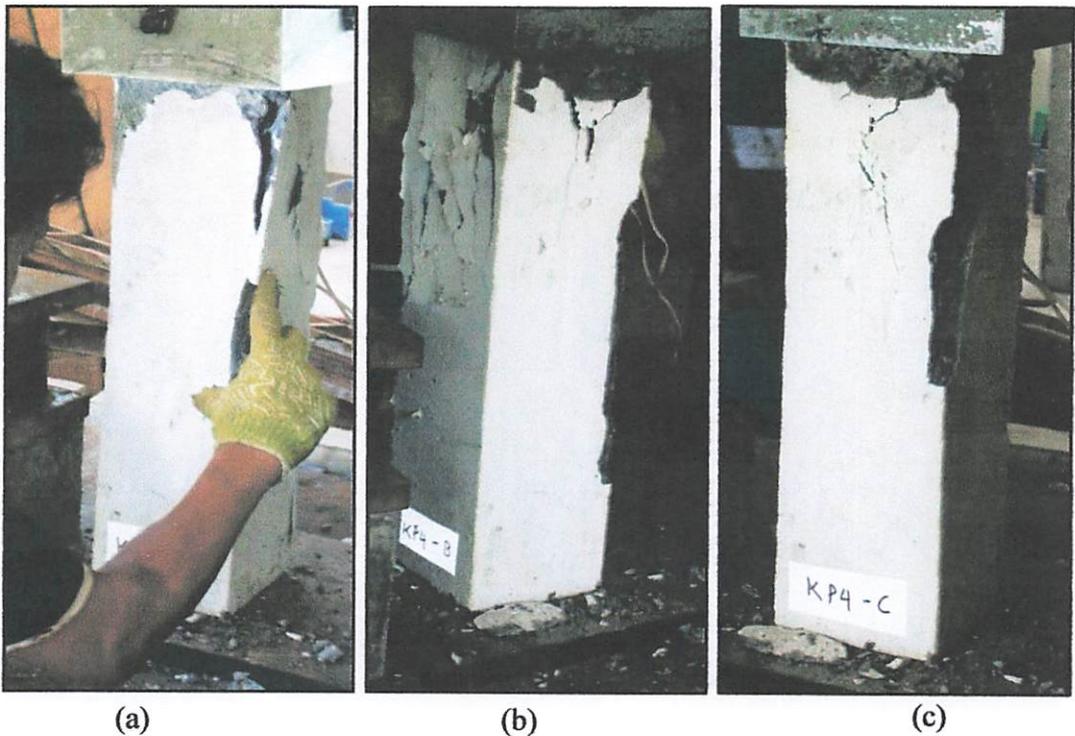
1. Mekanisme Keruntuhan.

Mekanisme keruntuhan kolom KP4-A diawali dengan retak arah memanjang kolom pada saat beban mencapai $P = 52,7$ ton, kemudian lebar retak bertambah seiring dengan penambahan beban tekan P hingga beban puncak. Seperti terlihat dalam Gambar 4.6a, gambar ini diambil pada saat beban P mendekati beban puncak. Beban puncak tercapai pada beban tekan $P=76,8$ ton, yang ditandai dengan lepasnya selimut beton, kemudian bagian inti beton mulai pecah karena efek pengekangan berkurang. Beban tekan tetap diberikan hingga tulangan transversal BJTP Ø8 leleh dan inti beton mulai runtuh sehingga pengujian kolom KP4-A dihentikan.

Pada kolom KP4-B, keruntuhan juga diawali dengan retak arah membelah memanjang kolom dibagian tengah kolom saat beban

mencapai $P = 53,6 \text{ ton}$, kemudian lebar retak bertambah seiring dengan dengan penambahan beban tekan P hingga beban puncak. Seperti terlihat dalam Gambar 4.4b, gambar ini diambil pada saat beban P mendekati beban puncak tapi kolom tetap ditekan hingga beban turun menjadi $P = 45,1 \text{ ton}$ yang ditandai dengan lepasnya selimut beton dan putusya lelehnya tulangan transversal BJTP Ø8, kemudian bagian inti beton mulai pecah.

Kehancuran pada Kolom KP4-C bermula retak dari bagian tengah kolom. Pada saat beban tekan mencapai beban Puncak $P=77,4 \text{ ton}$, keretakan pada kolom bertambah besar. Beban tekan terus diberikan hingga menjadi $P=45,8 \text{ ton}$. Pada saat itu tulangan transversal BJTP Ø8 leleh dan inti kolom mulai runtuh.

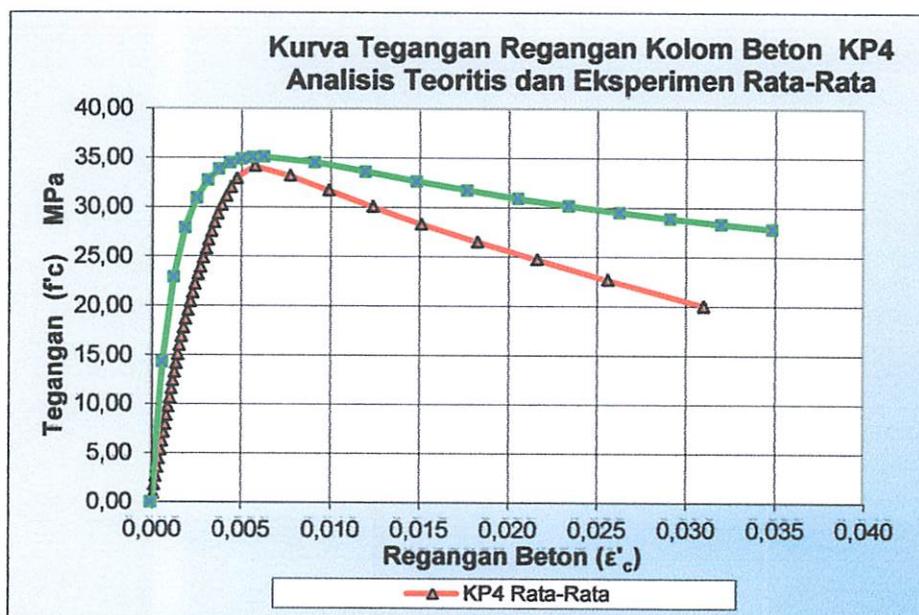


Gambar 4.4. Pengujian kolom terkekang tulangan BJTP Ø8 (KP4)
(a) Kolom KP4-A (b) Kolom KP4-B (c) Kolom KP4-C

2. Kurva Hubungan Tegangan-Regangan Beton

Hasil eksperimen yang diperoleh adalah besar beban tekan (P) dan besar displacement yang diukur menggunakan alat Dial sebanyak 2 buah. Nilai displacement yang dipakai adalah nilai rata-rata dari hasil pembacaan 2 buah Dial yang dibagi dengan tinggi kolom mula-mula yaitu $L = 500$ mm untuk memperoleh nilai regangan.

Kurva tegangan-regangan beton kolom *KP4* hasil analisa eksperimen dapat digambarkan dengan cara menghubungkan angka-angka pada *Lampiran IV Tabel L.4.4* yaitu angka-angka pada kolom 9 dan kolom 6. Sedangkan kurva tegangan-regangan beton kolom *KP4* hasil analisa teoritis menurut Mander, dkk. diambil dari *Grafik 3.10*. Kurva tegangan-regangan beton kolom *KP4* hasil analisa eksperimen dan teoritis tersebut digabungkan dalam satu gambar seperti terlihat pada *Grafik 4.4* dibawah ini.



Grafik 4.4. Kurva Tegangan-Regangan Kolom Beton terkekang Tulangan BJTP Ø8 (KP4)

Berdasarkan bentuk kurva gabungan dalam Grafik 4.4, terlihat ada perbedaan nilai f'_{cc} , ε'_{cc} dan ε'_{cu} pada kurva tegangan-regangan beton kolom *KP4* eksperimen dan teoritis, sehingga rincian perbedaan nilai f'_{cc} , ε'_{cc} dan ε'_{cu} dapat diuraikan sebagai berikut :

Kurva hasil analisa eksperimen mempunyai nilai tegangan beton f'_{cc} maksimum sebesar 34,16 MPa sedangkan f'_{cc} hasil analisa teoritis sebesar 35,10 MPa sehingga terdapat perbedaan kuat tekan sebesar 2,68 %. Nilai regangan beton ε'_{cc} hasil analisa eksperimen sebesar 0,00576 sedangkan ε'_{cc} hasil analisa teoritis sebesar 0,00632 atau terdapat perbedaan sebesar 8,85%. Nilai regangan beton ultimit ε'_{cu} hasil analisa eksperimen sebesar 0,03099 sedangkan ε'_{cu} hasil analisa teoritis sebesar 0,03488 atau terdapat perbedaan sebesar 11,17%. Kurva hasil eksperimen *KP4* mempunyai kemiringan sudut kurva naik yang lebih kecil dari kurva hasil analisis teoritisnya. Hal ini disebabkan karena pembacaan hasil displacement pada Dial dan beban tekan UTM yang secara manual. Tabel angka-angka hasil pengamatan dapat dilihat pada *Lampiran IV, Tabel L.4.4*.

4.2.5. Kolom Beton Terkekang Tulangan BJTP Ø6 yang dibungkus CFRP (KP5)

1. Mekanisme Keruntuhan.

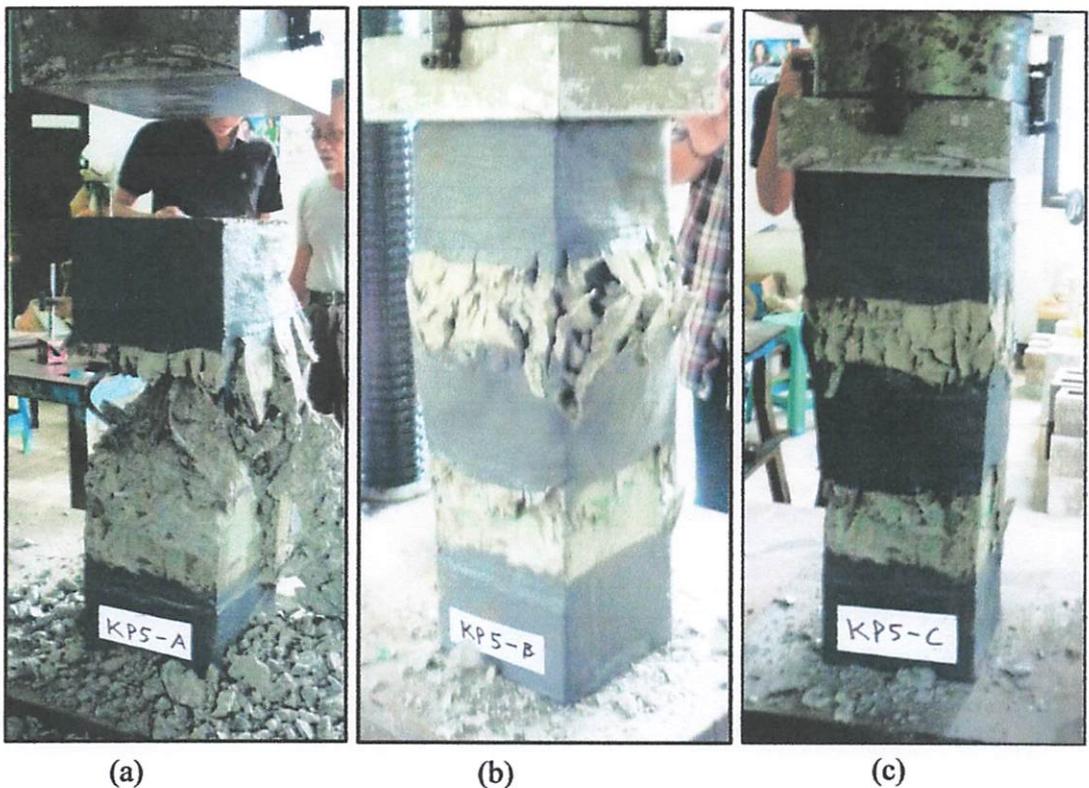
Mekanisme keruntuhan kolom *KP5-A* diawali dengan retak arah memanjang kolom pada bagian tengah kolom saat beban mencapai $P = 76 \text{ ton}$, kemudian lebar retak bertambah seiring dengan

dengan penambahan beban tekan hingga mencapai beban puncak pada $P = 94,4$ ton. Setelah mencapai beban puncak, beban tekan tetap diberikan hingga CFRP mencapai melewati beban ultimit pada $P = 76$ ton yang ditandai dengan lepasnya selimut beton pada bagian kolom yang tidak terbungkus CFRP dan putusya CFRP. Pada saat CFRP telah putus, kolom tidak langsung runtuh karena masih terkekang oleh tulangan BJTP Ø6, namun terjadi penurunan beban tekan dan displacemen yang cukup besar. Beban tekan terus mengalami penurunan hingga menjadi $P = 32,4$ ton dan tulangan transversal mulai terlihat leleh, diikuti lepasnya bagian inti beton dan kolompun runtuh..

Pada kolom KP4-B, keruntuhan juga diawali dengan retak memanjang pada tengah kolom saat beban tekan mendekati beban puncak $P = 78$ ton. Lebar retak bertambah seiring semakin besarnya displacement. Seperti terlihat dalam Gambar 4.5b, gambar ini diambil pada saat beban P mendekati beban puncak tapi kolom tetap ditekan hingga beban turun menjadi $P = 64$ ton yang ditandai dengan lepasnya selimut beton dan putusya CFRP. Setelah CFRP putus, kolom tidak langsung runtuh karena masih terkekang oleh tulangan BJTP Ø6. Beban tekan terus mengalami penurunan hingga 28 ton, pada titik ini akhirnya kolom tidak lagi mampu menahan beban tekan dan kemudian runtuh yang ditandai dengan runtuhnya inti beton.

Pola kehancuran pada Kolom KP5-C bermula retak dari bagian tengah kolom yang tak terkekang pada saat beban tekan mencapai 77,2 ton. Beban tekan terus diberikan hingga mencapai

beban puncak pada $P = 96,2$ ton. Keretakan pada kolom bertambah besar dan CFRP mulai terlihat sobek pada saat CFRP mencapai regangan ultimitnya. Pada saat beban tekan menjadi $P = 84$ ton, sobekan pada CFRP semakin besar dan terjadi penurunan beban tekan yang besar.. Kolom baru runtuh ketika beban tekan turun menjadi $P=34,5$ ton yang ditandai dengan lelehnya tulangan transversal dan hancurnya inti beton.



Gambar 4.5. Pengujian kolom terkekang tulangan BJTP Ø6 dan CFRP (KP5)

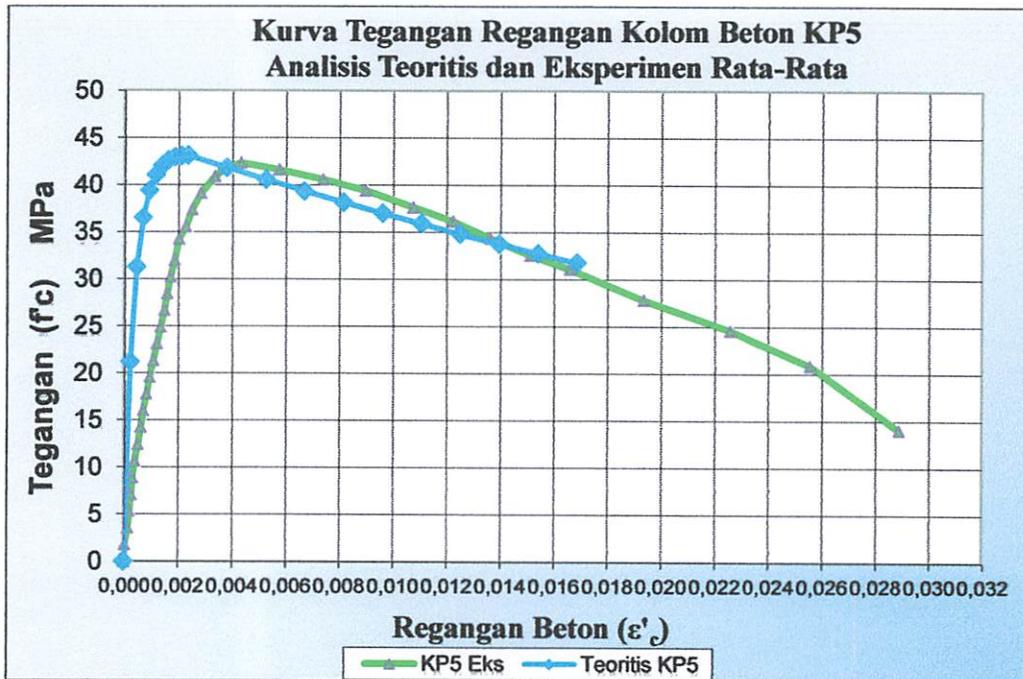
(a) Kolom KP5-A (b) Kolom KP5-B (c) Kolom KP5-C

2. Kurva Hubungan Tegangan-Regangan Beton

Hasil eksperimen yang diperoleh adalah besar beban tekan (P) dan besar displacement yang diukur menggunakan alat Dial

sebanyak 2 buah. Nilai displacement yang dipakai adalah nilai rata-rata dari hasil pembacaan 2 buah Dial yang dibagi dengan tinggi kolom mula-mula yaitu $L = 500$ mm untuk memperoleh nilai regangan.

Kurva tegangan-regangan beton kolom *KP5* hasil analisa eksperimen dapat digambarkan dengan cara menghubungkan angka-angka pada *Lampiran IV Tabel L.4.5* yaitu angka-angka pada kolom 9 dan kolom 6. Sedangkan kurva tegangan-regangan beton kolom *KP5* hasil analisa teoritis menurut Mander, dkk. diambil dari *Grafik 3.11*. Kurva tegangan-regangan beton kolom *KP5* hasil analisa eksperimen dan teoritis tersebut digabungkan dalam satu gambar seperti terlihat pada Grafik 3.5 dibawah ini.



Grafik 4.5. Kurva Tegangan-Regangan Kolom Beton terkekang Tulangan BJTP Ø6 (KP5)

Berdasarkan bentuk kurva gabungan dalam Grafik 4.5, terlihat ada perbedaan nilai f'_{cc} , ε'_{cc} dan ε'_{cu} pada kurva tegangan-regangan beton kolom KP5 eksperimen dan teoritis, sehingga rincian perbedaan nilai f'_{cc} , ε'_{cc} dan ε'_{cu} dapat diuraikan sebagai berikut :

Kurva hasil analisa eksperimen mempunyai nilai tegangan beton f'_{cc} maksimum sebesar 42,34 MPa sedangkan f'_{cc} hasil analisa teoritis sebesar 43,11 MPa sehingga terdapat perbedaan kuat tekan sebesar 1,78 %. Nilai regangan beton terkekang CFRP ε'_{cf} hasil analisa eksperimen sebesar 0,00901 sedangkan ε'_{cf} hasil analisa teoritis sebesar 0,00964 atau terdapat perbedaan sebesar 6,53%. Nilai regangan beton ultimit ε'_{cu} hasil analisa eksperimen sebesar 0,02892 sedangkan ε'_{cu} hasil analisa teoritis sebesar 0,01689 atau terdapat peningkatan sebesar 71,22 %. Kurva hasil eksperimen KP4 mempunyai kemiringan sudut kurva naik yang lebih kecil dari kurva hasil analisis teoritisnya. Hal ini disebabkan karena pembacaan hasil displacement pada Dial dan beban tekan UTM secara manual. Tabel angka-angka hasil pengamatan dapat dilihat pada *Lampiran III Tabel L.4.5*.

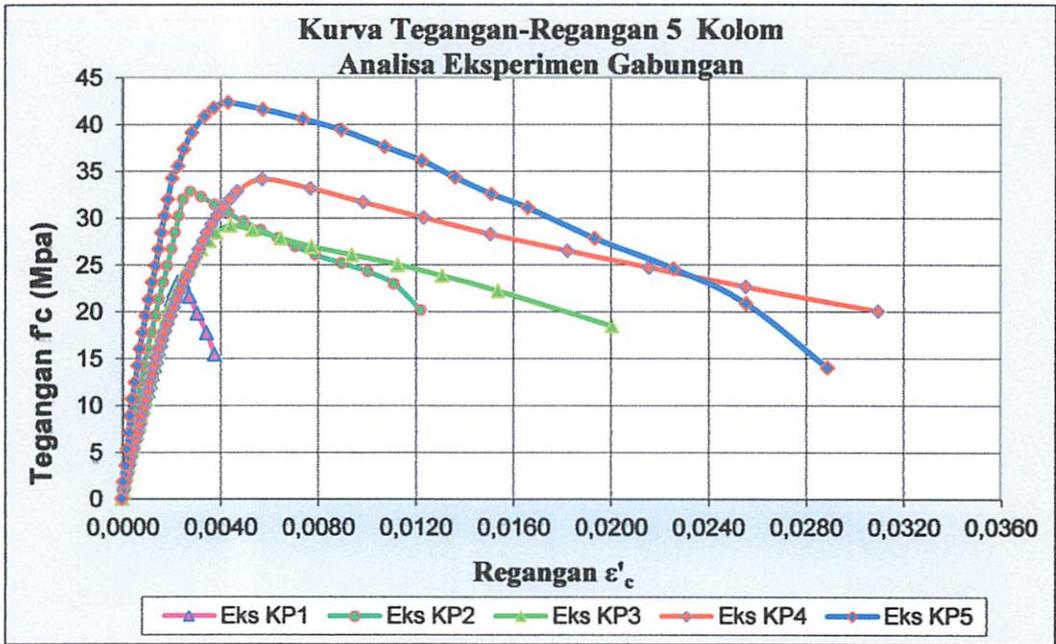
4.2.6. Kurva Hubungan Tegangan-Regangan Beton Gabungan 4 Kolom

Terlihat pada Grafik 4.6, kurva tegangan-regangan hasil eksperimen kolom beton polos (KP1) mempunyai nilai tegangan-regangan yang jauh lebih kecil jika dibandingkan sedangkan kolom beton polos yang terkekang CFRP (KP2). Kekangan dari CFRP

menimbulkan terjadinya peningkatan tegangan beton (f'_{cc}), regangan beton terkekang (ε'_{cc}) dan regangan beton ultimit (ε'_{cu}).

Pada kurva tegangan-regangan beton pada kolom yang terkekang tulangan BJTP Ø6 (KP2) dan kolom yang terkekang tulangan spiral BJTP Ø8 terlihat terjadi peningkatan tegangan beton yang lebih besar, sedangkan regangan beton terkekang (ε'_{cc}) dan regangan beton ultimit (ε'_{cu}) relatif sama.

Perubahan kurva tegangan-regangan kolom yang terkekang tulangan BJTP Ø6 dan dibungkus CFRP (KP5) terlihat sangat jauh berbeda dengan kolom yang hanya terkekang oleh CFRP (KP2), dan kolom yang terkekang oleh tulangan BJTP Ø6 dan BJTP Ø8 (KP3 dan KP4). Kolom KP5 mempunyai nilai tegangan yang jauh lebih besar jika dibandingkan dengan keempat kolom yang lain, namun mempunyai regangan ultimit yang masih lebih kecil dari regangan kolom yang terkekang tulangan BJTP Ø8 (KP4). Sehingga jika dapat disimpulkan bahwa kolom KP5 yang diperkuat dengan CFRP hanya meningkatkan kuat tekan kolom tanpa peningkatan daktilitas yang cukup berarti.



Grafik 4.6. Kurva Tegangan-Regangan Kolom Hasil Analisa Eksperimen

Tabel 4.3. Perbandingan kekuatan Kolom Hasil analisa Teoritis dan eksperimen

No.	Tipe Kolom	Teoritis			Eksperimen			Perbedaan		
		f'_{cc}	ϵ_{cc}	ϵ_{cu}	f'_{cc}	ϵ_{cc}	ϵ_{cu}	f'_{cc}	ϵ_{cc}	ϵ_{cu}
1	KP1	24.52	0.00211	0.00313	23.16	0.00251	0.00379	-5.56	19.23	21.38
2	KP2	34.11	0.00212	0.01113	32.84	0.00281	0.01225	-3.71	32.03	10.07
3	KP3	29.82	0.00416	0.02222	29.20	0.00444	0.02009	-2.10	6.64	-9.60
4	KP4	35.10	0.00632	0.03488	34.16	0.00576	0.03099	-2.68	-8.85	-11.17
5	KP5	43.11	0.00964	0.01689	42.34	0.00901	0.02892	-1.78	-6.53	71.22

Tabel 4.4. Perbandingan kekuatan Kolom Hasil analisa eksperimen

No.	Tipe Kolom	ρ_s	ρ_{CFRP}	Eksperimen			Perbedaan (%)			
				f'_{cc}	ϵ_{cc}	ϵ_{cu}	f'_{cc}	ϵ_{cc}	ϵ_{cu}	ρ_s
1	KP1	-	-	23.16	0.00251	0.00379	100.00	100.00	100.00	-
2	KP2	-	0.0035	32.84	0.00281	0.01225	141.84	111.67	322.84	-
3	KP3	0.0096	-	29.20	0.00444	0.02009	85.47	77.12	64.83	58.242
4	KP4	0.0165	-	34.16	0.00576	0.03099	104.01	205.19	253.02	100
5	KP5	0.0096	0.0035	42.34	0.00901	0.02892	123.94	156.51	93.32	58.242

Dari hasil analisa eksperimen pada Tabel 4.4 di atas, terlihat bahwa :

1. Kolom yang terkekang *CFRP* (KP2) menunjukkan efektifitas pengekangan yang baik dibanding kolom beton polos (KP1) yang mana mengalami peningkatan kuat tekan (f'_{cc}) sebesar 141,84%, regangan beton terkekang (ϵ'_{cc}) meningkat sebesar 111,67% dan regangan beton ultimit (ϵ'_{cu}) meningkat sebesar 322,84 %.
2. Kolom yang terkekang tulangan BJTP Ø6 dan *CFRP* (KP5) menunjukkan peningkatan Kekuatan yang signifikan jika dibandingkan dengan kolom yang hanya terkekang oleh *CFRP* (KP2), dimana kuat tekan (f'_{cc}) kolom (KP5) meningkat dari 32,84 MPa menjadi 42,34 MPa atau meningkat 128,93%, regangan beton terkekang (ϵ'_{cc}) meningkat dari 0,00281 menjadi 0,00901 atau meningkat 323,84% dan regangan beton ultimit (ϵ'_{cu}) meningkat dari 0,01225 menjadi 0,02892 atau meningkat 236,08%.
3. Kolom beton yang terkekang tulangan BJTP Ø6 yang dibungkus *CFRP* (KP5) mempunyai rasio tulangan transversal (ρ_s) berbeda

58,24% dari kolom KP4, memiliki efektifitas pengekangan yang lebih baik dari kolom beton yang terkekang *tulangan BJTP Ø8* (KP4), yang mana kuat tekan (f'_{cc}) kolom (KP5) meningkat 123,94% dari kolom KP4, regangan beton terkekang (ϵ'_{cc}) kolom KP5 meningkat 156,51% dari kolom KP4, sedangkan regangan beton ultimit (ϵ'_{cu}) kolom KP5 berbeda 93,32 % dari kolom KP4.

1. Pengujian Kolom tak Terkekang (KP1)



2. Pengujian Kolom Terkekang CFRP (KP2)



3. Pengujian Kolom Terkekang BJTP O 6 (KP3)



4. Pengujian Kolom Terkekang BJTP O 8 (KP4)



5. Pengujian Kolom Terkekang BJTP O 6 dan CFRP (KP5)



Gambar 4.6. Foto Pengujian Kolom

4.3. Hasil Analisa Daktilitas Regangan Kolom Eksperimen

Faktor Daktilitas regangan atau perbandingan antara regangan maksimum kolom pada saat kolom mencapai kondisi diambang keruntuhan (ϵ_{cu}) dan regangan kolom pada saat kolom mencapai tegangan puncak (ϵ_{cc}), maka besarnya faktor daktalitas regangan dapat dihitung sebagai berikut :

$$\mu = \frac{\epsilon_{cu}}{\epsilon_{cc}}$$

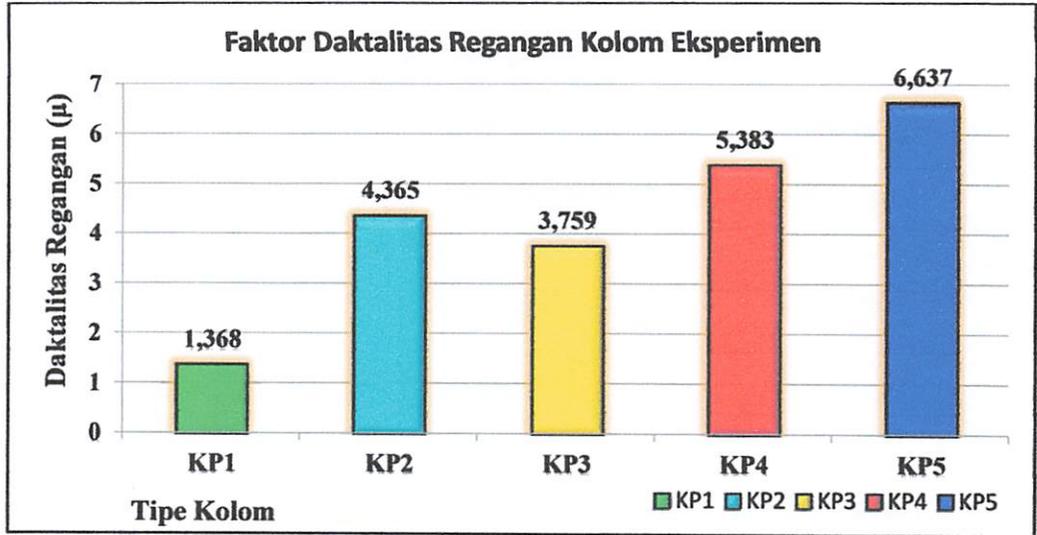
Dari hasil analisa kekuatan kolom eksperimen pada pada *point* 4.3, Tabel 4.4 diatas didapatkan nilai daktalitas regangan kolom sebagai berikut :

Tabel 4.5. Hasil Analisa Daktalitas regangan kolom Eksperimen

TIPE KOLOM	Regangan Maks ϵ_{cu}	Regangan Leleh ϵ_{cc}	Daktilitas μ
KP1	0,003793826	0,002772738	1,368259996
KP2	0,012247829	0,002805611	4,36547619
KP3	0,020088631	0,005344135	3,759005121
KP4	0,030988962	0,005756857	5,382965578
KP5	0,028919756	0,004357214	6,637212065

Pada tabel 4.5 diatas terlihat daktalitas regangan kolom tak terkekang (KP1) mengalami peningkatan nilai daktalitas yang signifikan jika diberi tambahan perkuatan dengan CFRP (KP2), yaitu meningkat dari 1,36 menjadi 4,365, demikian juga daktalitas regangan kolom yang terkekang tulangan BJTP Ø6 (KP3) mengalami peningkatan nilai Faktor daktalitas setelah diperkuat dengan CFRP (KP5), yaitu meningkat dari 3,759 menjadi 6,637.

Untuk visualisasi yang lebih jelas tentang peningkatan daktilitas regangan kolom hasil analisa eksperimen, dapat dilihat pada barchart dibawah ini :



Gambar 4.7. Barchart Daktilitas Regangan Kolom Eksperimen

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1. Kesimpulan

Hasil penelitian awal yang terbatas ini memberikan beberapa kesimpulan sebagai berikut :

1. Penambahan CFRP pada kolom tak terkekang (KP2) mengakibatkan peningkatan kuat tekan kolom (f'_{cc}) sebesar 141,84 %, regangan beton terkekang (ϵ'_{cc}) meningkat 111,67% dan regangan beton ultimit (ϵ'_{cu}) berbeda 322,84% jika dibandingkan dengan kolom tak terkekang (KP1). Pada kolom KP5 dengan perbedaan ρ_s sebesar 58,24 % dari KP4, setelah diberi tambahan CFRP mengalami peningkatan kuat tekan (f'_{cc}) sebesar 123,94%, regangan beton terkekang (ϵ'_{cc}) meningkat 156,51 % dan regangan beton ultimit (ϵ'_{cu}) berbeda 93,32%. Pada kolom yang sama-sama terkekang CFRP dengan dan tanpa tulangan transversal (KP5 dan KP2) terjadi peningkatan kuat tekan (f'_{cc}) sebesar 128,93%, regangan beton terkekang (ϵ'_{cc}) meningkat 323,84% dan regangan beton ultimit (ϵ'_{cu}) meningkat 236,08%%. (lihat *Tabel 4.4*).
2. Kurva tegangan regangan kolom yang terkekang CFRP mengalami perubahan sudut tegangan-regangan yang cukup besar pada bagian kurva naik, hanya menyebabkan perubahan sudut yang kecil pada bagian kurva turun. (Lihat *Grafik 4.6*)

3. Kolom yang dibungkus CFRP mengalami perubahan bentuk yang berbeda, dimana kehancuran beton bermula dari bagian tidak terselimuti oleh CFRP.
4. Kolom beton tak terkekang yang diberi tambahan lapisan CFRP (KP2) mengalami peningkatan nilai daktilitas sebesar 319,05% jika dibandingkan dengan nilai daktilitas kolom KP1 . Sedangkan pada kolom yang terkekang tulangan BJTP Ø6 diberi tambahan lapisan CFRP (KP5) mengalami peningkatan nilai daktilitas sebesar 123,3 % jika dibandingkan dengan nilai daktilitas KP4 (lihat *Tabel 4.5*).

5.2. Saran

1. Pengukuran regangan tulangan dengan cara konvensional (menggunakan Dial) sangat tidak memadai dalam hal keakuratan hasil pengujian, sehingga perlu menggunakan cara yang lebih canggih misalnya *strain gauges*.
2. Untuk peneliti yang tertarik melanjutkan Penelitian tentang Perkuatan kolom dengan *Carbon Fiber Reinforced Polymer* (CFRP) bisa mempertimbangan untuk menggunakan metode pengekangan Full Wrap agar dapat diketahui perilaku kolom secara lebih detail pada saat memikul beban aksial yang besar.
3. Melihat mahalnya harga *Carbon Fiber Reinforced Polymer*, bagi peneliti selanjutnya agar bisa mempertimbangan untuk melakukan simulasi dengan *Finith Element Analysis* sehingga model benda uji bisa dikurangi tanpa mengorbankan validitas hasil.

DAFTAR PUSAKA

- Anonim, ACI Commite 318 2005, **Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary (ACI 318-05)**, New York : American Concrete Institute.
- Anonim, Badan Standardisasi Nasional 2002, **Tata Cara Perencanaan Ketahanan Gempa untuk Bangunan Gedung SNI 03-1726-2002**, Bandung.
- Hognestad E. 1951, **A Study of Combined Bending and Axial Load in Reinforced Concrete Members**, University of Illinois Engineering Experimental Station, Nuletin Series No. 399
- Li B., Park R., Tanaka K., 1994, **Strength and Ductility of Reinforced Concrete Members and Frames Constructed using HSC**, Dept of Civil engineering, Univ of Canterbury, Cristchurch, New Zealand.
- Mander J. B., Priestley M. J. N., Park R., **Theoretical Stress-Strain Model for Confined Concrete**, Journal of Structural engineering, ASCE, V. 114. No. 8, August 1988, pp. 1804 - 1826.
- Mander J. B., Priestley M. J., Park R., **Observed Stress-Strain Behavior of Confined Concrete**, Journal of Structural engineering, ASCE, V. 114. No. 8, August 1988, pp. 1827 - 1849.
- Mau S. T., Elwi A. E., Zhou S., **Analytical Study of Spacing of Lateral Steel and Column Confinement**, Journal of Structural engineering, ASCE, V. 124. No. 3, March 1998, pp. 262 - 269.
- Naeim F., 1989, **Seismic Design Handbook**, New York : Van Nostrand Reinhold.
- Nawi E.G., 1998, **Beton Bertulang**, Bandung : Refika Aditama.
- Noyan A. S., Doran B, 1998, **The Effects of Confinement and Strain Hardening on The Performance and design of Short Circular Column**, Istanbul-Turkey
- Park R., Paulay T., 1975, **Reinforced Concrete Structure**, New York : John Wiley and Sons.

- Paulay T., Priestley M.J.N., 1991, Seismic Design of Reinforced Concrete and Masonry Building, New York : John Wiley and Sons.**
- Popovics S., 1973, A Numerical Approach to The Complete Stress-Strain Curve of Concrete, Cement Concrete Research.**
- Purwono R., Tavio, Imran I., Raka I. G. P., 2007, Tata Cara Perhitungan Struktur Beton untuk Bangunan Gedung SNI 03-2847-2002 dolenkapi Penjelasan (S-2002), ITS Surabaya.**
- Scott B. D., Park R., Priestley M. J. N., Stress-Strain behavior of Concrete Confined by Overlapping Hoops at Low and High Strain rate, ACI Structural Journal, January - February 1982, pp. 13 - 27.**
- Sheikh S. A., Toklucu M. T., Reinforced Concrete Columns Confined by Circular Spiral and Hoops, ACI Structural Journal, V. 90. No. 5, September - October 1993, pp. 542 – 553.**
- Soliman M.T.M. dan YU C. W., 1967, The Flexural Stress-Strain Relationship of Concrete Confined by Rectangular Transverse Reinforcement, Magazine of Concrete Research.**
- Uniform Building Code, 1997, Structural Engineering Design Provisions Volume 2, New York : International Conference of Building Official.**
- Wang C.K., Salmon C. G., 1979, Reinforced Concrete Design, New York : Harper and Row.**

LAMPIRAN I
FOTO DOKUMENTASI PROSES PENELITIAN

1. Dokumentasi Pembuatan dan Pengujian Silinder



Foto 1.1 : Pengadukan Beton Dengan Molen



Foto 1.2 : Pengukuran nilai slump = 86 mm



Foto 1.3 : Pemasangan Benda Uji Silinder



Foto 1.4 : Benda Uji Silinder



Foto 1.5 : Perawatan Silinder Beton



Foto 1.6 : Pengujian Silinder Beton

2. Dokumentasi Proses Persiapan Benda Uji dan Pengujian tekan Kolom

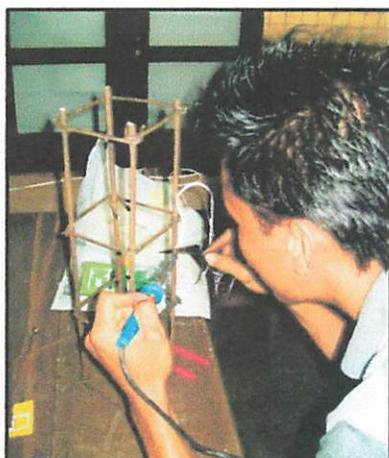


Foto 2.1 : Pemasangan Strain Gauges



Foto 2.2 : Pemasangan Strain Gauges



Foto 2.3 : Pemberian Epoxy pada permukaan kolom



Foto 2.4: Pemberian Epoxy pada permukaan kolom



Foto 2.5 : Pemasangan CFRP



Foto 2.5 : Pra Pengujian kolom



Foto 2.6 : Pengujian kolom KP1-A

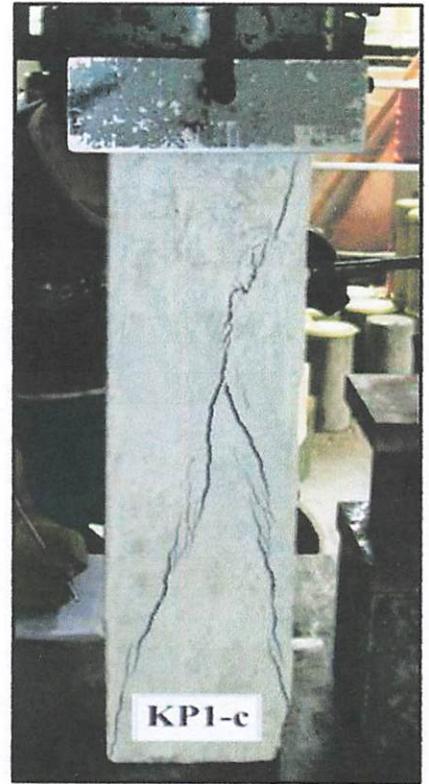


Foto 2.7 : Pengujian kolom KP1-B



Foto 2.8 : Pengujian kolom KP2-A



Foto 2.9 : Pengujian kolom KP2-B



Foto 2.10 : Pengujian kolom KP3-A



Foto 2.11 : Pengujian kolom KP3-B



Foto 2.12 : Pengujian kolom KP4-B



Foto 2.13 : Pengujian kolom KP4-C



Foto 2.14: Pengujian kolom KP5-B



Foto 2.15 : Pengujian kolom KP5-C

LAMPIRAN II

Tabel L.2.1 : Tabel Hasil Perancangan Campuran Beton 22,5 MPa

No	Uraian	Tabel, Perhitungan, Peraturan	Nilai
1	Kuat tekan yang disyaratkan	Ditetapkan	22,5 N/mm ² pada umur 28 hari
2	Standar Deviasi	Ditetapkan	4 N/mm ²
3	Nilai tambah (margin)		$k = 1,34 \times 4 = 5,36 \text{ N/mm}^2$
4	Kekuatan tekan rata-rata yang ditargetkan	SNI Ps.7.3.2.1 (Prs.1)	$f_{cr} = f_c + 1,34 \times s$
		SNI Ps.7.3.2.1 (Prs.2)	$f_{cr} = 22,5 + 1,34 \times 4 = 27,86 \text{ N/mm}^2$
			$f_{cr} = f_c + 2,33 \times s - 3,5$
			$f_{cr} = 22,5 + 2,33 \times 4 - 3,5 = 23,665 \text{ N/mm}^2$
5	Kekuatan tekan rata-rata yang dipakai	SNI Ps.7.3.2.1 (Prs.1)	27,86 N/mm ²
6	Jenis semen	Ditetapkan	Semen Gresik Tipe I
7	Jenis Agregat kasar	Ditetapkan	Batu Pecah (ukuran maksimum = 19mm)
8	Jenis Agregat halus	Ditetapkan	Pasir Pasuruan
9	Faktor Air semen	MCP 211.1-91 Tabel A1 5.3.4(a)	0,65
10	Nilai slump	MCP 211.1-91 Tabel A1.5.3.1	80 mm
11	Ukuran agregat maksimum	MCP 211.1-91 Tabel A1 5.3.3	19 mm
12	Kadar air bebas	MCP 211.1-91 Tabel A1 5.3.3	205 kg/m ³
13	Kadar udara bebas	MCP 211.1-91 Tabel A1 5.3.3	2% per-m ³
14	Jumlah semen	(11) / (8) MCP pasal 6.3.5 step 5	$205/0,65 = 315,4 \text{ kg/m}^3$
15	Berat jenis semen	Pengujian Lab. Beton ITN	3150 kg/m ³
16	Berat jenis agregat halus	Pengujian Lab. Beton ITN	2674 kg/m ³
17	Berat jenis agregat kasar	Pengujian Lab. Beton ITN	2700 kg/m ³
18	Berat Volume Agregat Kasar	Pengujian Lab. Beton ITN	1600 kg/m ³
19	Jumlah presentasi agregat kasar	MCP 211.1-91 Tabel A1 5.3.6	Didapat 0,63 atau 63%
20	Berat Jenis Beton	MCP 211.1-91 Tabel A1 5.3.7.1	2345 kg/m ³
21	Jumlah Agregat Kasar	(18) x (17)	$0,63 \times 1600 = 1008 \text{ kg}$
Sehingga didapat :			
22	Air	(12)	205 kg
23	Semen	(14)	315,4 kg
24	Agregat Kasar	(21)	1008 kg
25	Total	(22) + (23) + (24)	1528,4 kg
26	Agregat Halus	(20) - (25)	$2345 - 1528,4 = 816,6 \text{ kg}$
Volume padat mutlak dengan Jumlah Air, Semen dan Agregat Kasar :			
27	Volume Air	(12) / 1000	$205/1000 = 0,205 \text{ m}^3$
28	Volume Semen	(23) / (15)	$315,4/3150 = 0,100 \text{ m}^3$
29	Volume Agregat Kasar	(21) / (17)	$1008/2700 = 0,373 \text{ m}^3$
30	Volume Udara	(13)	$2\% \times 1 = 0,020 \text{ m}^3$
31	Total Volume padat	(27) + (28) + (29) + (30)	0,698 m ³
32	Volume padat dari pasir	1 - (31)	$1 - 0,698 = 0,302 \text{ m}^3$
33	Berat Agregat halus gradient	(32) x (16)	$0,302 \times 2674 = 807,55 \text{ kg}$
Maka didapat Campuran Beton :			
	Agregat	Berdasarkan Massa beton	Berdasarkan Gradient
34	Air	205 kg/m ³	205 kg/m ³
35	Semen	315,4 kg/m ³	315,4 kg/m ³
36	Agregat Kasar	1008 kg/m ³	1008 kg/m ³
37	Agregat Halus	816,6 kg/m ³	807,55 kg/m ³

Referensi

- 1 SNI 03-2847-2002 dan S-2002
- 2 ACI - MCP 211.1-91 - 2006

Tabel L.2.2. Hasil Pengujian Kuat Tarik Baja Tulangan BJTP

Tanggal Pengujian : Jumat, 19 Nopember 2010
Jumlah Benda Uji : 9 (Sembilan) Sample
Tempat Pengujian : Laboratorium Uji Material, Jurusan Teknik Mesin-S1
ITN Malang

Diameter Pengenal (mm)	Nomor Test	Panjang (mm)	Diameter Pengukuran (mm)	Luas (mm ²)	Max. Force (N)	Kuat Leleh (MPa)	Kuat Putus (MPa)	Elongation (%)
BJTP Ø 6 mm	0877	200	5.8	26,42	10451,43	277,3	411,15	97,47
	0878	200	5.8	26,42	10641,44	250,6	402,78	96,87
	0879	200	5.8	26,42	11022,69	280,13	417,21	94,96
	Rata- Rata					269,34	410,38	96,43
BJTP Ø 8 mm	0872	200	7.6	45,36	20090	313,89	442,86	100,71
	0873	200	7.6	45,36	20413,4	326,42	449,99	97,96
	0874	200	7.6	45,36	19899,43	298,33	438,7	94,96
	Rata- Rata					312,88	443,85	97,88
BJTP Ø 10 mm	0880	200	9.75	74,66	34988,44	353,2	488,12	98,71
	0881	200	9.75	74,66	33881,7	335,1	472,68	97,71
	0882	200	9.75	74,66	35561,17	360,5	496,11	97,61
	Rata- Rata					349,60	485,64	98,01

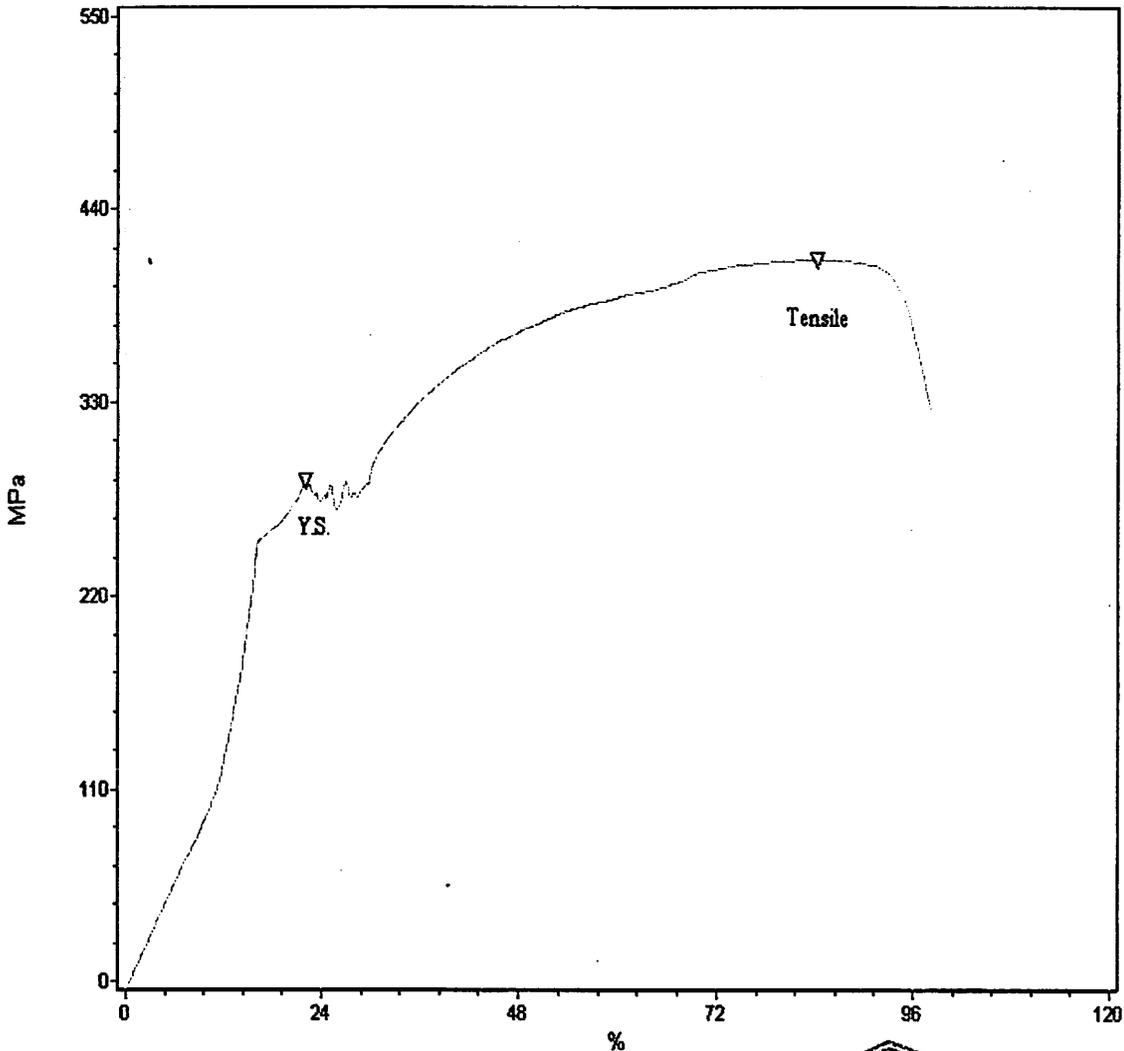
LABORATORIUM UJI MATERIAL
 JURUSAN TEKNIK MESIN - S1
 FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI
INSTITUT TEKNOLOGI NASIONAL MALANG

KAMPUS II JL. RAYA KAKANGLU KM. 2 IASIK MALU - MALANG
 TELP: (0341) 417634, 417636, 417637 FAX: 0341 - 417634

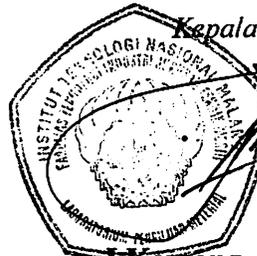
TEST REPORT

est No.: 0877 Test Description : Tensile Standard : ASTM A370 Test Date: 19/11/2010

No.	SPECIMEN	Area (mm) ²	Max. Force (Newton)	Yield Strength (MPa)	Tensile Strength (MPa)	Elongation (%)
1	BJTP 6 mm A	26.42	10451.43	277.3	411.15	97.47



Kepala Laboratorium :



Komang Astana Widi, ST.MT
 NIP Y. 1030400405

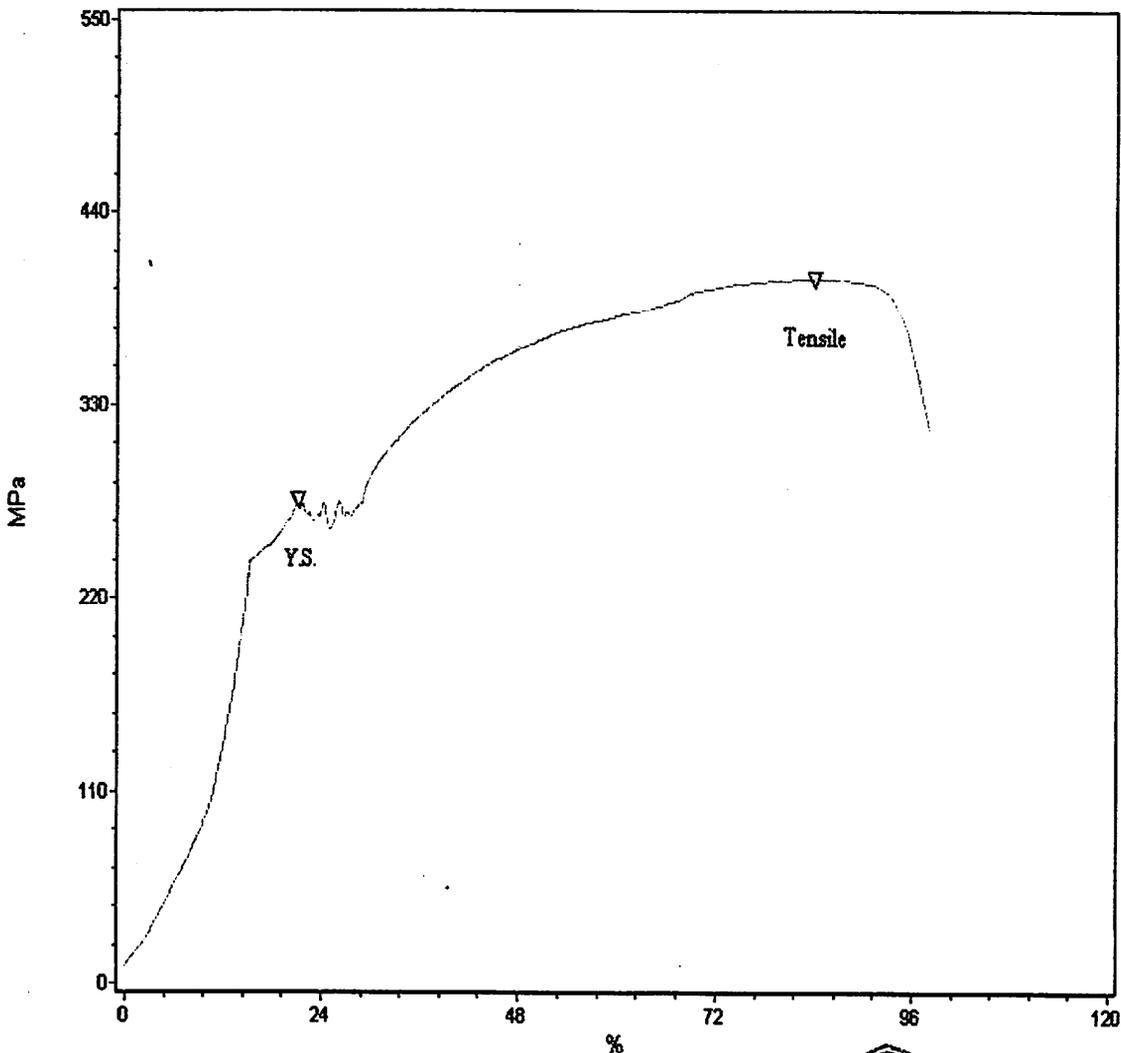
LABORATORIUM UJI MATERIAL
JURUSAN TEKNIK MESIN - S1
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI
INSTITUT TEKNOLOGI NASIONAL MALANG

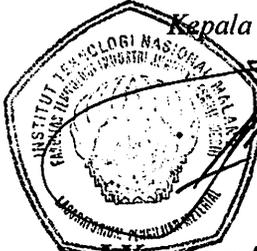
KAMPUS II JL. KAYA KAKANGLU KM. 2 TASIK MADU - MALANG
 TELP: (0341) 417634, 417636, 417637 FAX: 0341 - 417634

TEST REPORT

Test No.: 0878 Test Description : Tensile Standard : ASTM A370 Test Date: 19/11/2010

No.	SPECIMEN	Area (mm) ²	Max. Force (Newton)	Yield Strength (MPa)	Tensile Strength (MPa)	Elongation (%)
1	BJTP6 mm B	26.42	10641.44	250.6	402.78	96.97



Kepala Laboratorium :


Komang Astana Widi, ST.MT
 NIP Y. 1030400405

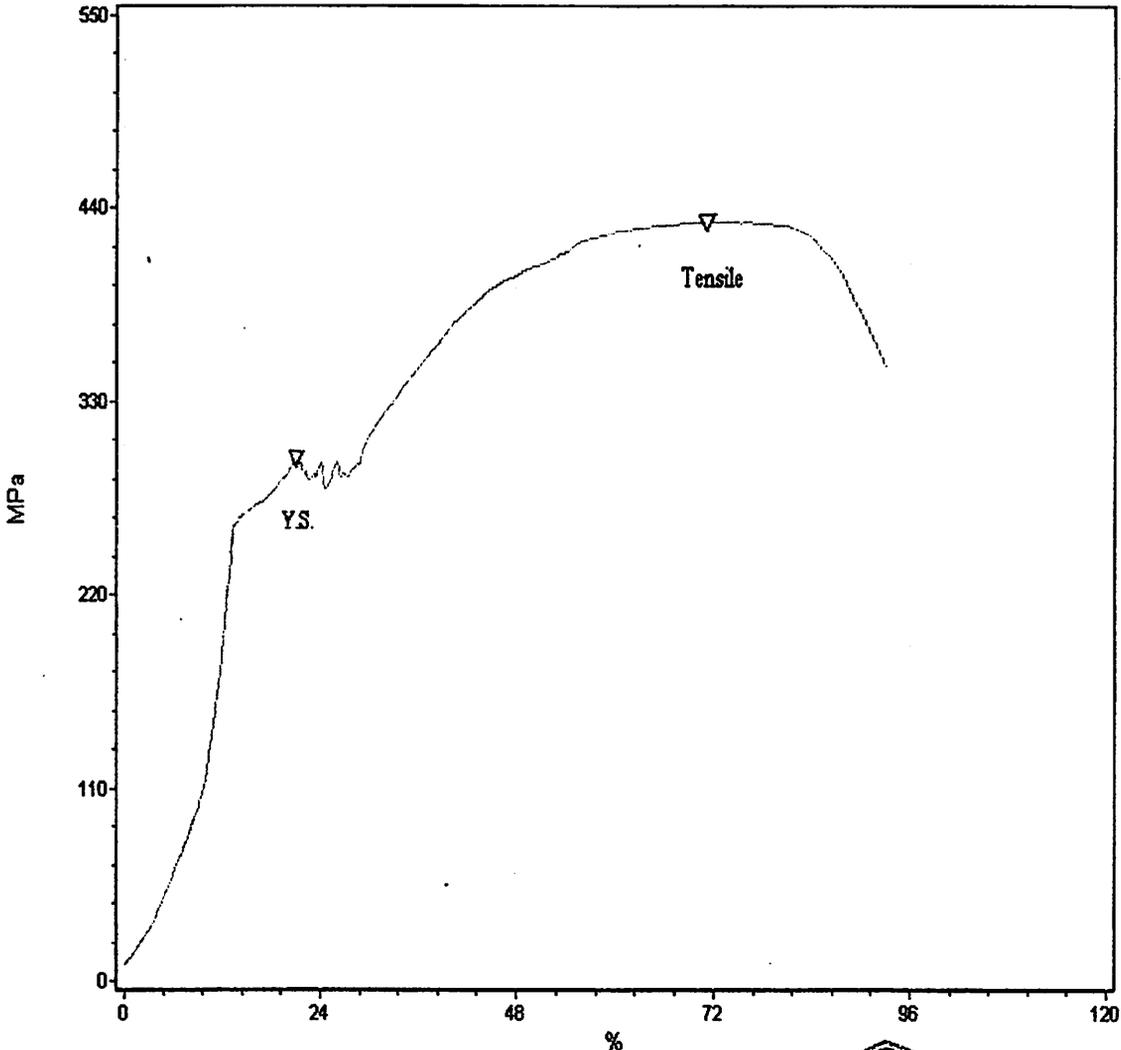
LABORATORIUM UJI MATERIAL
 JURUSAN TEKNIK MESIN - S1
 FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI
INSTITUT TEKNOLOGI NASIONAL MALANG

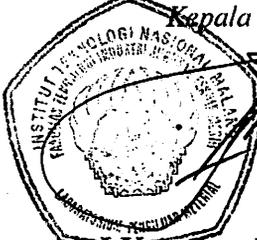
KAMPUS II JL. RAYA KARANGLU KM. 2 TASIK MADU - MALANG
 TELP: (0341) 417634, 417636, 417637 FAX: 0341 - 417634

TEST REPORT

Test No.: 0879 Test Description : Tensile Standard : ASTM A370 Test Date: 19/11/2010

No.	SPECIMEN	Area (mm) ²	Max. Force (Newton)	Yield Strength (MPa)	Tensile Strength (MPa)	Elongation (%)
1	BJTP6 mm C	26.42	11022.69	280.13	417.21	94.96



Kepala Laboratorium :

 Komang Astana Widi, ST.MT

NIP Y. 1030400405

LABORATORIUM UJI MATERIAL
JURUSAN TEKNIK MESIN - S1
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI
INSTITUT TEKNOLOGI NASIONAL MALANG

KAMPUS II JL. KAYA KARANGLU KM. 2 TASIK MADU - MALANG
 TELP: (0341) 417634, 417636, 417637 FAX: 0341 - 417634

TEST REPORT

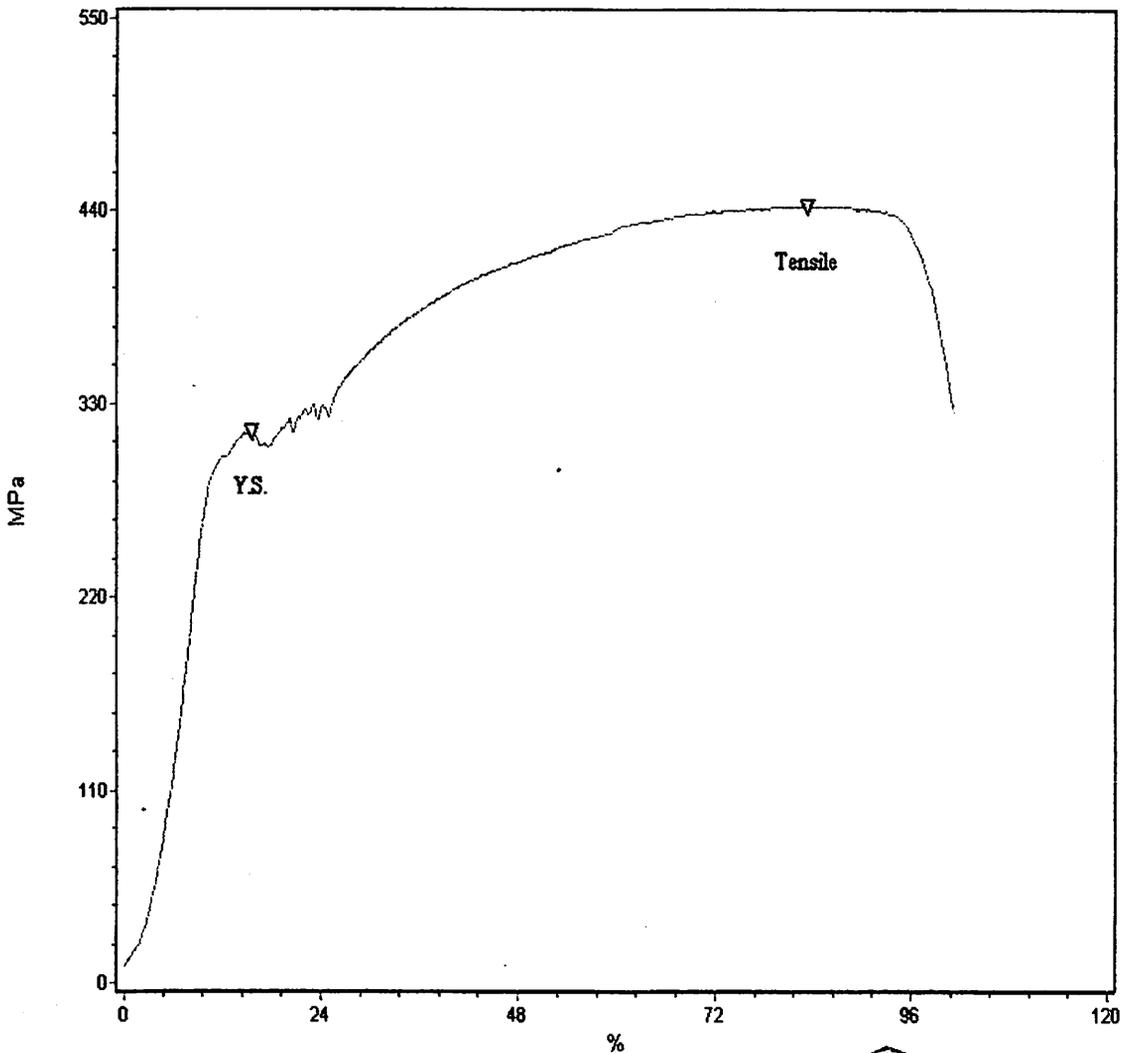
Test No.: 0872

Test Description : Tensile

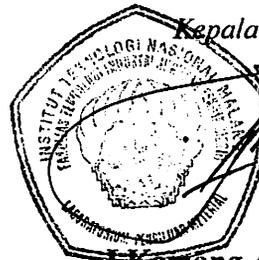
Standard : ASTM A370

Test Date: 19/11/2010

No.	SPECIMEN	Area (mm) ²	Max. Force (Newton)	Yield Strength (MPa)	Tensile Strength (MPa)	Elongation (%)
1	BJTP 8 mm A	45.36	20090.00	313.89	442.86	100.71



Kepala Laboratorium :



Komang Astana Widi, ST.MT

NIP Y. 1030400405

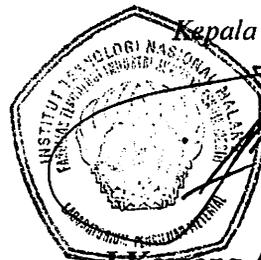
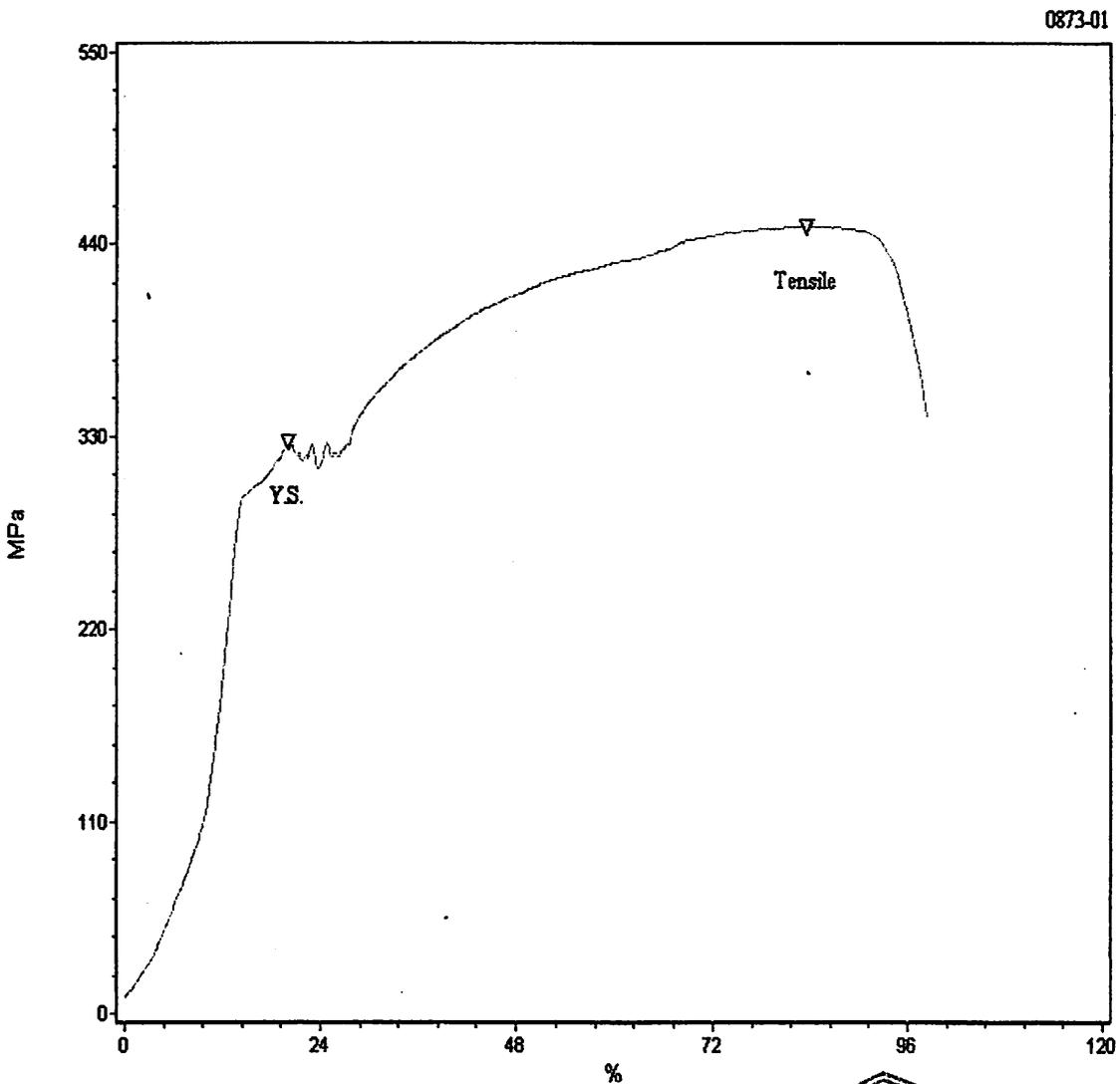
LABORATORIUM UJI MATERIAL
 JURUSAN TEKNIK MESIN - S1
 FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI
INSTITUT TEKNOLOGI NASIONAL MALANG

KAMPUS II JL. RAYA KAKANGLU KM. 2 TASIK MALU - MALANG
 TELP: (0341) 417634, 417636, 417637 FAX: 0341 - 417634

TEST REPORT

Test No.: 0873 Test Description : Tensile Standard : ASTM A370 Test Date: 19/11/2010

No.	SPECIMEN	Area (mm) ²	Max. Force (Newton)	Yield Strength (MPa)	Tensile Strength (MPa)	Elongation (%)
1	BJTP 8 mm B	45.36	20413.40	326.42	449.99	97.96



Kepala Laboratorium :

Komang Astana Widi, ST.MT

NIP Y. 1030400405

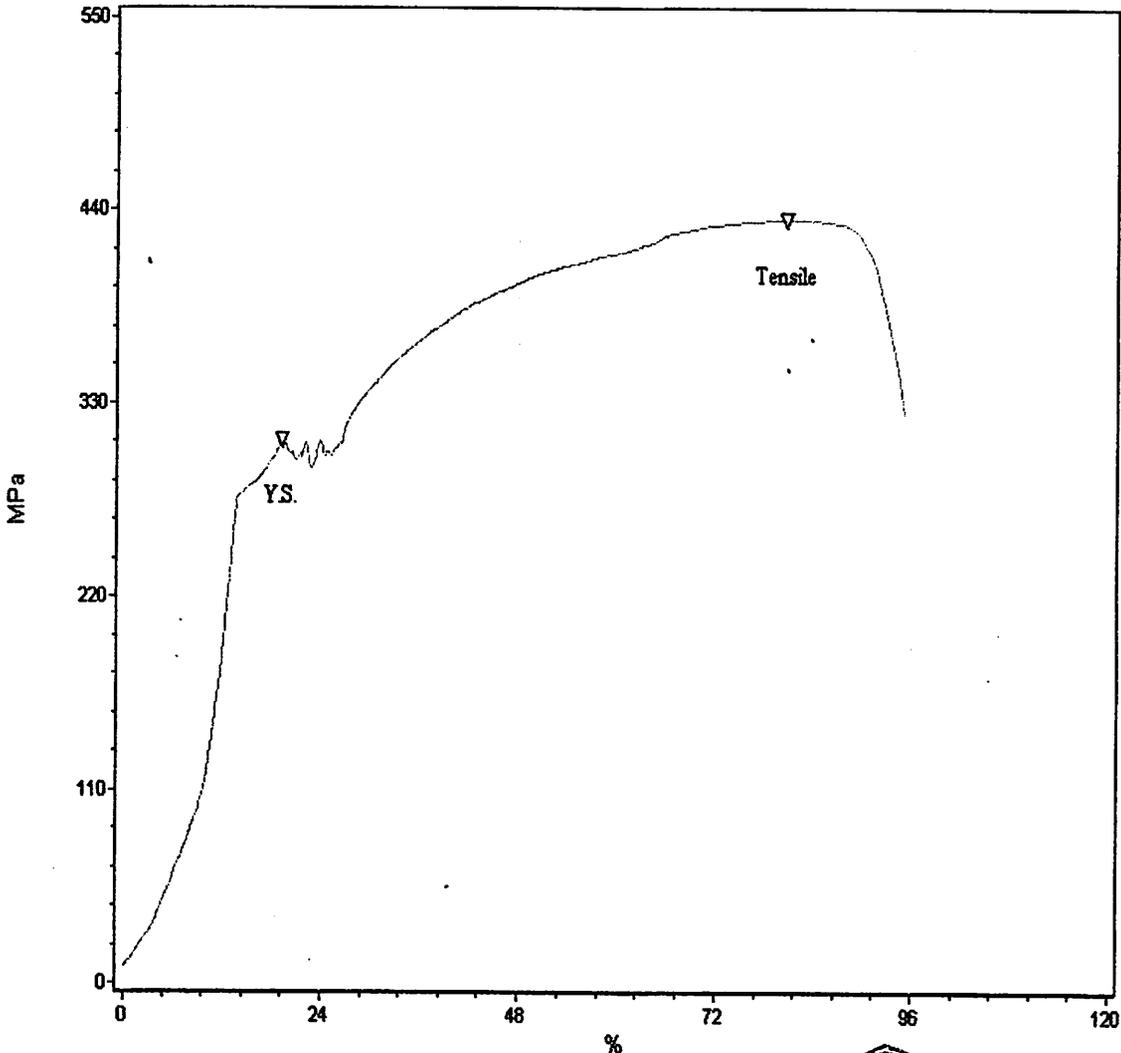
LABORATORIUM UJI MATERIAL
JURUSAN TEKNIK MESIN - S1
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI
INSTITUT TEKNOLOGI NASIONAL MALANG

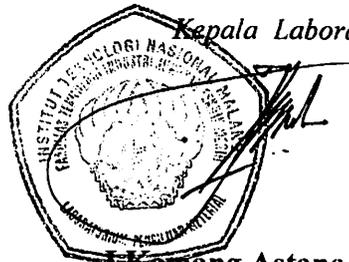
KAMPUS II JL. KAYA KAKANGLU KM. 2 TASIK MALU - MALANG
 TELP: (0341) 417634, 417636, 417637 FAX: 0341 - 417634

TEST REPORT

est No.: 0874 Test Description : Tensile Standard : ASTM A370 Test Date: 19/11/2010

No.	SPECIMEN	Area (mm) ²	Max. Force (Newton)	Yield Strength (MPa)	Tensile Strength (MPa)	Elongation (%)
1	BJTP 8 mm C	45.36	19899.43	298.33	438.7	94.96



Kepala Laboratorium :


Komang Astana Widi, ST.MT
 NIP Y. 1030400405

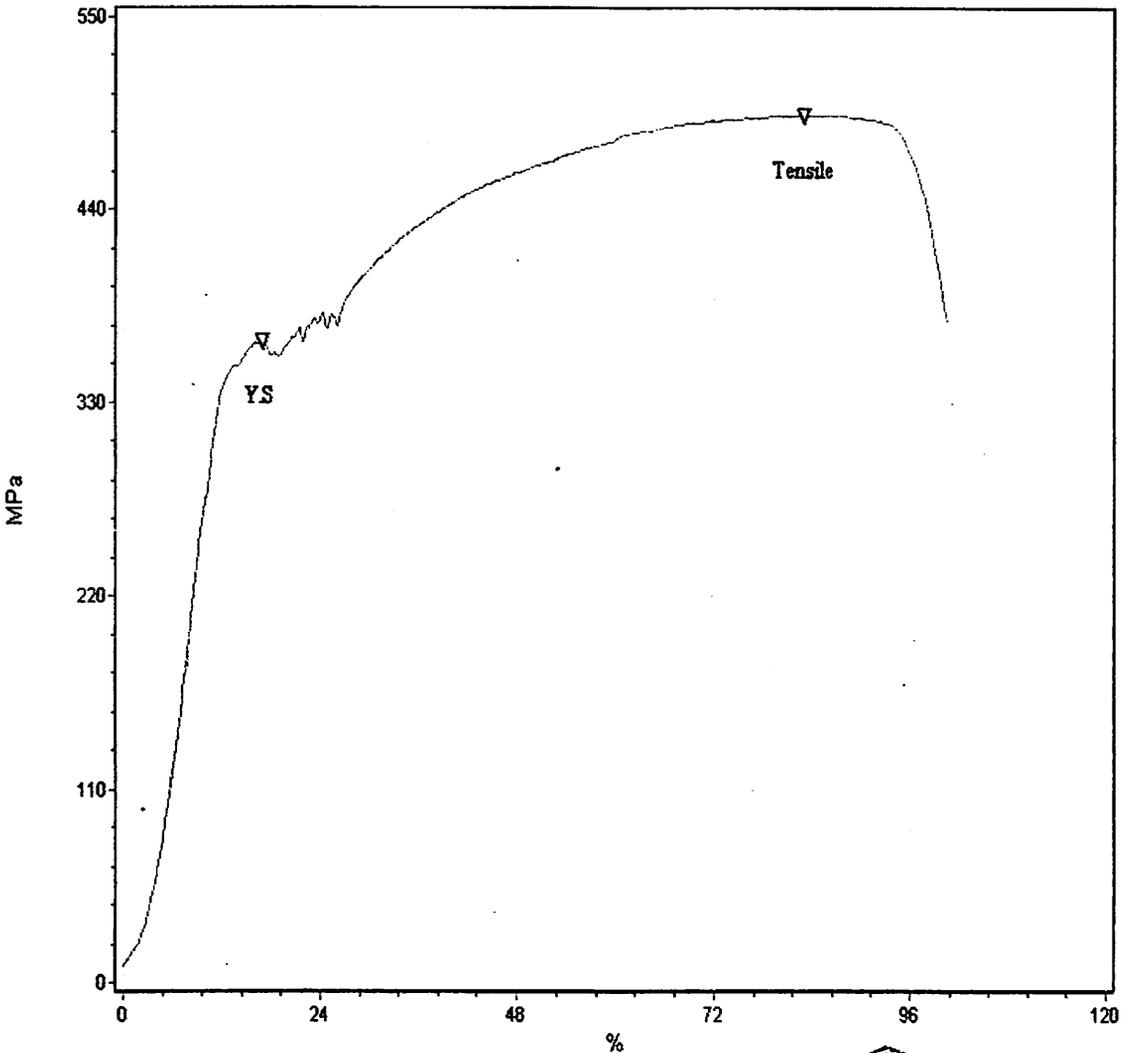
LABORATORIUM UJI MATERIAL
JURUSAN TEKNIK MESIN - S1
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI
INSTITUT TEKNOLOGI NASIONAL MALANG

KAMPUS II JL. KAYA KARANGLU KM. 2 TASIK MADU - MALANG
 TELP: (0341) 417634, 417636, 417637 FAX: 0341 - 417634

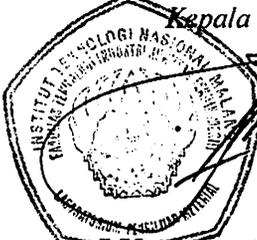
TEST REPORT

Test No.: 0880 Test Description : Tensile Standard : ASTM A370 Test Date: 19/11/2010

No.	SPECIMEN	Area (mm) ²	Max. Force (Newton)	Yield Strength (MPa)	Tensile Strength (MPa)	Elongation (%)
1	BJTP 10 mm A	71.68	34988.44	353.2	488.12	98.71



Kepala Laboratorium :



Komang Astana Widi, ST.MT
 NIP Y. 1030400405

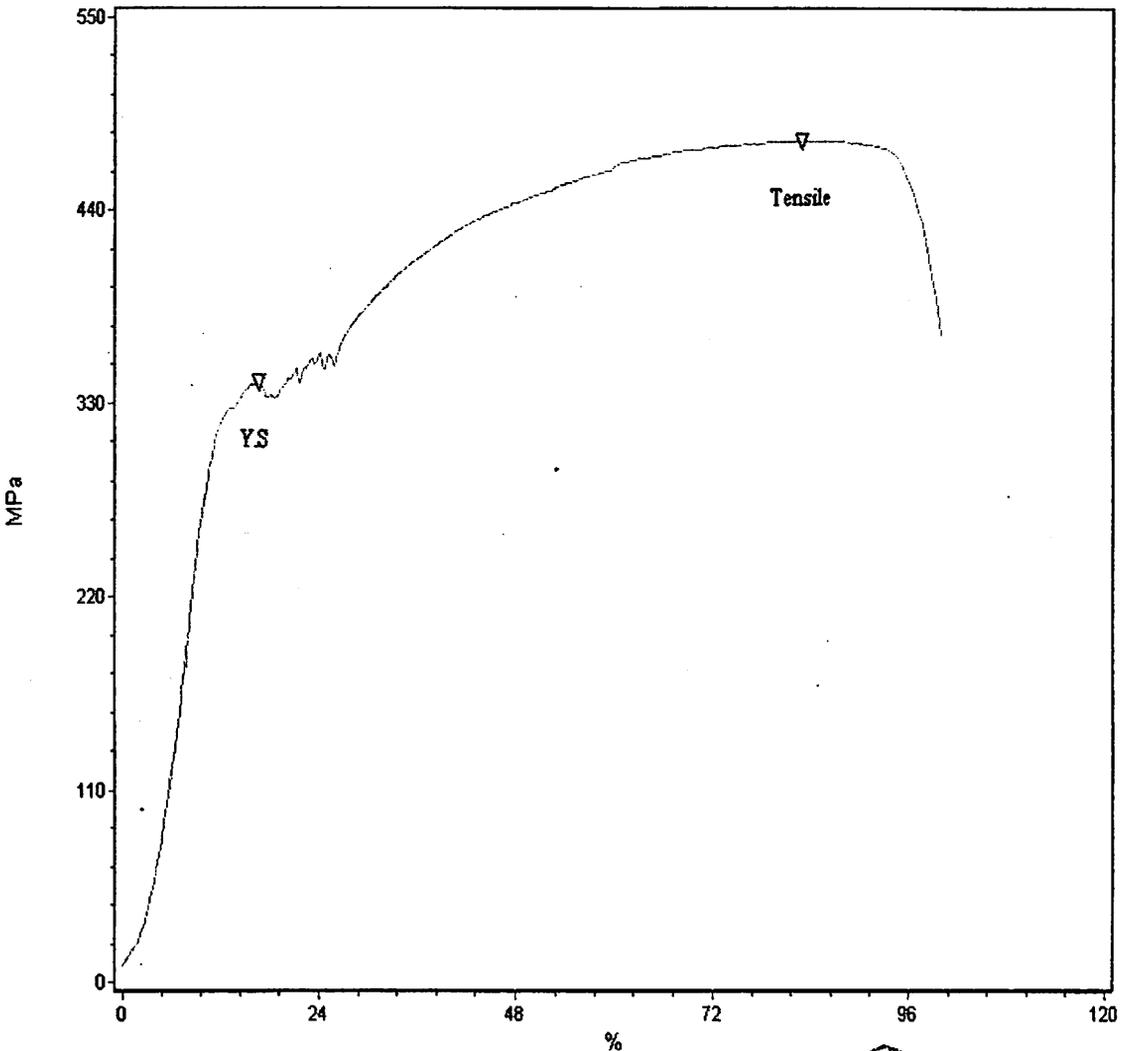
LABORATORIUM UJI MATERIAL
JURUSAN TEKNIK MESIN - S1
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI
INSTITUT TEKNOLOGI NASIONAL MALANG

KAMPUS II JL. KAYA KARANGLU KM. 2 TASIK MADU - MALANG
 TELP: (0341) 417634, 417636, 417637 FAX: 0341 - 417634

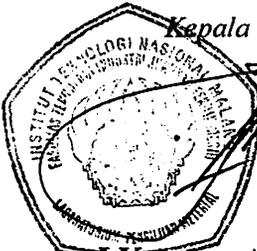
TEST REPORT

Test No.: 0881 Test Description : Tensile Standard : ASTM A370 Test Date: 19/11/2010

No.	SPECIMEN	Area (mm) ²	Max. Force (Newton)	Yield Strength (MPa)	Tensile Strength (MPa)	Elongation (%)
1	BJTP 10 mm B	71.68	33881.7	335.1	472.68	97.71



Kepala Laboratorium :



Komang Astana Widi, ST.MT
 NIP Y. 1030400405

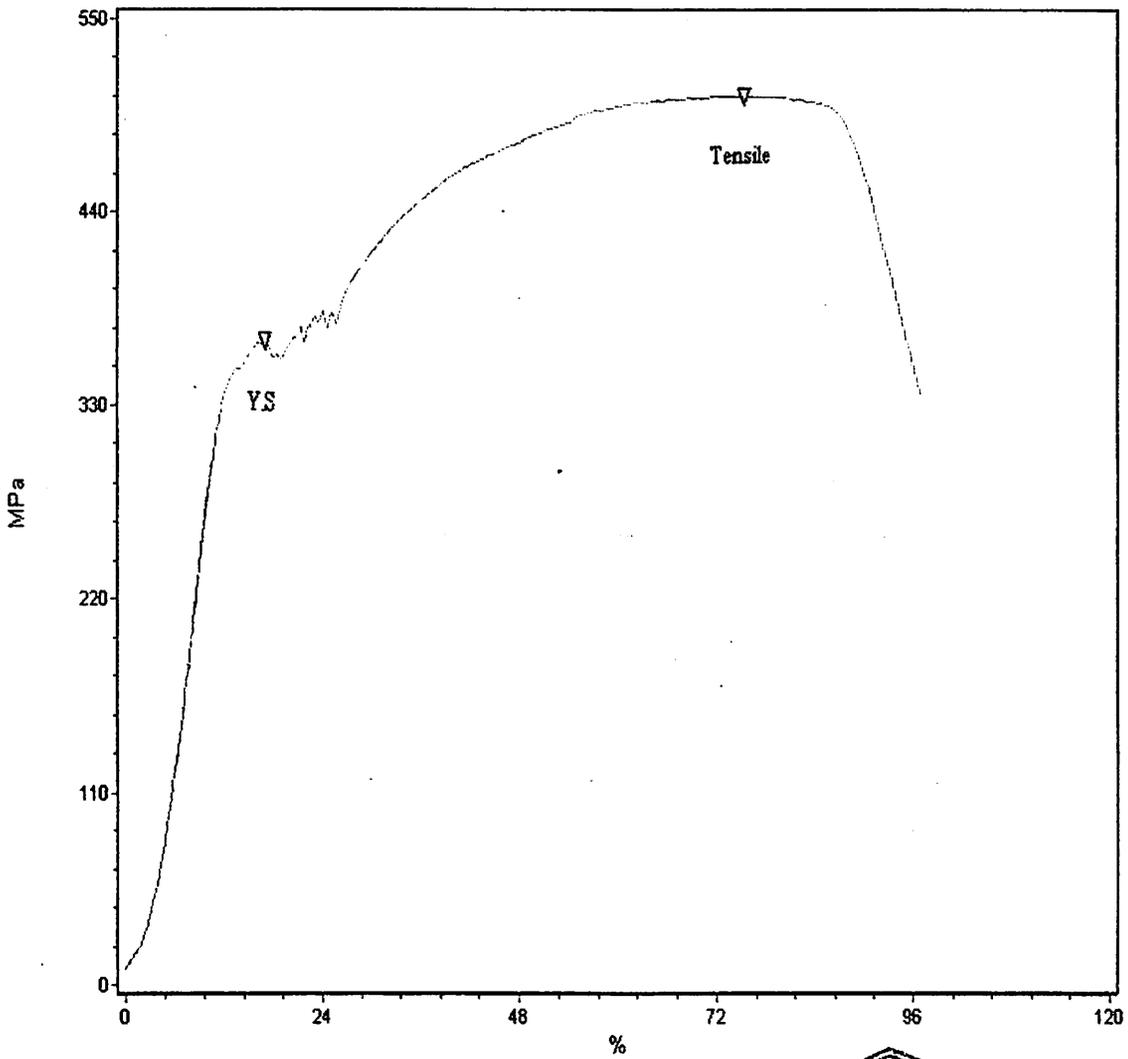
LABORATORIUM UJI MATERIAL
JURUSAN TEKNIK MESIN - S1
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI
INSTITUT TEKNOLOGI NASIONAL MALANG

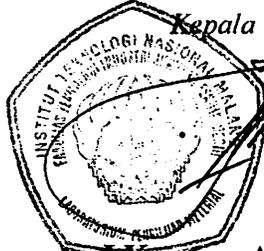
KAMPUS II JL. KAYA KARANGLU KM. 2 IASIK MALUJU - MALANG
 TELP: (0341) 417634, 417636, 417637 FAX: 0341 - 417634

TEST REPORT

Test No.: 0882 Test Description : Tensile Standard : ASTM A370 Test Date: 19/11/2010

No.	SPECIMEN	Area (mm) ²	Max. Force (Newton)	Yield Strength (MPa)	Tensile Strength (MPa)	Elongation (%)
1	BJTP 10 mm C	71.68	35561.17	360.5	496.11	97.61



Kepala Laboratorium :

Komang Astana Widi, ST.MT

NIP Y. 1030400405 

Tabel L.2.3 : Tabel Hasil Pengujian Tekan Beton Silinder

Tanggal Pengujian : Rabu, 24 Nopember 2010
 Umur Benda Uji : 28 Hari
 Jumlah Benda Uji : 12 Benda Uji
 Tempat Pengujian : Lab. Beton dan Bahan Kontruksi, ITN Malang

No	Kode	Tanggal Pembuatan	Tanggal Pengujian	Umur Beton	Berat (kg)	Diameter (cm)	Luas (cm ²)	Beban (kg)	fc		f _c (Mpa)	(f _c -f _d) (Mpa)	sd (Mpa)	f'c (Mpa)
									(kg/cm ²)	(Mpa)				
1	B1	25-Okt-10	24-Nop-10	30 Hari	12,82	15	176,71459	60600	342,92585	34,29259	27,7189	43,213382	2,388	24,519
2	B2	25-Okt-10	24-Nop-10	30 Hari	13,00	15	176,71459	54800	310,10456	31,01046		10,8343673		
3	B3	25-Okt-10	24-Nop-10	30 Hari	12,92	15	176,71459	54000	305,57749	30,55775		8,05908417		
4	B4	25-Okt-10	24-Nop-10	30 Hari	13,10	15	176,71459	45400	256,91145	25,69114		4,11177764		
5	B5	25-Okt-10	24-Nop-10	30 Hari	13,12	15	176,71459	45800	259,17498	25,9175		3,24503537		
6	B6	25-Okt-10	24-Nop-10	30 Hari	13,04	15	176,71459	46400	262,57029	26,25703		2,13705695		
7	B7	27-Okt-10	24-Nop-10	28 Hari	13,12	15	176,71459	44800	253,51614	25,35161		5,60402602		
8	B8	27-Okt-10	24-Nop-10	28 Hari	12,90	15	176,71459	52800	298,78688	29,87869		4,66469943		
9	B9	27-Okt-10	24-Nop-10	28 Hari	k	15	176,71459	52400	296,52334	29,65233		3,73818183		
10	B10	27-Okt-10	24-Nop-10	28 Hari	12,92	15	176,71459	45800	259,17498	25,9175		3,24503537		
11	B11	27-Okt-10	24-Nop-10	28 Hari	13,07	15	176,71459	47400	268,22913	26,82291		0,80278622		
12	B12	27-Okt-10	24-Nop-10	28 Hari	13,17	15	176,71459	37600	212,77248	21,27725		41,4948413		
											131,150274			

LAMPIRAN III

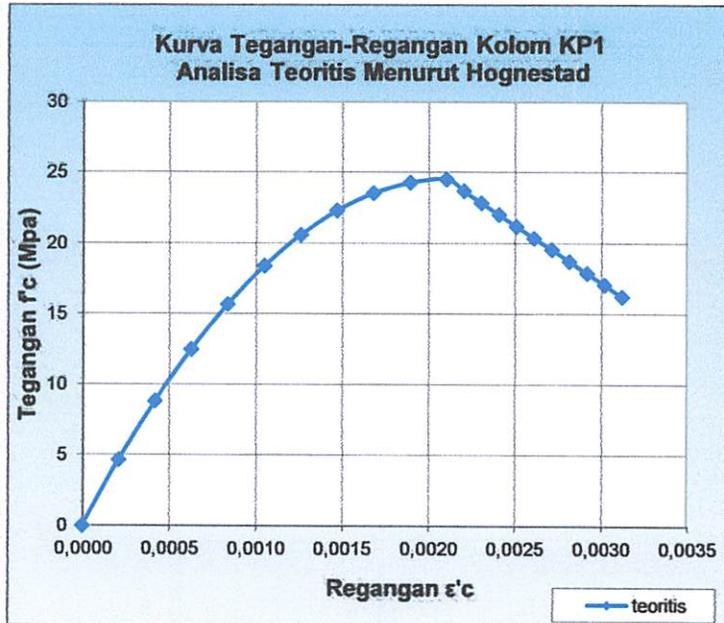
Tabel dan Grafik Analisa Teoritis Hubungan Tegangan-Regangan Kolom

1) Analisa Teoritis Kolom Beton Polos (KP1) menurut Hognestad

f _c = 24,52	P _{maks} = 64,88 Ton
ε _{30h} = 0	Ag = 74,662
ρ _s = 0	f'cc = 8,2649
E _c = 23273,307 MPa	ε _{cu} = 0,0031
f _c Naik = 24,52 MPa	
ε _{co} = 0,0021071	

Tabel L.3.1 : Tabel Hasil Analisa Teoritis Kolom KP1

No	ε _c	f _c (Mpa)
1	2	3
1	0	0
2	0,00021	4,659
3	0,00042	8,827
4	0,00063	12,505
5	0,00084	15,693
6	0,00105	18,390
7	0,00126	20,597
8	0,00147	22,313
9	0,00169	23,539
10	0,00190	24,275
11	0,00211	24,520
12	0,00221	23,694
13	0,00231	22,867
14	0,00241	22,041
15	0,00251	21,214
16	0,00262	20,388
17	0,00272	19,561
18	0,00282	18,735
19	0,00292	17,908
20	0,00302	17,082
21	0,00313	16,255



Keterangan Kolom :

Kolom 1 = Nomor urut

Kolom 2 = Regangan Beton

Kolom 3 = Kuat tekan beton

Baris 1-11 adalah kurva naik

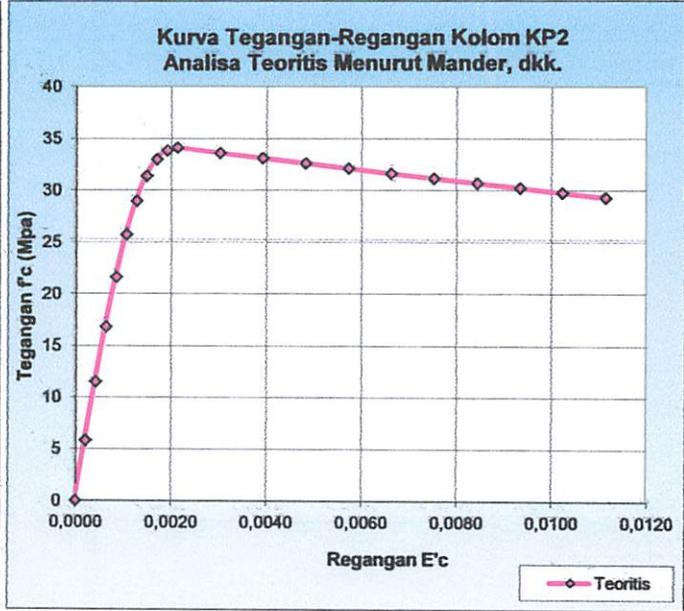
Baris 12-21 adalah kurva turun

2) Analisa Teoritis Kolom Beton KP2 yang terkekang CFRP menurut Mander, dkk

f_j =	920 Mpa	P_{maks}	93,347 Ton
f_{ju} =	2530 Mpa	ϵ_{co} =	0,002
ϵ_j =	0,004	f_c =	24,52 Mpa
ϵ_{sj} =	0,011	$f_{cc''}$ =	34,110 MPa
ϵ_{sfrp} =	0,004	r_j =	2,4085
β_{sfrp} =	0,0034667	ϵ_{scj} =	0,0021
E_{sccj} =	16052,497 MPa	ϵ_{sju} =	0,0111
E_{cj} =	27449,77 MPa		

Tabel L.3.2 : Tabel Hasil Analisa Teoritis Kolom KP2

No	ϵ_c	X	f_c (Mpa)
1	2	3	4
1	0	0	0
2	0,00021	0,10000	5,817
3	0,00042	0,20000	11,496
4	0,00064	0,30000	16,840
5	0,00085	0,40000	21,640
6	0,00106	0,50000	25,724
7	0,00127	0,60000	28,984
8	0,00149	0,70000	31,390
9	0,00170	0,80000	32,981
10	0,00191	0,90000	33,849
11	0,00212	1,00000	34,110
12	0,00303	1,42368	33,598
13	0,00393	1,84735	33,094
14	0,00483	2,27103	32,598
15	0,00573	2,69471	32,109
16	0,00663	3,11838	31,627
17	0,00753	3,54206	31,153
18	0,00843	3,96573	30,686
19	0,00933	4,38941	30,225
20	0,01023	4,81309	29,772
21	0,01113	5,23676	29,325



Keterangan Kolom :

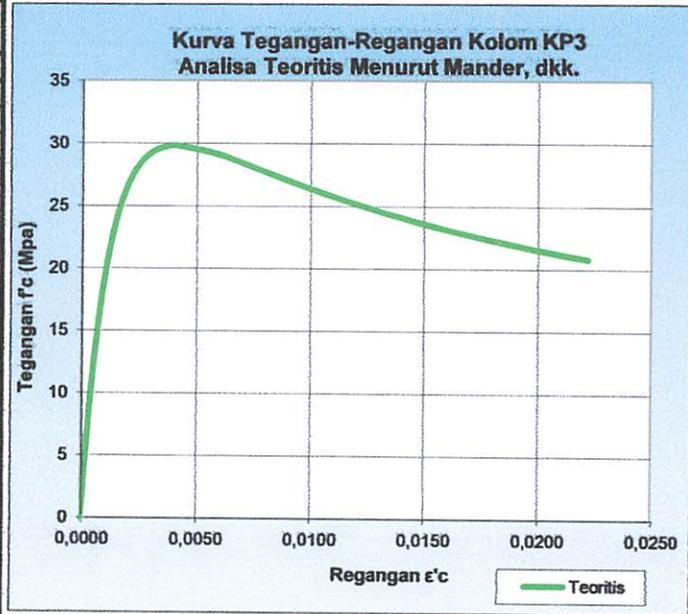
- Kolom 1 = Nomor urut
- Kolom 2 = Regangan Beton
- Kolom 3 = Rasio perbandingan regangan beton
- Kolom 4 = Kuat tekan beton
- Baris 1-11 adalah kurva naik
- Baris 12-21 adalah kurva turun

3) **Analisa Teoritis Kolom Beton terkekang Tulangan Transversal Ø6 (KP3) menurut Mander, dkk.**

ϵ_{so} = 0,002 Pmaks = 76,657 Ton
 ϵ_{sc} = 0,0041635
 Esec = 7163,3982 MPa
 r = 1,3871197
 Ec = 25667,746 MPa
 K = 1,2164
 ρ_{sh} = 0,00961
 fcc = 29,825 MPa
 fyh = 269,28 MPa
 ϵ_{sm} = 0,15
 ϵ_{su} = 0,0222208

Tabel L.3.3 : Tabel Hasil Analisa Teoritis Kolom KP3

No	ϵ_c	X	f _c (Mpa)
1	2	3	4
1	0	0	0
2	0,00042	0,10000	9,663
3	0,00083	0,20000	16,736
4	0,00125	0,30000	21,571
5	0,00167	0,40000	24,785
6	0,00208	0,50000	26,883
7	0,00250	0,60000	28,225
8	0,00291	0,70000	29,051
9	0,00333	0,80000	29,526
10	0,00375	0,90000	29,760
11	0,00416	1,00000	29,825
12	0,00597	1,43370	29,141
13	0,00777	1,86740	27,938
14	0,00958	2,30111	26,708
15	0,01139	2,73481	25,573
16	0,01319	3,16851	24,553
17	0,01500	3,60221	23,643
18	0,01680	4,03591	22,830
19	0,01861	4,46962	22,100
20	0,02042	4,90332	21,441
21	0,02222	5,33702	20,844



Keterangan Kolom :

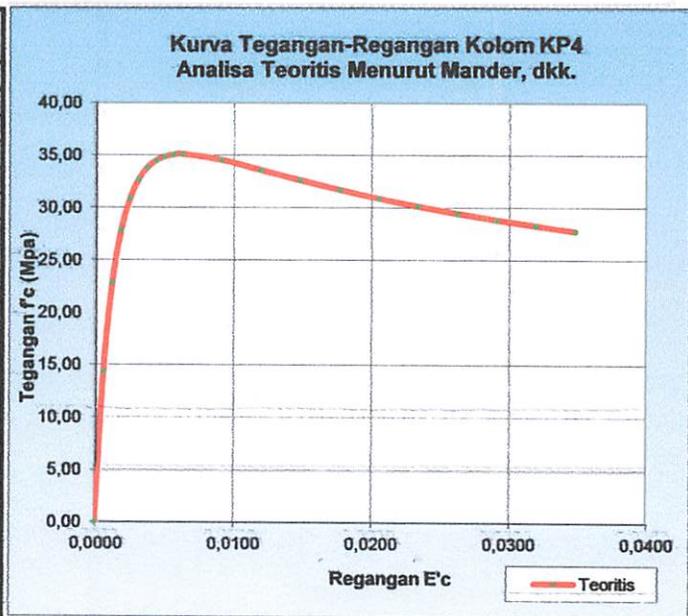
Kolom 1 = Nomor urut
 Kolom 2 = Regangan Beton
 Kolom 3 = Rasio perbandingan regangan beton
 Kolom 4 = Kuat tekan beton
 Baris 1-11 adalah kurva naik
 Baris 12-21 adalah kurva turun

4) Analisa Teoritis Kolom Beton terkekang Tulangan Transversal Ø8 (KP4) menurut Mander, dkk.

ϵ_{so} = 0,002 P_{maks} = 88,376 Ton
 ϵ_{sc} = 0,0063161
 E_{sec} = 5557,6962 MPa
 r = 1,249349
 E_c = 27846,525 MPa
 K = 1,4316
 ρ_{sh} = 0,0165
 f_c = 35,103 MPa
 f_{yh} = 312,88 MPa
 ϵ_{sm} = 0,15
 ϵ_{su} = 0,0348841

Tabel L.3.4 : Tabel Hasil Analisa Teoritis Kolom KP4

No	ϵ_c	X	f_c (Mpa)
1	2	3	4
1	0	0	0
2	0,00063	0,10000	14,348
3	0,00126	0,20000	22,887
4	0,00189	0,30000	27,901
5	0,00253	0,40000	30,904
6	0,00316	0,50000	32,729
7	0,00379	0,60000	33,840
8	0,00442	0,70000	34,502
9	0,00505	0,80000	34,874
10	0,00568	0,90000	35,053
11	0,00632	1,00000	35,103
12	0,00917	1,45230	34,554
13	0,01203	1,90460	33,601
14	0,01489	2,35690	32,628
15	0,01774	2,80920	31,722
16	0,02060	3,26151	30,900
17	0,02346	3,71381	30,159
18	0,02631	4,16611	29,489
19	0,02917	4,61841	28,881
20	0,03203	5,07071	28,327
21	0,03488	5,52301	27,820



Keterangan Kolom :

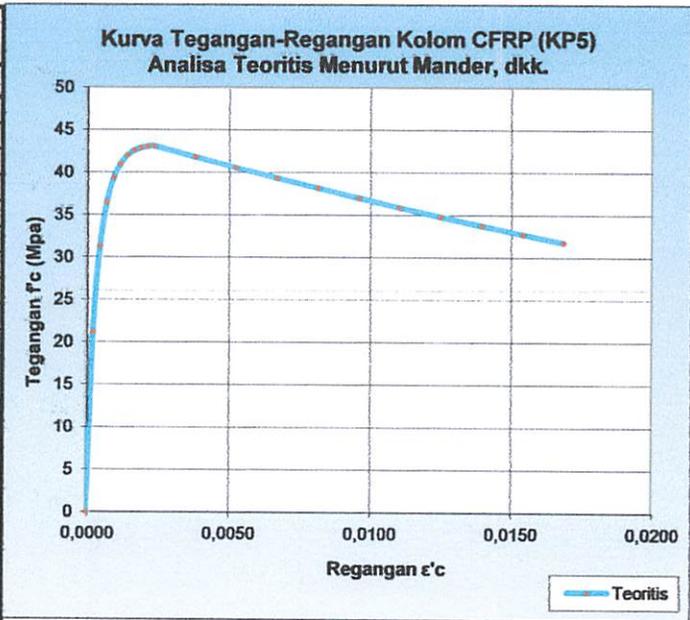
Kolom 1 = Nomor urut
 Kolom 2 = Regangan Beton
 Kolom 3 = Rasio perbandingan regangan beton
 Kolom 4 = Kuat tekan beton
 Baris 1-11 adalah kurva naik
 Baris 12-21 adalah kurva turun

5) Analisa Teoritis Kolom Beton KP5 yang terkekang Tulangan BJTP dan CFRP menurut Mander, dkk

f_j =	920 Mpa	P_{maks}	113,33 Ton
f_{ju} =	2530 Mpa	ϵ_{co} =	0,002
ϵ_j =	0,004	f_c =	24,52 Mpa
ϵ_{aj} =	0,011	ρ_s =	0,0096
ϵ_{dfp} =	0,004	E_{scc} =	12484 MPa
D_{dfp} =	0,0034667	E_c =	25667 MPa
E_{sccj} =	4499,2645 MPa	r_c =	1,947
E_{cj} =	30859,357 MPa	f_{cc}'' =	43,110 MPa
r_j =	1,1706847	f_{cc} =	29,823
ϵ_{ccj} =	0,0023888	ϵ_{cc} =	0,0096
ϵ_{aju} =	0,0096396	ϵ_{cu} =	0,0222

Tabel L.3.5 : Tabel Hasil Analisa Teoritis Kolom KP5

No	ϵ_c	X	f_c (Mpa)
1	0	0	0
2	0,00024	0,1	21,189
3	0,00048	0,2	31,284
4	0,00072	0,3	36,487
5	0,00096	0,4	39,369
6	0,00119	0,5	41,038
7	0,00143	0,6	42,023
8	0,00167	0,7	42,597
9	0,00191	0,8	42,916
10	0,00215	0,9	43,068
11	0,00239	1,0	43,110
12	0,00384	1,61	41,817
13	0,00529	2,21	40,562
14	0,00674	2,82	39,345
15	0,00819	3,43	38,165
16	0,00964	4,04	37,020
17	0,01109	4,64	35,909
18	0,01254	5,25	34,832
19	0,01399	5,86	33,787
20	0,01544	6,46	32,774
21	0,01689	7,07	31,790



Keterangan Kolom :

Kolom 1 = Nomor urut

Kolom 2 = Regangan Beton

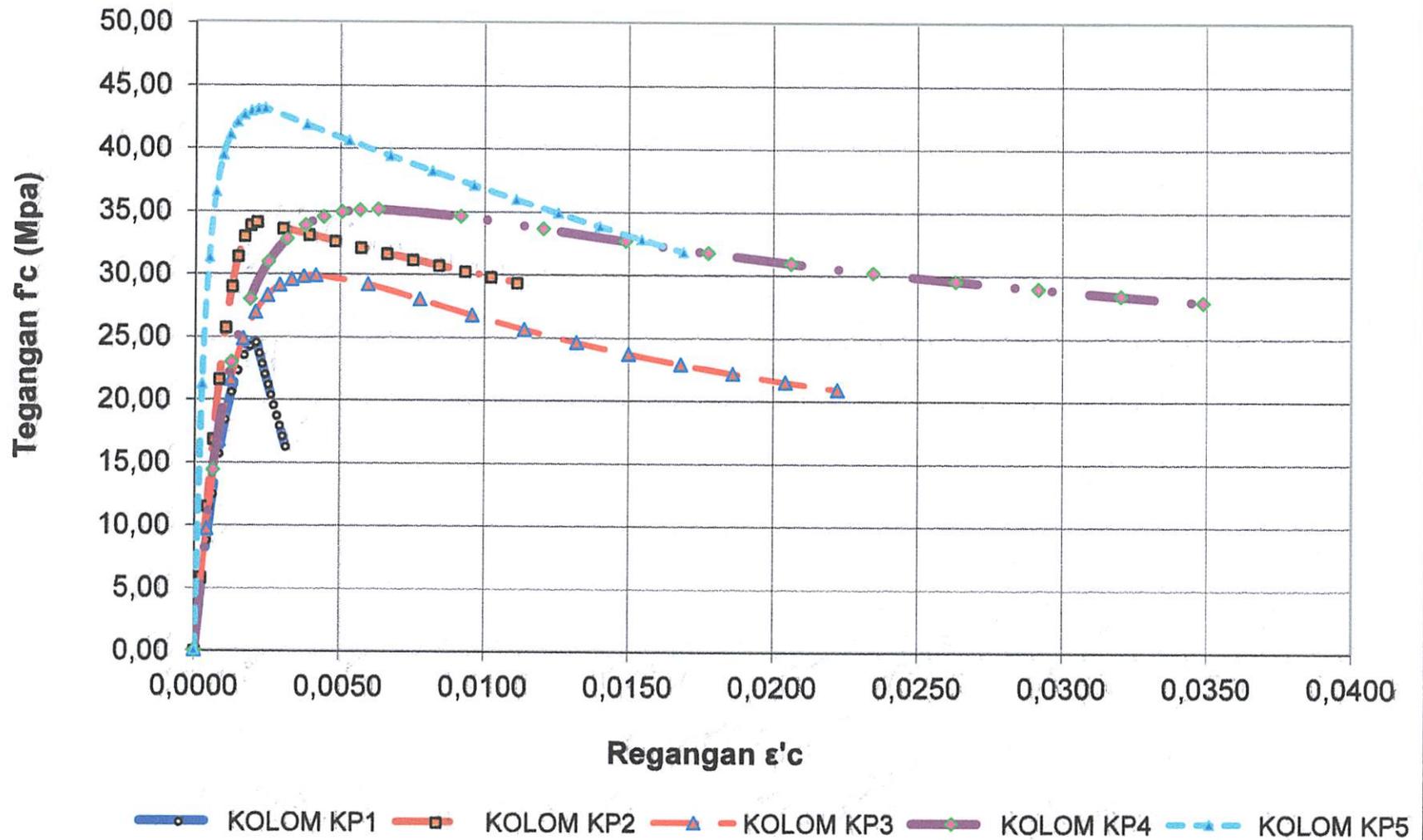
Kolom 3 = Rasio perbandingan regangan beton

Kolom 4 = Kuat tekan beton

Baris 1-11 adalah kurva naik

Baris 12-21 adalah kurva turun

Kurva Tegangan-Regangan Kolom Gabungan Analisa Teoritis



LAMPIRAN IV

Tabel L.4.1-A : Hasil Pengamatan Eksperimen Kolom KP1-A

P (ton)	DIAL 1 (mm)	DIAL 2 (mm)	L (mm)	A _g (mm ²)	f _c (Mpa)	ε _{c1}	ε _{c2}	ε _c rata-rata
1	2	3	4	5	8	9	10	11
0	0	0	500	22500	0,00000	0,00000	0,00000	0
2	2	4	500	22500	0,88889	0,00004	0,00008	6,00E-05
4	2	6	500	22500	1,77778	0,00004	0,00012	8,00E-05
6	8	8	500	22500	2,66667	0,00016	0,00016	1,60E-04
8	10	12	500	22500	3,55556	0,00020	0,00024	2,20E-04
10	12	16	500	22500	4,44444	0,00024	0,00032	2,80E-04
12	16	22	500	22500	5,33333	0,00032	0,00044	3,80E-04
14	20	26	500	22500	6,22222	0,00040	0,00052	4,60E-04
16	24	30	500	22500	7,11111	0,00048	0,00060	5,40E-04
18	30	34	500	22500	8,00000	0,00060	0,00068	6,40E-04
20	35	40	500	22500	8,88889	0,00070	0,00080	7,50E-04
22	40	45	500	22500	9,77778	0,00080	0,00090	8,50E-04
24	44	52	500	22500	10,66667	0,00088	0,00104	9,60E-04
26	50	58	500	22500	11,55556	0,00100	0,00116	1,08E-03
28	55	64	500	22500	12,44444	0,00110	0,00128	1,19E-03
30	60	69	500	22500	13,33333	0,00120	0,00138	1,29E-03
32	64	74	500	22500	14,22222	0,00128	0,00148	1,38E-03
34	68	78	500	22500	15,11111	0,00136	0,00156	1,46E-03
36	72	82	500	22500	16,00000	0,00144	0,00164	1,54E-03
38	78	88	500	22500	16,88889	0,00156	0,00176	1,66E-03
40	82	94	500	22500	17,77778	0,00164	0,00188	1,76E-03
42	87	102	500	22500	18,66667	0,00174	0,00204	1,89E-03
44	91	108	500	22500	19,55556	0,00182	0,00216	1,99E-03
46	94	115	500	22500	20,44444	0,00188	0,00230	2,09E-03
48	98	122	500	22500	21,33333	0,00196	0,00244	2,20E-03
50	103	128	500	22500	22,22222	0,00206	0,00256	2,31E-03
52	109	138	500	22500	23,11111	0,00218	0,00276	2,47E-03
54,5	116	150	500	22500	24,22222	0,00232	0,00300	2,66E-03
50	124	162	500	22500	22,22222	0,00248	0,00324	2,86E-03
46	140	174	500	22500	20,44444	0,00280	0,00348	3,14E-03
42	158	188	500	22500	18,66667	0,00316	0,00376	3,46E-03
38	174	196	500	22500	16,88889	0,00348	0,00392	3,70E-03
33,6	188	221	500	22500	14,93333	0,00376	0,00442	4,09E-03

Keterangan Kolom :

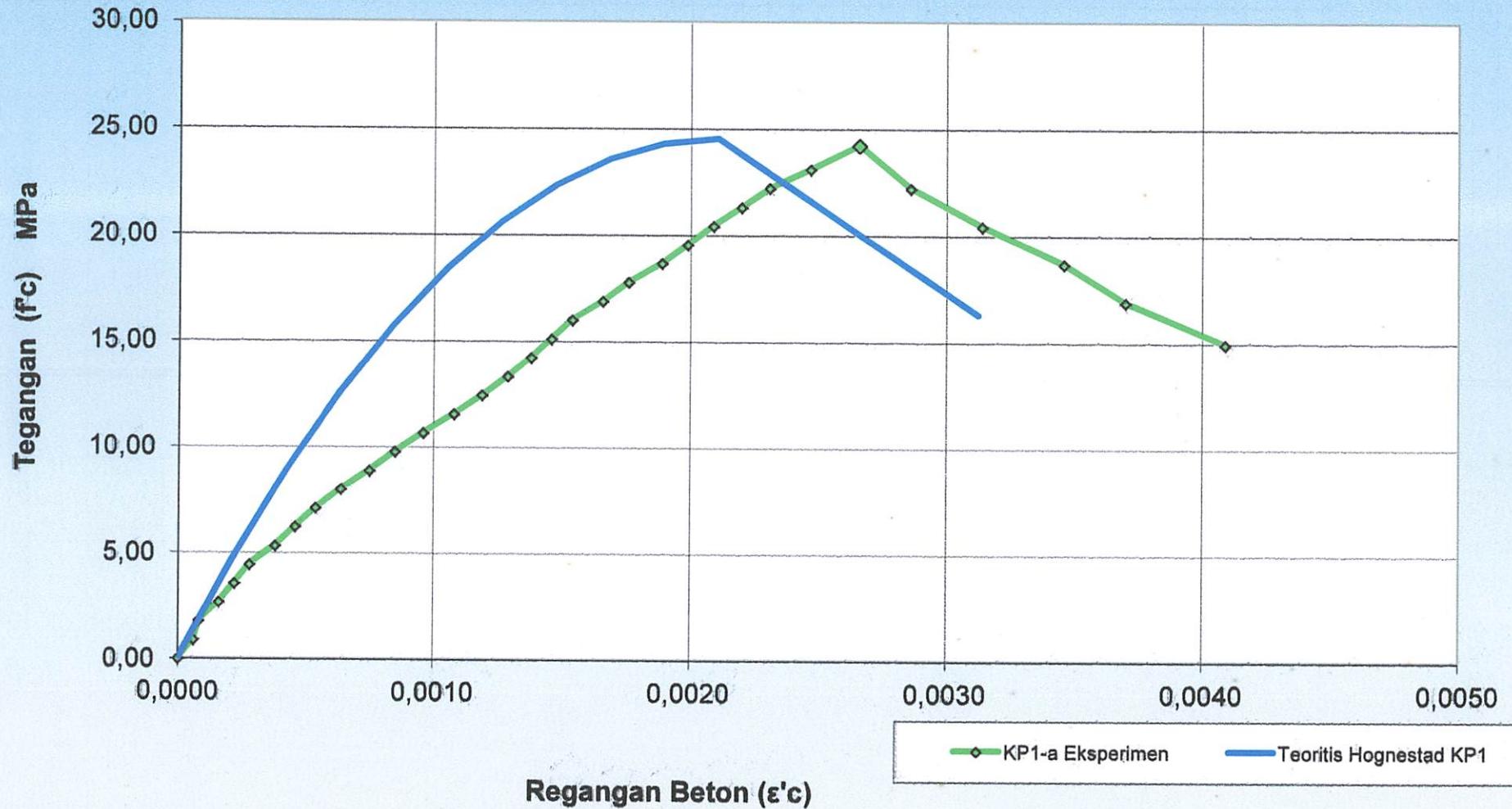
- | | |
|--|--------------------------------|
| 1 = Beban Aksial | 6 = Kuat Tekan Beton |
| 2 = Displacement pada DIAL 1 | 7 = Regangan beton pada DIAL1 |
| 3 = Displacement pada DIAL 2 | 8 = Regangan beton pada DIAL 2 |
| 4 = Tinggi mula-mula untuk pengukuran regangan | 9 = Regangan beton rata-rata |
| 5 = Luas penampang beton | |

Baris Yang Berwarna Biru adalah Pada Saat Terjadi Awal Retak

Baris Yang Berwarna Hijau adalah Pada Saat Beban Puncak

Baris Yang Berwarna Merah adalah Pada Saat Hancurnya Kolom

Kurva Tegangan Regangan Kolom Beton Polos (KP1-A) Analisis Teoritis dan Eksperimen



TABEL L 4.1-B**ANALISA EKSPERIMENTAL KOLOM BETON POLOS (KP1-B)**

P (ton)	DIAL 1 (mm)	DIAL 2 (mm)	L (mm)	A _g (mm ²)	f _c (Mpa)	ε _{c1}	ε _{c2}	ε _c rata-rata
1	2	3	4	5	8	9	10	11
0	0	0	499,5	22500	0,00000	0,00000	0,00000	0
2	5	0	499,5	22500	0,88889	0,00010	0,00000	5,01E-05
4	7	6	499,5	22500	1,77778	0,00014	0,00012	1,30E-04
6	10	9	499,5	22500	2,66667	0,00020	0,00018	1,90E-04
8	13	12	499,5	22500	3,55556	0,00026	0,00024	2,50E-04
10	17	15	499,5	22500	4,44444	0,00034	0,00030	3,20E-04
12	22	20	499,5	22500	5,33333	0,00044	0,00040	4,20E-04
14	26	25	499,5	22500	6,22222	0,00052	0,00050	5,11E-04
16	32	30	499,5	22500	7,11111	0,00064	0,00060	6,21E-04
18	36	34	499,5	22500	8,00000	0,00072	0,00068	7,01E-04
20	41	38	499,5	22500	8,88889	0,00082	0,00076	7,91E-04
22	46	43	499,5	22500	9,77778	0,00092	0,00086	8,91E-04
24	50	48	499,5	22500	10,66667	0,00100	0,00096	9,81E-04
26	55	53	499,5	22500	11,55556	0,00110	0,00106	1,08E-03
28	60	57	499,5	22500	12,44444	0,00120	0,00114	1,17E-03
30	64	63	499,5	22500	13,33333	0,00128	0,00126	1,27E-03
32	69	67	499,5	22500	14,22222	0,00138	0,00134	1,36E-03
34	72	70	499,5	22500	15,11111	0,00144	0,00140	1,42E-03
36	76	74	499,5	22500	16,00000	0,00152	0,00148	1,50E-03
38	80	79	499,5	22500	16,88889	0,00160	0,00158	1,59E-03
40	83	83	499,5	22500	17,77778	0,00166	0,00166	1,66E-03
42	88	87	499,5	22500	18,66667	0,00176	0,00174	1,75E-03
44	93	91	499,5	22500	19,55556	0,00186	0,00182	1,84E-03
46	97	96	499,5	22500	20,44444	0,00194	0,00192	1,93E-03
48	102	100	499,5	22500	21,33333	0,00204	0,00200	2,02E-03
50	109	105	499,5	22500	22,22222	0,00218	0,00210	2,14E-03
52	116	111	499,5	22500	23,11111	0,00232	0,00222	2,27E-03
53,8	124	119	499,5	22500	23,91111	0,00248	0,00238	2,43E-03
50	139	131	499,5	22500	22,22222	0,00278	0,00262	2,70E-03
46	155	151	499,5	22500	20,44444	0,00310	0,00302	3,06E-03
42	174	169	499,5	22500	18,66667	0,00348	0,00338	3,43E-03
38	196	192	499,5	22500	16,88889	0,00392	0,00384	3,88E-03
34,2	221	219	499,5	22500	15,20000	0,00442	0,00438	4,40E-03

Keterangan Kolom :

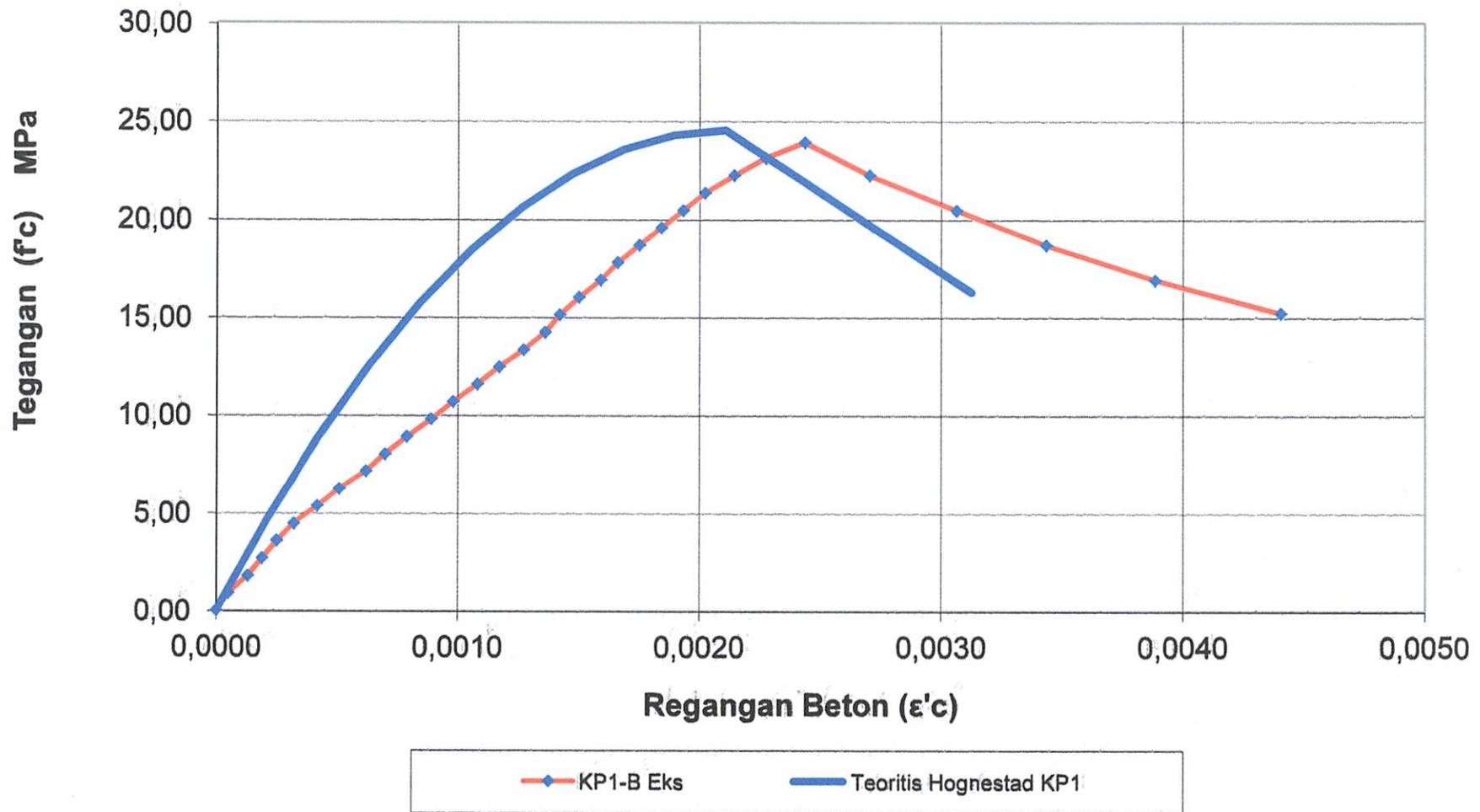
- | | |
|--|--------------------------------|
| 1 = Beban Aksial | 6 = Kuat Tekan Beton |
| 2 = Displacement pada DIAL 1 | 7 = Regangan beton pada DIAL 1 |
| 3 = Displacement pada DIAL 2 | 8 = Regangan beton pada DIAL 2 |
| 4 = Tinggi mula-mula untuk pengukuran regangan | 9 = Regangan beton rata-rata |
| 5 = Luas penampang kolom | |

Baris Yang Berwarna Biru adalah Pada Saat Terjadi Awal Retak

Baris Yang Berwarna Hijau adalah Pada Saat Beban Puncak

Baris Yang Berwarna Merah adalah Pada Saat Hancurnya Kolom

Kurva Tegangan Regangan Kolom Beton Polos (KP1-B) Analisis Teoritis dan Eksperimen



TABEL L4.1-C

ANALISA EKSPERIMENTAL KOLOM BETON POLOS (KP1-C)

P (ton)	DIAL 1 (mm)	DIAL 2 (mm)	L (mm)	A _g (mm ²)	f _c (Mpa)	ε _{c1}	ε _{c2}	ε _c rata-rata
1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	0	0	499	22500	0,00000	0,00000	0,00000	0
2	0	2	499	22500	0,88889	0,00000	0,00004	2,00E-05
4	3	5	499	22500	1,77778	0,00006	0,00010	8,02E-05
6	8	9	499	22500	2,66667	0,00016	0,00018	1,70E-04
8	13	14	499	22500	3,55556	0,00026	0,00028	2,71E-04
10	18	19	499	22500	4,44444	0,00036	0,00038	3,71E-04
12	22	24	499	22500	5,33333	0,00044	0,00048	4,61E-04
14	27	28	499	22500	6,22222	0,00054	0,00056	5,51E-04
16	32	34	499	22500	7,11111	0,00064	0,00068	6,61E-04
18	36	37	499	22500	8,00000	0,00072	0,00074	7,31E-04
20	41	42	499	22500	8,88889	0,00082	0,00084	8,32E-04
22	45	46	499	22500	9,77778	0,00090	0,00092	9,12E-04
24	49	50	499	22500	10,66667	0,00098	0,00100	9,92E-04
26	52	55	499	22500	11,55556	0,00104	0,00110	1,07E-03
28	56	57	499	22500	12,44444	0,00112	0,00114	1,13E-03
30	59	61	499	22500	13,33333	0,00118	0,00122	1,20E-03
32	64	65	499	22500	14,22222	0,00128	0,00130	1,29E-03
34	67	69	499	22500	15,11111	0,00134	0,00138	1,36E-03
36	71	73	499	22500	16,00000	0,00142	0,00146	1,44E-03
38	74	76	499	22500	16,88889	0,00148	0,00152	1,50E-03
40	76	78	499	22500	17,77778	0,00152	0,00156	1,54E-03
42	81	82	499	22500	18,66667	0,00162	0,00164	1,63E-03
44	85	87	499	22500	19,55556	0,00170	0,00174	1,72E-03
46	89	91	499	22500	20,44444	0,00178	0,00182	1,80E-03
48	92	94	499	22500	21,33333	0,00184	0,00188	1,86E-03
50	96	99	499	22500	22,22222	0,00192	0,00198	1,95E-03
52,2	105	111	499	22500	23,20000	0,00210	0,00222	2,16E-03
48	119	125	499	22500	21,33333	0,00238	0,00251	2,44E-03
46	133	142	499	22500	20,44444	0,00267	0,00285	2,76E-03
42	148	155	499	22500	18,66667	0,00297	0,00311	3,04E-03
36	173	178	499	22500	16,00000	0,00347	0,00357	3,52E-03
34	187	192	499	22500	15,11111	0,00375	0,00385	3,80E-03
32,7	203	211	499	22500	14,53333	0,00407	0,00423	4,15E-03

Keterangan Kolom :

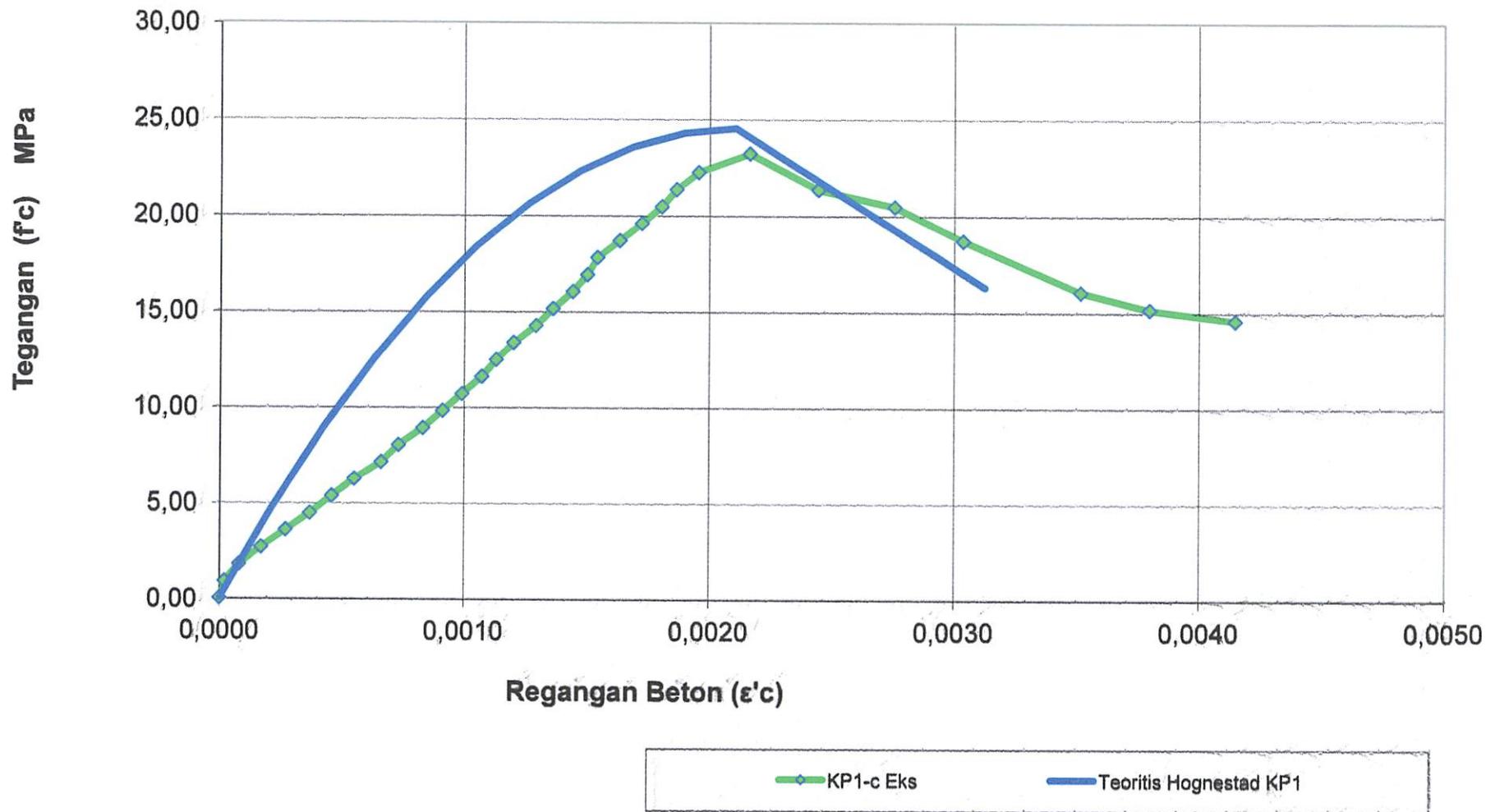
- 1 = Beban Aksial
- 2 = Displacement pada DIAL 1
- 3 = Displacement pada DIAL 2
- 4 = Tinggi mula-mula untuk pengukuran regangan
- 5 = Luas penampang kolom
- 6 = Kuat Tekan Beton
- 7 = Regangan beton pada DIAL 1
- 8 = Regangan beton pada DIAL 2
- 9 = Regangan beton rata-rata

Baris Yang Berwarna Biru adalah Pada Saat Terjadi Awal Retak

Baris Yang Berwarna Hijau adalah Pada Saat Beban Puncak

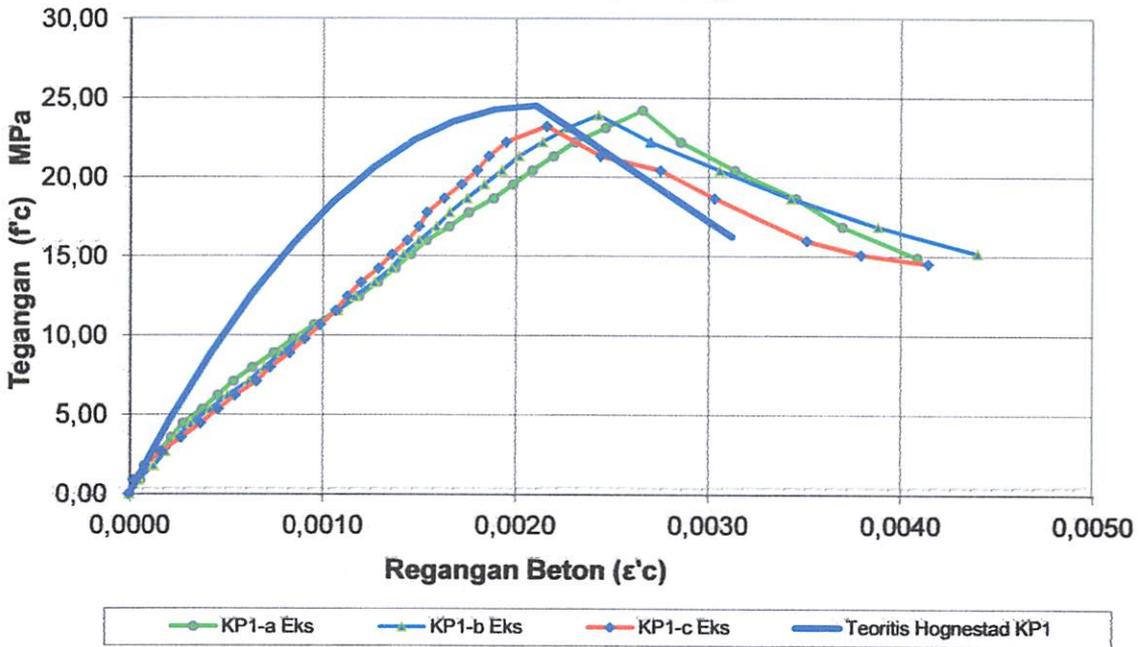
Baris Yang Berwarna Merah adalah Pada Saat Hancurnya Kolom

Kurva Tegangan Regangan Kolom Beton Polos (KP1-C) Analisis Teoritis dan Eksperimen

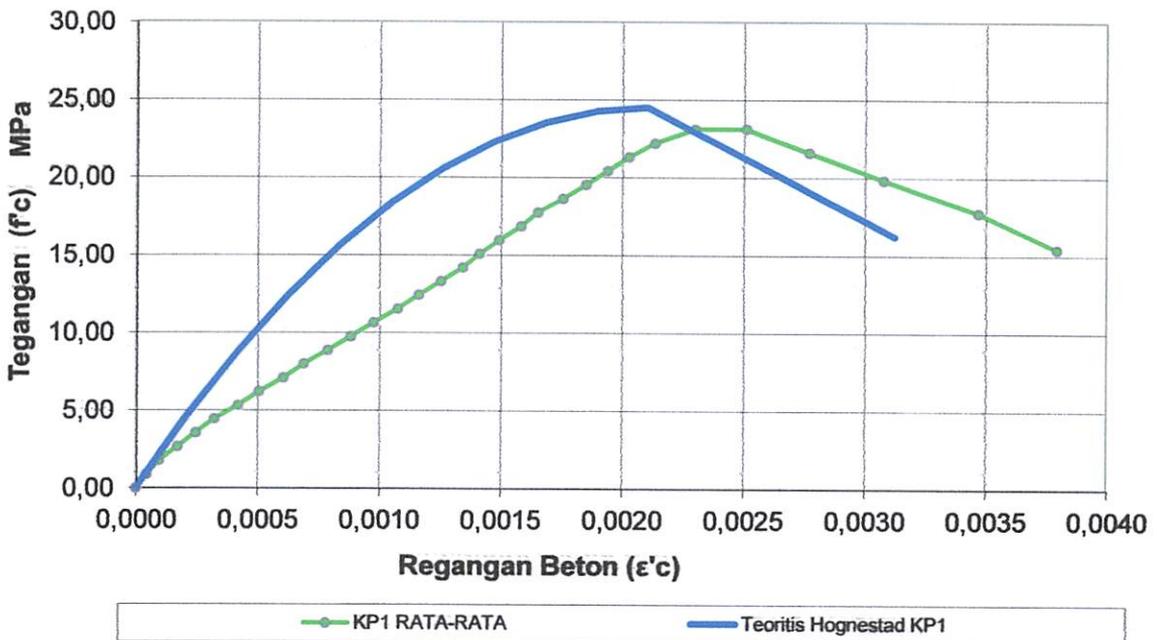


Lampiran IV : Kurva Tegangan regangan Hasil Pengamatan Eksperimen Kolom KP1-C

**Kurva Tegangan Regangan Kolom Beton Polos (KP1)
Analisis Teoritis dan Eksperimen**



**Kurva Tegangan Regangan Kolom Beton Polos (KP1)
Analisis Teoritis dan Eksperimen Rata-Rata**



TABEL L4.2-A**ANALISA EKSPERIMENTAL KOLOM BETON TERKEKANG CFRP (KP2-A)**

P (ton)	DIAL 1 (mm)	DIAL 2 (mm)	L (mm)	A _g (mm ²)	f _c (Mpa)	ε _{c1}	ε _{c2}	ε _c rata-rata
1	2	3	4	5	8	9	10	11
0	0	0	499	22500	0,00000	0,00000	0,00000	0
4	5	3	499	22500	1,77778	0,00010	0,00006	8,02E-05
8	9	7	499	22500	3,55556	0,00018	0,00014	1,60E-04
12	13	11	499	22500	5,33333	0,00026	0,00022	2,40E-04
16	18	16	499	22500	7,11111	0,00036	0,00032	3,41E-04
20	22	20	499	22500	8,88889	0,00044	0,00040	4,21E-04
24	28	25	499	22500	10,66667	0,00056	0,00050	5,31E-04
28	34	32	499	22500	12,44444	0,00068	0,00064	6,61E-04
32	41	39	499	22500	14,22222	0,00082	0,00078	8,02E-04
36	48	45	499	22500	16,00000	0,00096	0,00090	9,32E-04
40	56	55	499	22500	17,77778	0,00112	0,00110	1,11E-03
44	64	63	499	22500	19,55556	0,00128	0,00126	1,27E-03
48	73	71	499	22500	21,33333	0,00146	0,00142	1,44E-03
52	83	80	499	22500	23,11111	0,00166	0,00160	1,63E-03
56	94	89	499	22500	24,88889	0,00188	0,00178	1,83E-03
60	106	99	499	22500	26,66667	0,00212	0,00198	2,05E-03
64	115	108	499	22500	28,44444	0,00230	0,00216	2,23E-03
68	125	117	499	22500	30,22222	0,00251	0,00234	2,42E-03
72	136	129	499	22500	32,00000	0,00273	0,00259	2,66E-03
73,7	144	136	499	22500	32,75556	0,00289	0,00273	2,81E-03
72	165	158	499	22500	32,00000	0,00331	0,00317	3,24E-03
70	190	182	499	22500	31,11111	0,00381	0,00365	3,73E-03
68	218	211	499	22500	30,22222	0,00437	0,00423	4,30E-03
66	248	233	499	22500	29,33333	0,00497	0,00467	4,82E-03
64	280	269	499	22500	28,44444	0,00561	0,00539	5,50E-03
62	314	308	499	22500	27,55556	0,00629	0,00617	6,23E-03
60	350	338	499	22500	26,66667	0,00701	0,00677	6,89E-03
58	390	379	499	22500	25,77778	0,00782	0,00760	7,71E-03
56	455	441	499	22500	24,88889	0,00912	0,00884	8,98E-03
54	520	503	499	22500	24,00000	0,01042	0,01008	1,03E-02
52	585	565	499	22500	23,11111	0,01172	0,01132	1,15E-02
45	651	628	499	22500	20,00000	0,01305	0,01259	1,28E-02

Keterangan Kolom :

1 = Beban Aksial

2 = Displacement pada DIAL 1

3 = Displacement pada DIAL 2

4 = Tinggi mula-mula untuk pengukuran regangan

5 = Luas penampang beton

6 = Kuat Tekan Beton

7 = Regangan beton pada DIAL 1

8 = Regangan beton pada DIAL 2

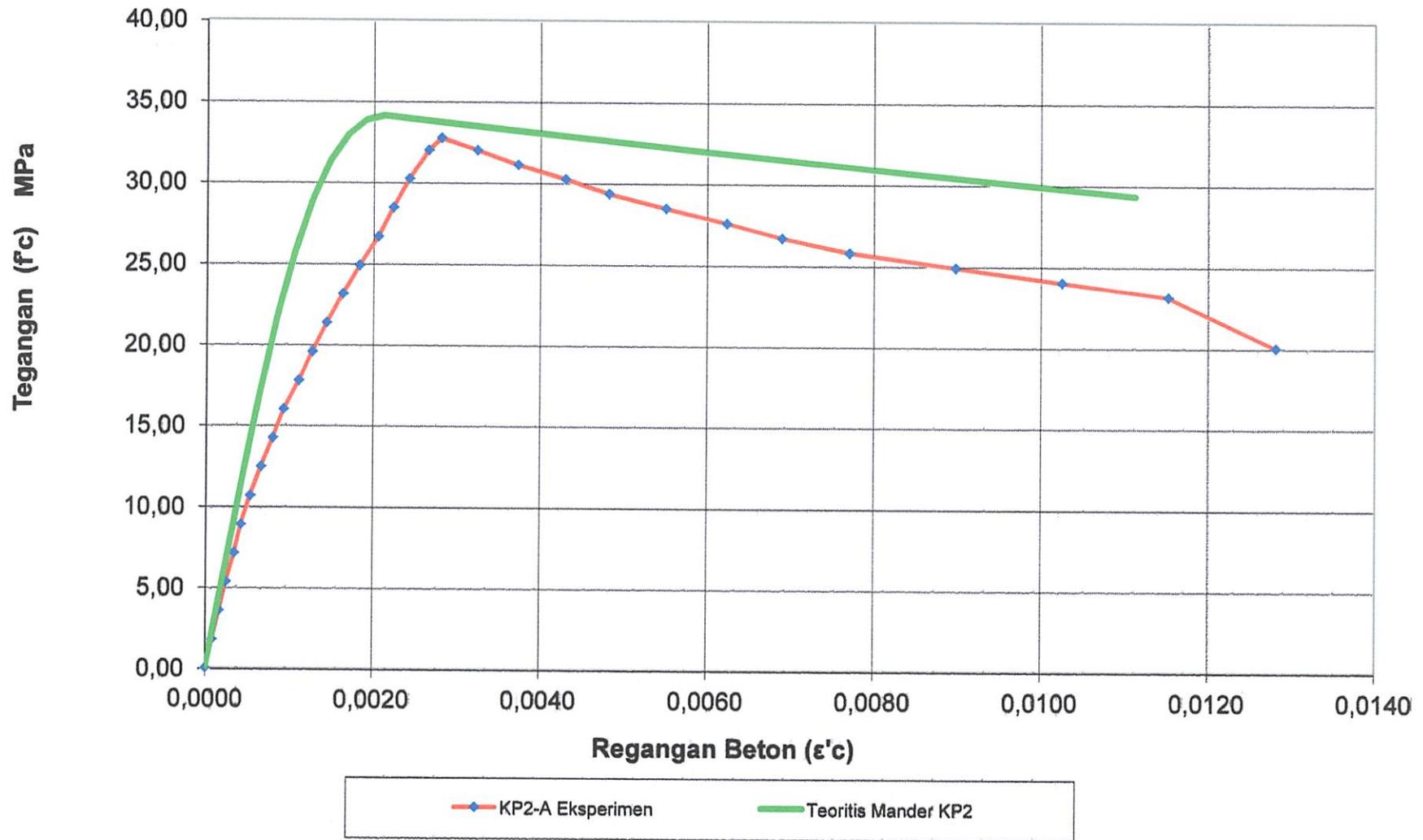
9 = Regangan beton rata-rata

Baris Yang Berwarna Hijau adalah Pada Saat Beban Puncak, beton yang tak terkekang CFRP mulai retak

Baris Yang Berwarna Biru adalah Pada Saat CFRP putus

Baris Yang Berwarna Merah adalah Pada Saat Hancurnya Kolom

Kurva Tegangan Regangan Kolom Beton KP2-A Analisis Teoritis dan Eksperimen



Lampiran IV : Kurva Tegangan regangan Hasil Pengamatan Eksperimen Kolom KP2-A

TABEL L4.2-B**ANALISA EKSPERIMENTAL KOLUM BETON TERKEKANG CFRP (KP2-B)**

P (ton)	DIAL 1 (mm)	DIAL 2 (mm)	L (mm)	A _g (mm ²)	f _c (Mpa)	ε _{c1}	ε _{c2}	ε _c rata-rata
1	2	3	4	5	8	9	10	11
0	0	0	499	22500	0,00000	0,00000	0,00000	0
4	7	8	499	22500	1,77778	0,00014	0,00016	1,50E-04
8	12	14	499	22500	3,55556	0,00024	0,00028	2,61E-04
12	17	20	499	22500	5,33333	0,00034	0,00040	3,71E-04
16	23	26	499	22500	7,11111	0,00046	0,00052	4,91E-04
20	29	33	499	22500	8,88889	0,00058	0,00066	6,21E-04
24	35	37	499	22500	10,66667	0,00070	0,00074	7,21E-04
28	41	45	499	22500	12,44444	0,00082	0,00090	8,62E-04
32	47	49	499	22500	14,22222	0,00094	0,00098	9,62E-04
36	54	55	499	22500	16,00000	0,00108	0,00110	1,09E-03
40	61	64	499	22500	17,77778	0,00122	0,00128	1,25E-03
44	69	72	499	22500	19,55556	0,00138	0,00144	1,41E-03
48	77	79	499	22500	21,33333	0,00154	0,00158	1,56E-03
52	85	88	499	22500	23,11111	0,00170	0,00176	1,73E-03
56	92	95	499	22500	24,88889	0,00184	0,00190	1,87E-03
60	98	102	499	22500	26,66667	0,00196	0,00204	2,00E-03
64	104	108	499	22500	28,44444	0,00208	0,00216	2,12E-03
68	111	114	499	22500	30,22222	0,00222	0,00228	2,25E-03
72	116	121	499	22500	32,00000	0,00232	0,00242	2,37E-03
73	128	135	499	22500	32,44444	0,00257	0,00271	2,64E-03
72	158	162	499	22500	32,00000	0,00317	0,00325	3,21E-03
70	186	190	499	22500	31,11111	0,00373	0,00381	3,77E-03
68	216	225	499	22500	30,22222	0,00433	0,00451	4,42E-03
66	248	253	499	22500	29,33333	0,00497	0,00507	5,02E-03
64	283	287	499	22500	28,44444	0,00567	0,00575	5,71E-03
62	319	324	499	22500	27,55556	0,00639	0,00649	6,44E-03
60	357	360	499	22500	26,66667	0,00715	0,00721	7,18E-03
58	398	401	499	22500	25,77778	0,00798	0,00804	8,01E-03
56	445	451	499	22500	24,88889	0,00892	0,00904	8,98E-03
54	492	500	499	22500	24,00000	0,00986	0,01002	9,94E-03
51	539	550	499	22500	22,66667	0,01080	0,01102	1,09E-02
44,7	586	600	499	22500	19,86667	0,01174	0,01202	1,19E-02

Keterangan Kolom :

1 = Beban Aksial

2 = Displacement pada DIAL 1

3 = Displacement pada DIAL 2

4 = Tinggi mula-mula untuk pengukuran regangan

5 = Luas penampang beton

6 = Kuat Tekan Beton

7 = Regangan beton pada DIAL 1

8 = Regangan beton pada DIAL 2

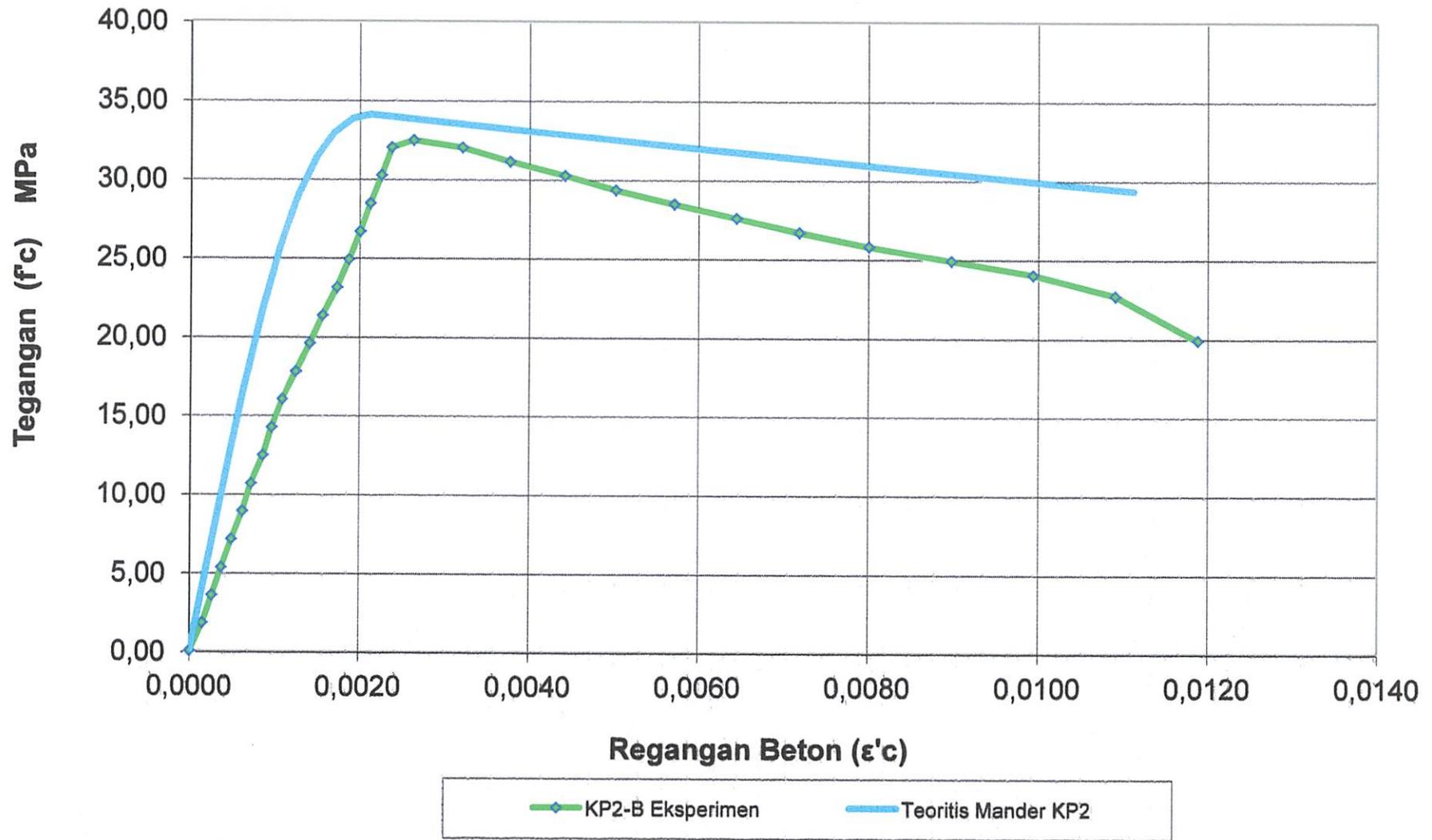
9 = Regangan beton rata-rata

Baris Yang Berwarna Hijau adalah Pada Saat Beban Puncak, beton yang tak terkekang CFRP mulai retak

Baris Yang Berwarna Biru adalah Pada Saat CFRP putus

Baris Yang Berwarna Merah adalah Pada Saat Hancurnya Kolom

Kurva Tegangan Regangan Kolom Beton KP2-B Analisis Teoritis dan Eksperimen



Lampiran IV : Kurva Tegangan Regangan Hasil Pengamatan Eksperimen Kolom KP2-B

TABEL L4.2-C**ANALISA EKSPERIMENTAL KOLOM BETON TERKEKANG CFRP (KP2-C)**

P (ton)	DIAL 1 (mm)	DIAL 2 (mm)	L (mm)	A _g (mm ²)	f _c (Mpa)	ε _{c1}	ε _{c2}	ε _c rata-rata
1	2	3	4	5	8	9	10	11
0	0	0	499	22500	0,00000	0,00000	0,00000	0
4	4	4	499	22500	1,77778	0,00008	0,00008	8,02E-05
8	8	10	499	22500	3,55556	0,00016	0,00020	1,80E-04
12	12	16	499	22500	5,33333	0,00024	0,00032	2,81E-04
16	18	22	499	22500	7,11111	0,00036	0,00044	4,01E-04
20	24	30	499	22500	8,88889	0,00048	0,00060	5,41E-04
24	31	38	499	22500	10,66667	0,00062	0,00076	6,91E-04
28	41	45	499	22500	12,44444	0,00082	0,00090	8,62E-04
32	48	50	499	22500	14,22222	0,00096	0,00100	9,82E-04
36	55	56	499	22500	16,00000	0,00110	0,00112	1,11E-03
40	62	65	499	22500	17,77778	0,00124	0,00130	1,27E-03
44	70	75	499	22500	19,55556	0,00140	0,00150	1,45E-03
48	77	79	499	22500	21,33333	0,00154	0,00158	1,56E-03
52	85	89	499	22500	23,11111	0,00170	0,00178	1,74E-03
56	92	96	499	22500	24,88889	0,00184	0,00192	1,88E-03
60	100	105	499	22500	26,66667	0,00200	0,00210	2,05E-03
64	106	112	499	22500	28,44444	0,00212	0,00224	2,18E-03
68	111	122	499	22500	30,22222	0,00222	0,00244	2,33E-03
72	120	132	499	22500	32,00000	0,00240	0,00265	2,53E-03
75	142	155	499	22500	33,33333	0,00285	0,00311	2,98E-03
74	162	168	499	22500	32,88889	0,00325	0,00337	3,31E-03
72	190	198	499	22500	32,00000	0,00381	0,00397	3,89E-03
70	218	222	499	22500	31,11111	0,00437	0,00445	4,41E-03
68	248	260	499	22500	30,22222	0,00497	0,00521	5,09E-03
66	288	292	499	22500	29,33333	0,00577	0,00585	5,81E-03
64	322	324	499	22500	28,44444	0,00645	0,00649	6,47E-03
62	360	366	499	22500	27,55556	0,00721	0,00733	7,27E-03
60	400	407	499	22500	26,66667	0,00802	0,00816	8,09E-03
58	453	453	499	22500	25,77778	0,00908	0,00908	9,08E-03
56	506	498	499	22500	24,88889	0,01014	0,00998	1,01E-02
52	559	542	499	22500	23,11111	0,01120	0,01086	1,10E-02
46,4	612	590	499	22500	20,62222	0,01226	0,01182	1,20E-02

Keterangan Kolom :

1 = Beban Aksial

2 = Displacement pada DIAL 1

3 = Displacement pada DIAL 2

4 = Tinggi mula-mula untuk pengukuran regangan

5 = Luas penampang beton

6 = Kuat Tekan Beton

7 = Regangan beton pada DIAL 1

8 = Regangan beton pada DIAL 2

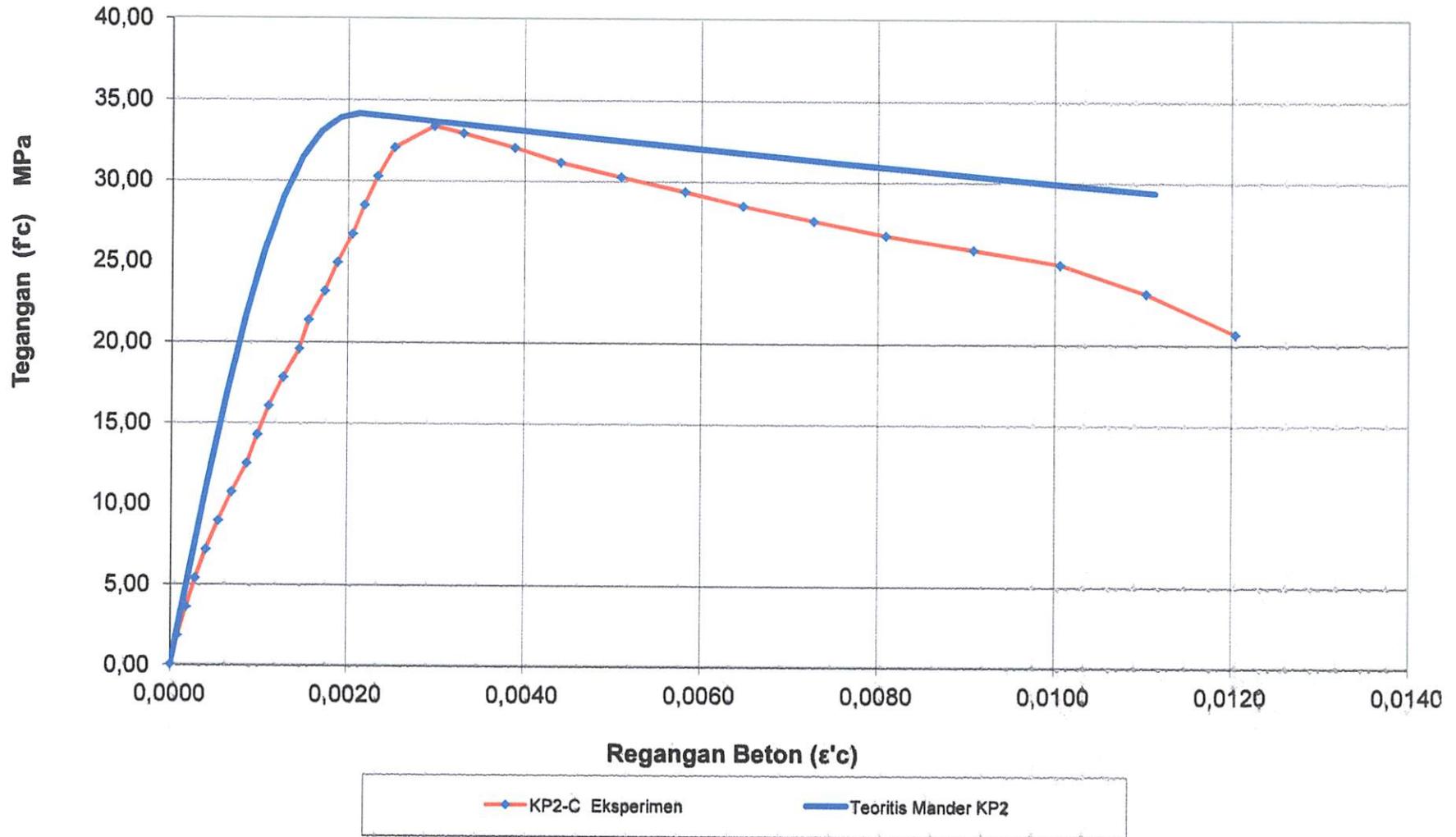
9 = Regangan beton rata-rata

Baris Yang Berwarna Hijau adalah Pada Saat Beban Puncak, beton yang tak terkekang CFRP mulai retak

Baris Yang Berwarna Biru adalah Pada Saat CFRP putus

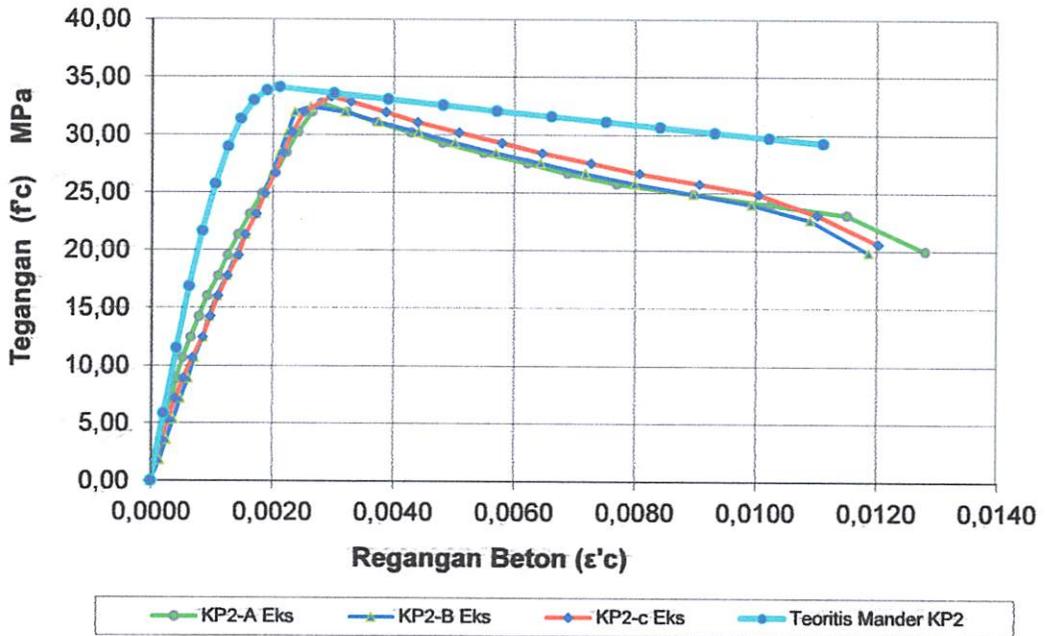
Baris Yang Berwarna Merah adalah Pada Saat Hancurnya Kolom

Kurva Tegangan Regangan Kolom Beton KP2-C
Analisis Teoritis dan Eksperimen

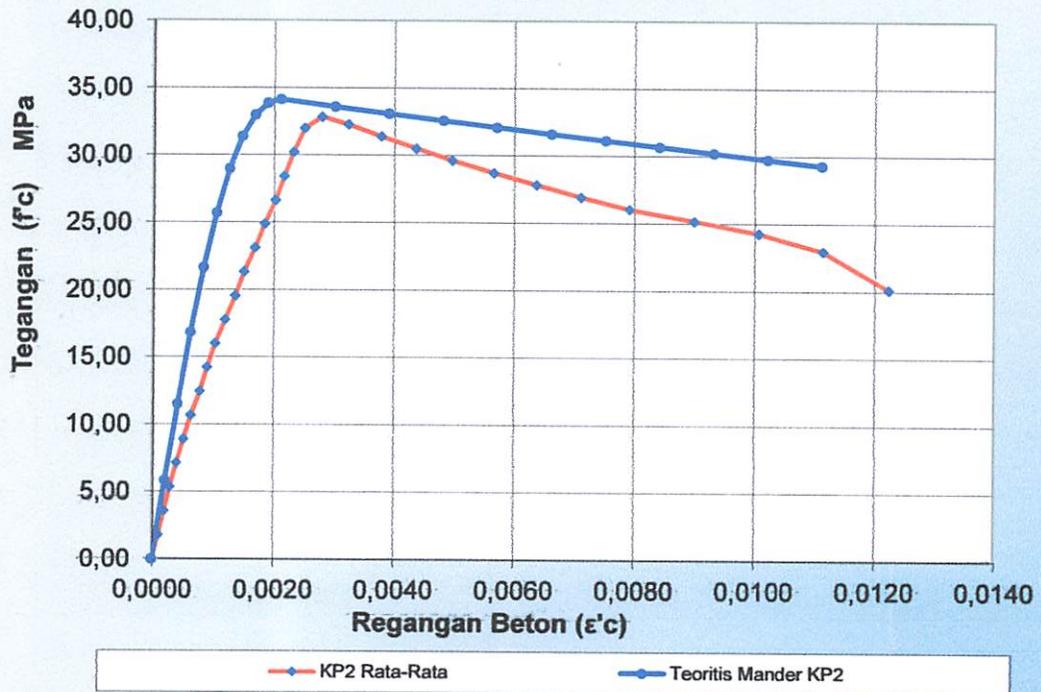


Lampiran IV : Kurva tegangan regangan Hasil Pengamatan Eksperimen Kolom KP2-C

**Kurva Tegangan Regangan Kolom Beton Polos (KP2)
Analisis Teoritis dan Eksperimen**



**Kurva Tegangan Regangan Kolom Beton KP2
Analisis Teoritis dan Eksperimen Rata-Rata**



TABEL L4.3-A

ANALISA EKSPERIMENTAL KOLOM BETON TERKEKANG BJTP Ø6 (KP3-A)

P (ton)	DIAL 1 (mm)	DIAL 2 (mm)	L (mm)	A _g (mm ²)	f _c (Mpa)	ε _{c1}	ε _{c2}	ε _c rata-rata
1	2	3	4	5	8	9	10	11
0	0	0	499	22500	0,00000	0,00000	0,00000	0
2	0	3	499	22500	0,88889	0,00000	0,00006	3,01E-05
4	3	9	499	22500	1,77778	0,00006	0,00018	1,20E-04
6	8	14	499	22500	2,66667	0,00016	0,00028	2,20E-04
8	13	17	499	22500	3,55556	0,00026	0,00034	3,01E-04
10	18	21	499	22500	4,44444	0,00036	0,00042	3,91E-04
12	22	25	499	22500	5,33333	0,00044	0,00050	4,71E-04
14	27	30	499	22500	6,22222	0,00054	0,00060	5,71E-04
16	32	35	499	22500	7,11111	0,00064	0,00070	6,71E-04
18	36	38	499	22500	8,00000	0,00072	0,00076	7,41E-04
20	41	44	499	22500	8,88889	0,00082	0,00088	8,52E-04
22	45	47	499	22500	9,77778	0,00090	0,00094	9,22E-04
24	49	51	499	22500	10,66667	0,00098	0,00102	1,00E-03
26	52	55	499	22500	11,55556	0,00104	0,00110	1,07E-03
28	56	59	499	22500	12,44444	0,00112	0,00118	1,15E-03
30	59	62	499	22500	13,33333	0,00118	0,00124	1,21E-03
32	64	66	499	22500	14,22222	0,00128	0,00132	1,30E-03
34	67	69	499	22500	15,11111	0,00134	0,00138	1,36E-03
36	71	73	499	22500	16,00000	0,00142	0,00146	1,44E-03
38	74	75	499	22500	16,88889	0,00148	0,00150	1,49E-03
40	76	78	499	22500	17,77778	0,00152	0,00156	1,54E-03
42	81	84	499	22500	18,66667	0,00162	0,00168	1,65E-03
44	85	88	499	22500	19,55556	0,00170	0,00176	1,73E-03
46	89	91	499	22500	20,44444	0,00178	0,00182	1,80E-03
48	92	95	499	22500	21,33333	0,00184	0,00190	1,87E-03
50	97	100	499	22500	22,22222	0,00194	0,00200	1,97E-03
52	102	107	499	22500	23,11111	0,00204	0,00214	2,09E-03
54	109	113	499	22500	24,00000	0,00218	0,00226	2,22E-03
56	116	119	499	22500	24,88889	0,00232	0,00238	2,35E-03
58	128	133	499	22500	25,77778	0,00257	0,00266	2,61E-03
60	138	143	499	22500	26,66667	0,00277	0,00287	2,82E-03
62	157	163	499	22500	27,55556	0,00315	0,00326	3,20E-03
64	168	174	499	22500	28,44444	0,00337	0,00349	3,43E-03
66,8	198	205	499	22500	29,68889	0,00397	0,00411	4,04E-03
66	252	261	499	22500	29,33333	0,00505	0,00524	5,14E-03
64	312	324	499	22500	28,44444	0,00625	0,00648	6,37E-03
62	375	389	499	22500	27,55556	0,00752	0,00779	7,65E-03
60	462	479	499	22500	26,66667	0,00926	0,00960	9,43E-03
58	545	565	499	22500	25,77778	0,01092	0,01133	1,11E-02
56	612	635	499	22500	24,88889	0,01226	0,01272	1,25E-02
52	706	732	499	22500	23,11111	0,01415	0,01467	1,44E-02
42,6	988	1025	499	22500	18,93333	0,01980	0,02053	2,02E-02

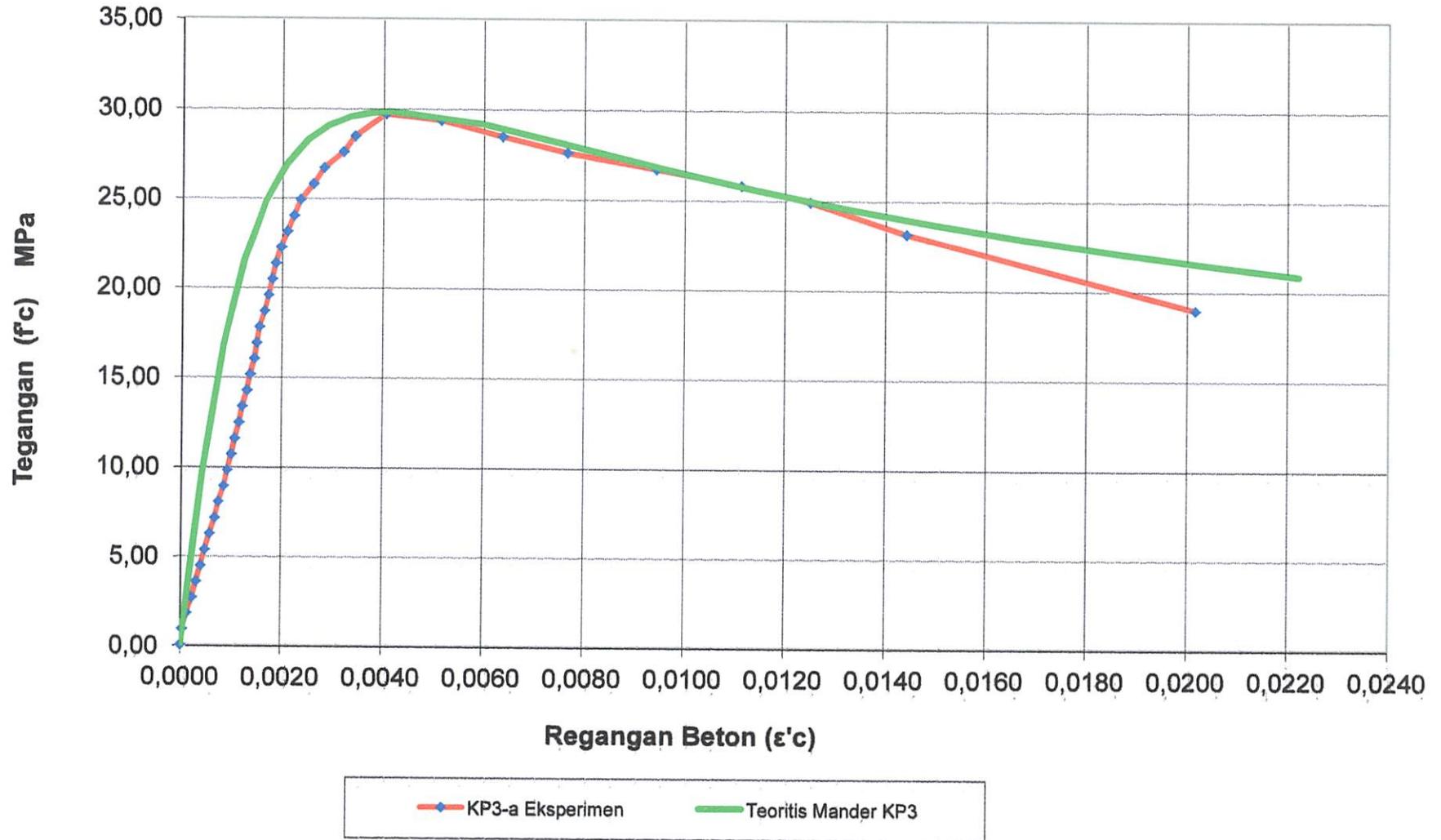
Keterangan Kolom :

- | | |
|--|--------------------------------|
| 1 = Beban Aksial | 6 = Kuat Tekan Beton |
| 2 = Displacement pada DIAL 1 | 7 = Regangan beton pada DIAL 1 |
| 3 = Displacement pada DIAL 2 | 8 = Regangan beton pada DIAL 2 |
| 4 = Tinggi mula-mula untuk pengukuran regangan | 9 = Regangan beton rata-rata |
| 5 = Luas penampang beton | |

Baris Yang Berwarna Hijau adalah Pada Saat Beban Puncak

Baris Yang Berwarna Merah adalah Pada Saat Hancurnya Kolom

Kurva Tegangan Regangan Kolom Beton (KP3-A) Analisis Teoritis dan Eksperimen



Lampiran IV : Kurva Tegangan regangan Hasil Pengamatan Eksperimen Kolom KP3-A

TABEL L4.3-B**ANALISA EKSPERIMENTAL KOLOM BETON TERKEKANG BJTP Ø 6 (KP3-B)**

P (ton)	DIAL 1 (mm)	DIAL 2 (mm)	L (mm)	A _g (mm ²)	F _c (Mpa)	ε _{c1}	ε _{c2}	ε _c rata-rata
1	2	3	4	5	8	9	10	11
0	0	0	499	22500	0,00000	0,00000	0,00000	0
2	4	3	499	22500	0,88889	0,00008	0,00006	7,01E-05
4	6	8	499	22500	1,77778	0,00012	0,00016	1,40E-04
6	8	12	499	22500	2,66667	0,00016	0,00024	2,00E-04
8	12	17	499	22500	3,55556	0,00024	0,00034	2,91E-04
10	16	19	499	22500	4,44444	0,00032	0,00038	3,51E-04
12	20	22	499	22500	5,33333	0,00040	0,00044	4,21E-04
14	24	27	499	22500	6,22222	0,00048	0,00054	5,11E-04
16	29	32	499	22500	7,11111	0,00058	0,00064	6,11E-04
18	33	36	499	22500	8,00000	0,00066	0,00072	6,91E-04
20	38	40	499	22500	8,88889	0,00076	0,00080	7,82E-04
22	42	45	499	22500	9,77778	0,00084	0,00090	8,72E-04
24	46	50	499	22500	10,66667	0,00092	0,00100	9,62E-04
26	50	53	499	22500	11,55556	0,00100	0,00106	1,03E-03
28	54	58	499	22500	12,44444	0,00108	0,00116	1,12E-03
30	58	61	499	22500	13,33333	0,00116	0,00122	1,19E-03
32	62	66	499	22500	14,22222	0,00124	0,00132	1,28E-03
34	66	70	499	22500	15,11111	0,00132	0,00140	1,36E-03
36	70	74	499	22500	16,00000	0,00140	0,00148	1,44E-03
38	76	78	499	22500	16,88889	0,00152	0,00156	1,54E-03
40	81	84	499	22500	17,77778	0,00162	0,00168	1,65E-03
42	86	89	499	22500	18,66667	0,00172	0,00178	1,75E-03
44	90	96	499	22500	19,55556	0,00180	0,00192	1,86E-03
46	98	101	499	22500	20,44444	0,00196	0,00202	1,99E-03
48	108	112	499	22500	21,33333	0,00216	0,00224	2,20E-03
50	116	122	499	22500	22,22222	0,00232	0,00244	2,38E-03
52	124	129	499	22500	23,11111	0,00248	0,00259	2,54E-03
54	134	141	499	22500	24,00000	0,00269	0,00283	2,76E-03
56	145	152	499	22500	24,88889	0,00291	0,00305	2,98E-03
58	157	163	499	22500	25,77778	0,00315	0,00327	3,21E-03
60	174	180	499	22500	26,66667	0,00349	0,00361	3,55E-03
62	188	198	499	22500	27,55556	0,00377	0,00397	3,87E-03
64	201	209	499	22500	28,44444	0,00403	0,00419	4,11E-03
65,3	246	231	499	22500	29,02222	0,00493	0,00463	4,78E-03
64	278	279	499	22500	28,44444	0,00557	0,00560	5,59E-03
62	332	334	499	22500	27,55556	0,00665	0,00669	6,67E-03
60	396	398	499	22500	26,66667	0,00794	0,00798	7,96E-03
58	474	476	499	22500	25,77778	0,00950	0,00955	9,52E-03
55	582	585	499	22500	24,44444	0,01166	0,01172	1,17E-02
52	688	691	499	22500	23,11111	0,01379	0,01386	1,38E-02
48	816	820	499	22500	21,33333	0,01635	0,01643	1,64E-02
38,8	1050	1055	499	22500	17,24444	0,02104	0,02115	2,11E-02

Keterangan Kolom :

1 = Beban Aksial

2 = Displacement pada DIAL 1

3 = Displacement pada DIAL 2

4 = Tinggi mula-mula untuk pengukuran regangan

5 = Luas penampang beton

6 = Kuat Tekan Beton

7 = Regangan beton pada DIAL 1

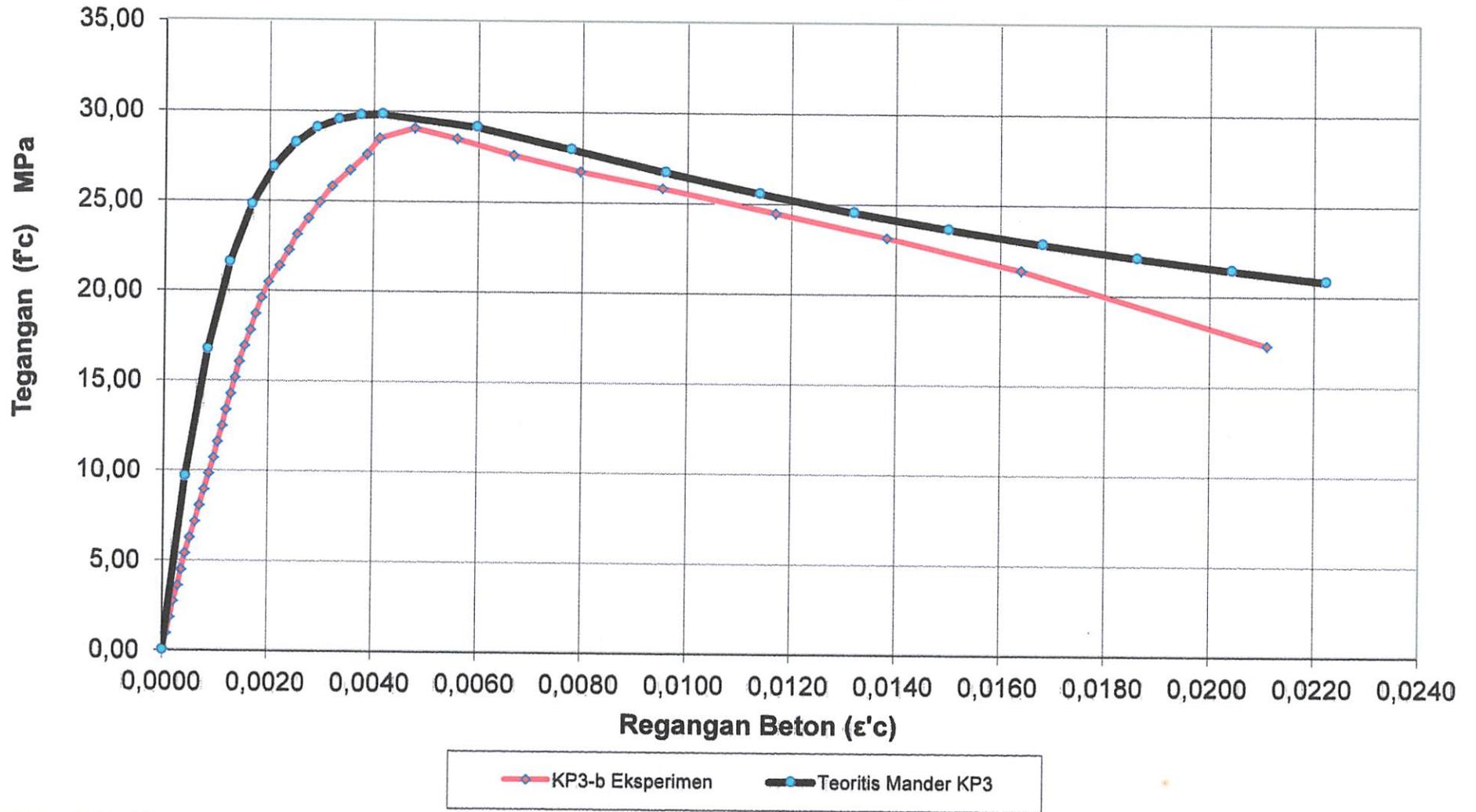
8 = Regangan beton pada DIAL 2

9 = Regangan beton rata-rata

Baris Yang Berwarna Hijau adalah Pada Saat Beban Puncak

Baris Yang Berwarna Merah adalah Pada Saat Hancurnya Kolom

Kurva Tegangan Regangan Kolom Beton KP3-B Analisis Teoritis dan Eksperimen



Lampiran IV : Kurva Tegangan Regangan Hasil Pengamatan Eksperimen Kolom KP3- B

TABEL L.4.3-C

ANALISA EKSPERIMENTAL KOLOM BETON TERKEKANG BJTP Ø6 (KP3-C)

P (ton)	DIAL 1 (mm)	DIAL 2 (mm)	L (mm)	A _g (mm ²)	f _c (Mpa)	ε _{c1}	ε _{c2}	ε _c rata-rata
1	2	3	4	5	8	9	10	11
0	0	0	499	22500	0,00000	0,00000	0,00000	0
2	2	4	499	22500	0,88889	0,00004	0,00008	6,01E-05
4	4	7	499	22500	1,77778	0,00008	0,00014	1,10E-04
6	6	11	499	22500	2,66667	0,00012	0,00022	1,70E-04
8	8	14	499	22500	3,55556	0,00016	0,00028	2,20E-04
10	12	17	499	22500	4,44444	0,00024	0,00034	2,91E-04
12	15	20	499	22500	5,33333	0,00030	0,00040	3,51E-04
14	19	23	499	22500	6,22222	0,00038	0,00046	4,21E-04
16	23	28	499	22500	7,11111	0,00046	0,00056	5,11E-04
18	27	35	499	22500	8,00000	0,00054	0,00070	6,21E-04
20	32	40	499	22500	8,88889	0,00064	0,00080	7,21E-04
22	37	44	499	22500	9,77778	0,00074	0,00088	8,12E-04
24	41	50	499	22500	10,66667	0,00082	0,00100	9,12E-04
26	45	55	499	22500	11,55556	0,00090	0,00110	1,00E-03
28	51	59	499	22500	12,44444	0,00102	0,00118	1,10E-03
30	56	63	499	22500	13,33333	0,00112	0,00126	1,19E-03
32	62	69	499	22500	14,22222	0,00124	0,00138	1,31E-03
34	67	74	499	22500	15,11111	0,00134	0,00148	1,41E-03
36	72	78	499	22500	16,00000	0,00144	0,00156	1,50E-03
38	78	82	499	22500	16,88889	0,00156	0,00164	1,60E-03
40	84	86	499	22500	17,77778	0,00168	0,00172	1,70E-03
42	91	91	499	22500	18,66667	0,00182	0,00182	1,82E-03
44	96	96	499	22500	19,55556	0,00192	0,00192	1,92E-03
46,4	102	102	499	22500	20,62222	0,00204	0,00204	2,04E-03
48	109	111	499	22500	21,33333	0,00218	0,00222	2,20E-03
50	116	119	499	22500	22,22222	0,00232	0,00238	2,35E-03
52	123	126	499	22500	23,11111	0,00246	0,00253	2,49E-03
54	131	132	499	22500	24,00000	0,00263	0,00265	2,64E-03
56	142	145	499	22500	24,88889	0,00285	0,00291	2,88E-03
58	151	152	499	22500	25,77778	0,00303	0,00305	3,04E-03
60	166	172	499	22500	26,66667	0,00333	0,00345	3,39E-03
62	178	185	499	22500	27,55556	0,00357	0,00371	3,64E-03
64	193	211	499	22500	28,44444	0,00387	0,00423	4,05E-03
65	215	234	499	22500	28,88889	0,00431	0,00469	4,50E-03
64	264	265	499	22500	28,44444	0,00529	0,00532	5,30E-03
62	322	324	499	22500	27,55556	0,00645	0,00649	6,47E-03
60	386	388	499	22500	26,66667	0,00774	0,00777	7,75E-03
58	464	466	499	22500	25,77778	0,00930	0,00935	9,32E-03
56	552	555	499	22500	24,88889	0,01106	0,01112	1,11E-02
53	652	655	499	22500	23,55556	0,01307	0,01313	1,31E-02
50	768	772	499	22500	22,22222	0,01539	0,01547	1,54E-02
43,4	946	951	499	22500	19,28889	0,01896	0,01905	1,90E-02

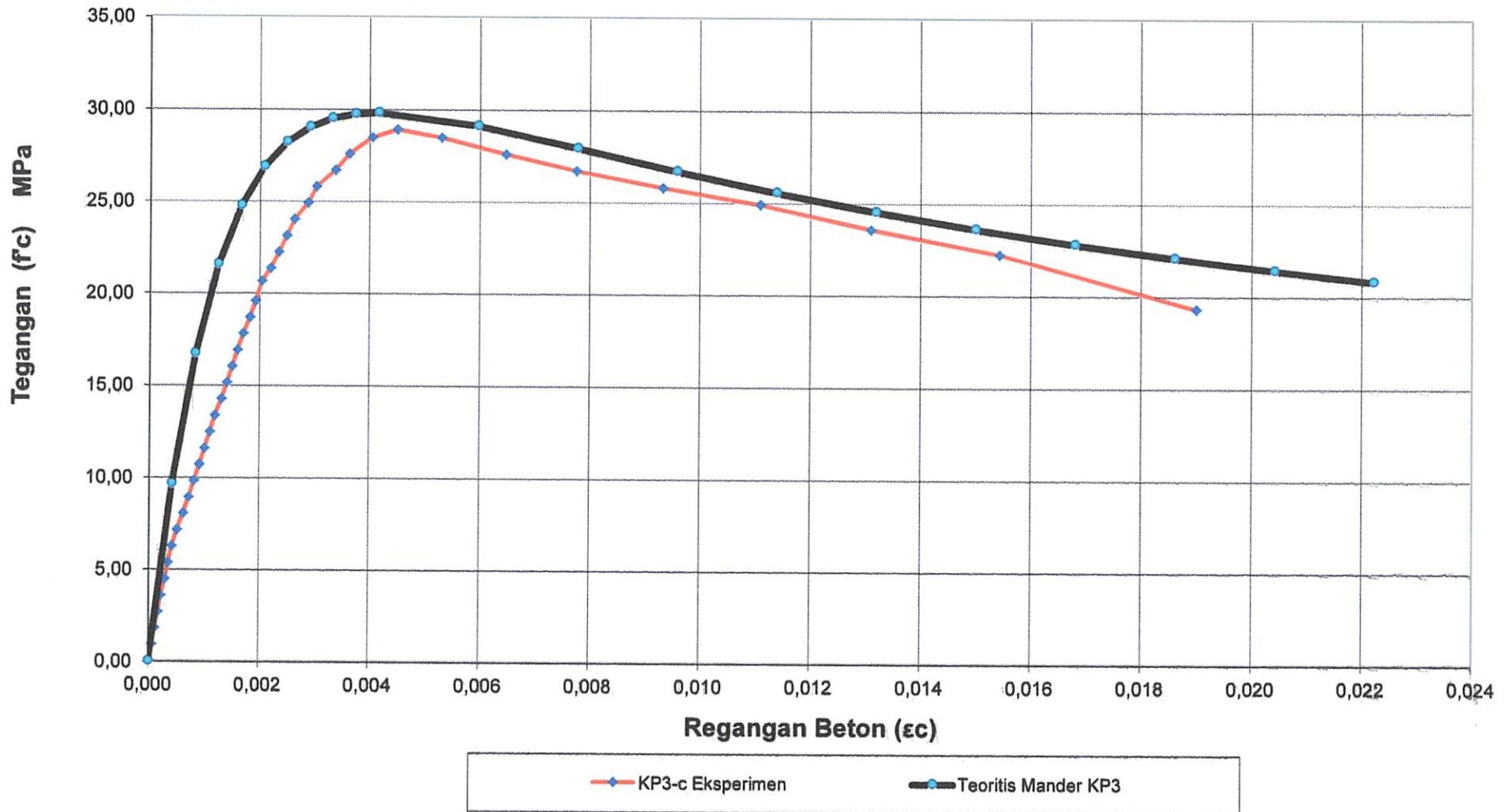
Keterangan Kolom :

- | | |
|--|--------------------------------|
| 1 = Beban Aksial | 6 = Kuat Tekan Beton |
| 2 = Displacement pada DIAL 1 | 7 = Regangan beton pada DIAL 1 |
| 3 = Displacement pada DIAL 2 | 8 = Regangan beton pada DIAL 2 |
| 4 = Tinggi mula-mula untuk pengukuran regangan | 9 = Regangan beton rata-rata |
| 5 = Luas penampang beton | |

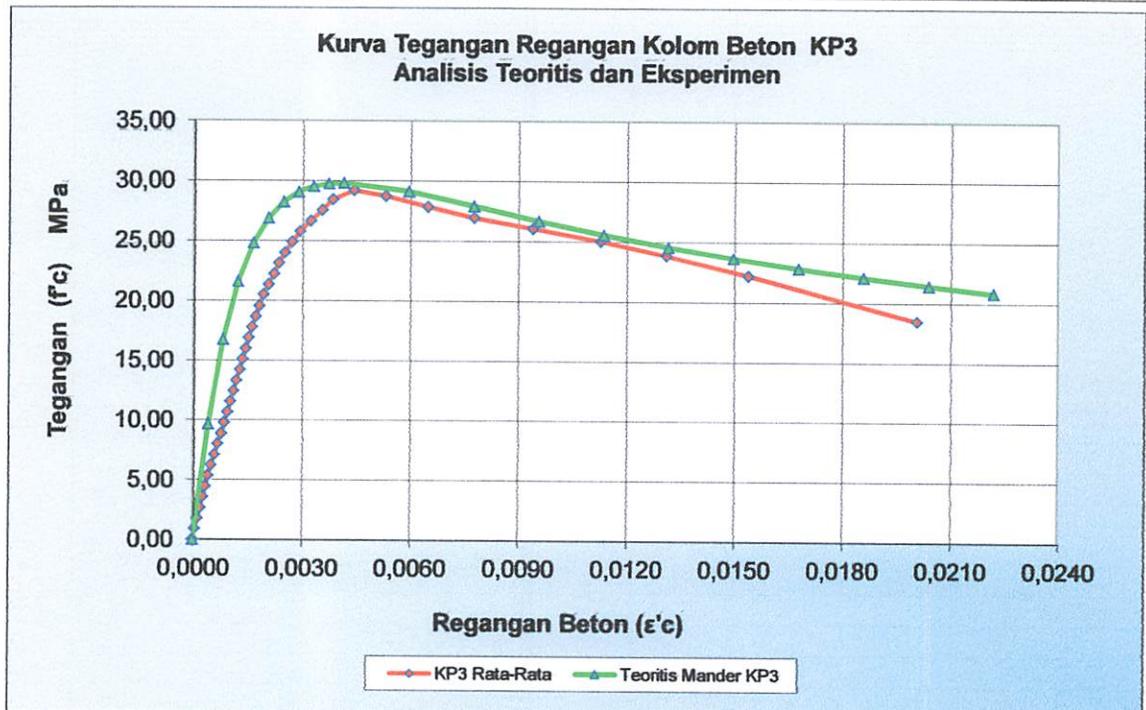
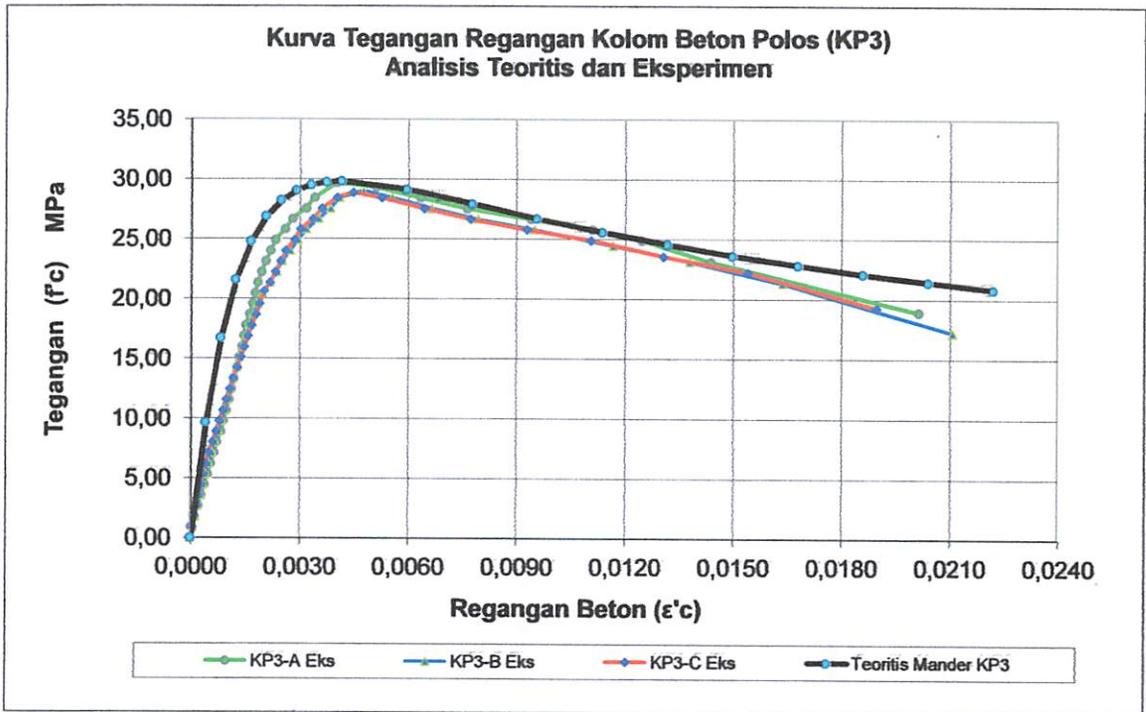
Baris Yang Berwarna Hijau adalah Pada Saat Beban Puncak

Baris Yang Berwarna Merah adalah Pada Saat Hancurnya Kolom

Kurva Tegangan Regangan Kolom Beton KP3-C Analisis Teoritis dan Eksperimen



Lampiran IV : Kurva Tegangan Regangan Hasil Pengamatan Eksperimen Kolom KP3-C



ANALISA EKSPERIMENTAL KOLOM BETON TERKEKANG BJTP 8 (KP4-A)

P (ton)	DIAL 1 (mm)	DIAL 2 (mm)	L (mm)	A _g (mm ²)	f _c (Mpa)	ε _{c1}	ε _{c2}	ε _c rata-rata
1	2	3	4	5	8	9	10	11
0	0	0	499,5	22500	0,00000	0,00000	0,00000	0
2	2	2	499,5	22500	0,88889	0,00004	0,00003	3,70E-05
4	3	3	499,5	22500	1,77778	0,00006	0,00005	5,56E-05
6	7	6	499,5	22500	2,66667	0,00014	0,00012	1,30E-04
8	12	10	499,5	22500	3,55556	0,00024	0,00020	2,22E-04
10	16	14	499,5	22500	4,44444	0,00032	0,00027	2,96E-04
12	21	18	499,5	22500	5,33333	0,00042	0,00036	3,89E-04
14	25	23	499,5	22500	6,22222	0,00050	0,00046	4,80E-04
16	30	28	499,5	22500	7,11111	0,00060	0,00055	5,77E-04
18	34	31	499,5	22500	8,00000	0,00068	0,00063	6,53E-04
20	38	35	499,5	22500	8,88889	0,00076	0,00070	7,30E-04
22	43	40	499,5	22500	9,77778	0,00086	0,00079	8,26E-04
24	48	44	499,5	22500	10,66667	0,00096	0,00088	9,23E-04
26	52	49	499,5	22500	11,55556	0,00104	0,00099	1,02E-03
28	56	53	499,5	22500	12,44444	0,00112	0,00107	1,09E-03
30	60	57	499,5	22500	13,33333	0,00120	0,00114	1,17E-03
32	64	61	499,5	22500	14,22222	0,00128	0,00122	1,25E-03
34	68	65	499,5	22500	15,11111	0,00136	0,00129	1,33E-03
36	72	68	499,5	22500	16,00000	0,00144	0,00137	1,41E-03
38	75	73	499,5	22500	16,88889	0,00150	0,00146	1,48E-03
40	81	79	499,5	22500	17,77778	0,00162	0,00157	1,60E-03
42	88	85	499,5	22500	18,66667	0,00176	0,00171	1,74E-03
44	95	92	499,5	22500	19,55556	0,00190	0,00184	1,87E-03
46	102	99	499,5	22500	20,44444	0,00204	0,00198	2,01E-03
48	110	107	499,5	22500	21,33333	0,00220	0,00214	2,17E-03
50	118	114	499,5	22500	22,22222	0,00236	0,00229	2,33E-03
52,7	127	123	499,5	22500	23,42222	0,00254	0,00247	2,50E-03
54	135	132	499,5	22500	24,00000	0,00270	0,00265	2,68E-03
56	142	139	499,5	22500	24,88889	0,00284	0,00279	2,81E-03
58	150	147	499,5	22500	25,77778	0,00300	0,00294	2,97E-03
60	156	153	499,5	22500	26,66667	0,00312	0,00306	3,09E-03
62	165	162	499,5	22500	27,55556	0,00330	0,00324	3,27E-03
64	173	170	499,5	22500	28,44444	0,00346	0,00339	3,43E-03
66	182	178	499,5	22500	29,33333	0,00364	0,00357	3,61E-03
68	193	189	499,5	22500	30,22222	0,00386	0,00379	3,83E-03
70	208	204	499,5	22500	31,11111	0,00416	0,00408	4,12E-03
72	225	223	499,5	22500	32,00000	0,00450	0,00446	4,48E-03
74	238	236	499,5	22500	32,88889	0,00476	0,00472	4,74E-03
76,8	287	284	499,5	22500	34,13333	0,00575	0,00569	5,72E-03
74	369	365	499,5	22500	32,88889	0,00739	0,00731	7,35E-03
72	438	434	499,5	22500	32,00000	0,00877	0,00868	8,72E-03
68	562	556	499,5	22500	30,22222	0,01125	0,01114	1,12E-02
64	688	681	499,5	22500	28,44444	0,01377	0,01364	1,37E-02
60	854	851	499,5	22500	26,66667	0,01710	0,01705	1,71E-02
56	1017	1014	499,5	22500	24,88889	0,02036	0,02030	2,03E-02
51	1245	1241	499,5	22500	22,66667	0,02492	0,02485	2,49E-02
44,6	1556	1551	499,5	22500	19,82222	0,03115	0,03106	3,11E-02

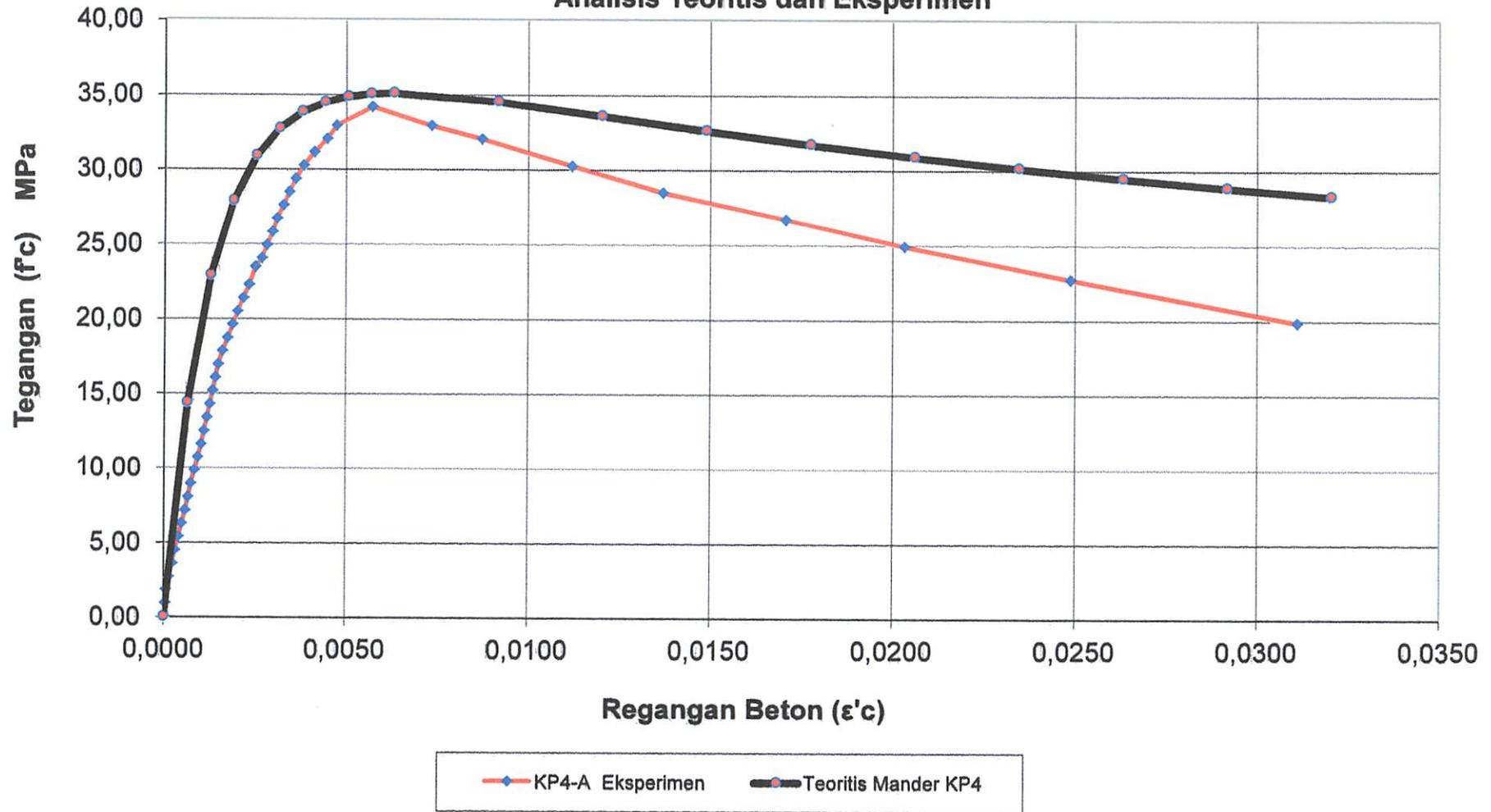
Keterangan Kolom :

- 1 = Beban Aksial
- 2 = Displacement pada DIAL 1
- 3 = Displacement pada DIAL 2
- 4 = Tinggi mula-mula untuk pengukuran regangan
- 5 = Luas penampang beton
- 6 = Kuat Tekan Beton
- 7 = Regangan beton pada DIAL 1
- 8 = Regangan beton pada DIAL 2
- 9 = Regangan beton rata-rata

Baris Yang Berwarna Hijau adalah Pada Saat Beban Puncak

Baris Yang Berwarna Merah adalah Pada Saat Hancurnya Kolom

Kurva Tegangan Regangan Kolom Beton KP4-A
Analisis Teoritis dan Eksperimen



Lampiran IV : Tegangan Regangan Hasil Pengamatan Eksperimen Kolom KP4-A

TABEL L.4.4-B

ANALISA EKSPERIMENTAL KOLOM BETON TERKEKANG CFRP (KP4-B)

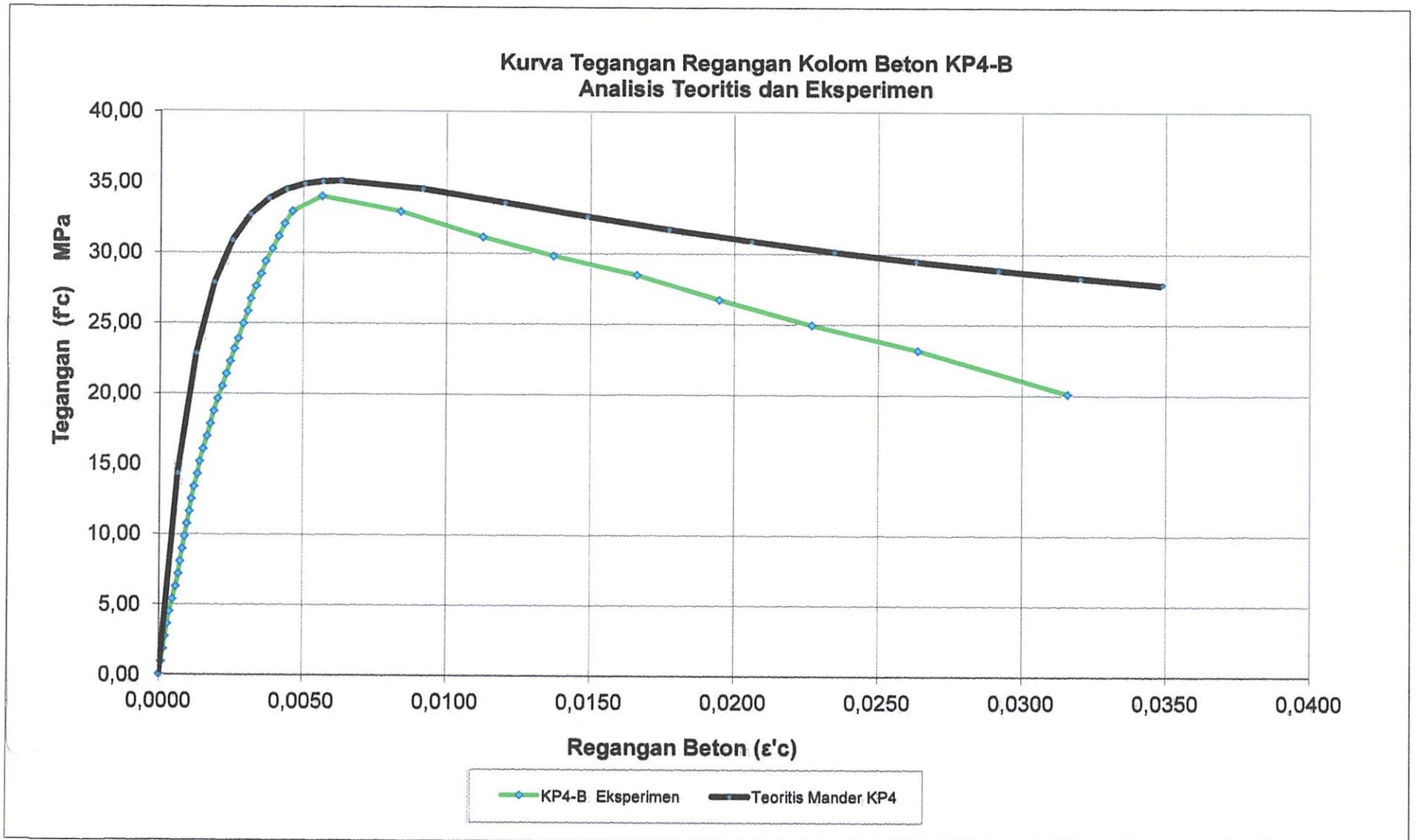
P (ton)	DIAL 1 (mm)	DIAL 2 (mm)	L (mm)	A _g (mm ²)	f _c (Mpa)	ε _{c1}	ε _{c2}	ε _c rata-rata
1	2	3	4	5	8	9	10	11
0	0	0	499,5	22500	0,00000	0,00000	0,00000	0
2	4	3	499,5	22500	0,88889	0,00008	0,00007	7,41E-05
4	8	7	499,5	22500	1,77778	0,00016	0,00014	1,48E-04
6	11	9	499,5	22500	2,66667	0,00022	0,00019	2,04E-04
8	15	13	499,5	22500	3,55556	0,00030	0,00026	2,78E-04
10	19	16	499,5	22500	4,44444	0,00038	0,00032	3,52E-04
12	25	21	499,5	22500	5,33333	0,00050	0,00043	4,63E-04
14	30	28	499,5	22500	6,22222	0,00060	0,00055	5,77E-04
16	35	32	499,5	22500	7,11111	0,00070	0,00064	6,73E-04
18	38	35	499,5	22500	8,00000	0,00076	0,00070	7,30E-04
20	42	39	499,5	22500	8,88889	0,00084	0,00077	8,07E-04
22	46	42	499,5	22500	9,77778	0,00092	0,00085	8,84E-04
24	50	46	499,5	22500	10,66667	0,00100	0,00092	9,61E-04
26	54	51	499,5	22500	11,55556	0,00108	0,00103	1,05E-03
28	57	54	499,5	22500	12,44444	0,00114	0,00108	1,11E-03
30	62	59	499,5	22500	13,33333	0,00124	0,00118	1,21E-03
32	68	65	499,5	22500	14,22222	0,00136	0,00129	1,33E-03
34	72	68	499,5	22500	15,11111	0,00144	0,00137	1,41E-03
36	78	74	499,5	22500	16,00000	0,00156	0,00148	1,52E-03
38	84	81	499,5	22500	16,88889	0,00168	0,00163	1,66E-03
40	90	87	499,5	22500	17,77778	0,00180	0,00175	1,77E-03
42	96	93	499,5	22500	18,66667	0,00192	0,00186	1,89E-03
44	103	100	499,5	22500	19,55556	0,00206	0,00200	2,03E-03
46	111	108	499,5	22500	20,44444	0,00222	0,00216	2,19E-03
48	118	114	499,5	22500	21,33333	0,00236	0,00229	2,33E-03
50	125	121	499,5	22500	22,22222	0,00250	0,00243	2,46E-03
52	132	128	499,5	22500	23,11111	0,00264	0,00256	2,60E-03
53,6	138	135	499,5	22500	23,82222	0,00276	0,00271	2,74E-03
56	147	144	499,5	22500	24,88889	0,00294	0,00288	2,91E-03
58	155	152	499,5	22500	25,77778	0,00310	0,00304	3,07E-03
60	160	157	499,5	22500	26,66667	0,00320	0,00314	3,17E-03
62	169	166	499,5	22500	27,55556	0,00338	0,00332	3,35E-03
64	178	174	499,5	22500	28,44444	0,00356	0,00349	3,53E-03
66	186	182	499,5	22500	29,33333	0,00372	0,00365	3,69E-03
68	198	194	499,5	22500	30,22222	0,00396	0,00388	3,92E-03
70	209	205	499,5	22500	31,11111	0,00418	0,00410	4,14E-03
72	218	216	499,5	22500	32,00000	0,00436	0,00432	4,34E-03
74	232	230	499,5	22500	32,88889	0,00464	0,00460	4,62E-03
76,4	284	281	499,5	22500	33,95556	0,00569	0,00563	5,66E-03
74	421	417	499,5	22500	32,88889	0,00843	0,00834	8,39E-03
70	565	559	499,5	22500	31,11111	0,01131	0,01120	1,13E-02
67	688	681	499,5	22500	29,77778	0,01377	0,01364	1,37E-02
64	834	826	499,5	22500	28,44444	0,01670	0,01653	1,66E-02
60	978	968	499,5	22500	26,66667	0,01958	0,01938	1,95E-02
56	1135	1132	499,5	22500	24,88889	0,02272	0,02265	2,27E-02
52	1320	1316	499,5	22500	23,11111	0,02643	0,02635	2,64E-02
45,1	1580	1575	499,5	22500	20,04444	0,03163	0,03154	3,16E-02

Keterangan Kolom :

- | | |
|--|--------------------------------|
| 1 = Beban Aksial | 6 = Kuat Tekan Beton |
| 2 = Displacement pada DIAL 1 | 7 = Regangan beton pada DIAL 1 |
| 3 = Displacement pada DIAL 2 | 8 = Regangan beton pada DIAL 2 |
| 4 = Tinggi mula-mula untuk pengukuran regangan | 9 = Regangan beton rata-rata |
| 5 = Luas penampang beton | |

Baris Yang Berwarna Hijau adalah Pada Saat Beban Puncak

Baris Yang Berwarna Merah adalah Pada Saat Hancurnya Kolom



Lampiran IV : Kurva Tegangan Regangan Hasil Pengamatan Eksperimen Kolom KP4-B

ANALISA EKSPERIMENTAL KOLOM BETON TERKEKANG BJTP Ø8 (KP4-C)

P (ton)	DIAL 1 (mm)	DIAL 2 (mm)	L (mm)	A _g (mm ²)	f _c (Mpa)	ε _{c1}	ε _{c2}	ε _c rata-rata
1	2	3	4	5	8	9	10	11
0	0	0	499,5	22500	0,00000	0,00000	0,00000	0
2	5	4	499,5	22500	0,88889	0,00010	0,00009	9,26E-05
4	10	9	499,5	22500	1,77778	0,00020	0,00017	1,85E-04
6	15	13	499,5	22500	2,66667	0,00030	0,00026	2,78E-04
8	21	18	499,5	22500	3,55556	0,00042	0,00036	3,89E-04
10	24	20	499,5	22500	4,44444	0,00048	0,00041	4,44E-04
12	29	25	499,5	22500	5,33333	0,00058	0,00049	5,37E-04
14	33	30	499,5	22500	6,22222	0,00066	0,00061	6,34E-04
16	37	34	499,5	22500	7,11111	0,00074	0,00068	7,11E-04
18	42	39	499,5	22500	8,00000	0,00084	0,00077	8,07E-04
20	46	42	499,5	22500	8,88889	0,00092	0,00085	8,84E-04
22	51	47	499,5	22500	9,77778	0,00102	0,00094	9,80E-04
24	56	52	499,5	22500	10,66667	0,00112	0,00103	1,08E-03
26	61	58	499,5	22500	11,55556	0,00122	0,00116	1,19E-03
28	65	62	499,5	22500	12,44444	0,00130	0,00124	1,27E-03
30	70	67	499,5	22500	13,33333	0,00140	0,00133	1,37E-03
32	75	71	499,5	22500	14,22222	0,00150	0,00143	1,46E-03
34	79	75	499,5	22500	15,11111	0,00158	0,00150	1,54E-03
36	84	80	499,5	22500	16,00000	0,00168	0,00160	1,64E-03
38	89	86	499,5	22500	16,88889	0,00178	0,00173	1,76E-03
40	94	91	499,5	22500	17,77778	0,00188	0,00183	1,85E-03
42	99	96	499,5	22500	18,66667	0,00198	0,00192	1,95E-03
44	105	102	499,5	22500	19,55556	0,00210	0,00204	2,07E-03
46	111	108	499,5	22500	20,44444	0,00222	0,00216	2,19E-03
48	116	113	499,5	22500	21,33333	0,00232	0,00225	2,29E-03
50	121	117	499,5	22500	22,22222	0,00242	0,00235	2,39E-03
52	128	124	499,5	22500	23,11111	0,00256	0,00249	2,52E-03
54	135	132	499,5	22500	24,00000	0,00270	0,00265	2,68E-03
56	142	139	499,5	22500	24,88889	0,00284	0,00279	2,81E-03
58	152	149	499,5	22500	25,77778	0,00304	0,00298	3,01E-03
60	161	158	499,5	22500	26,66667	0,00322	0,00316	3,19E-03
62	169	166	499,5	22500	27,55556	0,00338	0,00332	3,35E-03
64	178	174	499,5	22500	28,44444	0,00356	0,00349	3,53E-03
66	187	183	499,5	22500	29,33333	0,00374	0,00367	3,71E-03
68	198	194	499,5	22500	30,22222	0,00396	0,00388	3,92E-03
70	212	208	499,5	22500	31,11111	0,00424	0,00416	4,20E-03
72	223	221	499,5	22500	32,00000	0,00446	0,00442	4,44E-03
74	242	240	499,5	22500	32,88889	0,00484	0,00480	4,82E-03
77,4	296	293	499,5	22500	34,40000	0,00593	0,00587	5,90E-03
76	374	370	499,5	22500	33,77778	0,00749	0,00741	7,45E-03
72	487	482	499,5	22500	32,00000	0,00975	0,00965	9,70E-03
68	612	606	499,5	22500	30,22222	0,01225	0,01213	1,22E-02
63	752	744	499,5	22500	28,00000	0,01506	0,01490	1,50E-02
59	913	904	499,5	22500	26,22222	0,01828	0,01810	1,82E-02
55	1095	1084	499,5	22500	24,44444	0,02192	0,02170	2,18E-02
50	1279	1266	499,5	22500	22,22222	0,02561	0,02535	2,55E-02
45,8	1520	1505	499,5	22500	20,35556	0,03043	0,03013	3,03E-02

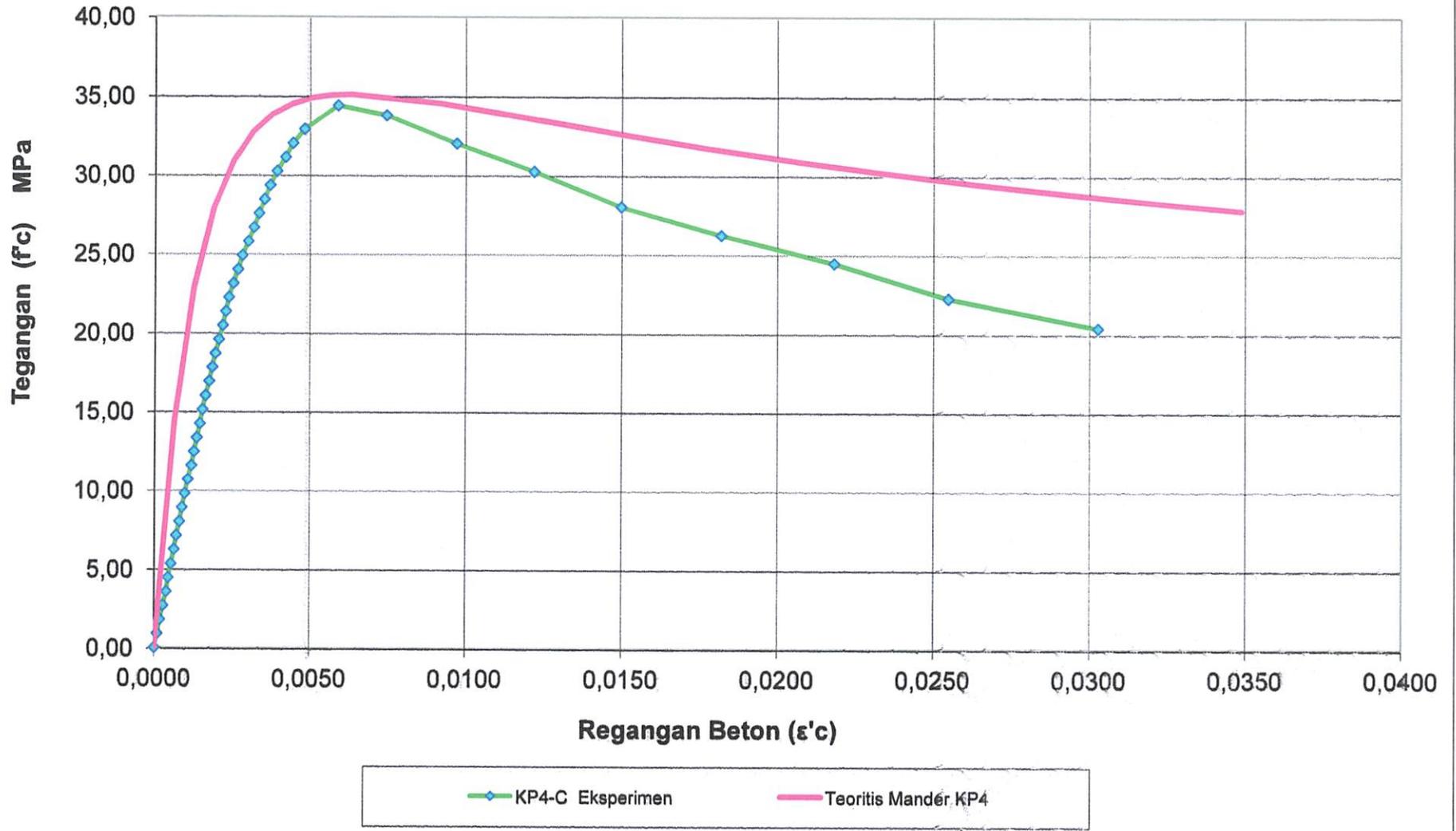
Keterangan Kolom :

- | | |
|--|--------------------------------|
| 1 = Beban Aksial | 6 = Kuat Tekan Beton |
| 2 = Displacement pada DIAL 1 | 7 = Regangan beton pada DIAL 1 |
| 3 = Displacement pada DIAL 2 | 8 = Regangan beton pada DIAL 2 |
| 4 = Tinggi mula-mula untuk pengukuran regangan | 9 = Regangan beton rata-rata |
| 5 = Luas penampang beton | |

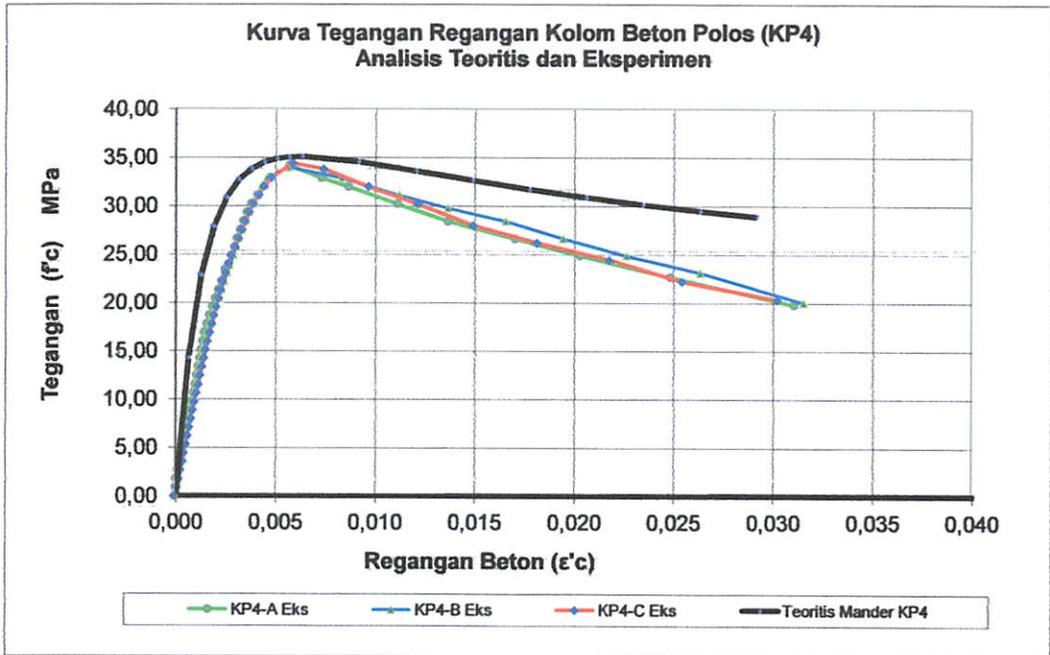
Baris Yang Berwarna Hijau adalah Pada Saat Beban Puncak

Baris Yang Berwarna Merah adalah Pada Saat Hancurnya Kolom

**Kurva Tegangan Regangan Kolom Beton Polos (KP4-C)
Analisis Teoritis dan Eksperimen**



Lampiran IV : Kurva Tegangan Regangan Hasil Pengamatan Eksperimen Kolom KP4-C



TABEL L4.5-A**ANALISA EKSPERIMENTAL KOLOM BETON TERKEKANG CFRP (KP5-A)**

P (ton)	DIAL 1 (mm)	DIAL 2 (mm)	L (mm)	A _g (mm ²)	f _c (Mpa)	ε _{c1}	ε _{c2}	ε _c rata-rata
1	2	3	4	5	8	9	10	11
0	0	0	499	22500	0,00000	0,00000	0,00000	0
4	4	4	499	22500	1,77778	0,00008	0,00009	8,42E-05
8	8	9	499	22500	3,55556	0,00016	0,00018	1,68E-04
12	11	12	499	22500	5,33333	0,00022	0,00024	2,31E-04
16	15	17	499	22500	7,11111	0,00030	0,00033	3,16E-04
20	16	18	499	22500	8,88889	0,00032	0,00035	3,37E-04
24	20	22	499	22500	10,66667	0,00040	0,00044	4,21E-04
28	25	28	499	22500	12,44444	0,00050	0,00056	5,31E-04
32	31	35	499	22500	14,22222	0,00062	0,00070	6,59E-04
36	36	39	499	22500	16,00000	0,00072	0,00077	7,47E-04
40	42	45	499	22500	17,77778	0,00084	0,00090	8,71E-04
44	47	50	499	22500	19,55556	0,00094	0,00101	9,75E-04
48	53	57	499	22500	21,33333	0,00106	0,00114	1,10E-03
52	59	62	499	22500	23,11111	0,00118	0,00124	1,21E-03
56	65	68	499	22500	24,88889	0,00130	0,00137	1,34E-03
60	71	75	499	22500	26,66667	0,00142	0,00149	1,46E-03
64	77	79	499	22500	28,44444	0,00154	0,00159	1,57E-03
68	84	87	499	22500	30,22222	0,00168	0,00173	1,71E-03
72	91	94	499	22500	32,00000	0,00182	0,00188	1,85E-03
76	102	105	499	22500	33,77778	0,00204	0,00211	2,07E-03
80	118	120	499	22500	35,55556	0,00236	0,00241	2,39E-03
84	132	135	499	22500	37,33333	0,00265	0,00270	2,67E-03
88	148	151	499	22500	39,11111	0,00297	0,00303	3,00E-03
92	172	175	499	22500	40,88889	0,00345	0,00352	3,48E-03
94	193	195	499	22500	41,77778	0,00387	0,00391	3,89E-03
94,4	232	234	499	22500	41,95556	0,00465	0,00470	4,67E-03
92	296	299	499	22500	40,88889	0,00593	0,00599	5,96E-03
90	382	385	499	22500	40,00000	0,00766	0,00771	7,68E-03
88	465	468	499	22500	39,11111	0,00932	0,00938	9,35E-03
84	565	569	499	22500	37,33333	0,01132	0,01140	1,14E-02
80	657	660	499	22500	35,55556	0,01317	0,01322	1,32E-02
76	715	718	499	22500	33,77778	0,01433	0,01439	1,44E-02
72	765	769	499	22500	32,00000	0,01533	0,01541	1,54E-02
68	835	839	499	22500	30,22222	0,01673	0,01682	1,68E-02
60	962	967	499	22500	26,66667	0,01928	0,01937	1,93E-02
52	1127	1133	499	22500	23,11111	0,02259	0,02270	2,26E-02
44	1270	1276	499	22500	19,55556	0,02545	0,02558	2,55E-02
32,4	1450	1457	499	22500	14,40000	0,02906	0,02920	2,91E-02

Keterangan Kolom :

1 = Beban Aksial

2 = Displacement pada DIAL 1

3 = Displacement pada DIAL 2

4 = Tinggi mula-mula untuk pengukuran regangan

5 = Luas penampang beton

6 = Kuat Tekan Beton

7 = Regangan beton pada DIAL 1

8 = Regangan beton pada DIAL 2

9 = Regangan beton rata-rata

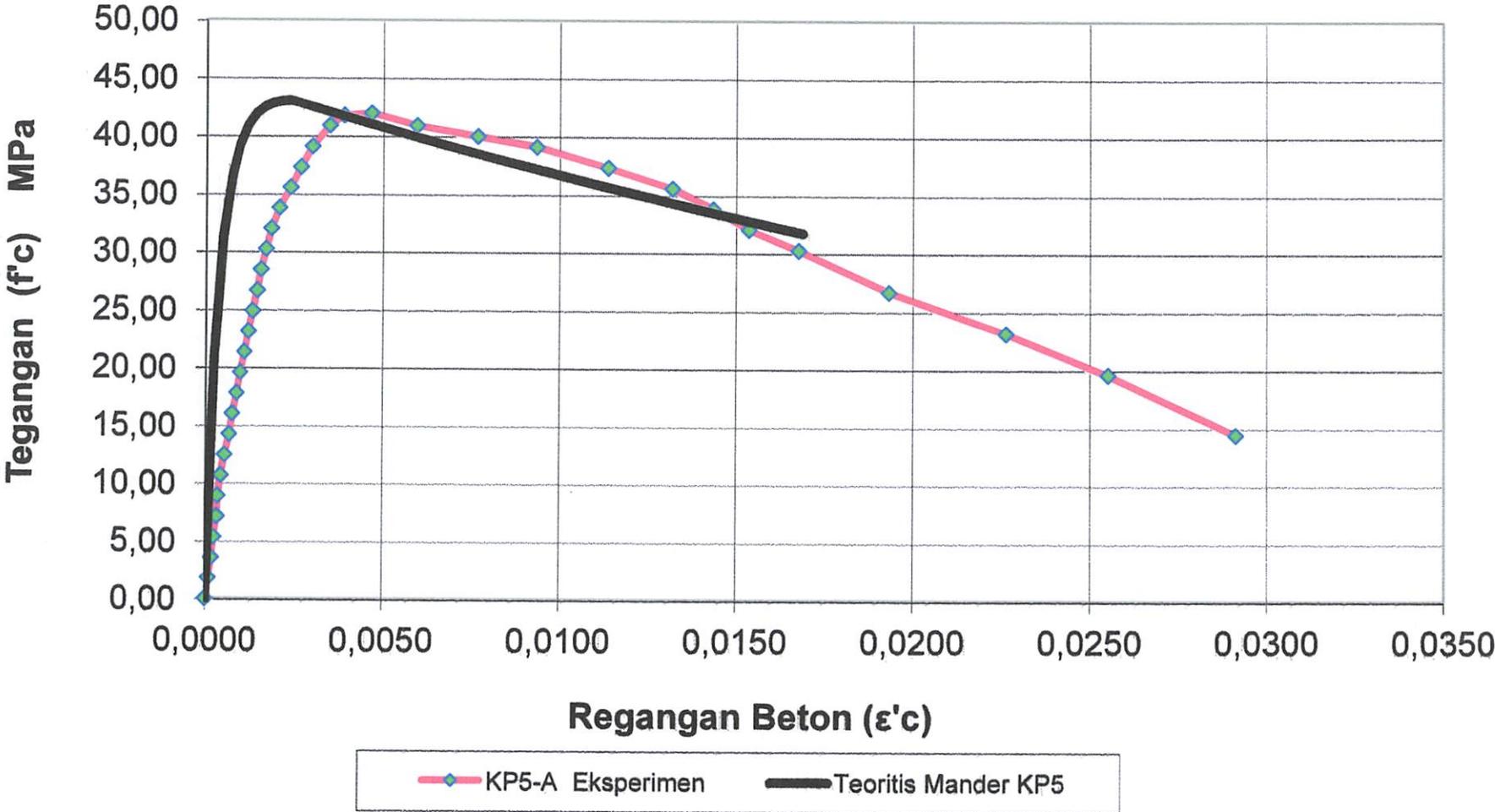
Baris Yang Berwarna Biru adalah Pada Saat beton tak terkekang CFRP Mulai Retak

Baris Yang Berwarna Hijau adalah Pada Saat Beban Puncak

Baris Yang Abu-abu Adalah Pada saat CFRP Putus

Baris Yang Berwarna Merah adalah Pada Saat Hancurnya Kolom

Kurva Tegangan Regangan Kolom Beton KP5-A Analisis Teoritis dan Eksperimen



Lampiran IV : Kurva Tegangan Regangan Hasil Pengamatan Eksperimen Kolom KP5-A

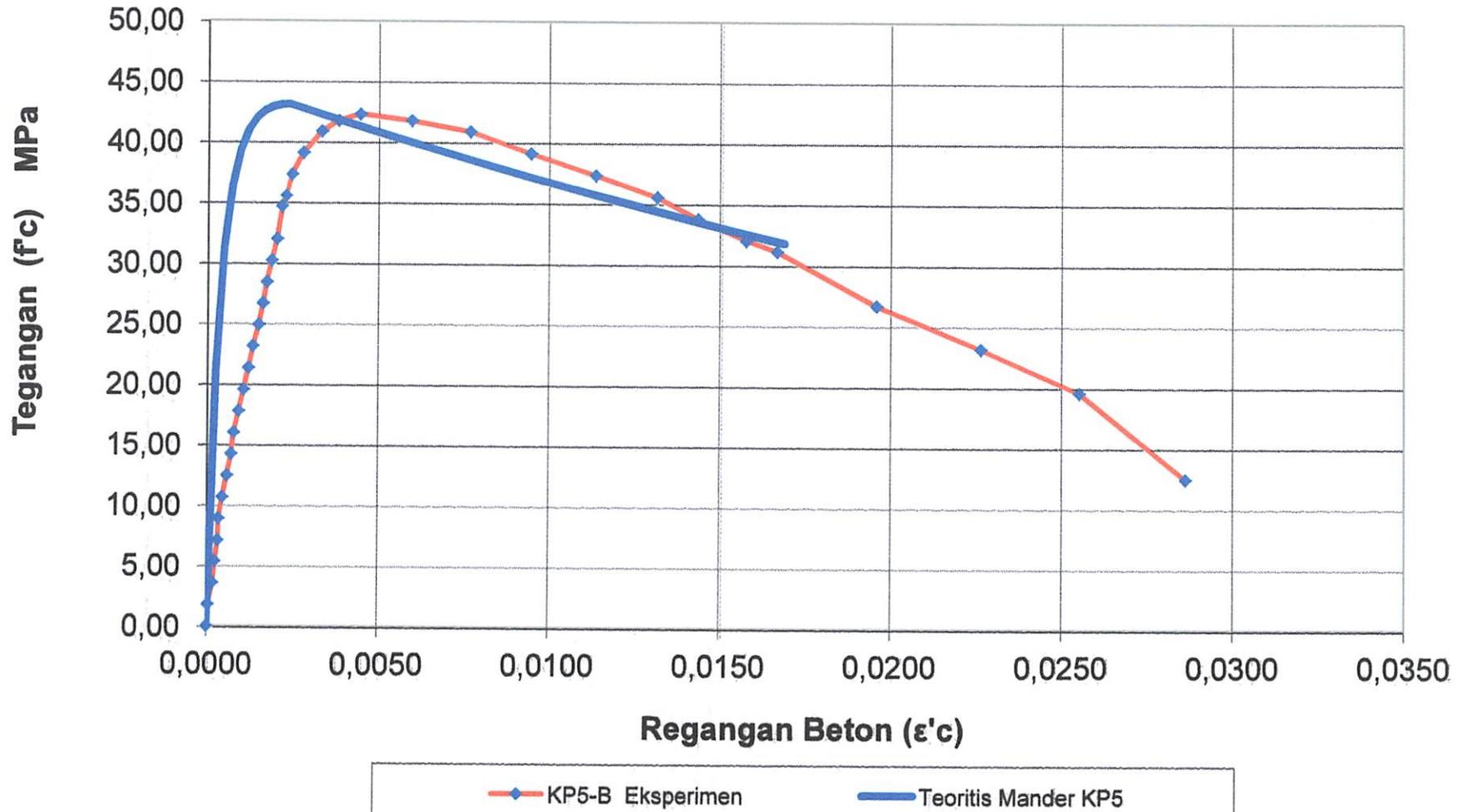
ANALISA EKSPERIMENTAL KOLOM BETON TERKEKANG CFRP (KP5-B)

P (ton)	DIAL 1 (mm)	DIAL 2 (mm)	L (mm)	A _g (mm ²)	f _c (Mpa)	ε _{c1}	ε _{c2}	ε _c rata-rata
1	2	3	4	5	8	9	10	11
0	0	0	499	22500	0,00000	0,00000	0,00000	0
4	0	3	499	22500	1,77778	0,00000	0,00006	3,01E-05
8	8	9	499	22500	3,55556	0,00016	0,00018	1,68E-04
12	11	12	499	22500	5,33333	0,00022	0,00024	2,31E-04
16	15	17	499	22500	7,11111	0,00030	0,00033	3,16E-04
20	16	18	499	22500	8,88889	0,00032	0,00035	3,37E-04
24	21	23	499	22500	10,66667	0,00042	0,00046	4,42E-04
28	27	30	499	22500	12,44444	0,00054	0,00061	5,74E-04
32	33	37	499	22500	14,22222	0,00066	0,00074	7,01E-04
36	37	40	499	22500	16,00000	0,00074	0,00079	7,67E-04
40	44	47	499	22500	17,77778	0,00088	0,00094	9,13E-04
44	51	55	499	22500	19,55556	0,00102	0,00109	1,06E-03
48	58	62	499	22500	21,33333	0,00116	0,00124	1,20E-03
52	65	68	499	22500	23,11111	0,00130	0,00137	1,34E-03
56	73	77	499	22500	24,88889	0,00146	0,00154	1,50E-03
60	79	83	499	22500	26,66667	0,00158	0,00166	1,62E-03
64	85	88	499	22500	28,44444	0,00170	0,00175	1,73E-03
68	92	95	499	22500	30,22222	0,00184	0,00190	1,87E-03
72	100	103	499	22500	32,00000	0,00200	0,00206	2,03E-03
78	107	110	499	22500	34,66667	0,00214	0,00221	2,18E-03
80	114	116	499	22500	35,55556	0,00228	0,00233	2,31E-03
84	122	124	499	22500	37,33333	0,00244	0,00249	2,47E-03
88	138	141	499	22500	39,11111	0,00277	0,00282	2,79E-03
92	165	168	499	22500	40,88889	0,00331	0,00337	3,34E-03
94	190	192	499	22500	41,77778	0,00381	0,00385	3,83E-03
95,2	221	223	499	22500	42,31111	0,00443	0,00447	4,45E-03
94	296	299	499	22500	41,77778	0,00593	0,00599	5,96E-03
92	382	385	499	22500	40,88889	0,00766	0,00771	7,68E-03
88	470	473	499	22500	39,11111	0,00942	0,00948	9,45E-03
84	565	569	499	22500	37,33333	0,01132	0,01140	1,14E-02
80	655	658	499	22500	35,55556	0,01313	0,01318	1,32E-02
76	715	718	499	22500	33,77778	0,01433	0,01439	1,44E-02
72	785	789	499	22500	32,00000	0,01573	0,01581	1,58E-02
70	830	834	499	22500	31,11111	0,01663	0,01672	1,67E-02
60	975	980	499	22500	26,66667	0,01954	0,01964	1,96E-02
52	1127	1133	499	22500	23,11111	0,02259	0,02270	2,26E-02
44	1270	1276	499	22500	19,55556	0,02545	0,02558	2,55E-02
28	1425	1432	499	22500	12,44444	0,02856	0,02870	2,86E-02

Keterangan Kolom :

- | | |
|--|--------------------------------|
| 1 = Beban Aksial | 6 = Kuat Tekan Beton |
| 2 = Displacement pada DIAL 1 | 7 = Regangan beton pada DIAL 1 |
| 3 = Displacement pada DIAL 2 | 8 = Regangan beton pada DIAL 2 |
| 4 = Tinggi mula-mula untuk pengukuran regangan | 9 = Regangan beton rata-rata |
| 5 = Luas penampang beton | |
- Baris Yang Berwarna Biru adalah Pada Saat beton tak terkekang CFRP Mulai Retak
Baris Yang Berwarna Hijau adalah Pada Saat Beban Puncak
Baris Yang Abu-abu Adalah Pada saat CFRP Putus
Baris Yang Berwarna Merah adalah Pada Saat Hancurnya Kolom

Kurva Tegangan Regangan Kolom Beton KP5-B Analisis Teoritis dan Eksperimen



Lampiran IV : Kurva Tegangan Regangan Hasil Pengamatan Eksperimen Kolom KP5-B

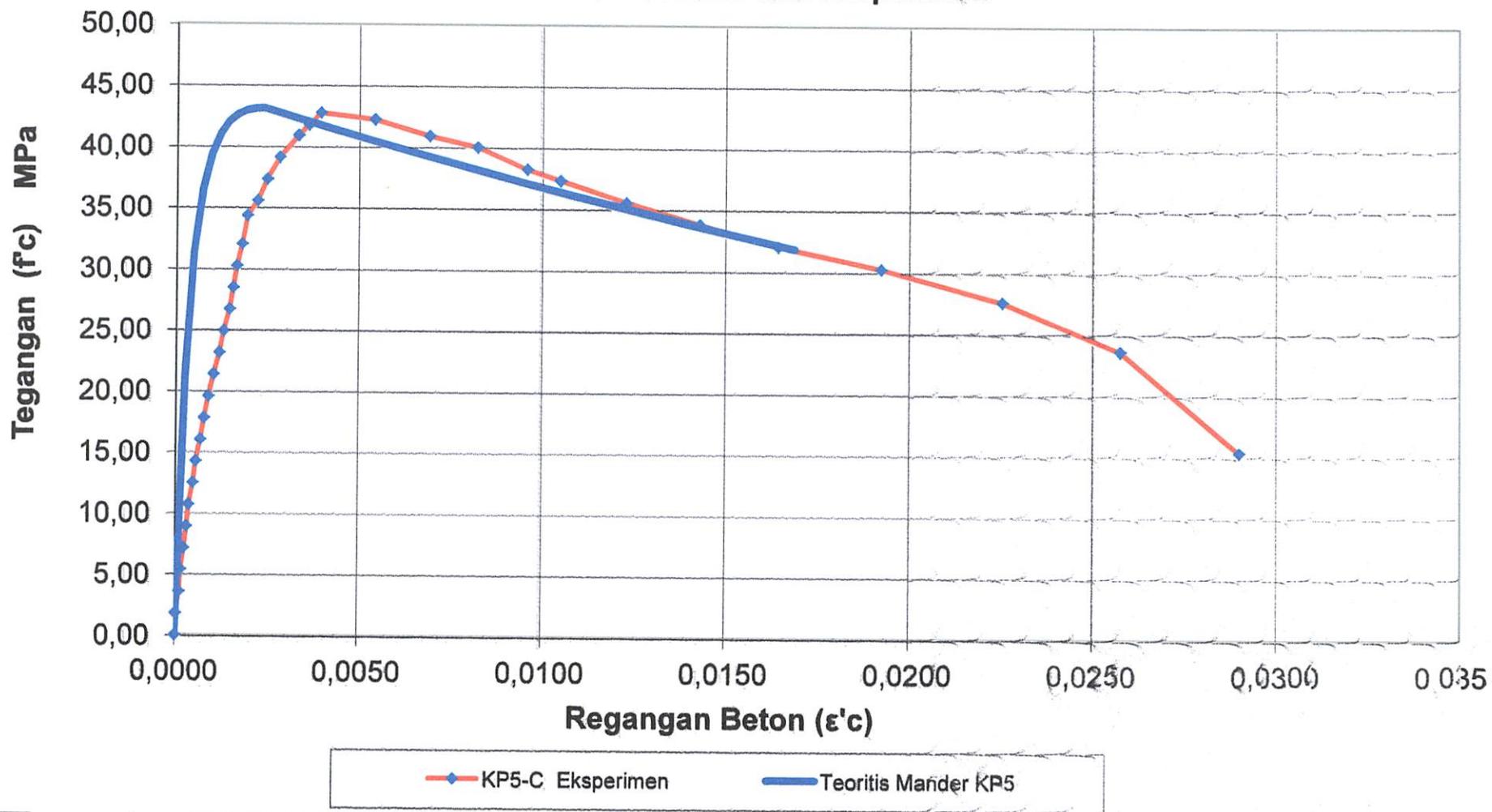
ANALISA EKSPERIMENTAL KOLOM BETON TERKEKANG CFRP (KP5-C)

P (ton)	DIAL 1 (mm)	DIAL 2 (mm)	L (mm)	A _g (mm ²)	f _c (Mpa)	ε _{c1}	ε _{c2}	ε _c rata-rata
1	2	3	4	5	8	9	10	11
0	0	0	499	22500	0,00000	0,00000	0,00000	0
4	2	0	499	22500	1,77778	0,00004	0,00000	2,00E-05
8	6	5	499	22500	3,55556	0,00012	0,00011	1,14E-04
12	8	7	499	22500	5,33333	0,00016	0,00014	1,52E-04
16	12	11	499	22500	7,11111	0,00024	0,00022	2,28E-04
20	16	14	499	22500	8,88889	0,00032	0,00029	3,05E-04
24	19	17	499	22500	10,66667	0,00038	0,00034	3,62E-04
28	24	23	499	22500	12,44444	0,00048	0,00047	4,74E-04
32	28	27	499	22500	14,22222	0,00056	0,00054	5,53E-04
36	34	33	499	22500	16,00000	0,00068	0,00066	6,71E-04
40	39	38	499	22500	17,77778	0,00078	0,00076	7,70E-04
44	45	44	499	22500	19,55556	0,00090	0,00087	8,88E-04
48	52	50	499	22500	21,33333	0,00104	0,00101	1,03E-03
52	60	58	499	22500	23,11111	0,00120	0,00117	1,18E-03
56	66	64	499	22500	24,88889	0,00132	0,00128	1,30E-03
60	74	72	499	22500	26,66667	0,00148	0,00144	1,46E-03
64	79	77	499	22500	28,44444	0,00158	0,00154	1,56E-03
68	84	81	499	22500	30,22222	0,00168	0,00163	1,66E-03
72	91	88	499	22500	32,00000	0,00182	0,00177	1,80E-03
77,2	98	96	499	22500	34,31111	0,00196	0,00192	1,94E-03
80	112	110	499	22500	35,55556	0,00224	0,00220	2,22E-03
84	125	123	499	22500	37,33333	0,00251	0,00245	2,48E-03
88	142	139	499	22500	39,11111	0,00285	0,00279	2,82E-03
92	168	165	499	22500	40,88889	0,00337	0,00330	3,33E-03
94	182	178	499	22500	41,77778	0,00365	0,00357	3,61E-03
96,2	198	196	499	22500	42,75556	0,00397	0,00393	3,95E-03
95	272	269	499	22500	42,22222	0,00545	0,00540	5,42E-03
92	347	344	499	22500	40,88889	0,00695	0,00688	6,92E-03
90	412	409	499	22500	40,00000	0,00826	0,00820	8,23E-03
86	480	477	499	22500	38,22222	0,00962	0,00955	9,59E-03
84	525	521	499	22500	37,33333	0,01052	0,01045	1,05E-02
80	615	611	499	22500	35,55556	0,01232	0,01224	1,23E-02
76	715	711	499	22500	33,77778	0,01433	0,01426	1,43E-02
72	822	819	499	22500	32,00000	0,01647	0,01641	1,64E-02
68	962	958	499	22500	30,22222	0,01928	0,01920	1,92E-02
62	1127	1122	499	22500	27,55556	0,02259	0,02249	2,25E-02
53	1288	1283	499	22500	23,55556	0,02581	0,02571	2,58E-02
34,5	1450	1444	499	22500	15,33333	0,02906	0,02894	2,90E-02

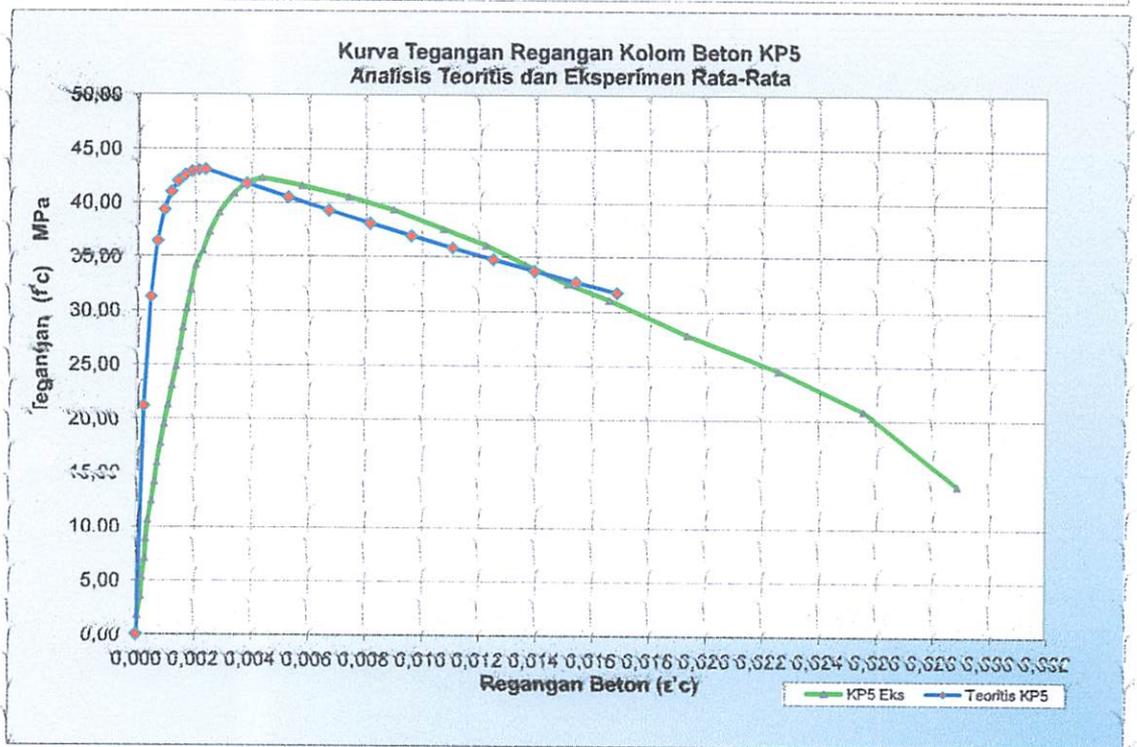
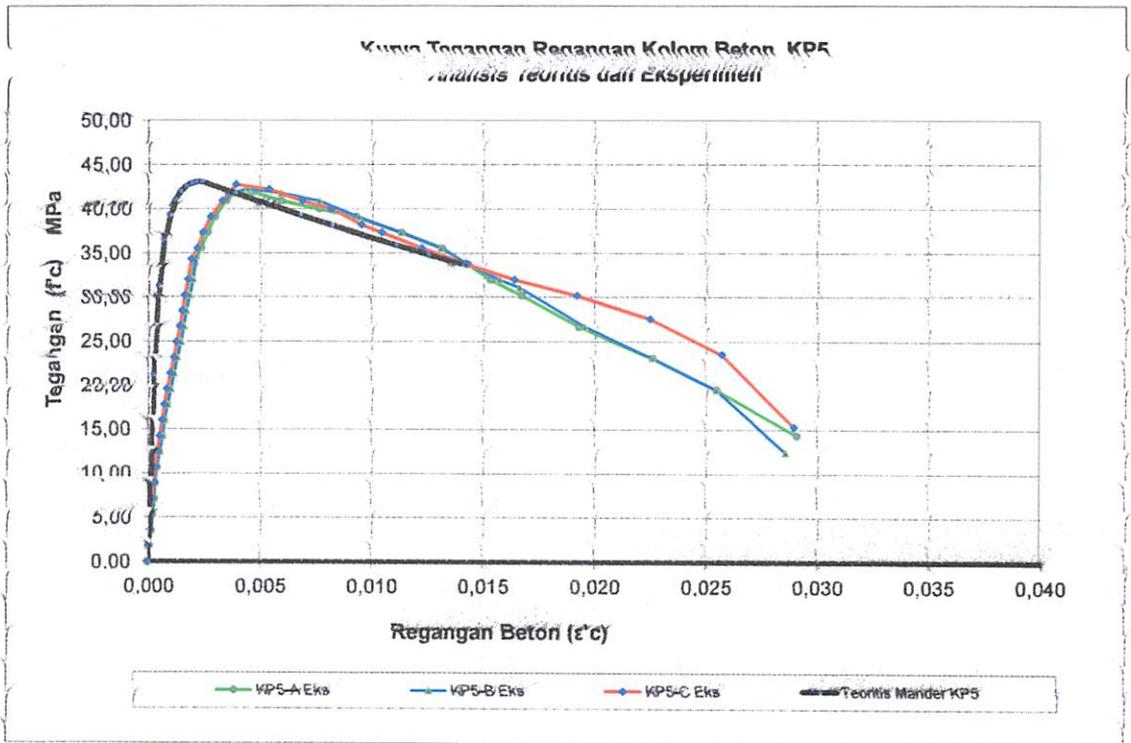
Keterangan Kolom :

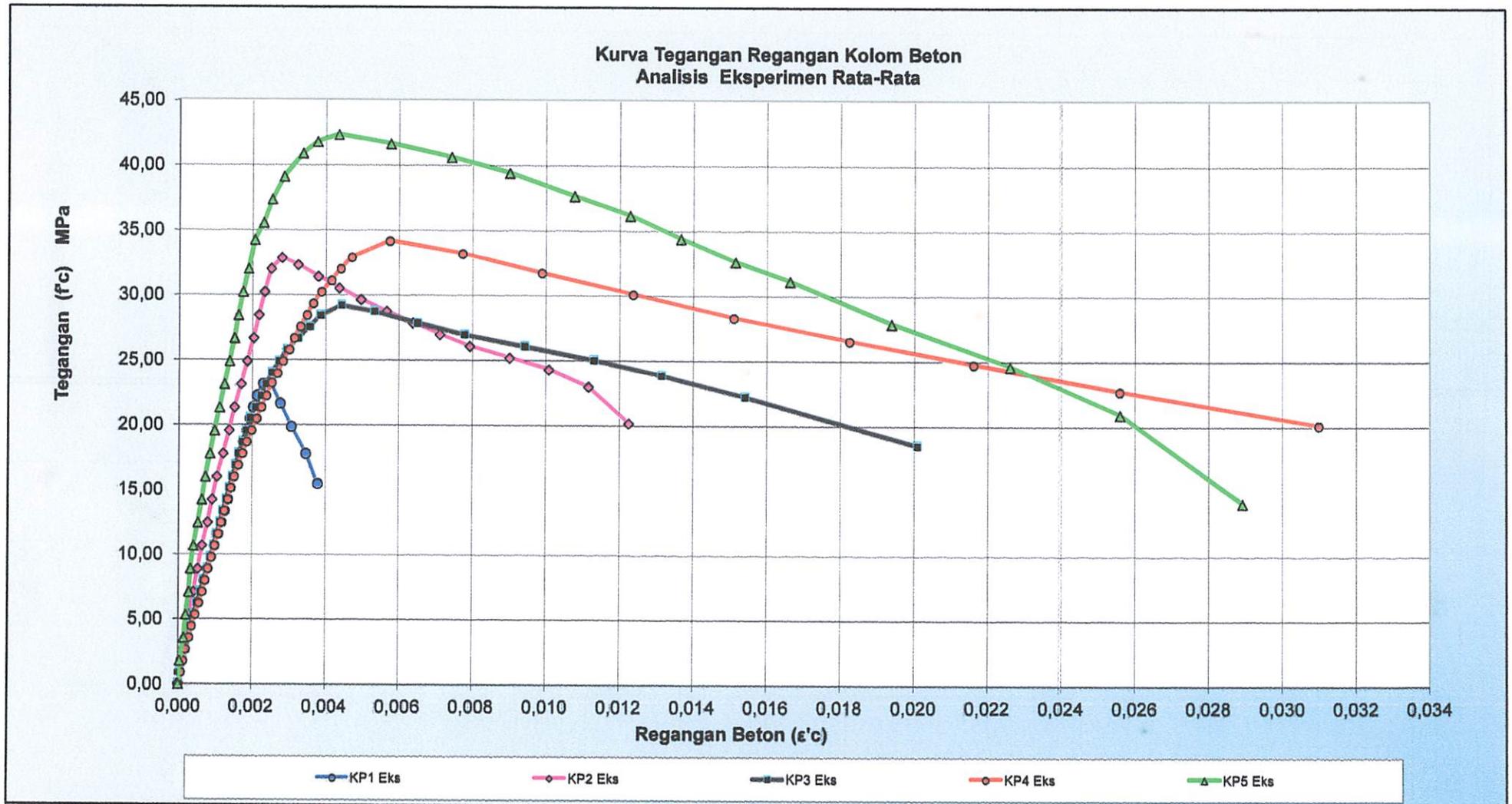
- | | |
|--|--------------------------------|
| 1 = Beban Aksial | 6 = Kuat Tekan Beton |
| 2 = Displacement pada DIAL 1 | 7 = Regangan beton pada DIAL 1 |
| 3 = Displacement pada DIAL 2 | 8 = Regangan beton pada DIAL 2 |
| 4 = Tinggi mula-mula untuk pengukuran regangan | 9 = Regangan beton rata-rata |
| 5 = Luas penampang beton | |
- Baris Yang Berwarna Biru adalah Pada Saat beton tak terkekang CFRP Mulai Retak
 Baris Yang Berwarna Hijau adalah Pada Saat Beban Puncak
 Baris Yang Abu-abu Adalah Pada saat CFRP Putus
 Baris Yang Berwarna Merah adalah Pada Saat Hancurnya Kolom

Kurva Tegangan Regangan Kolom Beton KP5-C Analisis Teoritis dan Eksperimen



Lampiran IV : Tegangan Regangan Hasil Pengamatan Eksperimen Kolom KP5-C





Lampiran IV : Kurva Tegangan Regangan Gabungan 5 Kolom Hasil Pengamatan Eksperimen



JURUSAN TEKNIK SIPIL
FAKULTAS TEKNIK SIPIL DAN PERENCANAAN
INSTITUT TEKNOLOGI NEGERI MALANG

LEMBARAN ASISTENSI

NAMA : BENYAMIN NDU UFI
NIM : 09.21.907
JUDUL : EFEKTIFITAS PENAMBAHAN LAPISAN CARBON FIBER-
REINFORCED POLYMER(CFRP) TERHADAP PENINGKATAN
KEKUATAN KOLOM PERSEGI DENGAN MUTU BETON
 f'_c 22,5 MPa

DOSEN PEMBIMBING: DR. BAMBANG WEDYANTADJI, MT

NO	HARI TANGGAL	MATERI KONSULTASI	PARAF
1	8-11-2010	- tulis dan sumber nya pustaka - layout	
2	3-1-2011	analisa kolom beton	
3	10-1-2011	- grafik di buat di skala 9 dan - layout sampai selesai	
4	19-1-2011	- pembahasan susunan dan Rumusan masalah Rumusan Masalah no 1 & 2 masalah Semu Beban sentris dan non sentris - cari grafik teg- Reg. yg paling atas	
5	27-1-2011	- buat foto lay out & bentuk - kesimpulan	
6	28-1-2011	kesimpulan & saran simpulan	
7	31-1-2011	dan 7 maju seminar hasil	



JURUSAN TEKNIK SIPIL
FAKULTAS TEKNIK SIPIL DAN PERENCANAAN
INSTITUT TEKNOLOGI NEGERI MALANG

LEMBARAN ASISTENSI

NAMA : BENYAMIN NDU UFI
NIM : 09.21.907
JUDUL SKRIPSI : EFEKTIFITAS PENAMBAHAN LAPISAN CARBON
FIBER REINFORCED POLYMER (CFRP)
TERHADAP PENINGKATAN KEKUATAN
KOLOM PERSEGI DENGAN MUTU BETON
 f_c 22,5 MPa

DOSEN PEMBIMBING : YOSIMSON P. MANAHA, ST. MT

NO	HARI TANGGAL	MATERI KONSULTASI	PARAF
1.	22-10-2010	- Bab I dibuat sesuai dg judul saudara - latar belakang dicet lagi	
2.	25-10-2010	- Rumusan masalah - Tujuan (Connect). - Manfaat di sempurnakan	
3.	27-10-2010	- Bab I → Ok - Bab II → Cek Rumus 2 yg dipakai, sesuaikan Rumus dg masalah, seimbang dan CFRP. - Apa tipe Carbon fiber ?	
4.	2-11-2010	- Bab II → Sempurnakan lagi rumus 2. - Bab. III → Perbaiki sesuai dg jumlah sampel kolom. - Siptan hitungan teoritis kolom	

5.	9-11-2010	<ul style="list-style-type: none"> - Lilitan esdom dg CFP di pdaori untuk tentukan tipe lilitan - hitungan? di lengkapi dg grafik untuk setiap esdom. - Kuat leleh baja tulangan pakai fyada → bukan fy rencana (sesuai hasil uji tarik). 	
6.	19-11-2010	<ul style="list-style-type: none"> - Untuk hasil Eksperimental di buat grafik per masing? esdom - Hasil Lab./Eksperimental vs teoritis dibuat 	
7.	3-12-2010	<ul style="list-style-type: none"> - Grafik teoritis & Eksperimental di gabung untuk masing? esdom. - Cek grafik esdom kpada dan kps 	
8.	21-12-2010	<ul style="list-style-type: none"> - Gabung semua grafik teoritis & semua grafik Eksperimental. - Validasi hasilnya 	
9.	3-01-2011	<ul style="list-style-type: none"> - Tuliskan nilai kenarikan/pancuman baik fcm maupun Regangan (Ec) - Buat kesimpulan 	
10.	19-01-2011	<ul style="list-style-type: none"> - Lampiran? di buat di lengkapi dg isian? tabel - Abstrak di buat 	
11.	27-1-2011	- Sempurnakan Abstrak	
12.	5-02-2011	Dapat Maju Seminar Hasil.	



INSTITUT TEKNOLOGI NASIONAL
 Jl. Bendungan Sigurn-gura 2
 Jl. Raya Karanglo Km. 2
 Malang

SEMINAR HASIL SKRIPSI PRODI TEKNIK SIPIL S-1

FORM REVISI / PERBAIKAN BIDANG _____

Nama : _____

NIM : 09.21.907

Hari / tanggal : _____ / _____

Perbaikan materi Seminar Hasil Tugas Akhir meliputi :

- kesimpulan
- aktualitas

Perbaikan Seminar Hasil Skripsi harus diselesaikan selambatnya 14 hari terhitung sejak pelaksanaan Seminar. Bila melebihi 14 hari, maka tidak dapat diikuti Ujian Skripsi.

Pengumpulan berkas untuk Ujian Skripsi dengan menyertakan lembar pengesahan dari Dosen Pembahas dan Kaprodi

Skripsi telah diperbaiki dan disetujui :

Malang, 04 MARET 2011
 Dosen Pembahas

(_____)

Malang, 24 FEBRUARI 2011
 Dosen Pembahas

(_____)



FORM REVISI / PERBAIKAN
BIDANG Penelitian

Nama : Benyamin Ndu Ufi
NIM : 0921907
Hari / tanggal : Rabu, 16 - 2 - 2011

Perbaikan materi Seminar Hasil Tugas Akhir meliputi :

- Dalam analisis perompas qfr : regangan, tahanan, perompas.
- Cele lagi fejl. daktilitas
- betuhkan tabel E_y & E_m .

Perbaikan Seminar Hasil Skripsi harus diselesaikan selambatnya 14 hari terhitung sejak pelaksanaan Seminar. Bila melebihi 14 hari, maka tidak dapat diikuti Ujian Skripsi.

Pengumpulan berkas untuk Ujian Skripsi dengan menyertakan lembar pengesahan dari Dosen Pembahas dan Kaprodi

Skripsi telah diperbaiki dan disetujui :

Malang, 10 - 2 - 2011
Dosen Pembahas

(A. Agus Santosa)

Malang, 16 - 2 - 2011
Dosen Pembahas

(A. Agus Santosa)



**FORM REVISI / PERBAIKAN
BIDANG**

Nama : Banyan Nelu WFI
NIM : 09.21.807
Hari / tanggal : _____ / _____

Perbaikan materi Skripsi meliputi :

- Perhitungan Pmax - Mo.
titik ① teorinya dimasukkan
yang ada. pengelangan
- Diagram teg - regangan.
pada titik ①

Perbaikan Skripsi harus diselesaikan selambatnya 14 hari terhitung sejak pelaksanaan Ujian dilaksanakan. Bila melebihi masa 14 hari, maka tidak dapat diikutkan Yudisium.

Tugas Akhir telah diperbaiki dan disetujui :

Malang, 04 MARET 2011 2010
Dosen Penguji

Malang, _____ 2010
Dosen Penguji

(IR. ESTER PRASASARI, MT)

(Esther P)

