

TUGAS AKHIR

**PENGARUH PERSENTASE GAYA PRATEGANG
TERHADAP LENDUTAN PADA
BALOK PRATEGANG PARSIAL**

**(Effects of Prestressed Force Percentages
to Deflection of Partial Prestressed Beam)**



IRMA

No Mhs : 94 310 072

DWI INDRAYANI

No Mhs : 94 310 232

**JURUSAN TEKNIK SIPIL
FAKULTAS TEKNIK SIPIL DAN PERENCANAAN
UNIVERSITAS ISLAM INDONESIA
YOGYAKARTA
2000**

**PENGARUH PERSENTASE GAYA PRATEGANG
TERHADAP LENDUTAN PADA
BALOK PRATEGANG PARSIAL**

**(Effects of Prestressed Force Percentages
to Deflection of Partial Prestressed Beam)**

*Diajukan Untuk Melengkapi Persyaratan Dalam Rangka
Memperoleh Derajat Sarjana Pada Jurusan Teknik Sipil
Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan
Universitas Islam Indonesia*

IRMA

No Mhs : 94 310 072

DWI INDRAYANI

No Mhs : 94 310 232

**JURUSAN TEKNIK SIPIL
FAKULTAS TEKNIK SIPIL DAN PERENCANAAN
UNIVERSITAS ISLAM INDONESIA
YOGYAKARTA
2000**

**PENGARUH PERSENTASE GAYA PRATEGANG
TERHADAP LENDUTAN PADA
BALOK PRATEGANG PARSIAL**

**(Effects of Prestressed Force Percentages
to Deflection of Partial Prestressed Beam)**

Disusun Oleh :

IRMA

No Mhs : 94 310 072

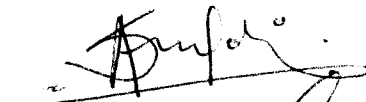
DWI INDRAYANI

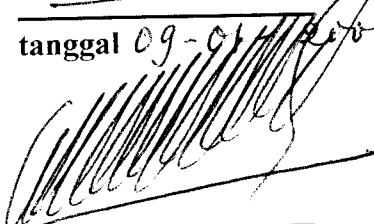
No Mhs : 94 310 232

Telah diperiksa dan disetujui oleh:

Ir. H. Samsudin, MT
Dosen pembimbing I

Ir. H. A.Kadir Aboe, MS
Dosen pembimbing II


tanggal 09-01/01


tanggal 09/01/01

KATA PENGANTAR

Assalamu`allaikum Wr.Wb.

Dengan segala kerendahan hati penulis mengucapkan puji syukur kepada Allah SWT, yang telah melimpahkan rahmat dan hidayah-Nya, akhirnya penulis dapat menyelesaikan tugas akhir ini dengan judul :

PENGARUH PERSENTASE GAYA PRATEGANG TERHADAP LENDUTAN PADA BALOK PRATEGANG PARSIAL

Tujuan dari penulisan tugas akhir ini adalah untuk memenuhi dan melengkapi salah satu syarat dalam menempuh ujian kesarjanaan pada Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan Jurusan Teknik Sipil, Universitas Islam Indonesia.

Penulis sadar sepenuhnya bahwa dalam penulisan tugas akhir ini banyak mendapat kesulitan, karena keterbatasan kemampuan yang dimiliki baik dalam pengalaman maupun teori ilmu. Namun terdorong oleh tekad yang besar untuk menyelesaikan tugas akhir ini dengan sebaik-baiknya serta dorongan dan bantuan dari berbagai pihak maka tugas akhir ini dapat tersusun.

Pada kesempatan ini, penulis mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada semua pihak terutama kepada :

1. Bapak Ir. Widodo, MSCE, PhD, selaku Dekan Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan Jurusan Teknik Sipil Universitas Islam Indonesia, Yogyakarta.
2. Bapak Ir. H. Tadjuddin BMA, MS selaku Ketua Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan Jurusan Teknik Sipil Universitas Islam Indonesia, Yogyakarta.
3. Bapak Ir. H. M. Samsudin, MT, selaku Dosen Pembimbing I Tugas Akhir Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan Jurusan Teknik Sipil Universitas Islam Indonesia, Yogyakarta.
4. Bapak Ir. H. A. Kadir Aboe, MS selaku Dosen Pembimbing II Tugas Akhir Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan Jurusan Teknik Sipil Universitas Islam Indonesia, Yogyakarta.

Akhirnya penghargaan yang khusus penulis sampaikan kepada bapak, ibu, kakak-kakakku dan adik-adikku tercinta dan semua pihak yang telah ikut mendo'akan dan memberikan banyak dorongan moril dan materiil selama penulis mengikuti perkuliahan hingga selesainya tugas akhir ini. Semoga Allah SWT, memberikan rahmat-Nya kepada kita semua.

Amin Ya Rabbil`alamin....

Wassalamu`alllaikum Wr.Wb.

Yogyakarta 2000

penulis

DAFTAR ISI

LEMBAR SAMPUL	i
LEMBAR JUDUL	ii
LEMBAR PENGESAHAN	iii
PERSEMBAHAN	iv
KATA PENGANTAR	v
DAFTAR ISI	vii
DAFTAR GAMBAR	xi
DAFTAR TABEL	xii
DAFTAR GRAFIK	xv
DAFTAR LAMPIRAN	xvii
DAFTAR NOTASI	xviii
INTISARI	xix
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Tujuan	2
1.3 Manfaat	3
1.4 Batasan Masalah	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	5
BAB III LANDASAN TEORI	8

3.1 Konsep Dasar Beton Prategang	8
3.1.1 Sistem Prategang Untuk Mengubah Beton Menjadi Bahan yang Elastis.....	9
3.1.2 Prategang Sebagai kombinasi Baja Mutu Tinggi dan Beton	10
3.1.3 Sistem Prategang Untuk Mencapai Perimbangan Beban	12
3.2 Sistem Prategangan	13
3.3 Bahan-Bahan Beton Prategang	14
3.3.1 Beton	14
3.3.2 Baja Untuk Tendon	15
3.3.3 Baja Untuk Tulangan Prategang	16
3.4 Prategang Parsial	16
3.4.1 Perilaku Beton Prategang Parsial	
3.4.2 Keuntungan dan Kerugian Penggunaan Prategang Parsial.....	22
3.5 Perencanaan Prategang Parsial.....	24
3.5.1 Tinjauan umum	24
3.5.2 Perencanaan Penampang	24
3.5.3 Menghitung Besar Gaya Prategang	27
3.5.4 Menghitung Luas Baja Prategang	28
3.5.5 Menghitung Eksentrisitas Tendon	28
3.5.6 Kontrol Tegangan Beton dan Tendon	29

	3.5.7 Menghitung Kapasitas Momen	30
	3.6 Lendutan	35
	3.6.1 Umum	35
	3.6.2 Hubungan Antara Beban dan Lendutan	36
	3.6.3 Perhitungan Lendutan Jangka Pendek	38
	3.6.4 Perhitungan Lendutan Jangka Panjang	43
	3.6.5 Kontrol Lendutan	49
BAB IV	PERHITUNGAN	50
	4.1 Perencanaan Balok Prategang	50
	4.1.1 Prategang Penuh	
	Sistem PASCA-TARIK dengan Grouting	52
	4.1.2 Prategang Parsial 90 %	
	Sistem PASCA-TARIK dengan Grouting	58
	4.2 Lendutan Jangka Pendek	64
	4.2.1 Prategang Penuh	
	Sistem PASCA-TARIK dengan Grouting	65
	4.2.2 Prategang Parsial 90 %	
	Sistem PASCA-TARIK dengan Grouting	69
	4.3 Lendutan Jangka Panjang	73
	4.3.1 Prategang Penuh	
	Sistem PASCA-TARIK dengan Grouting	73
	4.3.2 Prategang Parsial 90 %	
	Sistem PASCA-TARIK dengan Grouting	74

BAB V	ANALISIS HASIL DAN PEMBAHASAN	76
	5.1 Data dan Asumsi Desain	76
	5.2 Pembahasan Hasil Perhitungan	77
BAB VI	KESIMPULAN DAN SARAN	114
	6.1 Kesimpulan	114
	6.2 Saran	115

DAFTAR PUSTAKA

LAMPIRAN

DAFTAR GAMBAR

	Halaman
Gambar 3.1 Distribusi tegangan pada penampang beton prategang dengan eksentris	9
Gambar 3.2 Kopel dalam komponen prategang akibat gaya prategang	10
Gambar 3.3 Kopel dalam akibat prategang dan beban kerja	11
Gambar 3.4 Prategang sistem perimbangan beban	12
Gambar 3.5 Kurva beban dan lendutan pada tulangan kuat dan lemah	18
Gambar 3.6 Kurva beban dan lendutan untuk berbagai tingkat prategang	20
Gambar 3.7 Kopel pada balok prategang dengan tendon prategang dan tulangan non-prategang	32
Gambar 3.8 Kurva hubungan antara beban dan lendutan	37
Gambar 3.9 Kurva hubungan antara momen dan lendutan	40

DAFTAR TABEL

	Halaman
Tabel 5.1	Tegangan yang terjadi pada balok prategang penuh dan prategang parsial untuk panjang bentang 20 meter 81
Tabel 5.2	Luasan tulangan prategang , tulangan non-prategang dan kapasitas momen untuk panjang bentang 20 meter 82
Tabel 5.3	Kehilangan gaya prategang pada balok prategang penuh dan prategang sebagian untuk panjang bentang 20 meter 83
Tabel 5.4	Lendutan jangka pendek pada balok prategang penuh dan prategang sebagian untuk panjang bentang 20 meter 84
Tabel 5.5	Lendutan jangka panjang pada balok prategang penuh dan prategang sebagian untuk panjang bentang 20 meter 85
Tabel 5.6	Tegangan yang terjadi pada balok prategang penuh dan prategang parsial untuk panjang bentang 25 meter 86

Tabel 5.7	Luasan tulangan prategang , tulangan non-prategang dan kapasitas momen untuk panjang bentang 25 meter	87
Tabel 5.8	Kehilangan gaya prategang pada balok prategang penuh dan prategang sebagian untuk panjang bentang 25 meter	88
Tabel 5.9	Lendutan jangka pendek pada balok prategang penuh dan prategang sebagian untuk panjang bentang 25 meter	89
Tabel 5.10	Lendutan jangka panjang pada balok prategang penuh dan prategang sebagian untuk panjang bentang 25 meter	90
Tabel 5.11	Tegangan yang terjadi pada balok prategang penuh dan prategang parsial untuk panjang bentang 30 meter	91
Tabel 5.12	Luasan tulangan prategang , tulangan non-prategang dan kapasitas momen untuk panjang bentang 30 meter	92
Tabel 5.13	Kehilangan gaya prategang pada balok prategang penuh dan prategang sebagian untuk panjang bentang 30 meter	93

Tabel 5.14	Lendutan jangka pendek pada balok prategang penuh dan prategang sebagian untuk panjang bentang 30 meter	94
Tabel 5.15	Lendutan jangka panjang pada balok prategang penuh dan prategang sebagian untuk panjang bentang 30 meter	95

DAFTAR GRAFIK

	Halaman	
Grafik 5.1	Lendutan balok prategang penuh	
	bentang 20 meter	96
Grafik 5.2	Lendutan balok prategang parsial 90 %	
	bentang 20 meter	97
Grafik 5.3	Lendutan balok prategang parsial 80 %	
	bentang 20 meter	98
Grafik 5.4	Lendutan balok prategang parsial 70 %	
	bentang 20 meter	99
Grafik 5.5	Lendutan balok prategang parsial 60 %	
	bentang 20 meter	100
Grafik 5.6	Lendutan balok prategang penuh , parsial 90 % ,parsial 80 % ,parsial 70 % , parsial 60 % bentang 20 meter	101
Grafik 5.7	Lendutan balok prategang penuh	
	bentang 25 meter	102
Grafik 5.8	Lendutan balok prategang parsial 90 %	
	bentang 25 meter	103

DAFTAR LAMPIRAN

- Lampiran 1 Konstanta- konstanta untuk penampang balok T
- Lampiran 2 Tabel jenis tendon sistem rentang K- Freyssinet
- Lampiran 3 Nilai koefisien susut (K_{SH})
- Lampiran 4 Nilai K_{rc} , dan J
- Lampiran 5 Nilai C
- Lampiran 6 Kontrol lendutan

DAFTAR NOTASI

h	= tinggi penampang (mm)
h_f	= tinggi sayap (mm)
b_f	= lebar sayap (mm)
b_w	= lebar badan (mm)
h_w	= tinggi badan (mm)
A_g	= luasan penampang bruto (mm^2)
A_{netto}	= luasan penampang netto (mm^2)
A_t	= luasan penampang transformasi (mm^2)
A_{ps}	= luasan tendon (mm^2)
A_s	= luasan baja non-prategang (mm^2)
A_{psp}	= luasan tendon parsial (mm^2)
S_t	= modulus penampang atas (mm^3)
S_b	= modulus penampang bawah (mm^3)
I_g	= momen inersia penampang bruto (mm^4)
I_{netto}	= momen inersia penampang netto (mm^4)
I_t	= momen inersia penampang transformasi (mm^4)
I_{cr}	= momen inersia penampang kritis (mm^4)
I_e	= momen inersia penampang efektif (mm^4)
E_c	= modulus elastisitas beton (MPa)
E_{ci}	= modulus elastisitas beton awal (MPa)
E_{ps}	= modulus elastisitas tendon (MPa)
E_s	= modulus elastisitas baja non-prategang (MPa)
f_{ti}	= tegangan tarik ijin saat transfer (MPa)
f_{ts}	= tegangan tarik ijin saat layan (MPa)
f_{ci}	= tegangan tekan ijin saat transfer (MPa)
f_{cs}	= tegangan tekan ijin saat layan (MPa)
f_t	= tegangan serat atas beton (MPa)
f_b	= tegangan serat bawah beton (MPa)
f_{ps}	= tegangan tendon (MPa)
f'_c	= tegangan tekan beton (MPa)
f'_{ci}	= tegangan tekan beton awal (MPa)
f_{psl}	= tegangan baja pada kapasitas batas balik (MPa)
f_i	= tegangan tendon (MPa)
P_i	= gaya prategang awal (KN)
P_e	= gaya prategang efektif (KN)
P_{ip}	= gaya prategang awal parsial (KN)
P_{ep}	= gaya prategang efektif parsial (KN)
e_c	= eksentrisitas tendon pada tengah bentang (mm)
e_e	= eksentrisitas tendon pada tumpuan (mm)
n_{ps}	= rasio perbandingan modulus elastisitas beton dan tendon
n_s	= rasio perbandingan modulus elastisitas beton dan baja non-prategang

w_{ps}	=	indeks penulangan tendon
w_s	=	indeks penulangan baja non-prategang
ρ_{ps}	=	rassio penulangan tendon
ρ_s	=	rassio penulang non-prategang
a	=	tinggi daerah tekan beton tanpa tulangan non-prategang (mm)
a'	=	tinggi daerah tekan beton dengan tulangan non-prategang (mm)
M_o	=	momen akibat berat sendiri (KNm)
M_D	=	momen akibat beban mati (KNm)
M_L	=	momen akibat beban hidup (KNm)
M_{ult}	=	momen batas (KNm)
M_n	=	momen nominal (KNm)
$M_{n\text{ perlu}}$	=	momen nominal yang diperlukan (KNm)
M_{cr}	=	momen kritis (KNm)
δ_o	=	lendutan akibat berat sendiri (mm)
δ_D	=	lendutan akibat beban mati (mm)
δ_L	=	lendutan akibat beban hidup (mm)
δ_{pi}	=	lendutan akibat gaya prategang (mm)
δ_T	=	lendutan total (mm)

INTISARI

Pada dasarnya filosofi desain beton prategang adalah menciptakan suatu material baru dengan membuat beton dalam keadaan desak sehingga tegangan tarik pada beton tersebut dapat dihilangkan. Dalam perkembangannya ternyata diindikasikan bahwa masih ada kekuatan tarik pada beton yang dapat dijadikan sebagai kekuatan tambahan, desain yang berdasarkan pada filosofi ini disebut beton prategang parsial. Pada beton prategang parsial digunakan tulangan prategang dan tulangan non-prategang namun kekuatan terhadap lentur akan tetap sama dengan prategang penuh. Penambahan tulangan non-prategang pada balok prategang parsial akan memberikan karakteristik lendutan yang berbeda dengan lendutan yang terjadi pada balok prategang penuh. Tujuan dari penulisan tugas akhir ini adalah untuk mengetahui karakteristik lendutan balok prategang parsial dengan berbagai proporsi tulangan prategang dan tulangan non-prategang sesuai dengan persentase gaya prategang yang diberikan.

Analisis pertama yang dilakukan adalah merencanakan balok prategang bentang 20, 25 dan 30 meter dengan memberikan gaya prategang sebesar 100% (penuh), 90%, 80%, 70%, 60% dari gaya yang dibutuhkan pada balok prategang penuh. Analisis selanjutnya adalah analisis lendutan dengan menggunakan metode "Approximate Time Step Method". Analisis lendutan meliputi lendutan jangka pendek (lendutan seketika) dan lendutan jangka panjang.

Dari analisis pada tugas akhir ini dapat disimpulkan bahwa besarnya gaya prategang menjadi dasar dalam penggunaan jumlah tulangan prategang (serat tendon) dan tulangan non-prategang yang digunakan, sedangkan pengurangan jumlah serat tendon akan memperbesar tegangan tarik yang terjadi. Untuk setiap bentang pengurangan gaya prategang yang diberikan akan tetap menghasilkan lendutan ke atas (camber) yang sama. Pengaruh faktor yang berhubungan dengan umur beton pada saat penambahan beban akan menambah besar lendutan, baik akibat gaya prategang, berat sendiri, beban mati maupun beban hidup. Semakin panjang bentang semakin besar pula lendutan akibat berat sendiri dan beban luar, sehingga pada umur pembebanan yang relatif lama superposisi lendutan pada bentang panjang dapat berupa lendutan ke bawah.

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Penggunaan beton prategang semakin sering dijumpai dalam proyek pembangunan seiring dengan kemajuan dan perkembangan dalam bidang konstruksi, terutama pada struktur yang mengalami momen lentur yang besar. Hal ini sering dijumpai pada elemen struktur balok yang memiliki bentang panjang. Pemakaian sistem prategang pada balok selain memberikan tegangan internal yang besar dalam menahan beban luar juga dari segi estetika mempunyai penampang yang ramping.

Beton prategang adalah beton yang mengalami tegangan internal dengan besar dan distribusi sedemikian rupa sehingga dapat mengimbangi tegangan yang terjadi akibat beban eksternal. Pada elemen-elemen beton prategang, sistem prategang dilakukan dengan menarik tulangnya. Pada dasarnya filosofi desain beton prategang adalah menciptakan suatu material baru dengan membuat beton dalam keadaan tertekan sehingga tidak akan terjadi tegangan tarik pada beton tersebut, desain ini disebut sistem prategang penuh. Dalam perkembangannya ternyata diindikasikan bahwa masih ada kekuatan tarik pada beton yang dapat dijadikan sebagai kekuatan tambahan. Oleh karena itu masih ada alternatif metode desain lain yang mengizinkan terjadinya sejumlah tegangan tarik. Desain ini

disebut prategang parsial atau prategang sebagian. Untuk prategang jenis ini sejumlah tegangan tarik boleh terjadi pada penampang, maksimal sama dengan tegangan tarik ijin beton.

Untuk menahan tegangan tarik akibat beban luar dan untuk membatasi lebarnya retak, maka beton prategang parsial menggunakan tulangan non-prategang disamping tulangan prategang (serat tendon) sebagai tulangan utama. Tulangan non-prategang yaitu tulangan yang tidak mengalami tegangan sebelum beban luar bekerja. Sedangkan tulangan prategang (serat tendon) yaitu tulangan yang sudah mengalami tegangan akibat gaya prategang meskipun beban luar belum bekerja. Dengan kombinasi kedua jenis tulangan ini, kekuatan penampang terhadap lentur akan tetap sama dengan prategang penuh. Namun penambahan tulangan non-prategang akan memberikan karakteristik lendutan yang berbeda dengan karakteristik lendutan pada balok prategang penuh.

Pada tugas akhir ini dicoba untuk menganalisis karakteristik lendutan yang terjadi pada balok prategang parsial berdasarkan persentase gaya prategang yang diberikan.

1.2 Tujuan

Adapun yang menjadi tujuan dari penyusunan tugas akhir ini adalah:

Untuk mengetahui karakteristik lendutan balok prategang parsial dengan berbagai proporsi tulangan prategang (serat tendon) dan tulangan non-prategang sesuai dengan persentase gaya prategang yang diberikan.

1.3 Manfaat

Dari hasil studi analisis ini diharapkan akan mempunyai manfaat sebagai berikut:

- Memberikan gambaran mengenai pendekatan dalam memperkirakan lendutan dalam balok prategang parsial.
- Menambah data yang dapat digunakan sebagai pertimbangan pada desain beton prategang parsial.

1.4 Batasan Masalah

Karena terlalu banyak permasalahan yang berhubungan dengan perancangan beton prategang, maka dalam tugas akhir ini ditetapkan batasan-batasan masalah sebagai berikut :

1. Elemen yang dipakai dalam analisis balok prategang penuh dan balok prategang parsial tampang T sistem postension bonded prestressed.
2. Struktur diletakan diatas dua tumpuan sederhana dengan panjang bentang 20,25,30 meter.
3. Kuat desak karakteristik beton yang digunakan adalah 45 MPa, tegangan luluh baja aktif atau tendon prategang (f_{pu}) adalah 1850 MPa dan tegangan luluh baja pasif atau tulangan non-prategang (f_y) adalah 360 MPa.
4. Pembebanan dihitung dengan Peraturan Pembebanan Indonesia tahun 1983.
5. Kehilangan prategang total ditetapkan sebesar 20%.
6. Beton prategang penuh didesain untuk tidak terjadi tarik.

7. Beton prategang parsial didesain untuk menahan beban lentur dengan memberikan gaya prategang sebesar 90%, 80%, 70%, 60% dari gaya prategang yang dibutuhkan pada prategang penuh.
8. Perhitungan lendutan dengan menggunakan metode Approximate Time Step Method pada umur pembebanan 30 hari, 120 hari, 1 tahun, dan 5 tahun.
9. Bentuk tata letak tendon yang digunakan adalah Dopped tendon.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

T.Y. LIN & NED H. BURNS (1981), lendutan yang terkontrol akibat gaya prategang pada balok prategang penuh dapat digunakan dengan lebih menguntungkan untuk menghasilkan lendutan keatas yang diinginkan dan menggeser lendutan akibat beban luar. Selain itu, juga diketahui adanya keadaan dimana lendutan keatas yang berlebih akibat gaya prategang dapat mengakibatkan kesulitan yang serius.

ARTHUR H NIELSON (1987), salah satu dari keuntungan penting beton prategang parsial adalah meningkatkan kontrol lendutan, karena lendutan keatas (camber) akibat gaya prategang pada saat balok belum mengalami pembebanan dapat dihindari dengan menggunakan gaya prategang yang kecil. Meskipun demikian, ini berarti bahwa lendutan kebawah pada saat seluruh beban layan bekerja akan lebih besar dari beton prategang penuh. Konsekuensinya, sangatlah penting untuk membuat pendekatan dalam memperkirakan lendutan prategang parsial pada tiap-tiap tahap pembebanan.

N.C SINHA & S.K ROY (1994), perhitungan pada balok prategang parsial menjadi lebih rumit, hal ini diakibatkan oleh timbulnya retak lentur. Pada waktu retak-retak terjadi pada balok, bahkan pada permulaan retak sekalipun meski masih merupakan retak rambut yang hampir-hampir tidak terlihat oleh mata

telanjang, penampang efektif dalam melawan momen akan menjadi penampang retak sebagai pengganti seluruh penampang beton.

T.Y. LIN & NED H. BURNS (1981), untuk memberikan kekuatan tambahan pada struktur beton prategang parsial suatu tulangan non-prategang sering ditambahkan untuk memberikan suatu kekuatan batas ultimit yang lebih tinggi pada balok dan memberi kekuatan tambahan untuk memikul tegangan tarik yang terjadi pada beton.

NAWY (1996), bila balok prategang mengalami beban yang berlebih atau pada kasus prategang parsial dimana batas kontrol retak diijinkan, penggunaan momen inersia bruto (I_g) hanya berlaku untuk perhitungan lendutan seketika pada saat transfer. Secara teoritis momen inersia retak (I_{cr}) seharusnya digunakan untuk penampang yang mengalami retak, sementara itu momen inersia penampang bruto digunakan untuk penampang diantara retak. Meskipun demikian penjumlahan secara numerikal dari lendutan sepanjang bentang kadang-kadang tidak dibenarkan karena kesulitan mengevaluasi lendutan secara akurat. Konsekuensinya momen inersia efektif (I_e) dapat digunakan sebagai rata-rata inersia sepanjang bentang sederhana yang rumusnya telah dikembangkan oleh **BRANSON**.

ARI SAPTOYUONO & RACHMAT WIJAYA (1998). Membahas studi analisis perbandingan desain balok prategang penuh dengan prategang parsial pada balok tampang T dengan menambahkan tulangan pasif (non-prategang) untuk memberikan suatu kekuatan batas ultimit yang lebih pada balok. Dari hasil

analisis tersebut menunjukkan bahwa semakin besar persentase parsial semakin besar pula kekuatan batas untuk menahan tarik.

BAB III

LANDASAN TEORI

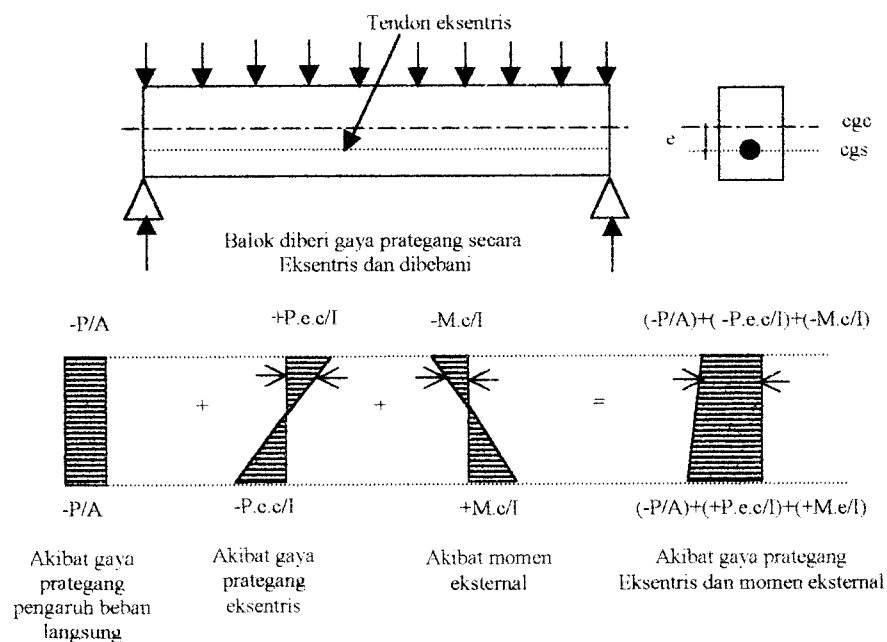
3.1 Konsep Dasar Beton Prategang

Beton adalah bahan yang mampu menahan gaya desak sedang kemampuannya menahan gaya tarik kecil. Dalam perencanaan beton bertulang biasa, kekuatan tarik beton biasanya diabaikan, sehingga luasan efektif tampang adalah daerah yang hanya menahan desak, dengan demikian terdapat inefisiensi terhadap luasan yang direncanakan.

Atas dasar ini para ahli berusaha mereduksi gaya tarik yang terjadi pada beton, sehingga keseluruhan penampang beton secara maksimal akan menahan desak. Tegangan tarik pada beton dapat direduksi dengan memadukan pemakaian beton dengan baja mutu tinggi atau tendon yang diberi gaya prategang awal yang cukup dengan menarik tendon, sehingga tegangan tarik pada beton akibat momen lentur pada saat beban layan dapat dihilangkan dan beton hanya terjadi tegangan desak saja. Konsep inilah yang dikenal dengan sistem beton prategang. Konsep umum untuk menjelaskan dan menganalisa sifat-sifat dasar dari beton prategang untuk memperoleh desain yang baik dan efisien adalah sebagai berikut:

3.1.1 Sistem Pategang Untuk Mengubah Beton Menjadi Bahan yang Elastis.

Konsep ini merupakan hasil pemikiran Eugene Freyssinet yang memvisualisasikan beton prategang sebagai beton yang ditransformasikan dari bahan yang getas menjadi bahan yang elastis, dengan memberikan tekanan (desakan) terlebih dahulu. Pada konsep ini beton dipandang mengalami dua sistem pembebanan yaitu gaya internal prategang dan beban eksternal, dimana tegangan tarik akibat gaya eksternal dilawan dengan tegangan desak akibat gaya internal.



Gambar 3.1 Distribusi tegangan pada penampang beton prategang dengan eksentrisitas

Dari gambar 3.1 diperoleh distribusi terakhir pada penampang sebagai berikut:

$$f = -\frac{P}{A_g} \pm \frac{P \cdot e \cdot c}{I_g} \pm \frac{M \cdot c}{I_g} \quad (3.1)$$

Dengan :

P = gaya prategang yang diberikan (KN)

A_g = luasan penampang bruto (mm^2)

e = eksentrisitas tendon (mm)

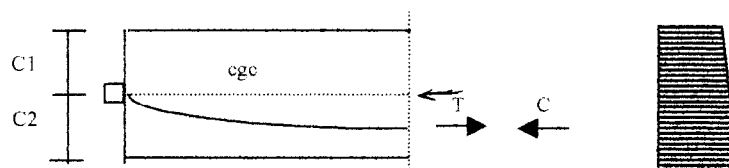
c = jarak terhadap titik berat penampang (mm)

M = momen total dari beban yang bekerja (KNm)

I_g = momen inersia penampang bruto (mm^4)

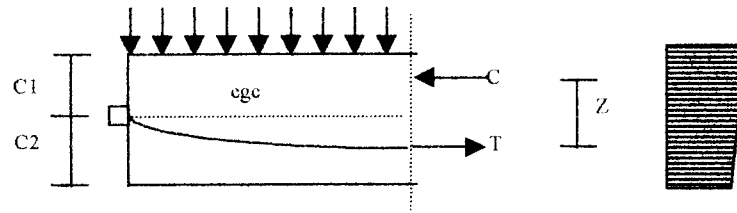
3.1.2 Prategang Sebagai Kombinasi Baja Mutu Tinggi dan Beton

Konsep ini mempertimbangkan beton prategang sebagai kombinasi dari baja dan beton seperti pada beton bertulang konvensional. Dimana baja menahan gaya tarik dan beton menahan gaya tekan, dengan demikian kedua bahan membentuk kopel penahan untuk melawan momen eksternal.



Gambar 3.2 Kopel dalam komponen prategang akibat gaya prategang

Dari gambar 3.2 dapat dilihat bahwa sebelum beban luar bekerja maka gaya tarik pada tendon (T) dan gaya tekan beton (C), bekerja pada titik yang sama sehingga kopel dalam sama dengan nol.



Gambar 3.3 Kopel dalam akibat prategang dan beban kerja

Sedangkan ketika beban luar telah bekerja, pusat blok gaya akan terangkat akibat perubahan distribusi tegangan, sejauh kemampuan kopel dalam menahan beban eksternal.

$$M = C \cdot z = T \cdot z \quad (3.2)$$

Dengan nilai C dan T adalah konstan dengan nilai z yang bervariasi. Bila nilai eksentrisitas sudah diketahui atau dihitung, maka

$$K_t = z - K_b, \text{ karena} \quad (3.3)$$

$$C = T \text{ dan } z = \frac{M}{T} \quad (3.4)$$

Dengan melakukan substitusi persamaan di atas dan dari gambar 3.2 dan 3.3 diperoleh:

$$f_t = -\frac{C}{A_g} + \frac{C \cdot K_t \cdot c_1}{I_g} \quad (3.5)$$

$$f_b = -\frac{C}{A_c} - \frac{C \cdot K_t \cdot c_2}{I_c} \quad (3.6)$$

Pada tendon besarnya gaya tarik T sama dengan gaya prategang efektif (P_e) dan $I_g = A_g \cdot r^2$ maka :

$$f_t = -\frac{P_e}{A_g} \cdot \left[1 - \frac{K_t \cdot c_1}{r^2} \right] \quad (3.7)$$

$$f_b = -\frac{P_e}{A_g} \cdot \left[1 + \frac{K_t \cdot c_2}{r^2} \right] \quad (3.8)$$

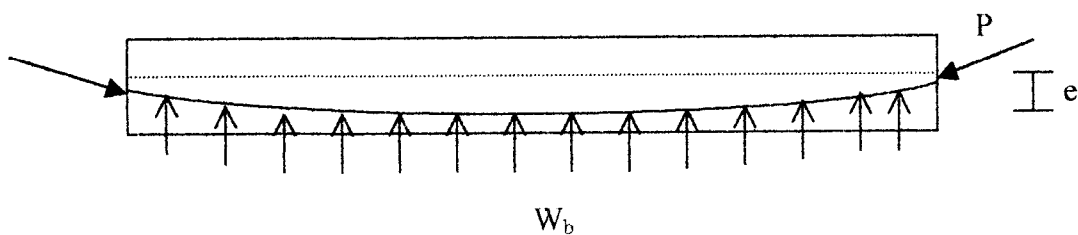
3.1.3 Sistem Prategang Untuk Mencapai Perimbangan Beban

Konsep ini terutama menggunakan gaya prategang sebagai suatu usaha untuk membuat seimbang gaya-gaya pada sebuah batang. Pengaruh dari prategang dianggap sebagai keseimbangan berat sendiri sehingga batang yang mengalami lenturan tidak akan mengalami lentur pada kondisi pembebanan yang direncanakan. Besar gaya perimbangan yang dihasilkan oleh tendon dengan gaya-gaya yang terdistribusi secara merata ke atas adalah sebagai berikut:

$$W_b = \frac{8 \cdot P \cdot e}{L^2} \quad (3.9)$$

$$W_{\text{netto}} = W_{\text{total kebawah}} - W_b$$

$$M_{\text{netto}} = \frac{1}{8} \cdot W_{\text{netto}} \cdot L^2 \quad (3.10)$$



Gambar 3.4 Prategang Sistem perimbangan beban

Adapun tegangan-tegangan yang terjadi pada serat penampang adalah:

$$f = -\frac{P}{A_g} \pm \frac{M_{\text{netto}} \cdot c}{I_g} \quad (3.11)$$

Dengan :

- W_{balok} = beban perimbangan (KN/m)
- W_{netto} = beban bersih eksternal (KN/m)
- P = gaya prategang tendon (KN)
- A_g = luasan penampang bruto (mm^2)
- I_g = momen inertiya penampang bruto (mm^4)
- M_{netto} = momen bersih eksternal (KNm)
- f = tegangan pada serat penampang beton (MPa)
- e = eksentrisitas tendon terhadap titik berat penampang (mm)
- L = panjang bentang (mm)
- c = jarak titik berat penampang terhadap serat terluar beton (mm)

3.2 Sistem Prategangan

Cara yang biasa dilakukan untuk pemberian gaya prategang pada komponen struktur beton adalah dengan menggunakan tendon baja . Terdapat dua macam cara pelaksanaan pemberian gaya prategang :

1. Sistem pra-tarik (pretensioning)

Cara pra-tarik (pretensioning) didefinisikan sebagai cara pemberian gaya prategang pada beton dimana tendon ditarik untuk ditegangkan sebelum dilakukan pengecoran adukan beton kedalam acuan yang telah disiapkan. Pertama-tama tendon dipasang memanjang diantara dua jangkar. Tendon tersebut kemudian ditarik hingga mencapai nilai tegangan tarik rencana (f_{ci})

dan dijangkarkan kuat-kuat kedua ujungnya. Kemudian dilakukan pengecoran adukan beton kedalam acuan berisi tendon dalam keadaan tertarik. Setelah beton mencapai kekerasan dan kekuatan (f_{ci}') tertentu, tendon dipotong dan dijangkarkan pada beton .

2. Sistem pasca-tarik (postensioning)

Sistem pasca-tarik (postensioning) didefinisikan sebagai cara memberikan prategang pada beton, dimana tendon baru ditarik setelah betonnya dicetak terlebih dahulu sampai mempunyai cukup kekuatan untuk menahan tegangan sesuai dengan yang diinginkan. Pada pelaksanaan cara ini, pertama-tama acuan beton dipasang sesuai dengan rencana letak komponen struktur dengan sekaligus dipasang pipa selongsong yang akan menyelubungi tendon. Selanjutnya tendon dimasukkan kedalam pipa selongsong yang sudah disiapkan dalam beton, kemudian tendon ditarik dari salah satu ujung beton yang dijangkar mati pada ujung lainnya.

3.3 Bahan-Bahan Beton Prategang

3.3.1 Beton

Beton dengan kekuatan yang tinggi biasanya dibutuhkan untuk pekerjaan beton prategang. Dalam praktek kekuatan beton yang seharusnya digunakan adalah kekuatan silinder beton umur 28 hari sebesar 34 MPa sampai 55 MPa. Kekuatan yang tinggi merupakan keharusan pada beton prategang karena beberapa alasan. Alasan tersebut antara lain karena angkur yang diperdagangkan untuk baja prategang selalu direncanakan berdasarkan beton mutu tinggi. Selain

itu beton mutu tinggi memberikan ketahanan yang tinggi terhadap tarikan dan geser, seperti juga pada rekatan dan tumpuan. Faktor lainnya adalah beton mutu tinggi juga mempunyai modulus elastisitas lebih tinggi dan regangan akibat rangkai lebih kecil, yang mengakibatkan kehilangan gaya prategang lebih kecil.

Pada beton prategang, penting untuk mengetahui regangan-regangan yang dihasilkan seperti juga tegangan-tegangan. Hal ini penting untuk memperkirakan kehilangan gaya prategang pada baja dan untuk memperhitungkan pengaruh-pengaruh lain dari pemendekan beton.

3.3.2 Baja Untuk Tendon

Baja mutu tinggi merupakan bahan umum untuk menghasilkan gaya prategang dan mensuplai gaya tarik pada beton prategang. Baja mutu tinggi untuk sistem prategang biasanya merupakan salah satu dari ketiga bentuk ini, kawat (wire), untaian kawat (strand), batang (baar), untuk sistem pasca-tarik banyak dipakai kawat yang digabungkan secara paralel menjadi kabel. Tersedia banyak variasi kawat dan strand dari kekuatan dan sifat yang berbeda-beda, yang paling menonjol dan lebih sering dipakai adalah strand yang berisi 7 batang kawat. Kuat tarik tendon yang tersedia biasanya berkisar antara 1000 MPa sampai dengan 1900 MPa. Tendon prategang yang digunakan dalam analisis pada tugas akhir ini adalah Sistem Rentang-K Freyssinet.

3.3.3 Baja Untuk Tulangan Non-Prategang

Untuk tulangan non-prategang digunakan bahan baja yang memiliki sifat teknis menguntungkan, dan baja tulangan yang digunakan dapat berupa baja lonjoran ataupun kawat rangkai las (wire mesh) yang berupa batang kawat baja dirangkai (dianyam) dengan teknik pengelasan. Agar dapat berlangsung lekatan erat antara baja tulangan dengan beton, selain batang polos berpenampang bulat (BJTP) juga digunakan batang deformasian (BJTD), yaitu batang tulangan baja yang permukaannya dikasarkan secara khusus, diberi sirip teratur dengan pola tertentu, atau batang tulangan yang dipilin pada proses produksinya. Tegangan luluh baja tulangan biasanya berkisar antara 240 MPa sampai dengan 400 MPa.

3.4 Prategang Parsial

3.4.1 Perilaku Beton Prategang Parsial

Elemen struktur prategang parsial adalah elemen struktur prategang yang direncanakan dengan mengijinkan terjadinya tarik pada saat beban layan. Namun demikian tidak semua struktur yang direncanakan dengan prategang parsial akan mengalami tegangan tarik pada saat beban layan. Demikian juga sebaliknya, pada struktur yang direncanakan dengan sistem prategang penuh mungkin akan mengalami tegangan tarik pada beban kerja berlebih.

Perbedaan antara beton prategang parsial dengan prategang penuh sebenarnya hanya terletak pada tingkat tegangan tarik yang dipakai. Tegangan tarik akan lebih besar dan terjadi lebih sering untuk suatu struktur yang didesain dengan prategang parsial daripada yang didesain menggunakan prategang penuh.

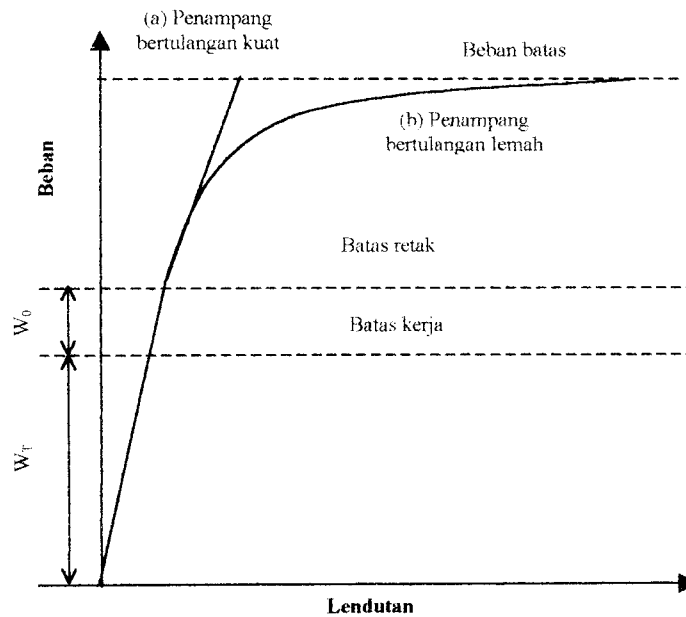
Untuk memberikan keamanan tambahan pada beton prategang parsial, suatu tulangan non-prategang sering ditambahkan untuk memberikan suatu kekuatan batas ultimit yang lebih tinggi pada balok dan memberi kekuatan tambahan untuk memikul tegangan tarik yang terjadi pada beton. Pada struktur jenis ini ada sebagian tulangan yang ditegangkan dan ada sebagian yang tidak (tulangan non-prategang). Suatu struktur prategang dapat dikatakan merupakan prategang parsial bila salah satu atau kedua pernyataan dibawah ini terpenuhi, meskipun kadang-kadang hanya digunakan pernyataan atau kondisi yang pertama saja.

1. Tegangan tarik diijinkan pada saat beton dibebani oleh beban kerja.
2. Sejumlah tulangan non-prategang ditambahkan pada struktur tersebut.

Suatu keuntungan yang penting dari prategang parsial adalah pengurangan lendutan ke atas. Meminimumkan lendutan ke atas adalah penting terutama ketika beban gelagar atau beban mati relatif lebih kecil bila dibandingkan dengan beban rencana total. Meminimumkan lendutan ke atas awal juga berarti menurunkan efek dari rangkai lentur dan mempermudah kontrol dari ketidakseragaman lendutan ke atas tersebut.

Untuk lebih memahami perilaku dari balok prategang parsial, perlu untuk mempelajari dari balok tersebut yaitu dengan memberikan jumlah tulangan dan besar gaya prategang yang berbeda-beda. Perbedaan pada perilaku suatu balok yang bertulangan kuat (*over-reinforced*) dan bertulangan lemah (*under-reinforced*) terlihat dengan membandingkan kurva (a) dan kurva (b) dalam gambar 3.5. Sedangkan perbedaan perilaku dari prategang kuat (*over-prestressed*) dan prategang lemah (*under-prestressed*) dapat dilihat dalam gambar 3.6.

Suatu penampang yang diberi tulangan kuat akan mengalami suatu kegagalan akibat tekan pada beton sebelum tegangan tarik baja melewati batas luluhnya. Deformasi batas dari gaya dan lendutan dari balok adalah kecil dan kegagalan yang terjadi adalah kegagalan getas. Apabila tulangan yang diberikan terlalu kuat, meskipun bajanya tidak diberi gaya prategang, lendutan pada titik sebelum runtuh akan tetap terbatas. Ketika penampang tersebut diberi tulangan lemah, lendutannya akan terus meningkat sangat nyata sebelum kegagalan terjadi, sehingga akan memberikan suatu tanda yang cukup sebelum terjadi keruntuhan. Keruntuhan akan bermula dengan perpanjangan baja yang berlebihan dan berakhir dengan keruntuhan beton secara bertahap pada daerah tekan.



Gambar 3.5 Kurva beban dan lendutan pada tulangan kuat dan lemah

Dalam usaha mencegah terjadinya kegagalan yang tiba-tiba atau keruntuhan yang getas dan juga untuk faktor ekonomis maka suatu beton prategang yang didesain berdasarkan peraturan ACI adalah Under-reinforced. Ketika suatu panampang under-reinforced didesain untuk prategang penuh, yang mensyaratkan tidak terjadinya tegangan tarik pada saat beban kerja, hubungan antara beban dan defleksi diberikan oleh kurva b gambar 3.6. Sebelum retak, penampang akan menahan satu beban tambahan W_o diatas beban kerja W_t , yang besarnya adalah:

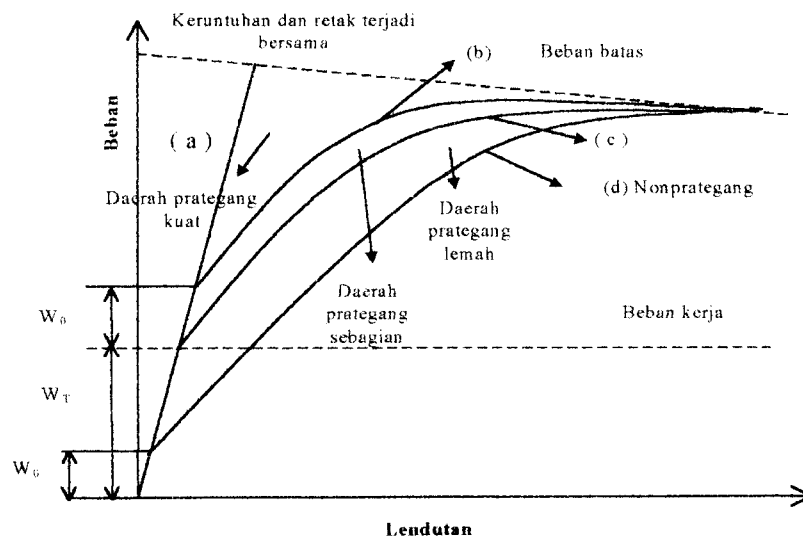
$$W_o = k \cdot \frac{f_r \cdot I_g}{c_b} \quad (3.12)$$

dengan :

k = suatu konstanta yang tergantung pada panjang bentang dan kondisi ujung - ujung

f_r = modulus keruntuhan dari beton (MPa)

c_b = jarak dari cgc ke serat terluar (mm)



Gambar 3.6 Kurva beban lendutan untuk berbagai tingkat prategang

Jika suatu penampang yang sama bertulangan lemah dengan sejumlah baja yang sama diberi suatu prategang yang lebih kecil, sehingga retak baru akan terjadi bila beban kerja tercapai, tegangan tarik akan sama dengan modulus keruntuhan (f_r) di bawah beban layan, hubungan beban lendutan ditunjukkan oleh kurva (c), dengan lendutan pada penampang retak mulai terjadi pada beban layan. Jika balok tidak diberi gaya prategang sama sekali, tetapi masih diberi tulangan dengan jumlah baja yang sama, dan direkatkan pada beton, balok akan berperilaku seperti pada kurva (d). Balok tersebut akan mulai retak ketika beban W_0 tercapai, meskipun kekuatannya tidak banyak berkurang.

Jika balok diberi tulangan gaya prategang tinggi (over-reinforced), balok akan mulai retak bila beban telah melampaui $W_t + W_0$, dan kurva beban lendutan akan berada diantara kurva (a) dan (b), gambar 3.6. Untuk kasus yang ekstrim ketika suatu balok diberi tulangan sangat lemah (very under-reinforced) tetapi diberi gaya prategang yang sangat tinggi (very-over prestressed), retak dan

keruntuhan akan terjadi secara bersamaan sedemikian rupa sehingga keruntuhan getas terjadi. Pada prinsipnya balok prategang parsial akan mempunyai kurva beban lendutan yang terletak diantara kurva (b) dan (d), tergantung dari besarnya prategang. Tetapi dalam pelaksanaannya, retak yang terjadi pada saat beban kerja tidak diijinkan, sehingga kurva lendutan biasanya terletak diantara kurva (b) dan (c), dan jarang berada dibawah kurva (c).

Jumlah prategang yang digunakan tergantung pada type struktur. Untuk struktur yang tidak boleh mengalami retak pada kondisi beban kerja dan sering mengalami beban berlebih, sebaiknya digunakan prategang penuh yang diperlihatkan oleh kurva (b). Untuk struktur yang jarang mengalami beban berlebih, prategang parsial diantara kurva (b) dan (c) dapat diijinkan. Jumlah baja prategang dapat dihemat bila digunakan desain dengan prategang parsial, tetapi jika diinginkan kekuatan batas yang sama, paling tidak harus ditambahkan tulangan non-prategang.

Prategang parsial dapat diperoleh dengan salah satu cara berikut:

1. Dengan menggunakan sejumlah baja berkekuatan tarik yang sama, tetapi sebagian tidak diprategangkan, dengan ini akan dihemat sejumlah penarikan dan pengangkutan, dan dapat meningkatkan kekenyalan tetapi retak terjadi lebih awal dan akan sedikit mengurangi kekuatan batasnya.

2. Dengan menggunakan jumlah baja yang sama, tetapi dengan tingkat penarikan yang rendah, pengaruh dari cara ini sesuai dengan metode (1) tetapi tanpa penghematan angkur ujung.
3. Dengan menggunakan baja prategang yang lebih sedikit dan menambahkan sejumlah tulangan non-prategang akan memberikan kekuatan batas seperti yang diinginkan dan menghasilkan kekenyalan yang lebih besar, tetapi retak akan terjadi lebih awal.

3.4.2 Keuntungan dan Kerugian Penggunaan Prategang Parsial

Dalam pelaksanaannya penggunaan balok prategang parsial mempunyai keuntungan dan kerugian bila dibandingkan dengan balok prategang penuh. Keuntungan dan kerugian diantaranya adalah sebagai berikut:

a) Keuntungan Prategang Parsial

Prategang parsial mempunyai beberapa keuntungan bila dibandingkan dengan prategang penuh, diantaranya adalah sebagai berikut:

1. Pada prategang parsial gaya prategang dan luas penampang baja prategang dapat dikurangi dengan adanya penambahan tulangan-tulangan non-prategang, sehingga kuat lentur yang dihasilkan akan tetap sama untuk memikul beban berfaktor.

2. Pengurangan lendutan ke atas (camber), sehubungan dengan adanya pengurangan gaya prategang yang diberikan.
3. Penggunaan baja non-prategang pada prategang parsial akan meningkatkan daktilitas dan penyerapan energi pada penampang bila terjadi beban berulang pada kondisi inelastis. Hal ini akan memberikan keunggulan dalam desain struktur gempa.
4. Secara ekonomis ada suatu penghematan karena adanya penghematan baja prategang, penghematan penarikan dan pengangkutan ujung.

b) Kerugian Beton Prategang Parsial

Adapun kerugiannya adalah sebagai berikut:

1. Perhitungan beton prategang parsial lebih kompleks, karena analisa dari penampang retak tidak dapat menggunakan teori elastis dalam menghitung tegangan dan lendutan yang terjadi sehubungan dengan gaya prategang dan beban yang bekerja.
2. Pada kondisi beban berlebih lendutan yang terjadi akan lebih besar.
3. Untuk struktur yang membutuhkan kedalaman yang tinggi beton prategang parsial kurang menguntungkan karena retak yang ditimbulkan.
4. Pengurangan kekuatan lentur batas untuk jumlah baja yang sama.

3.5 Perencanaan Balok Prategang

3.5.1 Tinjauan Umum

Proses perhitungan perencanaan balok beton prategang terdiri dari beberapa langkah. Langkah pertama adalah pemilihan bentuk dan ukuran penampang, kemudian peninjauan besar gaya prategang dan eksentrisitas tendon. Berikutnya penentuan tata letak atau layout tendon sepanjang balok, kemudian berdasarkan pada hasil perhitungan tersebut dilakukan pemeriksaan terhadap tegangan yang terjadi

3.5.2 Perencanaan Penampang

a. Tegangan Ijin Beton

tegangan ijin beton sesuai SK SNI T-15-1991-03 adalah sebagai berikut ini.

1. Sesaat setelah pelimpahan (transfer) gaya prategang
 - Tegangan pada tepi desak $f_{ci} = 0.6f_{ci}$
 - Tegangan pada tepi tarik $f_{ti} = 0.25 \sqrt{f_{ci}}$
2. Pada beban kerja setelah terjadi kehilangan gaya prategang
 - Tegangan pada tepi desak $f_{cs} = 0.45f_c$
 - Tegangan pada tepi tarik $f_{ts} = 0.5 \sqrt{f_c}$

b. Menghitung Momen Rencana

- Momen akibat berat sendiri balok

$$M_o = \frac{1}{8} w_o L^2 \quad (3.13)$$

- Momen akibat beban mati

$$M_D = \frac{1}{8} w_D L^2 \quad (3.14)$$

- Momen akibat beban hidup

$$M_L = \frac{1}{8} w_L L^2 \quad (3.15)$$

c. Menghitung Modulus Penampang Rencana

$$S = \frac{(1-R)M_o + (M_D + M_L)}{R \cdot f_{ci} - f_{cs}} \quad (3.16)$$

$$S = \frac{(1-R)M_o + (M_D + M_L)}{f_{ts} - Rf_{ci}} \quad (3.17)$$

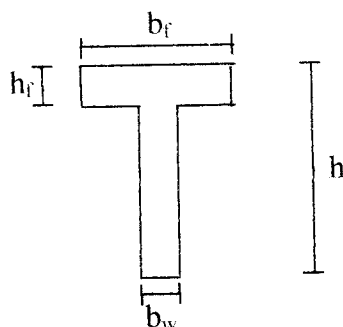
d. Perhitungan Dimensi Penampang

Bentuk-bentuk penampang yang sering kali digunakan untuk beton

Prategang antara lain sebagai berikut :

1. Penampang I simetris
2. Penampang I tak simetris
3. Penampang T
4. Penampang T terbalik
5. Penampang persegi panjang

Dalam studi analisis ini, penampang yang akan dipergunakan dalam perhitungan adalah penampang bentuk T sistem pasca-tarik dengan grouting. Adapun pendekatan untuk menentukan dimensi penampang menurut T.Y Lin adalah :



Taksiran tinggi balok $h = 1/17 L - 1/25 L$

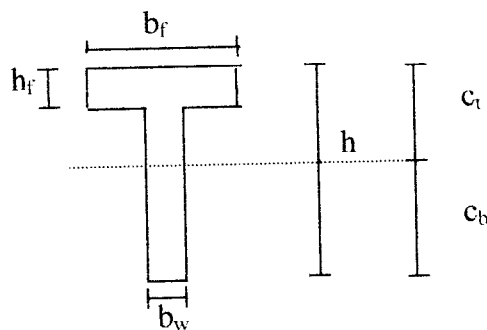
Dari dari tabel C-1 (lampiran 1), pilihlah rasio perbandingan tinggi sayap dan tinggi badan (h_f/h) serta perbandingan lebar badan dan lebar sayap (b_w/b), maka dari tabel C-1 akan diperoleh data-data A , I , c_t , c_b , r^2 .

Sehingga :

$$S_t = I/c_b$$

$$S_b = I/c_t$$

Dimana $S=S_t$, maka dari persamaan persamaan tersebut diatas akan diperoleh dimensi penampang.



Dari dimensi yang telah ditentukan kemudian dihitung properti penampang.

3.5.3 Menghitung Besar Gaya Prategang

1. Untuk beton prategang penuh

- Tegangan beton pada pusat beton

$$f_{cci} = f_{ti} - \frac{c_t}{h} \cdot (f_{ti} - f_{ci}) \quad (3.18)$$

- Gaya prategang awal

$$P_i = |f_{cci}| \cdot A_g \quad (3.19)$$

- Gaya prategang efektif

$$P_e = P_o \cdot R \quad (3.20)$$

dimana $R = (1 - LOP)$

2. Untuk beton prategang parsial

- Gaya prategang awal

$$P_{ip} = (1 - r) \cdot P_i \quad (3.21)$$

dimana $r = (1 - \%prategang \text{ parsial})$

- Gaya prategang efektif

$$P_{ep} = P_{ip} \cdot R \quad (3.22)$$

3.5.4 Menghitung Luas Baja Prategang

Sesaat setelah transfer tegangan tendon maksimum menurut SK SNI T-15-1991-03

$$f_{ps} = 0,74 f_{pu}$$

$$f_{ps} = 0,82 f_{py}$$

Luas baja prategang yang diperlukan

$$A_{ps} = \frac{P_i}{f_{ps}} \quad (3.23)$$

Untuk beton prategang dengan tulangan non-prategang :

Luas baja prategang yang diperlukan

$$A_{psp} = \frac{P_{ip}}{f_{ps1}} \quad (3.24)$$

Luas baja non prategang yang diperlukan

$$M_{np} = A_{psp} \cdot f_{ps1} \cdot \left[d' - \frac{a'}{2} \right] + A_s \cdot f_y \cdot \left[d' - \frac{a'}{2} \right] \quad (3.25)$$

$$A_s = \frac{M_{np} - A_{psp} \cdot f_{ps1} \cdot \left[d' - \frac{a'}{2} \right]}{f_y \cdot \left[d' - \frac{a'}{2} \right]} \quad (3.26)$$

3.5.5 Menghitung Eksentrisitas Tendon

- Serat atas

$$e = (f_{ti} - f_{cci}) \cdot \frac{S_i}{P_i} + \frac{M_o}{P_i} \quad (3.27)$$

- Serat bawah

$$e = (f_{cci} - f_{ci}) \cdot \frac{S_b}{P_i} + \frac{M_o}{P_i} \quad (3.28)$$

- $ER = c_b - d_{ps}$

Kemudian dari perhitungan diatas dipakai eksentrisitas yang terbesar.

3.5.6 Kontrol Tegangan Beton dan Tendon

Saat transfer

- Tegangan Beton

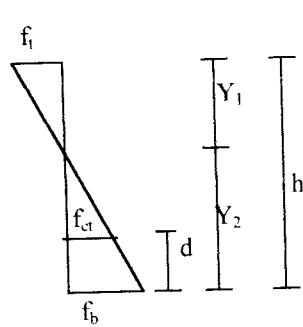
Serat atas

$$f_t = -\frac{P_i}{A_{netto}} + \frac{P_i \cdot e \cdot c_t}{I_{netto}} - \frac{M_o \cdot c_t}{I_{netto}} \leq 0,25 \sqrt{f_c} \quad (3.29)$$

Serat bawah

$$f_b = -\frac{P_i}{A_{netto}} - \frac{P_i \cdot e \cdot c_b}{I_{netto}} + \frac{M_o \cdot c_b}{I_{netto}} \leq 0,6 f_c \quad (3.30)$$

- Tegangan Tendon



$$f_{si} = \frac{P_i}{A_{ps}}$$

$$Y_1 = \frac{f_t}{f_t + f_b} \cdot h$$

$$Y_2 = h - Y_1$$

$$f_{ct} = \frac{Y_2 - d}{Y_2} \cdot f_b$$

saat layan

- Tegangan beton

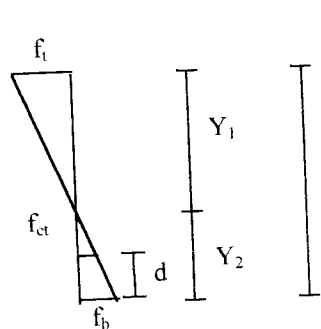
Serat atas

$$f_t = -\frac{P_e}{A_t} + \frac{P_e \cdot e \cdot c_t}{I_t} - \frac{M_T \cdot c_t}{I_t} \leq 0,45 f'_c \quad (3.31)$$

Serat bawah

$$f_b = -\frac{P_e}{A_t} - \frac{P_e \cdot e \cdot c_b}{I_t} + \frac{M_T \cdot c_b}{I_t} \leq 0,5\sqrt{f'_c} \quad (3.32)$$

- Tegangan Tendon



$$f_{sc} = \frac{P_e}{A_{ps}}$$

$$Y_1 = \frac{f_t}{f_t + f_b} \cdot h$$

$$Y_2 = h - Y_1$$

$$f_{ct} = \frac{Y_2 - d}{Y_2} \cdot f_b$$

3.5.7 Menghitung Kapasitas Momen

Seperti pada balok bertulang biasa pada balok prategang juga terdapat dua kondisi rasio penulangan

- Kondisi tulangan kurang (under-reinforced) dimana kehancuran mulai dengan perpanjangan baja yang berlebihan dan diakhiri dengan hancurnya beton

- Kondisi tulangan berlebih (over reinforced) beton akan hancur sebelum baja mencapai tegangan luluhnya, sehingga hanya timbul lendutan yang kecil sebelum hancur.

Sebenarnya tidak ada garis pemisah yang pasti antara persentase penulangan untuk balok bertulangan lebih dan bertulangan kurang. Indeks penulangan (w_p) yang mendekati nilai batas dan menjamin kehancuran plastis diberikan oleh ACI adalah sebagai berikut :

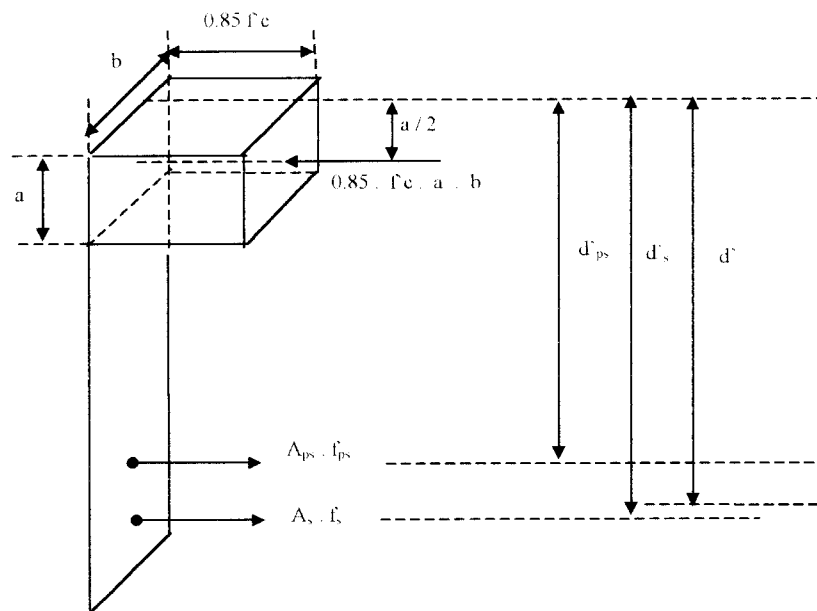
$$w_{ps} = \frac{\rho_{ps} \cdot f_{ps}}{f'_c} \leq 0.3 \quad \text{dengan} \quad \rho_{ps} = \frac{A_{ps}}{b \cdot d'_{ps}}$$

Pada keadaan saat baja prategang (A_{ps}) dan baja non-prategang (A_s) digunakan bersama-sama, maka perbandingan penulangan batas diberikan sebagai berikut:

$$(w_s + w_{ps}) \leq 0.3 \quad \text{dengan} \quad w_s = \frac{\rho_s \cdot f_y}{f'_c} \quad \text{dan} \quad \rho_s = \frac{A_s}{b \cdot d'_s}$$

Analisa tampang akibat lentur adalah menggunakan teori kuat batas ultimit (strength) untuk mengetahui kemampuan batas tampang dalam menahan beban kerja. Jika tendon terekat dengan grouting maka tegangan baja pada kapasitas momen batas balik adalah :

$$f_{ps1} = f_{pu} \left[1 - 0.5 \rho_{ps} \cdot \frac{f_{pu}}{f'_c} \right] \quad (3.33)$$



Gambar 3.7 Kopel pada balok prategang dengan tulangan aktif dan tulangan pasif

Dari gambar diatas maka besarnya momen batas dapat ditentukan

1. Untuk penampang tanpa tulangan non-prategang

$$C = T_1 \quad \text{dimana}$$

C adalah gaya desak pada beton, dan dengan metode Whitney didapat

$$C = 0,85 \cdot f'_c \cdot b \cdot a \text{ dan}$$

T_1 adalah gaya tarik pada tendon

$$T_1 = A_{ps} \cdot f_{psl}$$

Dengan menyamakan kedua persamaan tersebut

$$0,85 \cdot f'_c \cdot a \cdot b = A_{ps} \cdot f_{psl}$$

$$a = \frac{A_{ps} \cdot f_{psl}}{0,85 \cdot f'_c \cdot b}$$

Maka momen nominal penampang adalah

$$M_n = A_{ps} \cdot f_{psl} \left(d'_{ps} - \frac{a}{2} \right) \quad (3.34)$$

2. Untuk penampang dengan tulangan non-prategang

$$C = T_1 + T_2$$

T_2 adalah gaya tarik pada tulangan non - prategang yang besarnya

$$T_2 = A_s \cdot f_y$$

Dengan menyamakan kedua persamaan tersebut

$$0,85 \cdot f'_c \cdot a \cdot b = A_{ps} \cdot f_{ps} + A_s \cdot f_y$$

$$a' = \frac{A_{ps} \cdot f_{ps1} + A_s \cdot f_y}{0,85 \cdot f'_c \cdot b}$$

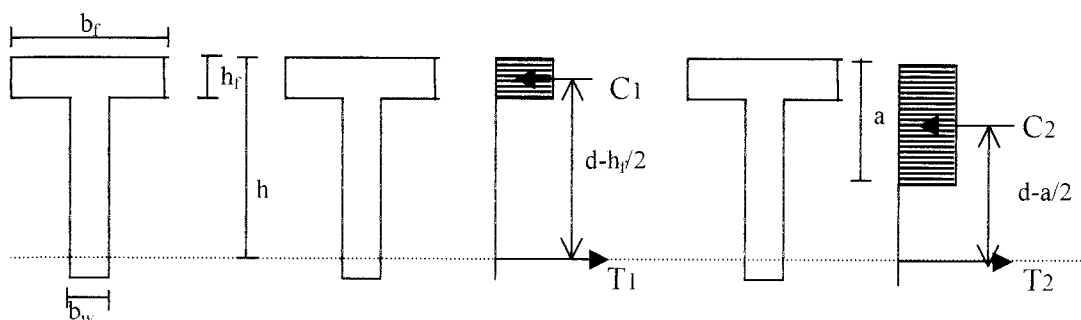
$$d' = \frac{A_{ps} \cdot f_{ps1} \cdot d'_{ps} + A_s \cdot f_y \cdot d'_s}{A_{ps} \cdot f_{ps1} + A_s \cdot f_y}$$

Maka momen nominal penampang adalah

$$M_n = A_{ps} \cdot f_{ps1} \left(d' - \frac{a'}{2} \right) + A_s \cdot f_y \cdot \left(d' - \frac{a'}{2} \right) \quad (3.35)$$

Dalam menghitung kapasitas momen batas pada balok tampang T, terlebih dahulu perlu diketahui letak blok desak pada penampang beton. Keadaan tersebut diatas dapat digolongkan menjadi jika :

1. Blok desak terjadi di badan ($a > h_f$)



$A_{pw} = A_{ps} - A_{pf}$ dimana

$$A_{pf} = 0,85 \cdot f'_c \cdot (b_f - b_w) \cdot h_f / f_{ps}$$

Bila $w_p > 0,3$

1. Untuk penampang tanpa tulangan non - prategang

$$M_n = \left[A_{pw} \cdot f_{ps1} \cdot a' \left(d'_{ps} - \frac{a'}{2} \right) + 0,85 \cdot f'_c \cdot (b_f - b_w) \cdot h_f \cdot \left(d'_{ps} - \frac{h_f}{2} \right) \right] \quad (3.36)$$

2. Untuk penampang dengan tulangan non - prategang

$$M_n = \left[A_{pw} \cdot f_{ps1} \cdot a' \left(d' - \frac{a'}{2} \right) + 0,85 \cdot f'_c \cdot (b_f - b_w) \cdot h_f \cdot \left(d' - \frac{h_f}{2} \right) \right] \quad (3.37)$$

Bila $w_p < 0,3$

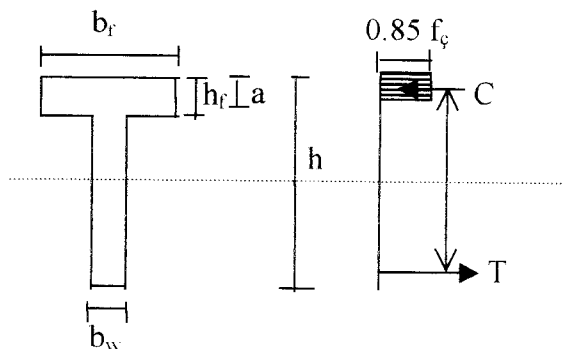
1. Untuk penampang tanpa tulangan non - prategang

$$M_n = \left[A_{ps} \cdot f_{ps1} \cdot \left(d'_{ps} - \frac{a'}{2} \right) \right] \quad (3.38)$$

2. Untuk penampang dengan tulangan non - prategang

$$M_n = \left[A_{ps} \cdot f_{ps1} \cdot \left(d' - \frac{a'}{2} \right) + A_s \cdot f_y \cdot \left(d' - \frac{h_f}{2} \right) \right] \quad (3.39)$$

2. Blok desak terjadi di sayap ($a < h_f$)



$$A_{pw} = A_{ps} - A_{pf}$$

$$A_{pf} = 0,85 \cdot f'_c \cdot (b_f - b_w) \cdot \frac{h_f}{f_{ps1}}$$

Bila $w_p > 0,3$

1. Untuk penampang tanpa tulangan non - prategang

$$M_n = 0,85 \cdot f'_c \cdot b_f \cdot (d'_{ps})^2 \quad (3.40)$$

2. Untuk penampang dengan tulangan non - prategang

$$M_n = 0,85 \cdot f'_c \cdot b_f \cdot (d')^2 \quad (3.41)$$

Bila $w_p < 0,3$

1. Untuk penampang tanpa tulangan non - prategang

$$M_n = \left[A_{ps} \cdot f_{ps1} \cdot \left(d'_{ps} - \frac{a}{2} \right) \right] \quad (3.42)$$

2. Untuk penampang dengan tulangan non - prategang

$$M_n = \left[A_{ps} \cdot f_{ps1} \cdot \left(d' - \frac{a'}{2} \right) + A_s \cdot f_y \cdot \left(d' - \frac{h_f}{2} \right) \right] \quad (3.43)$$

3.6 Lendutan

3.6.1 Umum

Lendutan didefinisikan sebagai perubahan posisi suatu titik dari batang sebelum bekerjanya beban hingga beban bekerja. Masalah lendutan ini harus dicermati secara serius karena kemampuan layanan (servicability) suatu struktur diantaranya ditentukan oleh lendutan. Lendutan pada balok prategang terdiri dari dua jenis yaitu lendutan jangka pendek (lendutan seketika) dan lendutan jangka panjang. Lendutan jangka pendek pada balok prategang dipengaruhi oleh beban yang bekerja dan gaya prategang yang diberikan. Pada lendutan jangka panjang selain dipengaruhi oleh beban yang bekerja dan gaya prategang yang diberikan, juga dipengaruhi faktor susut dan rangkai.

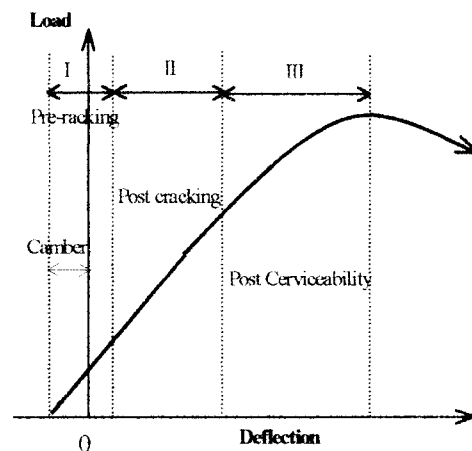
Anggapan-anggapan yang dipakai dalam menghitung lendutan pada beton prategang :

1. Tampang melintang bruto beton dianggap cukup akurat untuk menghitung momen inersia.
2. modulus elastis beton $E_c = 4700\sqrt{f'_c}$ dimana nilai f'_c adalah nilai kuat desak beton silinder pada umur E_c dievaluasi.
3. Prinsip superposisi diterapkan dalam lendutan yang disebabkan oleh beban layan dan lendutan keatas (camber) yang disebabkan oleh gaya prategang.
4. Semua perhitungan lendutan dapat diperhitungkan pada pusat gaya berat tendon (cgc) dimana tendon dianggap sebagai tendon tunggal.
5. Lendutan yang diakibatkan oleh geser diabaikan.
6. Tampang dianggap elastis sampai pada beban batas, setelah itu pada keadaan retak momen inersia retak dapat memberikan pendekatan yang akurat terhadap camber.

3.6.2 Hubungan Antara Beban dan Lendutan

Lendutan jangka pendek dihitung berdasarkan asumsi bahwa beton adalah homogen dan elastis. Seperti dalam setiap komponen beton, kesulitan masih ditemukan jika ingin meramalkan lendutan beton secara akurat. Kesulitan yang ditemukan adalah dalam menentukan nilai E_c yang tepat mengingat nilai tersebut berubah untuk besar tegangan yang berbeda dan berubah menurut usia dari beton. Kesulitan lainnya adalah dalam memperkirakan akibat rangkai terhadap lendutan, karena nilai koefisien rangkai seperti besar dan lamanya beban bekerja

tidak dapat diperkirakan terlebih dahulu. Untuk tujuan praktis ketelitian dari 10% sampai dengan 20% seringkali cukup dan dapat dicapai jika semua faktor diperhitungkan secara hati-hati.



Gambar 3.8 Kurva hubungan antara beban dan lendutan

1. Precracking stage : pada masa ini tegangan tarik yang diakibatkan oleh beban jauh lebih kecil dari tegangan tarik runtuh beton (f_r). Nilai modulus elastis beton (E_c) dapat dihitung dengan persamaan ACI:

$$E_c = 4700\sqrt{f'_c} \quad (3.44)$$

$$f_r = 0.5\sqrt{f'_c} \quad (3.45)$$

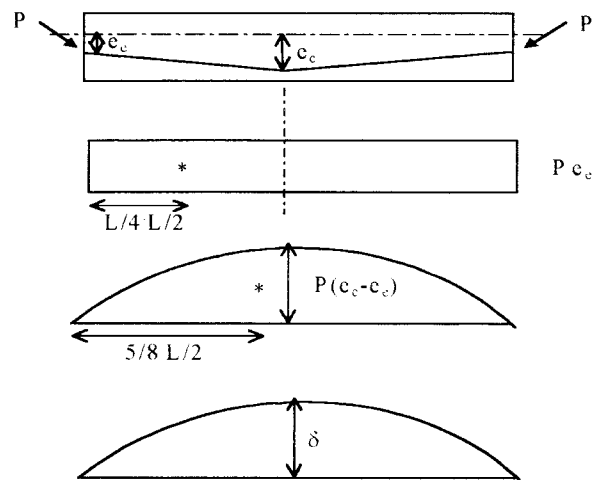
Nilai inersia penampang bruto masih dapat digunakan dalam menghitung lendutan. Masa ini berakhir pada saat beton mengalami retak yang pertama kali terjadi.

2. Post cracing stage : masa ini biasa terjadi pada masa beban servis bekerja pada balok. Pada masa ini lendutan menyebabkan lendutan yang mengakibatkan retak pada balok tetapi masih dalam batas toleransi. Retak mulai terjadi pada bagian-bagian balok dan akan semakin lebar dan dalam di tengah bentang pada balok dengan tumpuan sederhana. Ketika retak-retak mulai berlanjut, kontribusi beton dalam menahan lendutan semakin berkurang.
3. Post servicability cracking stage : pada masa ini secara struktural beton sudah mengalami kegagalan, regangan pada baja ϵ_s meningkat dibawah regangan luluh baja ϵ_y tanpa penambahan beban. Balok terus melendut tanpa penambahan beban, retak terus membuka, garis netral terus bergerak mendekati serat desak. Akhirnya untuk yang kedua, kegagalan desak pada beton terjadi diakibatkan oleh momen maksimum yang diikuti dengan runtuhnya beton.

3.6.3 Perhitungan Lendutan Jangka Pendek

Perhitungan lendutan menggunakan formula standar bagi struktur berperilaku elastik. Lendutan komponen struktur merupakan fungsi dari panjang bentang, perletakan dan kondisi ujung, jenis beban dan kekakuan lentur komponen. Lendutan maksimum adalah :

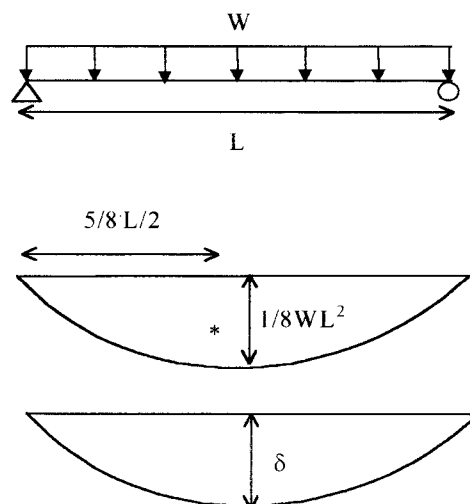
- Lendutan akibat gaya prategang



$$\delta = -\frac{P \cdot e_c}{EI} \cdot \frac{L}{2} \cdot \frac{L}{4} - \frac{P \cdot (e_c - e_c)}{EI} \cdot \frac{3}{2} \cdot \frac{L}{2} \cdot \frac{5}{8} \cdot \frac{L}{2}$$

$$\delta = -\frac{1}{8} \cdot \frac{P \cdot e_c \cdot L^2}{EI} - \frac{5}{48} \cdot \frac{P \cdot (e_c - e_c) \cdot L^2}{EI} \quad (3.46)$$

- Lendutan akibat beban merata



$$\delta = +\frac{3}{2} \cdot \frac{W \cdot L^2}{EI} \cdot \frac{2}{3} \cdot \frac{L}{2} \cdot \frac{5}{8} \cdot \frac{L}{2}$$

$$\delta = +\frac{5}{384} \cdot \frac{W \cdot L^4}{EI} \quad (3.47)$$

a) Pada Saat Transfer

Pada saat transfer dimana beban luar belum bekerja lendutan hanya diakibatkan oleh gaya prategang dan berat sendiri balok. Pada tahap pembebanan ini momen inersia bruto masih dapat digunakan dalam perhitungan karena balok dianggap belum mengalami retak. Nilai modulus elastisitas beton pada masa ini dihitung menurut ACI:

$$E_{ci} = 4700\sqrt{f'_{ci}} \quad (3.48)$$

$$f'_{ci} = 0.8f'_c \quad (3.49)$$

sehingga,

1. Lendutan akibat gaya prategang

$$\delta_{pi} = \frac{p_i \cdot e_e \cdot L^2}{8 \cdot E_{ci} \cdot I_g} - \frac{5 \cdot p_i \cdot (e_c - e_e) \cdot L^2}{48 \cdot E_{ci} \cdot I_g} \quad (3.50)$$

2. Lendutan akibat berat sendiri

$$\delta_o = \frac{5 \cdot W_o \cdot L^4}{384 \cdot E_{ci} \cdot I_g} \quad (3.51)$$

Lendutan total

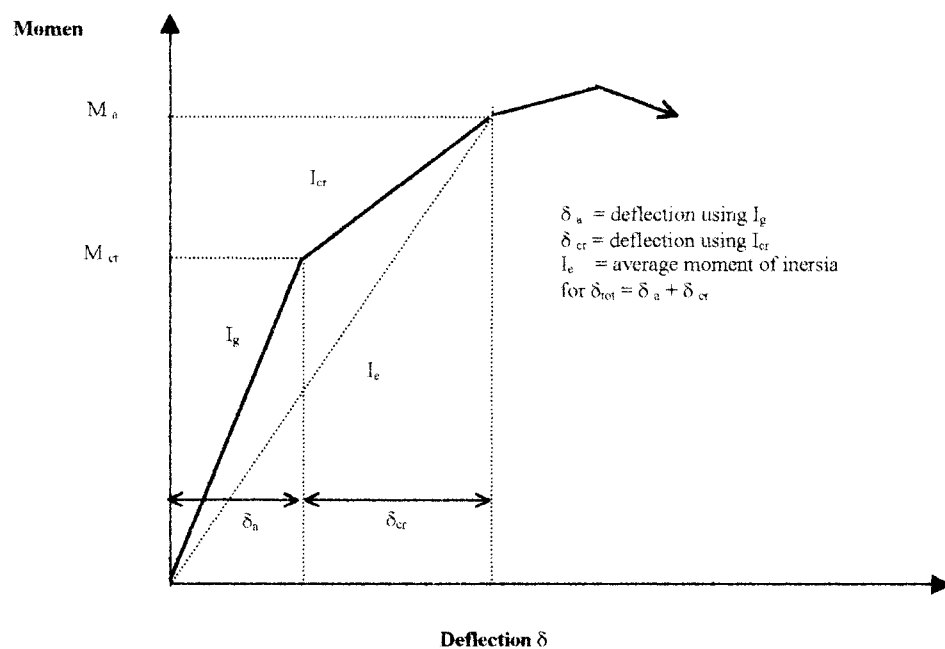
$$\delta_{total} = \delta_{pi} - \delta_o \quad (3.52)$$

b) Pada Saat Layan

Faktor yang berpengaruh

- Momen inersia balok

Pada tahap pembebanan ini beton dianggap telah mengalami retak sehingga secara teoritis dalam perhitungannya menggunakan momen inersia retak. Meskipun demikian pendekatan dengan cara menjumlahkan secara numerik dari lendutan sepanjang bentang tidak dapat dibenarkan karena kesulitan dalam mengevaluasi lendutan. Konsekuensinya harus ada suatu nilai momen inersia yang dapat mewakili nilai momen inersia penampang dalam menahan lendutan pada tahap pembebanan ini.



Gambar 3.9 Kurva hubungan antara momen dan lendutan

Sebuah rumus yang dikembangkan oleh Branson memberikan nilai momen inersia efektif yang dianggap cukup mewakili nilai tersebut adalah:

$$I_e = I_{cr} + \left(\frac{M_{cr}}{M_a} \right)^3 (I_g - I_{cr}) \leq I_g \quad (3.53)$$

dimana :

I_g = momen inersia penampang bruto (mm^4)

I_e = momen inersia penampang efektif (mm^4)

I_{cr} = momen inersia penampang retak (mm^4)

$I_{cr} = (n_{ps} \cdot A_{ps} \cdot d_{ps}^2) \left(1 - 1.6 \sqrt{n_{ps} \cdot \rho_{ps}} \right)$ untuk prategang penuh

$I_{cr} = (n_{ps} \cdot A_{ps} \cdot d_{ps}^2 + n_s \cdot A_s \cdot d_s^2) \left(1 - 1.6 \sqrt{n_{ps} \cdot \rho_{ps} + n_s \cdot \rho_s} \right)$ untuk prategang parsial

$$n_{ps} = \frac{E_{ps}}{E_c}$$

$$n_s = \frac{E_s}{E_c}$$

$$\rho_{ps} = \frac{A_{ps}}{b \cdot d_{ps}} \quad (\text{rassio penulangan prategang})$$

$$\rho_s = \frac{A_s}{b \cdot d_s} \quad (\text{rassio penulangan non - prategang})$$

sehingga,

1. Lendutan akibat beban mati

$$\delta_D = \frac{5 \cdot W_D \cdot L^4}{384 \cdot E_c \cdot I_e} \quad (3.54)$$

2. Lendutan akibat beban hidup

$$\delta_L = \frac{5 \cdot W_L \cdot L^4}{384 \cdot E_c \cdot I_e} \quad (3.55)$$

Lendutan total

$$\delta_{\text{total}} = \delta_D - \delta_L \quad (3.56)$$

3.6.4 Perhitungan Lendutan Jangka Panjang

Faktor yang berpengaruh

- Kehilangan gaya prategang

Analisis keseluruhan dan desain dari komponen struktur beton prategang akan menyertakan pertimbangan gaya-gaya efektif dari tendon prategang pada setiap tahap pembebanan, bersama-sama dengan sifat bahan yang berlaku pada saat berfungsinya struktur itu yang tergantung pada waktu. Perkiraan yang masuk akal dapat menjamin kinerja yang memuaskan pada beban kerja. Pada sebagian besar keadaan, kekuatan tidak akan berubah karena perkiraan kehilangan gaya prategang yang sedikit lebih besar atau lebih kecil. Analisis yang sangat terperinci dari kehilangan gaya prategang pada waktu merancang komponen struktur pategang mungkin tidak perlu. Namun kemampuan kerja dari komponen prategang pada setiap tahapan pembebanan menjadi penting, disamping jaminan kekuatan yang cukup. Kehilangan gaya prategang dapat diperkirakan dengan lebih terinci sebagai berikut:

1. Kehilangan gaya prategang akibat pergerakan dudukan jangkar

Pada saat kabel ditarik dan dongkrak dilepaskan untuk mentransfer gaya prategang kepada beton, pasak-pasak yang dipasang untuk memegang kawat tendon dapat menggelincir sebelum kawat tendon menempatkan diri secara kokoh diantara pasak pasak tersebut. Pada umumnya besar pergerakan dudukan jangkar berkisar antara 1/4 inci (6.35 mm) sampai dengan 3/8 inci (9.53mm).

Kehilangan tegangan akibat pergeseran dudukan jangkar

$$\Delta f_s = \frac{\Delta \cdot E_{ps}}{L} \quad (3.57)$$

$$\text{Persentase kehilangan gaya prategang, } \Delta f_{s1} = \frac{\Delta f_s \cdot A_{ps}}{F_o} \cdot 100\% \quad (3.58)$$

dengan

Δ = Pergerakan dudukan jangkar (mm)

L = Panjang kabel tendon (mm)

A_{ps} = Luas penampang kabel (mm²)

F_o = Gaya prategang pada kabel (MPa)

E_s = Modulus elastis tendon (MPa)

2. Kehilangan gaya prategang akibat rangkai pada beton

Kehilangan gaya prategang akibat rangkai pada komponen struktur untuk tendon terikat dihitung dengan persamaan berikut.

$$\Delta f_s = K_{cr} \cdot \frac{E_{ps}}{E_c} \cdot (f_{cir} - f_{cds}) \quad (3.59)$$

$$\text{Persentase kehilangan gaya prategang, } \Delta f_{s2} = \frac{\Delta f_s \cdot A}{F_o} \cdot 100\% \quad (3.60)$$

dimana

$K_{cr} = 2.0$ untuk komponen struktur pra - tarik

$K_{cr} = 1.6$ untuk komponen struktur pasca - tarik

E_c = Modulus elastis beton umur 28 hari (MPa)

f_{cds} = Tegangan beton pada titik berat tendon akibat seluruh beban mati yang bekerja pada struktur setelah diberi gaya prategang (MPa)

3. Kehilangan gaya prategang akibat susut pada beton

Susut beton pada balok prategang mengakibatkan perpendekan tendon yang ditarik, berarti mengakibatkan kehilangan tegangan. Kehilangan gaya prategang akibat susut beton.

$$\Delta f_s = K_{SH} \cdot \epsilon_{ps} E_{ps} \quad (3.61)$$

$$\text{Persentase kehilangan gaya prategang, } \Delta f_{s_2} = \frac{\Delta f_s \cdot A_{ps}}{F_o} \cdot 100\% \quad (3.62)$$

dimana

$$\epsilon_{ps} = 8.2 \cdot 10^{-6} \left(1 - 0.06 \frac{V}{H} \right) (100 - RH) \quad (3.63)$$

$\frac{V}{H}$ = Perbandingan volume terhadap luas permukaan dalam inci

RH = Kelembaban relatif

K_{SH} = Koefisien susut (lampiran 3)

4. Akibat relaksasi dari tegangan tendon

Perubahan regangan baja yang konstan pada tendon bila terjadi rangkai yang tergantung waktu. Menurut komisi ACI – ASTM, kehilangan tegangan pada tendon akibat relaksasi dari tegangan tendon.

$$\Delta f_s = (K_{re} - J(SH + CR + ES)) \cdot C \quad (3.64)$$

dimana

SH = Δf_s akibat susut beton (MPa)

CR = Δf_s akibat rangkai beton (MPa)

ES = Δf_s akibat perpendekan elastis beton beton (MPa)

K_{re} , J dan C adalah nilai - nilai yang dapat diambil dari tabel (lampiran 4 dan 5)

Pada penyusunan tugas akhir ini menggunakan beton prategang sistem pasca-tarik. Pada prategang sistem pasca-tarik jika sebuah tendon ditarik dan dijangkarkan, beton akan memendek, karena gaya pada kabel dihitung setelah



perpendekan elastis pada beton, maka pada beton tersebut tidak ada kehilangan gaya prategangan ($CR=0$).

5. Kehilangan tegangan akibat gesekan tendon

Pada kasus balok pasca-tarik, apabila tendon lurus atau parabola ditarik, maka terjadi gesekan pada dinding saluran yang akan mengakibatkan kehilangan tegangan. Kehilangan tegangan ini akan bertambah besar sesuai dengan bertambahnya jarak dari dongkrak. Besarnya Kehilangan tegangan akibat gesekan tendon adalah

$$\Delta f_{pF} = f_{Pi}(\mu\alpha + KL) \quad (3.65)$$

dimana

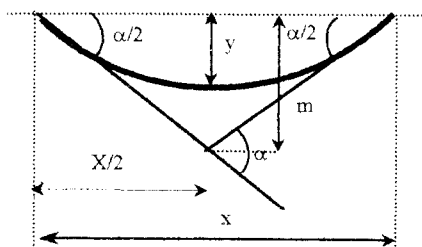
f_{Pi} = Tegangan awal pada tendon (MPa)

K = Koefisien gesekan pergoyangan (koefisien wobble)

μ = Koefisien gesekan lengkung

α = Perubahan sudut kabel dari ujung dongkrak ke titik x (dalam radian)

Nilai perubahan sudut kabel untuk tendon parabola adalah sebagai berikut :



$$\tan \frac{\alpha}{2} = \frac{m}{x/2} = \frac{2m}{x}$$

$$\text{jika } y = 1/2 m \text{ dan } \alpha/2 = 4y/x$$

$$\text{maka } \alpha = 8y/x \text{ radian}$$

- Rangkak Beton

Rangkak adalah penambahan pada regangan seiring dengan waktu yang diakibatkan oleh beban tetap (mati). Deformasi atau regangan yang diakibatkan oleh ketergantungan waktu adalah merupakan fungsi dari jumlah beban yang bekerja, durasi pembebanan, propertis beton termasuk proporsi campuran dan kondisi lingkungannya. Jika hubungan tegangan-regangan yang diakibatkan oleh rangkak adalah masih dalam kondisi linear, maka koefisien rangkak dapat ditentukan sebagai berikut:

$$\varepsilon_{CU} = \frac{\varepsilon_{CR}}{\varepsilon_{EL}} \quad (3.66)$$

$$\varepsilon_{CR} = \varepsilon_{EL} + \varepsilon_{CU} \quad (3.67)$$

$$\varepsilon_{CU} = \rho_u \cdot f_{ci} \quad (3.68)$$

dimana

ε_{CR} = regangan rangkak

ε_{EL} = regangan elastis beton.

ε_{CU} = regangan tambahan akibat rangkak

ρ_u = koefisien unit rangkak biasa disebut specific creep

Koefisien rangkak ultimit dihitung dengan

$$\varepsilon = \rho_u \cdot E_c \quad (3.69)$$

Nilai koefisien rangkai berkisar antara 2 dan 4, dengan nilai rata-rata 2.35 untuk rangkai ultimit.

kemudian koefisien rangkai pada setiap waktu dalam hari ditentukan sebagai :

$$C_t = \frac{t^{0.60}}{10 + t^{0.60}} C_U \quad (3.70)$$

- Waktu

Perhitungan lendutan jangka panjang sangat tergantung terhadap waktu, hal ini berkaitan dengan kehilangan gaya prategang akibat rangkai sangat tergantung terhadap waktu. Komisi PCI untuk kehilangan prategang mengembangkan suatu cara yang membagi-bagi riwayat komponen struktur beton menjadi minimum dalam empat tahapan waktu.

Langkah	Waktu permulaan, t	Waktu akhir, t
1	Pratarik: Pengangkuran baja yang diberi gaya prategang Pasca-tarik Akhir dari Perawatan beton	Umur saat beton diberi gaya prategang
2	Akhir langkah 1	Umur = 30 hari, atau waktu pada saat komponen struktur dibebani oleh beban berat selain beratnya sendiri
3	Akhir langkah 2	Umur = 1 tahun
4	Akhir langkah 3	Akhir masa berfungsinya

$$\begin{aligned}
K_a &= \text{faktor yang berhubungan dengan umur beton pada saat penambahan beban} \\
&= 1.25 \cdot t^{-0.118} \quad \text{untuk beton ringan} \\
&= 1.13 \cdot t^{-0.095} \quad \text{untuk beton normal} \\
K_r &= 1 \cdot \left(1 + \frac{A_s}{A_{ps}} \right) \quad \text{ketika } \frac{A_s}{A_{ps}} \ll 1.0
\end{aligned} \tag{3.71}$$

Perhitungan lendutan

$$\begin{aligned}
\delta_{T-i} &= -\delta_{pi} \left(1 - \frac{\Delta P}{P_0} + \lambda (K_r C_t) \right) + \delta_0 (1 + K_r C_t) \\
&\quad + \delta_D (1 + K_a K_r C_t) + \delta_L
\end{aligned} \tag{3.72}$$

dimana

δ_{pi} = lendutan akibat gaya prategang (mm)

ΔP = kehilangan gaya prategang termasuk kehilangan gaya prategang elastis

$$\lambda = 1 - \frac{\Delta P}{P_0}$$

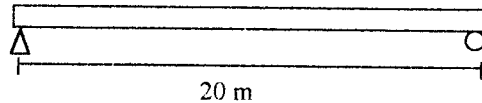
P_0 = gaya prategang saat transfer setelah kehilangan gaya prategang elastis
= P_i dikurangi kehilangan gaya prategang elastis

C_t = koefisien rangkai terhadap waktu

3.6.5 Kontrol Lendutan

ACI menyatakan bahwa perhitungan lendutan diperlukan untuk memberikan / memenuhi syarat layanan struktur untuk berbagai kondisi seperti tercantum dalam (lampiran 6). Sebagai catatan efek jangka panjang menyebabkan kemungkinan pembesaran lendutan / camber seiring dengan bertambahnya waktu. Tegangan yang berlebihan pada beton menjadikan suatu keharusan / kebutuhan untuk menghitung lendutan jangka panjang.

BAB IV PERHITUNGAN



4.1 Perencanaan Balok Prategang

- Balok tampang T
- Panjang balok 20 m
- Baja Prategang
 - $f_{pu} = 1860 \text{ MPa}$
 - $f_{py} = 0.85 \cdot f_{pu} = 0.85 \cdot 1860 = 1581 \text{ MPa}$
- Baja Non Prategang: $f_y = 360 \text{ MPa}$
- $f'_c = 45 \text{ MPa}$
- $f'_{ci} = 0.8 \cdot f'_c = 0.8 \cdot 45 = 36 \text{ MPa}$
- $E_{ci} = 4700 \sqrt{f'_{ci}} = 4700 \sqrt{0.8 \cdot 45} = 28200 \text{ MPa}$
- $E_c = 4700 \sqrt{f'_c} = 4700 \sqrt{45} = 31528.56 \text{ MPa}$
- $n_{ps} = \frac{E_{ps}}{E_c} = \frac{1.98 \cdot 10^5}{31528.56} = 6.218 \approx 6$
- $n_s = \frac{E_s}{E_c} = \frac{2.2 \cdot 10^5}{31528.56} = 7.097 \approx 7$
- Tegangan Ijin
 - Saat Awal
 - Serat Bawah (tekan) $f_{ci} = 0.60 \cdot f'_{ci} = 0.60 \cdot 36 = -21.6 \text{ MPa}$
 - Serat Atas (Tarik) $f_{ti} = 0.25 \cdot \sqrt{f'_{ci}} = 0.25 \cdot \sqrt{36} = +1.5 \text{ MPa}$
 - Saat Akhir
 - Serat Bawah (tarik) $f_{ts} = 0.5 \cdot \sqrt{f'_c} = 0.5 \cdot \sqrt{45} = +3.35 \text{ MPa}$
 - Serat Atas (tekan) $f_{cs} = 0.45 \cdot f'_c = 0.45 \cdot 45 = -20.25 \text{ MPa}$
- Kehilangan Gaya Prategang: 20 %

Rencana beban

- Beban sendiri = $[(h_f \cdot b_f) + (h_w \cdot b_w)] \cdot B_{j_{\text{beton}}}$
 $= [(0.2 \cdot 0.4) + (0.85 \cdot 0.25)] \cdot 24$
 $= 7 \text{ KN/m}$

• Beban mati

$$B_{j_{\text{beton}}} = 24 \text{ KN/m}^3$$

$$B_{j_{\text{pasir}}} = 18 \text{ KN/m}^3$$

$$\text{Ubin per cm tebal} = 0.24 \text{ KN/m}^2$$

$$\text{Spesi per cm tebal} = 0.21 \text{ KN/m}^2$$

Jarak balok 3.5 M

$$\text{Pelat 20 cm} = 0.20 \cdot 24 \cdot (3.5 - 0.4) = 14.38 \text{ KN/m}$$

$$\text{Ubin 2 cm} = 2 \cdot 0.24 \cdot 3.5 = 1.68 \text{ KN/m}$$

$$\text{Spesi 2 cm} = 2 \cdot 0.21 \cdot 3.5 = 0.735 \text{ KN/m}$$

$$\text{Pasir 2 cm} = 0.02 \cdot 18 \cdot 3.5 = 1.26 \text{ KN/m} +$$

$$= 18 \text{ KN/m}$$

• Beban hidup

Jarak antar balok 3.5 m

$$\text{Beban untuk garasi} = 2.5 \text{ KN/m}^2$$

$$\text{Beban hidup} = 3.5 \cdot 2.5 = 8.75 \text{ KN/m}$$

a) Momen momen yang bekerja

Akibat berat sendiri (W_o)

$$M_o = 1/8 \cdot W_o \cdot L^2 = 1/8 \cdot 7 \cdot 20^2 = 350 \text{ KNm}$$

Akibat beban mati (W_D)

$$M_D = 1/8 \cdot W_D \cdot L^2 = 1/8 \cdot 18 \cdot 20^2 = 900 \text{ KNm}$$

Akibat beban hidup (W_L)

$$M_L = 1/8 \cdot W_L \cdot L^2 = 1/8 \cdot 8.75 \cdot 20^2 = 437.5 \text{ KNm}$$

b) Menghitung modulus penampang rencana

$$S_t = \frac{(1 - R) \cdot M_o + M_D + M_L}{R \cdot f_{ti} - f_{cs}} = \frac{((1 - 0.8) \cdot 350 + 900 + 437.5) \cdot 10^6}{0.8 \cdot 1.5 - (-20.25)}$$

$$= 65617715.62 \text{ mm}^3$$

$$S_b = \frac{(1 - R) \cdot M_o + M_D + M_L}{f_{ts} - R \cdot f_{ci}} = \frac{((1 - 0.8) \cdot 350 + 900 + 437.5) \cdot 10^6}{3.35 - 0.8 \cdot (-21.6)}$$

$$= 68225884.63 \text{ mm}^3$$

$$\rightarrow \text{diambil } S = 68225884.63 \text{ mm}^3$$

c) Perhitungan dimensi penampang

$$\text{Diambil } h = 1/17 \cdot$$

4.1.1 Prategang Penuh Sistem PASCA-TARIK dengan Grouting

Dari lampiran I

$$\text{Diambil } \frac{b_w}{b} = 0.3$$

$$\frac{h_f}{h} = 0.2$$

$$c_t = 0.374 \cdot h$$

$$c_b = 0.626 \cdot h$$

$$I = 0.0408 \cdot b \cdot h^3$$

$$A = 0.440 \cdot b \cdot h^3$$

$$S_t = I / c_t = \frac{0.0408 \cdot b \cdot h^3}{0.374 \cdot h} = 0.1091 \cdot b \cdot h^2$$

$$S_b = I / c_b = \frac{0.0408 \cdot b \cdot h^3}{0.626 \cdot h} = 0.0692 \cdot b \cdot h^2$$

$$S = S_t \rightarrow 68225884.63 = 0.1091 \cdot b \cdot h^2$$

$$= \frac{68225884.63}{0.1091 \cdot 1100^2} = 496.8197 \text{ diambil } 500 \text{ mm}$$

$$h = 1100 \text{ mm}$$

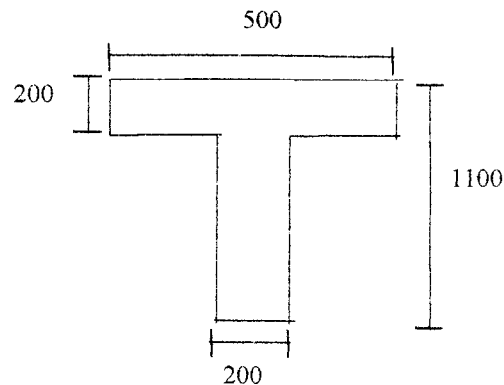
$$b = 500 \text{ mm}$$

$$h_f = 0.2 \cdot h = 0.2 \cdot 1100 \approx 200 \text{ mm}$$

$$b_w = 0.3 \cdot b = 0.3 \cdot 500 \approx 200 \text{ mm}$$

$$A = 0.440 \cdot b \cdot h = 0.440 \cdot 500 \cdot 1100 = 242000 \text{ mm}^2$$

$$I = 0.0408 \cdot b \cdot h^3 = 0.0408 \cdot 500 \cdot 1100^3 = 2.71 \cdot 10^{10} \text{ mm}^4$$



$$\text{Luas sayap} = A_f = 500 \cdot 200 = 100000$$

$$\text{Luas badan} = A_w = 900 \cdot 200 = 180000 +$$

$$A_g = 280000$$

$$W_o = A_g \cdot b_{j\text{beton}}$$

$$= 280000 \cdot 10^{-6} \cdot 24 = 6.72 \text{ KN/m} < W_D \text{ taksiran} = 7 \text{ KN/m}$$

$$M_o = 1/8 \cdot W_o \cdot L^2 = 1/8 \cdot 6.72 \cdot 20^2 = 336 \text{ KNm}$$

d) Menghitung gaya prategang awal

Tegangan beton pada pusat beton (f_{cci})

$$f_{cci} = f_{ti} - \frac{c_t}{h} \cdot (f_{ti} - f_{ci})$$

$$= 1.5 - \frac{445.6487}{1100} \cdot (1.5 - (-21.6))$$

$$= -7.1394 \text{ MPa}$$

gaya prategang awal

$$P_i = |f_{cci}| \cdot A_g$$

$$P_i = |-7.1394| \cdot 280000$$

$$= 3250 \text{ KN}$$

gaya prategang efektif

$$P_e = P_i \cdot R$$

$$P_e = 3250 \cdot 0.8$$

$$= 2600 \text{ KN}$$

e) Menghitung luas baja prategang

Sesaat setelah transfer tegangan tendon maksimum menurut SKSNI T - 15 - 1991 - 03

$$f_{ps} = 0.74 \cdot f_{pu} = 0.74 \cdot 1860 = 1376.4 \text{ MPa}$$

$$f_{ps} = 0.82 \cdot f_{py} = 0.82 \cdot 1581 = 1296.42 \text{ MPa}$$

dipakai $f_{ps} = 1296.42 \text{ MPa}$

Luas baja prategang yang diperlukan

$$A_{ps} = \frac{P_i}{f_{ps}}$$

$$= \frac{2600 \cdot 10^3}{1296.42}$$

$$= 2405.59 \text{ mm}^2$$

Dipakai tendon dengan ukuran dimensi kabel $\Phi 1/2 \text{ inc}$

$$A_p = 1/4 \cdot \pi \cdot 1/2 \text{ inc} = 0.19625 \text{ inc} = 126.61 \text{ mm}^2$$

Dari lampiran 2

Dipakai tendon model 27K5

- 27 kabel dalam satu tendon dengan kabel $\Phi 1/2 \text{ inc}$

- Selongsong $\Phi 85.73$ dengan luas selongsong 7121.9616 mm

f) Rencana tata letak tendon

perencanaan PASCA - TARIK dipakai A_{netto}

$$A_{\text{netto}} = A_g - A_{ps}$$

$$\begin{aligned} A_{\text{netto}} &= 280000 - 7121.9616 \\ &= 274228.29 \text{ mm} \end{aligned}$$

Mencari titik berat penampang

$$c_t = \frac{\left[h_f \cdot b_f \cdot (h_f / 2) + b_w \cdot h_w \cdot (h_f + h_w / 2) - A_{ps} (h - d_{ps}) \right]}{A_{\text{netto}}}$$

$$\begin{aligned} c_t &= \frac{\left[200 \cdot 500 \cdot (1 \cdot 200) + 200 \cdot 900 \cdot (200 + 900 / 2) - 7121.9616 (1100 - 270) \right]}{274228.29} \\ &= 445.6489 \text{ mm} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} c_b &= h - c_t \\ &= 1100 - 445.6489 \\ &= 654.3513 \text{ mm} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} ER &= c_b - d_{ps} \\ &= 654.3513 - 270 \\ &= 384.3513 \text{ mm} \end{aligned}$$

$$I_{\text{netto}} = 1/12 \cdot b_f \cdot h_f^3 + A_f \cdot (c_t - h_f / 2)^2 + 1/12 \cdot b_w \cdot h_w^3 + A_w \cdot (c_b - h_w / 2)^2 - A_{ps} \cdot ER^2$$

$$\begin{aligned} I_{\text{netto}} &= 1/12 \cdot 500 \cdot 200^3 + 100000 \cdot (445.6489 - 1100 / 2)^2 \\ &\quad + 1/12 \cdot 200 \cdot 900^3 + 180000 (654.3513 - 900 / 2)^2 \\ &\quad - 7121.9616 \cdot 384.3513^2 \\ &= 3.1691 \cdot 10^{10} \text{ mm}^4 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} S_t &= \frac{I_{\text{netto}}}{c_t} \\ &= \frac{3.1691 \cdot 10^{10}}{445.6489} = 7.0889 \cdot 10^7 \text{ mm}^3 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} S_b &= \frac{I_{\text{netto}}}{c_b} \\ &= \frac{3.1691 \cdot 10^{10}}{654.3513} = 4.8279 \cdot 10^7 \text{ mm}^3 \end{aligned}$$

Menghitung eksentrisitas tendon

$$e_c = (f_{li} - f_{cci}) \cdot \frac{S_t}{P_i} + \frac{M_o}{P_i}$$

$$= (1.5 - (-7.1394)) \cdot \frac{7.0889 \cdot 10^7}{3250 \cdot 10^3} + \frac{336 \cdot 10^6}{3250 \cdot 10^3}$$

$$= 291.8295 \text{ mm}$$

$$e_c = (f_{cci} - f_{ci}) \cdot \frac{S_b}{P_i} + \frac{M_o}{P_i}$$

$$= (-7.194 - (-21.6)) \cdot \frac{4.8279 \cdot 10^7}{3250 \cdot 10^3} + \frac{336 \cdot 10^6}{3250 \cdot 10^3}$$

$$= 318.2016 \text{ mm}$$

Dipakai e_c yang terbesar $e_c = 318.2016 \text{ mm}$

Kontrol tegangan (sistem PASCA TARIK dengan grouting)

Tegangan beton

→ Saat transfer

$$f_t = -\frac{P_i}{A_{netto}} + \frac{P_i \cdot e_c \cdot c_t}{I_{netto}} - \frac{M_o \cdot c_t}{I_{netto}}$$

$$= -\frac{3250 \cdot 10^3}{274228.29} + \frac{3250 \cdot 10^3 \cdot 318.2016 \cdot 445.6486}{3.1591 \cdot 10^{10}} - \frac{336 \cdot 10^6 \cdot 445.6486}{3.1591 \cdot 10^{10}} \leq 0.25 \sqrt{f'_{ci}}$$

$$= -0.1003 \text{ MPa} \leq +1.5 \text{ MPa}$$

$$f_b = -\frac{P_i}{A_{netto}} - \frac{P_i \cdot e_c \cdot c_b}{I_{netto}} + \frac{M_o \cdot c_b}{I_{netto}}$$

$$= -\frac{3250 \cdot 10^3}{274228.29} - \frac{3250 \cdot 10^3 \cdot 318.2016 \cdot 654.3513}{3.1591 \cdot 10^{10}} + \frac{336 \cdot 10^6 \cdot 654.3513}{3.1691 \cdot 10^{10}} \leq 0.6 \cdot f'_{ci}$$

$$= -21.5312 \text{ MPa} \leq -21.6 \text{ MPa}$$

→ saat layan

Dipakai penampang transformasi

$$A_t = A_g + (n_{ps} - 1) \cdot A_{ps}$$

$$= 280000 + (6 - 1) \cdot 7121.9616 <$$

$$= 303086.84 \text{ mm}^2$$

Mencari titik berat penampang

$$c_t = \frac{[h_f \cdot b_f \cdot (h_f / 2) + b_w \cdot h_w \cdot (h_f + h_w / 2) - A_c (1/2h - d_{ps})]}{A_t}$$

$$c_t = \frac{[200 \cdot 500 \cdot (200 / 2) + 200 \cdot 900 \cdot (200 + 900 / 2) - (6 - 1) \cdot 7121.9616 \cdot (1/2 \cdot 1100 - 270)]}{303086.84}$$

$$= 451.9602 \text{ mm}$$

$$\begin{aligned}c_b &= h - c_t \\ &= 1100 - 451.9602 \\ &= 648.0397 \text{ mm}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}ER &= c_b - d_{ps} \\ &= 648.0397 - 270 \\ &= 384.3513 \text{ mm}\end{aligned}$$

$$I_t = 1/12 \cdot b_f \cdot h_f^3 + A_f \cdot (c_t - h_f/2)^2 + 1/12 \cdot b_w \cdot h_w^3 + A_w (c_b - h_w/2)^2 + (n_p - 1)A_{ps} \cdot ER^2$$

$$\begin{aligned}I_t &= 1/12 \cdot 500 \cdot 200^3 + 100000 \cdot (451.9602 - 1100/2)^2 \\ &\quad + 1/12 \cdot 200 \cdot 900^3 + 180000(648.0397 - 900/2)^2 \\ &\quad + (6 - 1) \cdot 7121.9616 \cdot 384.3513^2 \\ &= 3.4164 \cdot 10^{10} \text{ mm}^4\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}f_t &= -\frac{P_e}{A_t} + \frac{P_e \cdot e_c \cdot c_t}{I_t} - \frac{M_T \cdot c_t}{I_t} \\ &= -\frac{2600 \cdot 10^3}{303086.84} + \frac{2600 \cdot 10^3 \cdot 318.2016 \cdot 451.9602}{3.4164 \cdot 10^{10}} - \frac{1673.5 \cdot 10^6 \cdot 451.9602}{3.4164 \cdot 10^{10}} \leq 0.45 \cdot f'_c \\ &= -18.8201 \text{ MPa} \leq -20.25 \text{ MPa}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}f_b &= -\frac{P_e}{A_t} - \frac{P_e \cdot e_c \cdot c_b}{I_t} + \frac{M_T \cdot c_b}{I_t} \\ &= -\frac{2600 \cdot 10^3}{303086.84} - \frac{2600 \cdot 10^3 \cdot 318.2016 \cdot 648.0397}{3.4164 \cdot 10^{10}} + \frac{1673.5 \cdot 10^6 \cdot 648.0397}{3.4164 \cdot 10^{10}} \leq 0.5 \cdot \sqrt{f'_c} \\ &= -0.287 \text{ MPa} \leq +3.35 \text{ MPa}\end{aligned}$$

Tegangan tendon

→ saat transfer

$$f_i = \frac{P_i}{A_{ps}} = \frac{3250 \cdot 10^3}{2405.59} = 1351.0199 \text{ MPa}$$

$$f_{ct} = \frac{(h - d_{ps}) \cdot f_b}{h} = \frac{(1100 - 270) \cdot 21.9312}{1100} = -16.5481 \text{ MPa}$$

$$\begin{aligned}f_{pi} &= f_i + n_{ps} \cdot f_{ct} \\ &= 1351.0199 + 6 \cdot (-16.5481) \\ &= 1251.7314 < 1296.42 \text{ MPa}\end{aligned}$$

→ saat layan

$$f_e = \frac{P_e}{A_{ps}} = \frac{2600 \cdot 10^3}{2405.59} = 1080.8159 \text{ MPa}$$

$$f_{ct} = \frac{(h - d_{ps}) \cdot f_b}{h} = \frac{(1100 - 270) \cdot -0.287}{1100} = -0.2165 \text{ MPa}$$

$$\begin{aligned} f_{ps} &= f_e + n_{ps} \cdot f_{ct} \\ &= 1080.8159 + 6 \cdot (-0.2165) \\ &= 1079.5166 < 1296.42 \text{ MPa} \end{aligned}$$

Menghitung kapasitas momen

$$f'_c = 45 \text{ MPa}$$

$$P_e = 2600 \cdot 10^3 \text{ N}$$

$$A_{ps} = 2405.59 \text{ mm}^2$$

$$f_{pu} = 1860 \text{ MPa}$$

$$\rho_{ps} = \frac{A_{ps}}{b \cdot d'_{ps}} = \frac{2405.59}{500 \cdot (1100 - 270)} = 0.0057$$

$$f_{ps1} = f_{pu} \cdot \left[1 - 0.5 \cdot \rho_{ps} \cdot \frac{f_{pu}}{f'_c} \right]$$

$$f_{ps1} = 1860 \cdot \left[1 - 0.5 \cdot 0.0057 \cdot \frac{1860}{45} \right] = 1615.8121 \text{ MPa}$$

$$w_{ps} = \frac{\rho_{ps} \cdot f_{ps1}}{f'_c} \leq 0.3$$

$$\begin{aligned} w_{ps} &= \frac{0.0057 \cdot 1615.8121}{45} \\ &= 0.00204 < 0.3 \end{aligned}$$

Menentukan kedalaman blok desak

$$a = \frac{A_{ps} \cdot f_{ps1}}{0.85 \cdot \beta_1 \cdot b \cdot f'_c}$$

$$a = \frac{2405.59 \cdot 1615.8121}{0.85 \cdot 0.73 \cdot 500 \cdot 45}$$

$$a = 278.4121 \text{ mm} > h_f = 200 \text{ mm (di badan)}$$

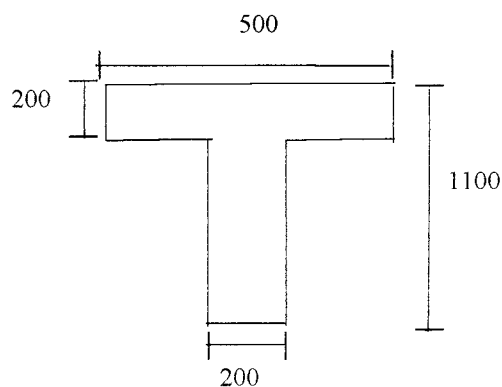
c) Luas tulangan pasif yang dibutuhkan

$$M_n = A_{psp} \cdot f_{psl} \cdot (d'_{ps} - a/2) + A_s \cdot f_y \cdot (d'_s - a/2)$$

$$A_s = \frac{M_n - A_{psp} \cdot f_{psl} \cdot (d'_{ps} - a/2)}{f_y \cdot (d'_s - a/2)}$$

$$= \frac{3425 \cdot 10^6 - (2256.2132 \cdot 10^3 \cdot 1615.8121 \cdot (830 - 278.4121 \cdot 2))}{360 \cdot (1060 - 278.4121 \cdot 2)} = 2662.2307 \text{ mm}^2$$

d) Rencana tata letak tendon



Perencanaan PASCA - TARIK dipakai A_{cnetto}

$$A_{netto} = A_g - A_{ps} - A_s$$

$$= 280000 - 5771.71 - 2662.2307$$

$$= 271566.0593 \text{ mm}^2$$

Mencari titik berat penampang

$$c_t = \frac{[h_f \cdot b_f \cdot (h_f / 2) + b_w \cdot h_w \cdot (h_f + h_w / 2) - A_{ps}(h - d_{ps}) - A_s(h - d_s)]}{A_{netto}}$$

$$= \frac{[200 \cdot 500 \cdot (200 / 2) + 200 \cdot 900 \cdot (200 + 900 / 2) - 5771.71(1100 - 270) - 2662.2307(1100 - 40)]}{271566.0593}$$

$$= 439.6260 \text{ mm}$$

$$c_b = h - c_t$$

$$= 1100 - 439.6260$$

$$= 660.3739 \text{ mm}$$

$$ER = c_b - d_{ps}$$

$$= 660.3739 - 270$$

$$= 390.3739 \text{ mm}$$

$$I_{\text{netto}} = 1/12 \cdot b_f \cdot h_f^3 + A_f \cdot (c_t - h_f / 2)^2 + 1/12 \cdot b_w \cdot h_w^3 + A_w \cdot (c_b - h_w / 2)^2 - [A_{ps} \cdot ER^2 + A_s \cdot (c_b - 40)^2]$$

$$I_{\text{netto}} = 1/12 \cdot 500 \cdot 200^3 + 100000 \cdot (439.6260 - 1100 / 2)^2 + 1/12 \cdot 200 \cdot 900^3 + 180000(660.3739 - 900 / 2)^2 - [5771.71 \cdot 390.3739^2 + 2662.2307 \cdot (660.3739 - 40)^2]$$

$$= 3.0631 \cdot 10^{10} \text{ mm}^4$$

$$S_t = \frac{I_{\text{netto}}}{c_t}$$

$$= \frac{3.0631 \cdot 10^{10}}{439.6260} = 69676521.68 \text{ mm}^3$$

$$S_b = \frac{I_{\text{netto}}}{c_b}$$

$$= \frac{3.0631 \cdot 10^{10}}{660.3739} = 46385256.31 \text{ mm}^3$$

Menghitung eksentrisitas tendon

$$e_c = (f_{ti} - f_{cci}) \cdot \frac{S_t}{P_i} + \frac{M_o}{P_i}$$

$$= (1.5 - (-7.1394)) \cdot \frac{69676521.68}{2925 \cdot 10^3} + \frac{336 \cdot 10^6}{2925 \cdot 10^3}$$

$$= 320.6712 \text{ mm}$$

$$e_c = (f_{cci} - f_{ci}) \cdot \frac{S_b}{P_i} + \frac{M_o}{P_i}$$

$$= (-7.1394 - (-21.6)) \cdot \frac{46385256.31}{2925 \cdot 10^3} + \frac{336 \cdot 10^6}{2925 \cdot 10^3}$$

$$= 344.1909 \text{ mm}$$

Dipakai e_c yang terbesar $e_c = 344.1909 \text{ mm}$

Kontrol tegangan (sistem PASCA TARIK dengan grouting)

Tegangan beton

→ Saat transfer

$$f_t = -\frac{P_i}{A_{\text{netto}}} + \frac{P_i \cdot e_c \cdot c_t}{I_{\text{netto}}} - \frac{M_o \cdot c_t}{I_{\text{netto}}}$$

$$= -\frac{3250 \cdot 10^3}{271566.0593} + \frac{3250 \cdot 10^3 \cdot 344.1909 \cdot 439.6260}{3.0631 \cdot 10^{10}} - \frac{336 \cdot 10^6 \cdot 439.6260}{3.0631 \cdot 10^{10}} \leq +0.25 \sqrt{f'_{ci}}$$

$$= -0.2315 \text{ MPa} \leq +1.5 \text{ MPa}$$

$$f_b = -\frac{P_i}{A_{\text{netto}}} - \frac{P_i \cdot e_c \cdot c_b}{I_{\text{netto}}} + \frac{M_o \cdot c_b}{I_{\text{netto}}}$$

$$= -\frac{3250 \cdot 10^3}{271566.0593} - \frac{3250 \cdot 10^3 \cdot 344.1909 \cdot 660.3739}{3.0631 \cdot 10^{10}} + \frac{336 \cdot 10^6 \cdot 660.3739}{3.0631 \cdot 10^{10}} \leq -0.6 \cdot f'_{ci}$$

$$= -21.4483 \text{ MPa} \leq -21.6 \text{ MPa}$$

→ Saat layan

Dipakai penampang transformasi

$$A_t = A_g + (n_{ps} - 1)A_{ps} + (n_s - 1)A_s$$

$$= 280000 + (6 - 1) \cdot 5771.71 + (7 - 1) \cdot 2662.2307$$

$$= 316397.9937 \text{ mm}^2$$

Mencari titik berat penampang

$$c_t = \frac{[h_f \cdot b_f \cdot (h_f / 2) + b_w \cdot h_w \cdot (h_f + h_w / 2) + (n_{ps} - 1)A_{ps}(h - d_{ps}) + (n_s - 1)A_s(h - d_s)]}{A_t}$$

$$c_t = \frac{[200 \cdot 500 \cdot (200 / 2) + 200 \cdot 900 \cdot (200 + 900 / 2) + (6 - 1)5771.71 \cdot (1100 - 270) + (7 - 1)2662.2307 \cdot (1100 - 40)]}{316397.9937}$$

$$= 483.1387 \text{ mm}$$

$$c_b = h - c_t$$

$$= 1100 - 483.1387$$

$$= 616.8612 \text{ mm}$$

$$ER = c_b - d_{ps}$$

$$= 616.8612 - 270$$

$$= 320.6712 \text{ mm}$$

$$\begin{aligned}
I_t &= 1/12 \cdot b_f \cdot h_f^3 + A_f \cdot (c_t - h_f / 2)^2 + 1/12 \cdot b_w \cdot h_w^3 + A_w \cdot (c_b - h_w / 2)^2 \\
&\quad + (n_{ps} - 1)A_{ps} \cdot ER^2 + (n_s - 1)A_s \cdot (c_b - 40) \\
I_t &= 1/12 \cdot 500 \cdot 200^3 + 100000(483.1387 - 1100 / 2)^2 \\
&\quad + 1/12 \cdot 200 \cdot 900^3 + 180000(616.8612 - 900 / 2)^2 + (6 - 1) \cdot 5771.71 \cdot (1100 - 270)^2 \\
&\quad + (7 - 1) \cdot 2662.2307 \cdot (616.8612 - 40)^2 \\
&= 4.1551 \cdot 10^{10} \text{ mm}^4
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
f_t &= -\frac{P_e}{A_t} + \frac{P_e \cdot e_c \cdot c_t}{I_t} - \frac{M_T \cdot c_t}{I_t} \\
&= -\frac{2925 \cdot 10^3}{316397.9937} + \frac{2925 \cdot 10^3 \cdot 344.1909 \cdot 483.1387}{4.1551 \cdot 10^{10}} - \frac{1675.5 \cdot 10^6 \cdot 483.1387}{4.1551 \cdot 10^{10}} \leq -0.45 \cdot f'_c \\
&= -19.2922 \text{ MPa} \leq -20.25 \text{ MPa} \\
f_b &= -\frac{P_e}{A_t} - \frac{P_e \cdot e_c \cdot c_b}{I_t} + \frac{M_T \cdot c_b}{I_t} \\
&= -\frac{2340 \cdot 10^3}{316397.9937} + \frac{2340 \cdot 10^3 \cdot 344.1909 \cdot 616.8612}{4.1551 \cdot 10^{10}} - \frac{1675.5 \cdot 10^6 \cdot 616.7612}{4.1551 \cdot 10^{10}} \leq +0.5 \cdot \sqrt{f'_c} \\
&= +2.358 \leq +3.35 \text{ MPa}
\end{aligned}$$

Tegangan tendon

→ saat transfer

$$\begin{aligned}
f_{ip} &= \frac{P_{ip}}{A_{psp}} = \frac{2950 \cdot 10^3}{2152.37} = 1358.9670 \text{ MPa} \\
Y_1 &= \frac{f_t}{f_t + f_b} \cdot h = \frac{0.2315}{0.2315 + 21.4423} \cdot 1100 = 11.5888 \text{ mm} \\
Y_2 &= h - Y_1 = 1100 - 11.5888 = 1088.4111 \text{ mm} \\
f_{ct} &= \frac{Y_2 - d}{Y_2} \cdot f_b = \frac{1088.4111 - 270}{1088.4111} \cdot -21.4423 \\
&= -16.3487 \text{ MPa} \\
f_{pip} &= f_{ip} + n_{ps} \cdot f_{ct} \\
&= 1358.9670 + 6 \cdot (-16.3487) \\
&= 1260.8747 < 1296.42 \text{ MPa}
\end{aligned}$$

→ saat layan

$$f_{ip} = \frac{P_{ip}}{A_{psp}} = \frac{2340 \cdot 10^3}{2152.37} = 1087.1736 \text{ MPa}$$

$$Y_1 = \frac{f_t}{f_t + f_b} \cdot h = \frac{19.2922}{19.2922 + 2.358} \cdot 1100 = 980.1951 \text{ mm}$$

$$Y_2 = h - Y_1 = 1100 - 980.1951 = 119.8048 \text{ mm}$$

$$f_{ct} = \frac{d - Y_2}{Y_2} \cdot f_a = \frac{270 - 119.8048}{980.1951} \cdot (-19.2922) = -2.9561 \text{ MPa}$$

$$\begin{aligned} f_{pip} &= f_{ip} + n_{ps} \cdot f_{ct} \\ &= 1087.1736 + 6 \cdot (-2.9561) \\ &= 1069.4368 < 1296.42 \text{ MPa} \end{aligned}$$

$$\rho_{ps} = \frac{A_{ps}}{b \cdot d'_{ps}} = \frac{2152.37}{500 \cdot (1100 - 270)} = 0.00518$$

$$\rho_s = \frac{A_s}{b \cdot d'_s} = \frac{2662.2307}{500 \cdot (1100 - 270)} = 0.00502$$

$$w_{ps} = \frac{\rho_{ps} \cdot f_{ps1}}{f'_c} = \frac{0.00518 \cdot 1615.8121}{45} = 0.1859$$

$$w_s = \frac{\rho_s \cdot f_y}{f'_c} = \frac{0.00502 \cdot 360}{45} = 0.0401$$

$$w_{ps} + w_s = 0.1859 + 0.0401 = 0.2261 \leq 0.3$$

Menentukan kedalaman blok desak

$$a = \frac{A_{ps} \cdot f_{ps1} + A_s \cdot f_y}{0.85 \cdot \beta_1 \cdot b \cdot f'_c}$$

$$a = \frac{2152.37 \cdot 1615.8121 + 2662.2307 \cdot 360}{0.85 \cdot 0.73 \cdot 500 \cdot 45}$$

$$a = 253.0683 > h_f = 200 \text{ mm (di badan)}$$

$$d' = \frac{A_{ps} \cdot f_{ps1} \cdot d'_{ps} + A_s \cdot f_y \cdot d'_s}{A_{ps} \cdot f_{ps1} + A_s \cdot f_y}$$

$$d' = \frac{2152.37 \cdot 1615.8121 \cdot 830 + 2662.2307 \cdot 360 \cdot 1060}{2152.37 \cdot 1615.8121 + 2662.2307 \cdot 360}$$

$$d' = 879.6892 \text{ mm}$$

$$M_n = A_{ps} \cdot f_{psl} \cdot (d' - a'/2) + A_s \cdot f_y \cdot (d' - h_f/2)$$

$$M_n = 2152.37 \cdot 1615.8121 \cdot (879.6892 - 253.0683/2) + 2662.2307 \cdot 360 \cdot (879.6892 - 200/2)$$

$$M_n = 3666.5983 \text{ KNm}$$

$$M_{ult} = 1.2M_D + 1.6M_L$$

$$M_{ult} = 1.2 \cdot 1336 + 1.6 \cdot 437.5$$

$$M_{ult} = 2303.2 \text{ KNm}$$

$$M_{n \text{ perlu}} = \frac{2343.2}{0.8} = 3425 \text{ KNm} < M_n = 3666.5983 \text{ KNm}$$

4.2 Lendutan Jangka Pendek

$$A_g = h_f \cdot b_f + b_w \cdot h_w$$

$$A_g = 200 \cdot 500 + 200 \cdot 900$$

$$= 280000 \text{ mm}^2$$

Mencari titik berat penampang

$$c_t = \frac{[h_f \cdot b_f \cdot (h_f / 2) + b_w \cdot h_w \cdot (h_f + h_w / 2)]}{A_g}$$

$$c_t = \frac{[200 \cdot 500 \cdot (1 / 200) + 200 \cdot 900 \cdot (200 + 900 / 2)]}{280000}$$

$$= 453.5714 \text{ mm}$$

$$c_b = h - c_t$$

$$= 1100 - 453.5714$$

$$= 646.4285 \text{ mm}$$

$$I_g = 1/12 \cdot b_f \cdot h_f^3 + A_f \cdot (c_t - h_f / 2)^2 + 1/12 \cdot b_w \cdot h_w^3 + A_w \cdot (c_b - h_w / 2)^2$$

$$I_g = 1/12 \cdot 500 \cdot 200^3 + 100000 \cdot (453.5714 - 1100 / 2)^2$$

$$+ 1/12 \cdot 200 \cdot 900^3 + 180000(646.4285 - 900 / 2)^2$$

$$= 3.1929 \cdot 10^{10} \text{ mm}^4$$

$$S_t = \frac{I_g}{c_t}$$

$$= \frac{3.1329 \cdot 10^{10}}{453.5714} = 70396325.46 \text{ mm}^3$$

$$S_b = \frac{I_g}{c_b}$$

$$= \frac{3.1329 \cdot 10^{10}}{646.4385} = 49394106.81 \text{ mm}^3$$

Menghitung eksentrisitas tendon

$$e_c = (f_{ti} - f_{cci}) \cdot \frac{S_t}{P_i} + \frac{M_o}{P_i}$$

$$= (1.5 - (-7.1394)) \cdot \frac{70396325.46}{3250 \cdot 10^3} + \frac{336 \cdot 10^6}{3250 \cdot 10^3}$$

$$= 290.5175 \text{ mm}$$

$$e_c = (f_{cci} - f_{ci}) \cdot \frac{S_b}{P_i} + \frac{M_o}{P_i}$$

$$= (-7.1394 - (-21.6)) \cdot \frac{49394106.81}{3250 \cdot 10^3} + \frac{336 \cdot 10^6}{3250 \cdot 10^3}$$

$$= 323.1595 \text{ mm}$$

Dipakai e_c yang terbesar $e_c = 323.1595 \text{ mm}$

eksentrisitas tendon pada dukungan

$$e_c = (f_{ti} - f_{cci}) \cdot \frac{S_t}{P_i}$$

$$= (1.5 - (-7.1394)) \cdot \frac{70396325.46}{3250 \cdot 10^3}$$

$$= 187.1329 \text{ mm}$$

$$r^2 = \frac{I_g}{A_g} = \frac{3.1929 \cdot 10^{10}}{280000} = 114034.8639 \text{ mm}^2$$

4.2.1 Prategang Penuh Sistem PASCA-TARIK dengan Grouting

→ Saat Transfer

Lendutan akibat gaya prategang

$$\delta_{pi} = -\frac{P_i \cdot e_c \cdot L^2}{8 \cdot E_{ci} \cdot I_g} - \frac{5 \cdot P_i \cdot (e_c - e_e) \cdot L^2}{48 \cdot E_{ci} \cdot I_g}$$

$$= -\frac{3250 \cdot 10^3 \cdot 187.1329 \cdot 20^2 \cdot 10^6}{8 \cdot 28200 \cdot 3.1929 \cdot 10^{10}} - \frac{5 \cdot 3250 \cdot 10^3 \cdot (323.1595 - 187.1329) \cdot 20^2 \cdot 10^6}{48 \cdot 28200 \cdot 3.1929 \cdot 10^{10}}$$

$$= -33.7729 \text{ mm} (\uparrow) - 20.347 \text{ mm} (\uparrow) = -54.119 \text{ mm} (\uparrow)$$

Lendutan akibat berat sendiri

$$\delta_o = +\frac{5 \cdot W_o \cdot L^4}{384 \cdot E_{ci} \cdot I_g}$$

$$= +\frac{5 \cdot 6.72 \cdot 20^4 \cdot 10^{12}}{384 \cdot 28200 \cdot 3.1929 \cdot 10^{10}}$$

$$= +15.5483 \text{ mm} (\downarrow)$$

Lendutan total

$$\begin{aligned}\delta_t &= \delta_{pi} + \delta_o \\ &= -54.2295 \text{ mm}(\uparrow) + 15.5483 \text{ mm}(\downarrow) = -38.6812 \text{ mm}(\uparrow)\end{aligned}$$

→ Saat layan

Menghitung kehilangan gaya prategang

1. Akibat rangkai beton

$$\Delta f_s = K_{cr} \frac{E_{ps}}{E_c} (f_{cir} - f_{cds})$$

$$K_{cr} = 1.6$$

$$E_{ps} = 1.98 \cdot 10^5 \text{ KN/mm}^2$$

$$E_c = 31528.56 \text{ KN/mm}^2$$

$$f_{cds} = \frac{M_{DL} \cdot e}{I_t} = \frac{(900 + 437.5) \cdot 10^6}{3.4164 \cdot 10^{10}} = 9.4589 \text{ Mpa}$$

$$\begin{aligned}f_{cir} &= -\frac{P_i}{A_t} \left(1 + \frac{e^2}{r^2}\right) + \frac{M_{DL} \cdot e}{I_t} \\ &= -\frac{3250 \cdot 1000}{280000} \left(1 + \frac{323.1595^2}{114034.8639}\right) + \frac{(900 + 437.5) \cdot 10^6 \cdot 323.1595}{34164475579} \\ &= 12.1159 \text{ MPa}\end{aligned}$$

$$\Delta f_s = 1.6 \frac{1.98 \cdot 10^5}{31528.56} (12.1159 - 9.4589) = 26.697 \text{ MPa}$$

% kehilangan gaya prategang

$$\Delta f_{s1} = \frac{\Delta f_s \cdot A_{ps}}{P_o} = \frac{26.697 \cdot 2405.59}{3250} \cdot 100\% = 1.9760\%$$

2 Akibat susut beton

$$\Delta f_s = K_{SH} \cdot \epsilon_{ps} \cdot E_s$$

$$K_{SH} = 0.58 \text{ (lampiran 3)}$$

$$\epsilon_{ps} = 8.2 \cdot 10^{-6} \left(1 - 0.06 \frac{V}{H}\right) (100 - RH)$$

$$\begin{aligned}\frac{V}{H} &= \frac{\text{keliling penampang beton}}{\text{luas penampang beton}} = \frac{(2 \cdot 900 + 200 + 500 + 2 \cdot 200 + (500 - 200)) \cdot 25.4}{280000 \cdot 25.4^2} \\ &= 3.445\end{aligned}$$

$$RH = 70$$

$$\Delta f_s = 8.2 \cdot 10^6 \cdot 0.58 \cdot 1.98 \cdot 10^5 \cdot (1 - 0.06 \cdot 3.445)(100 - 70)$$

$$= 27.667 \text{ MPa}$$

% kehilangan gaya prategang

$$\Delta f_{s_2} = \frac{\Delta f_s \cdot A_{ps}}{P_o} = \frac{27.667 \cdot 2405.59}{3250} \cdot 100\% = 2.047\%$$

3. Akibat relaksasi tendon

$$\Delta f_s = (K_{re} - J(SH + CR + ES)) \cdot C$$

$$SH = 27.667 \text{ MPa}$$

$$CR = 26.697 \text{ MPa}$$

$$K_{re} = 35 \text{ MPa}, J = 0.15 \text{ dan } C = 1.36 \text{ (lampiran 4)}$$

$$\Delta f_s = (35 - 0.15(27.667 + 26.697)) \cdot 1.36$$

$$= 37.046 \text{ MPa}$$

% kehilangan gaya prategang

$$\Delta f_{s_3} = \frac{\Delta f_s \cdot A_{ps}}{P_o} = \frac{37.046 \cdot 2405.59}{3250} \cdot 100\% = 2.742\%$$

4. Akibat friksi

$$\Delta f_{pF} = f_{pi} (\mu \alpha + KL)$$

$$f_{pi} = \frac{P_i}{A_{ps}} = \frac{3250 \cdot 10^3}{2405.59} = 1351.019$$

$$\Delta f_{pF} = 1351.019(0.2 \cdot 0.22 + 0.002 \cdot 20)$$

$$= 113.485 \text{ MPa}$$

% kehilangan gaya prategang

$$\Delta f_{s_4} = \frac{\Delta f_s \cdot A_{ps}}{P_o} = \frac{113.485 \cdot 2405.59}{3250} \cdot 100\% = 8.4\%$$

5. Akibat perubahan kedudukan jangkar

$$\Delta f_s = \frac{\Delta \cdot E_s}{L}$$

diambil $\Delta = 0.25$ inci atau 6.35 mm

$$\Delta f_s = \frac{6.35 \cdot 1.8 \cdot 10^5}{20 \cdot 10^3} = 64.647 \text{ MPa}$$

% kehilangan gaya prategang

$$\Delta f_{s_5} = \frac{\Delta f_s \cdot A_{ps}}{P_o} = \frac{64.647 \cdot 2405.59}{3250} \cdot 100\% = 4.785\%$$

kehilangan gaya prategang total (LOP)

$$\begin{aligned} \text{LOP} &= \Delta fs_1 + \Delta fs_2 + \Delta fs_3 + \Delta fs_4 + \Delta fs_5 \\ &= 1.976 + 2.047 + 2.742 + 8.4 + 4.485 = 19.951\% \end{aligned}$$

$$\text{gaya prategang efektif } P_e = (1 - 0.19954) \cdot 3250 = 2601.59 \text{ KN}$$

• Momen inersia efektif

$$\begin{aligned} I_{cr} &= \left(n_{ps} \cdot A_{ps} \cdot d_{ps}^2 \right) \cdot \left(1 - 1.6 \sqrt{n_{ps} \cdot \rho_{ps}} \right) \\ &= \left(6 \cdot 7121.6919 \cdot (1100 - 270)^2 \right) \cdot \left(1 - 1.6 \sqrt{6 \cdot 0.0057} \right) \\ &= 6976307633 \text{ mm}^4 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} M_{cr} &= S_b \left[0.5 \cdot \sqrt{f'_c} + \frac{P_e}{A_g} \cdot \left(1 + \frac{e_e \cdot c_b}{r^2} \right) - \frac{M_o + M_D}{S_b} \right] \\ &= 49394106.81 \cdot \left[0.5 \cdot \sqrt{45} + \frac{2601.59 \cdot 10^3}{280000} \cdot \left(1 + \frac{323.1595 \cdot 646.4285}{114034.8639} \right) - \frac{336 + 900}{49394106.81} \right] \\ &= 1464.5458 \text{ KNm} \end{aligned}$$

$$I_e = I_{cr} + \left(\frac{M_{cr}}{M_a} \right)^3 \cdot (I_g - I_{cr}) \leq I_g$$

$$\begin{aligned} I_e &= 6976307633 + \left(\frac{1464.5458 \cdot 10^6}{(900 + 437.5) \cdot 10^6} \right)^3 \cdot (3.1929 \cdot 10^{10} - 6976307633) \leq 3.1929 \cdot 10^{10} \\ &= 3.3364 \cdot 10^{10} \text{ mm}^4 \geq 3.1929 \cdot 10^{10} \text{ dipakai } I_g \end{aligned}$$

Lendutan akibat beban mati

$$\begin{aligned} \delta_D &= + \frac{5 \cdot W_D \cdot L^4}{384 \cdot E_c \cdot I_e} \\ &= + \frac{5 \cdot 18 \cdot 20^4 \cdot 10^{12}}{384 \cdot 31528.56 \cdot 3.1929 \cdot 10^{10}} \\ &= +29.7066 \text{ mm}(\downarrow) \end{aligned}$$

Lendutan akibat beban hidup

$$\begin{aligned} \delta_L &= + \frac{5 \cdot W_L \cdot L^4}{384 \cdot E_c \cdot I_e} \\ &= + \frac{5 \cdot 8.75 \cdot 20^4 \cdot 10^{12}}{384 \cdot 31528.56 \cdot 3.1929 \cdot 10^{10}} \\ &= +18.1081 \text{ mm}(\downarrow) \end{aligned}$$

Lendutan total

$$\begin{aligned} \delta_t &= \delta_D + \delta_L \\ &= +29.7066 \text{ mm}(\downarrow) + 18.1081 \text{ mm}(\downarrow) \\ &= +47.8150(\downarrow) \end{aligned}$$

4.2.2 Prategang Parsial 90% Sistem PASCA-TARIK dengan Grouting

Menghitung eksentrisitas tendon

$$e_c = (f_{ti} - f_{cci}) \cdot \frac{S_t}{P_i} + \frac{M_o}{P_i}$$

$$= (1.5 - (-7.1394)) \cdot \frac{70396325}{2950 \cdot 10^3} + \frac{336 \cdot 10^6}{2950 \cdot 10^3}$$

$$= 322.7972 \text{ mm}$$

$$e_c = (f_{cci} - f_{ci}) \cdot \frac{S_b}{P_i} + \frac{M_o}{P_i}$$

$$= (-7.1394 - (-21.6)) \cdot \frac{49394106.81}{2950 \cdot 10^3} + \frac{336 \cdot 10^6}{2950 \cdot 10^3}$$

$$= 359.0661 \text{ mm}$$

Dipakai e_c yang terbesar $e_c = 359.0661 \text{ mm}$

eksentrisitas tendon pada dukungan

$$e_e = (f_{ti} - f_{cci}) \cdot \frac{S_t}{P_i}$$

$$= (1.5 - (-7.1394)) \cdot \frac{70396325.46}{2950 \cdot 10^3}$$

$$= 207.9254 \text{ mm}$$

$$r^2 = \frac{I_g}{A_g} = \frac{3.1929 \cdot 10^{10}}{280000} = 114034.8639 \text{ mm}^2$$

→ Saat Transfer

Lendutan akibat gaya prategang

$$\delta_{pi} = -\frac{P_{ip} \cdot e_e \cdot L^2}{8 \cdot E_{ci} \cdot I_g} - \frac{5 \cdot P_{ip} \cdot (e_c - e_e) \cdot L^2}{48 \cdot E_{ci} \cdot I_g}$$

$$= -\frac{2950 \cdot 10^3 \cdot 207.9254 \cdot 20^2 \cdot 10^6}{8 \cdot 28200 \cdot 3.1929 \cdot 10^{10}} - \frac{5 \cdot 2950 \cdot 10^3 \cdot (359.0661 - 207.9254) \cdot 20^2 \cdot 10^6}{48 \cdot 28200 \cdot 3.1929 \cdot 10^{10}}$$

$$= -34.0616 \text{ mm}(\uparrow) - 20.532 \text{ mm}(\uparrow) = -54.593 \text{ mm}(\uparrow)$$

Lendutan akibat berat sendiri

$$\delta_o = +\frac{5 \cdot W_o \cdot L^4}{384 \cdot E_{ci} \cdot I_g}$$

$$= +\frac{5 \cdot 7 \cdot 20^4 \cdot 10^{12}}{384 \cdot 28200 \cdot 3.1929 \cdot 10^{10}}$$

$$= +15.5483 \text{ mm}(\downarrow)$$

Lendutan total

$$\begin{aligned}\delta_t &= \delta_{pi} - \delta_o \\ &= -54.2295 \text{ mm}(\uparrow) + 15.5483 \text{ mm}(\downarrow) = -3836812 \text{ mm}(\uparrow)\end{aligned}$$

→ Saat layan

• Kehilangan gaya prategang

1. Akibat rangkai beton

$$\Delta fs = K_{cr} \frac{E_{ps}}{E_c} (f_{cir} - f_{cds})$$

$$K_{cr} = 1.6$$

$$E_{ps} = 1.98 \cdot 10^5 \text{ KN/mm}^2$$

$$E_c = 31528.56 \text{ KN/mm}^2$$

$$f_{cds} = \frac{M_{DL} \cdot e}{I_t} = \frac{(900 + 437.5) \cdot 10^6}{3.4164 \cdot 10^{10}} = 8.6415 \text{ MPa}$$

$$\begin{aligned}f_{cir} &= -\frac{P_i}{A_t} \left(1 + \frac{e^2}{r^2} \right) + \frac{M_{DL} \cdot e}{I_t} \\ &= -\frac{2925 \cdot 1000}{280000} \left(1 + \frac{359.0661^2}{114034.8639} \right) + \frac{(900 + 437.5) \cdot 10^6 \cdot 359.0661}{4.1551 \cdot 10^{10}} \\ &= 11.0117 \text{ MPa}\end{aligned}$$

$$\Delta fs = 1.6 \frac{1.98 \cdot 10^5}{31528.56} (11.0117 - 9.4589) = 23.815 \text{ MPa}$$

% kehilangan gaya prategang

$$\Delta fs_1 = \frac{\Delta fs \cdot A_{ps}}{P_o} = \frac{23.815 \cdot 2152.37}{2925} \cdot 100\% = 1.752\%$$

2 Akibat susut beton

$$\Delta fs = K_{SH} \cdot \epsilon_{ps} \cdot E_s$$

$$K_{SH} = 0.58 \text{ (lampiran 3.)}$$

$$\epsilon_{ps} = 8.2 \cdot 10^{-6} \left(1 - 0.06 \frac{V}{H} \right) (100 - RH)$$

$$\begin{aligned}\frac{V}{H} &= \frac{\text{keliling penampang beton}}{\text{luas penampang beton}} = \frac{(2 \cdot 900 + 200 + 500 + 2 \cdot 200 + (500 - 200)) / 25.4}{280000 \cdot 25.4^2} \\ &= 3.445\end{aligned}$$

$$RH = 70$$

$$\Delta f_s = 8.2 \cdot 10^6 \cdot 0.58 \cdot 1.98 \cdot 10^5 \cdot (1 - 0.06 \cdot 3.445)(100 - 70)$$

$$= 27.667 \text{ MPa}$$

% kehilangan gaya prategang

$$\Delta f_{s_2} = \frac{\Delta f_s \cdot A_{ps}}{P_o} = \frac{27.667 \cdot 2152.37}{2925} \cdot 100\% = 2.035\%$$

3. Akibat relaksasi tendon

$$\Delta f_s = (K_{re} - J(\text{SH} + \text{CR} + \text{ES})) \cdot C$$

$$\text{SH} = 27.667 \text{ MPa}$$

$$\text{CR} = 23.815 \text{ MPa}$$

$$K_{re} = 35 \text{ MPa}, J = 0.15 \text{ dan } C = 1.36 \text{ (lampiran 4 dan 5)}$$

$$\Delta f_s = (35 - 0.15(27.667 + 23.815)) \cdot 1.36$$

$$= 37.046 \text{ MPa}$$

% kehilangan gaya prategang

$$\Delta f_{s_3} = \frac{\Delta f_s \cdot A_{ps}}{P_o} = \frac{37.046 \cdot 2152.37}{2925} \cdot 100\% = 2.7699\%$$

4. Akibat friksi

$$\Delta f_{pF} = f_{pi}(\mu\alpha + KL)$$

$$f_{pi} = \frac{P_i}{A_{ps}} = \frac{2925 \cdot 10^3}{2152.37} = 1358.96 \text{ MPa}$$

$$\Delta f_{pF} = 1358.96(0.2 \cdot 0.22 + 0.002 \cdot 20)$$

$$= 114.152 \text{ MPa}$$

% kehilangan gaya prategang

$$\Delta f_{s_4} = \frac{\Delta f_s \cdot A_{ps}}{P_o} = \frac{114.152 \cdot 2152.37}{2925} \cdot 100\% = 8.4\%$$

5. Akibat perubahan kedudukan jangkar

$$\Delta f_s = \frac{\Delta \cdot E_s}{L}$$

diambil $\Delta = 0.25$ inci atau 6.35 mm

$$\Delta f_s = \frac{6.35 \cdot 1.8 \cdot 10^5}{20 \cdot 10^3} = 64.647 \text{ MPa}$$

% kehilangan gaya prategang

$$\Delta f_{s_5} = \frac{\Delta f_s \cdot A_{ps}}{P_o} = \frac{64.647 \cdot 2152.37}{2925} \cdot 100\% = 4.757\%$$

Kehilangan gaya prategang total (LOP)

$$\begin{aligned} \text{LOP} &= \Delta f_{s_1} + \Delta f_{s_2} + \Delta f_{s_3} + \Delta f_{s_4} + \Delta f_{s_5} \\ &= 1.7524 + 2.0358 + 2.7699 + 8.4 + 4.757 = 19.7154 \% \end{aligned}$$

$$\text{gaya prategang efektif } P_e = (1 - 0.197154) \cdot 2925 = 2348.04 \text{ KN}$$

Momen inersia efektif

$$\begin{aligned} I_{cr} &= \left(n_{ps} \cdot A_{ps} \cdot d_{ps}^2 + n_s \cdot A_s \cdot d_s^2 \right) \cdot \left(1 - 1.6 \sqrt{n_{ps} \cdot \rho_{ps} + n_s \cdot \rho_s} \right) \\ &= \left(6 \cdot 2152.37 \cdot (1100 - 270)^2 + 7 \cdot 2662.2307 \cdot (1100 - 40)^2 \right) \\ &\quad \cdot \left(1 - 1.6 \sqrt{6 \cdot 0.0057 + 7 \cdot 0.0050} \right) \\ &= 17545743458 \text{ mm}^4 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} M_{cr} &= S_b \left[0.5 \cdot \sqrt{f'_c} + \frac{P_e}{A_g} \cdot \left(1 + \frac{e_c \cdot c_b}{r^2} \right) - \frac{M_o + M_D}{S_b} \right] \\ &= 49394106.81 \cdot \left[0.5 \cdot \sqrt{45} + \frac{2348.04 \cdot 10^3}{280000} \cdot \left(1 + \frac{359.0661 \cdot 646.4295}{114034.8639} \right) - \frac{336 + 900}{49394106.81} \right] \\ &= 1418.6798 \text{ KNm} \end{aligned}$$

$$I_e = I_{cr} + \left(\frac{M_{cr}}{M_a} \right)^3 \cdot (I_g - I_{cr}) \leq I_g$$

$$\begin{aligned} I_e &= 17545743458 + \left(\frac{1418.6798 \cdot 10^6}{(900 + 437.5) \cdot 10^6} \right)^3 \cdot (3.1929 \cdot 10^{10} - 17545743458) \leq 3.1929 \cdot 10^{10} \\ &= 3.1372 \cdot 10^{10} \text{ mm}^4 \leq 3.1929 \cdot 10^{10} \text{ dipakai } I_e \end{aligned}$$

Lendutan akibat beban mati

$$\begin{aligned} \delta_D &= + \frac{5 \cdot W_D \cdot L^4}{384 \cdot E_c \cdot I_e} \\ &= + \frac{5 \cdot 18 \cdot 20^4 \cdot 10^{12}}{384 \cdot 31528.56 \cdot 3.1372 \cdot 10^{10}} \\ &= +31.5937 \text{ mm} (\downarrow) \end{aligned}$$

Lendutan akibat beban hidup

$$\begin{aligned} \delta_L &= + \frac{5 \cdot W_L \cdot L^4}{384 \cdot E_c \cdot I_e} \\ &= + \frac{5 \cdot 8.75 \cdot 20^4 \cdot 10^{12}}{384 \cdot 31528.56 \cdot 3.1372 \cdot 10^{10}} \\ &= +18.4300 \text{ mm} (\downarrow) \end{aligned}$$

Lendutan total

$$\begin{aligned} \delta_t &= \delta_D + \delta_L \\ &= 31.5937 \text{ mm} (\downarrow) + 18.4300 \text{ mm} (\downarrow) = +50.0237 \text{ mm} (\downarrow) \end{aligned}$$

4.3 Lendutan Jangka Panjang

- 30 hari

$$C_t = \frac{t^{0.60}}{10 + t^{0.60}} \cdot c_u = \frac{30^{0.60}}{10 + 30^{0.60}} \cdot 2.35 = 1.02$$

$$K_r = 1$$

$$K_a = 1.13 \cdot t^{-0.095} = 1.13 \cdot 30^{-0.095} = 0.82$$

- 120 hari

$$C_t = \frac{t^{0.60}}{10 + t^{0.60}} \cdot c_u = \frac{120^{0.60}}{10 + 120^{0.60}} \cdot 2.35 = 1.50$$

$$K_r = 1$$

$$K_a = 1.13 \cdot t^{-0.095} = 1.13 \cdot 120^{-0.095} = 0.72$$

- 365 hari

$$C_t = \frac{t^{0.60}}{10 + t^{0.60}} \cdot c_u = \frac{365^{0.60}}{10 + 365^{0.60}} \cdot 2.35 = 1.82$$

$$K_r = 1$$

$$K_a = 1.13 \cdot t^{-0.095} = 1.13 \cdot 365^{-0.095} = 0.65$$

- 1825 hari

$$C_t = \frac{t^{0.60}}{10 + t^{0.60}} \cdot c_u = \frac{1825^{0.60}}{10 + 1825^{0.60}} \cdot 2.35 = 2.12$$

$$K_r = 1$$

$$K_a = 1.13 \cdot t^{-0.095} = 1.13 \cdot 1825^{-0.095} = 0.55$$

4.3.1 Prategang Penuh Sistem PASCA-TARIK dengan Grouting

$$\Delta P = P_i - P_e = 3250 - 2601.59 = 648.41 \text{ MPa}$$

$$\lambda = 1 - \frac{\Delta P}{2P_i} = 1 - \frac{650}{2 \cdot 3250} = 0.9002$$

$$\delta_{pi} = -54.2295 \text{ mm } (\uparrow)$$

$$\delta_o = +15.5483 \text{ mm } (\downarrow)$$

$$\delta_D = +29.7068 \text{ mm } (\downarrow)$$

$$\delta_L = +18.1081 \text{ mm } (\downarrow)$$

$$\delta_T = -\delta_{pi} \left[1 - \frac{\Delta P}{P_i} + \lambda \cdot (K_r \cdot C_t) \right] + \delta_o \cdot (1 + K_r \cdot C_t) + \delta_D \cdot (1 + K_a \cdot K_r \cdot C_t) + \delta_L$$

- 30 hari

$$\begin{aligned} \delta_T &= -54.2295 \cdot \left[1 - \frac{648.41}{2 \cdot 3250} + 0.9002 \cdot (1 \cdot 1.02) \right] + 15.5483 \cdot (1 + 1 \cdot 1.02) \\ &\quad + 29.7068 \cdot (1 + 0.82 \cdot 1 \cdot 1.02) + 18.1081 \\ &= +10.784 \text{ mm } (\downarrow) \end{aligned}$$

- 120 hari

$$\begin{aligned} \delta_T &= -54.2295 \cdot \left[1 - \frac{648.41}{2 \cdot 3250} + 0.9002 \cdot (1 \cdot 1.5) \right] + 15.5483 \cdot (1 + 1 \cdot 1.5) \\ &\quad + 29.7068 \cdot (1 + 0.72 \cdot 1 \cdot 1.5) + 18.1081 \\ &= +1.985 \text{ mm } (\downarrow) \end{aligned}$$

- 365 hari

$$\begin{aligned} \delta_T &= -54.2295 \cdot \left[1 - \frac{648.41}{2 \cdot 3250} + 0.9002 \cdot (1 \cdot 1.82) \right] + 15.5483 \cdot (1 + 1 \cdot 1.82) \\ &\quad + 29.7068 \cdot (1 + 0.65 \cdot 1 \cdot 1.82) + 18.1081 \\ &= -5.647 \text{ mm } (\uparrow) \end{aligned}$$

- 1825 hari

$$\begin{aligned} \delta_T &= -54.2295 \cdot \left[1 - \frac{648.41}{2 \cdot 3250} + 0.9002 \cdot (1 \cdot 2.12) \right] + 15.5483 \cdot (1 + 1 \cdot 2.12) \\ &\quad + 29.7068 \cdot (1 + 0.55 \cdot 1 \cdot 2.12) + 18.1081 \\ &= -15.649 \text{ mm } (\uparrow) \end{aligned}$$

4.3.2 Prategang Parsial 90 % Sistem PASCA-TARIK dengan Grouting

$$\Delta P = P_i - P_e = 2925 - 2348.04 = 576.96 \text{ MPa}$$

$$\lambda = 1 - \frac{\Delta P}{2P_i} = 1 - \frac{576.96}{2 \cdot 2925} = 0.9015$$

$$\delta_{pi} = -54.2295 \text{ mm } (\uparrow)$$

$$\delta_o = +15.5483 \text{ mm } (\downarrow)$$

$$\delta_D = +31.5937 \text{ mm } (\downarrow)$$

$$\delta_L = +18.4300 \text{ mm } (\downarrow)$$

$$\delta_T = -\delta_{pi} \left[1 - \frac{\Delta P}{P_{ip}} + \lambda \cdot (K_r \cdot C_t) \right] + \delta_o \cdot (1 + K_r \cdot C_t) + \delta_D \cdot (1 + K_a \cdot K_r \cdot C_t) + \delta_L$$

- 30 hari

$$\begin{aligned} \delta_T &= -54.2295 \cdot \left[1 - \frac{576.96}{2 \cdot 2925} + 0.9015 \cdot (1 \cdot 1.02) \right] + 15.5483 \cdot (1 + 1 \cdot 1.02) \\ &\quad + 31.5937 \cdot (1 + 0.82 \cdot 1 \cdot 1.02) + 18.4300 \\ &= +14.377 \text{ mm } (\downarrow) \end{aligned}$$

- 120 hari

$$\begin{aligned} \delta_T &= -54.2295 \cdot \left[1 - \frac{576.96}{2 \cdot 2925} + 0.9015 \cdot (1 \cdot 1.02) \right] + 15.5483 \cdot (1 + 1 \cdot 1.02) \\ &\quad + 31.5937 \cdot (1 + 0.72 \cdot 1 \cdot 1.5) + 18.4300 \\ &= +6.001 \text{ mm } (\downarrow) \end{aligned}$$

- 365 hari

$$\begin{aligned} \delta_T &= -54.2295 \cdot \left[1 - \frac{576.96}{2 \cdot 2925} + 0.9015 \cdot (1 \cdot 1.02) \right] + 15.5483 \cdot (1 + 1 \cdot 1.02) \\ &\quad + 31.5937 \cdot (1 + 0.65 \cdot 1 \cdot 1.82) + 18.4300 \\ &= -1.4667 \text{ mm } (\uparrow) \end{aligned}$$

- 1825 hari

$$\begin{aligned} \delta_T &= -54.2295 \cdot \left[1 - \frac{576.96}{2 \cdot 2925} + 0.9015 \cdot (1 \cdot 1.02) \right] + 15.5483 \cdot (1 + 1 \cdot 1.02) \\ &\quad + 31.5937 \cdot (1 + 0.55 \cdot 1 \cdot 2.12) + 18.4300 \\ &= -11.4925 \text{ mm } (\uparrow) \end{aligned}$$

BAB V

ANALISIS HASIL DAN PEMBAHASAN

5.1 Data dan Asumsi Disain

Pada perencanaan beton prategang ini kami menggunakan panjang bentang yang bervariasi yaitu, 20 m, 25 m, dan 30 m. Sedangkan untuk jarak antar balok kami pakai panjang 3.5 m, dan desain beton prategang parsial untuk menahan lentur dengan mengurangi gaya prategang sebesar 10%, 20%, 30%, dan 40% dari gaya prategang yang dibutuhkan pada prategang penuh. Beban-beban yang bekerja didasarkan pada Peraturan Pembebanan Indonesia tahun 1983. Perhitungan lendutan dengan menggunakan metode "Approximate Time Step Method" pada umur pebebanan 30 hari, 120 hari, 365 hari (1tahun) dan 1825 hari (5tahun). Data-data beban yang bekerja pada bentang seperti tersebut dibawah ini.

1. Untuk panjang bentang (L) 20 m

$$W_o = 7 \text{ KN/m}$$

$$W_D = 18 \text{ KN/m}$$

$$W_L = 8.75 \text{ KN/m}$$

2. Untuk panjang bentang (L) 25 m

$$W_o = 11.76 \quad \text{KN/m}$$

$$W_D = 20 \quad \text{KN/m}$$

$$W_L = 8.75 \quad \text{KN/m}$$

3. Untuk panjang bentang (L) 30 m

$$W_o = 12.5 \quad \text{KN/m}$$

$$W_D = 22 \quad \text{KN/m}$$

$$W_L = 8.75 \quad \text{KN/m}$$

Dari data diatas dengan perhitungan mekanika diperoleh momen eksternal untuk masing-masing bentang., selanjutnya momen eksternal ini dijadikan sebagai dasar untuk pemilihan profil tampang. Pemilihan profil tampang T didasarkan pada tabel H Nielson yang dapat dilihat pada lampiran 1

Mutu bahan yang digunakan dalam perencanaan ini menggunakan beton dengan kuat desak karakteristik $f_c = 45$ Mpa, tegangan ultimit tulangan aktif (tendon) $f_{pu} = 1860$ Mpa, dan tulangan pasif (non-prategang) $f_y = 360$ Mpa.

5.2 Pembahasan Hasil Perhitungan

Analisis pada tahap terencanaan balok prategang parsial dalam tugas akhir ini hanya menggunakan satu tampang yaitu tampang T sistem pasca-tarik dengan grouting. Type tendon yang digunakan adalah tendon type K Freyssinet yang dapat dilihat pada lampiran 2. Jumlah dan type selongsong disesuaikan dengan besarnya gaya prategang yang dibutuhkan. Dalam analisis ini tegangan beton yang terjadi

perhitungan pada tahap perncanaan balok prategang tersebut diperoleh beberapa hasil sebagai berikut:

1. Pemakaian bentang yang panjang akan mengakibatkan beban yang besar sehingga gaya prategang yang dibutuhkan semakin besar.
2. Pada tabel 5.1, 5.6 dan 5.11 kolom 3, dapat dilihat bahwa eksentrisitas tendon terhadap titik berat penampang beton pada balok prategang parsial semakin besar seiring dengan berkurangnya gaya prategang yang diberikan, karena garis netral semakin mendekati daerah tekan.
3. Pada balok prategang parsial, tegangan beton serat atas pada saat transfer akan mengalami tarik yang akan terus bertambah besar dengan semakin berkurangnya gaya prategang yang diberikan. Tegangan tarik yang terbesar terjadi pada balok bentang 30 meter sebesar +3.3109 MPa, dimana tegangan tarik yang terjadi masih aman jika masih dibawah tegangan tarik ijin beton.
8. Dengan berkurangnya gaya prategang yang diberikan maka luas tulangan prategang (serat tendon) yang digunakan pada pada balok prategang parsial semakin berkurang sedangkan luasan tulangan non-prategang semakin bertambah, yang hasilnya dapat dilihat pada tabel 5.2, 5.7 dan 5.12 kolom 6 dan 7.

Setelah tahap perencanaan balok prategang selesai dan telah diperoleh hasil perhitungannya, selanjutnya masuk pada tahap perhitungan lendutan yang terjadi pada balok prategang tersebut. Untuk perhitungan lendutan ini, berdasarkan empat tahapan waktu dari komponen struktur beton prategang. Sehingga dalam tahap ini, perhitungan lendutan dilakukan dengan cara :

- Balok diberi gaya prategang setelah beton berumur 28 hari, sedangkan beban luar baru mulai bekerja setelah beton berumur 30 hari.
- Metode perhitungan lendutan ditinjau mulai saat transfer gaya prategang (umur 28 hari) sampai dengan 30 hari pertama yang hanya diakibatkan oleh berat balok saja, sebagai selang waktu antara pemberian gaya prategang sampai waktu penempatan. Sedangkan beban luar yang tetap, ditambahkan kira-kira pada umur 30 hari dan lendutan setelah 5 tahun akibat penambahan beban luar ini dianggap sebagai lendutan akhir balok.

Dari hasil perhitungan tersebut kemudian dianalisa sesuai dengan hasil perhitungannya:

1. Lendutan yang terjadi sesaat setelah transfer gaya prategang (umur 28 hari) merupakan lendutan seketika akibat gaya prategang dan berat sendiri balok, yang hasilnya berupa lendutan keatas (camber). Seperti dapat dilihat pada tabel 5.5, 5.10 dan 5.15 serta ditunjukkan pada grafik detail lendutan waktu 0 hari sampai dengan 60 hari.
2. Lendutan akibat gaya prategang akan relatif sama meskipun gaya prategang berkurang, karena eksentrisitas tendon terhadap titik berat beton semakin besar. ini dapat dilihat pada tabel 5.4, 5.9 dan 5.14.

3. Pengaruh faktor yang berhubungan dengan umur beton pada lendutan jangka panjang adalah memperbesar lendutan, baik itu lendutan akibat gaya prategang (lendutan ke atas), lendutan akibat berat sendiri (lendutan ke bawah), lendutan akibat beban luar (lendutan ke bawah).
4. Lendutan antara waktu setelah transfer gaya prategang sampai waktu penempatan pada umur 30 hari pertama, diperhitungkan sebagai lendutan jangka panjang akibat gaya prategangan dan berat sendiri balok. Lendutan yang dihasilkan berupa lendutan ke atas (camber) yang semakin bertambah besar dengan bertambahnya umur beton.
5. Lendutan yang terjadi saat akhir pada 30 hari diperhitungkan sebagai lendutan jangka panjang akibat gaya prategang, berat sendiri dan beban luar. Lendutan yang terjadi pada saat ini menghasilkan lendutan ke bawah yang besar dan merupakan lendutan terbesar balok. Hasilnya dapat dilihat pada tabel 5.5, 5.9 dan 5.15 dan ditunjukkan pada grafik 5.1 sampai dengan 5.18. Besarnya lendutan yang terjadi pada tahap ini perlu diperhatikan agar lendutan yang terjadi jangan sampai melebihi batas lendutan ijin. Pada tugas akhir ini balok direncanakan untuk gedung maka batas lendutan maksimum yang digunakan adalah seperti pada lampiran 6, yang diambil sesuai dengan peraturan KS SNI T-15-1991-03 tabel 3.2.5.
6. Dengan semakin bertambahnya umur pembebanan, superposisi lendutan akan menghasilkan lendutan ke bawah yang semakin kecil dan akhirnya pada umur beton tertentu dapat terjadi lendutan ke atas. Keadaan ini dapat dilihat pada

grafik 5.6, untuk bentang 20 meter balok prategang penuh mulai melendut ke atas antara umur 130 hari dan 260 hari, sedangkan untuk balok prategang parsial 60% mulai melendut ke atas antara umur 780 hari dan 910 hari. Selanjutnya pada umur 5 tahun (1825 hari) semua balok baik itu prategang penuh maupun prategang parsial akan menghasilkan lendutan ke atas mulai dari 15 mm hingga 4.6 mm. Sedangkan untuk bentang 25 meter (grafik 5.125 tahun (1825 hari), balok prategang penuh akan menghasilkan lendutan ke atas sebesar 7.9 mm dan akan terus mengecil seiring dengan berkurangnya gaya prategang yang diberikan hingga akhirnya pada prategang parsial 60% terjadi lendutan ke bawah terbesar sebesar 14.73 mm. Untuk bentang 30 meter (grafik 5.18) pada umur 5 tahun (1825 hari), baik prategang penuh maupun prategang parsial semuanya menghasilkan lendutan ke bawah yang semakin besar seiring dengan berkurangnya gaya prategang yang diberikan. Lendutan terbesar yang terjadi untuk bentang 30 meter terjadi pada prategang parsial 60% sebesar 19.0361 mm.

7. Semakin panjang bentang semakin besar pula lendutan akibat berat sendiri balok dan beban luar ini dapat dilihat dengan membandingkan hasil pada tabel 5.5.4, 5.9 dan 5.1. Sehingga pada umur pambebanan yang relatif lama superposisi lendutan pada bentang panjang akan berupa lendutan ke bawah. Dari grafik 5.18 dapat dilihat bahwa pada umur 5 tahun (1825 hari) balok prategang penuh menghasilkan lendutan ke bawah yang sangat kecil yaitu sebesar 0.1953 mm, ini berarti bahwa balok bisa dianggap tidak mengalami lendutan. Pada balok

Tabel 5.1 Tegangan yang terjadi pada balok prategang penuh dan prategang sebagian untuk panjang bentang (L) = 20 meter

NO	% PRATEGANG	TYPE TENDON	E (mm)	TEGANGAN BETON				TEGANGAN TENDON	
				SAAT TRANSFER		SAAT LAYAN		SAAT TRANSFER	SAAT LAYAN
				f_t	f_b	f_t	f_b	f_{pi}	f_{pe}
1	100 %	27K5	318.2016	-0.1003	-21.5312	-18.8201	-0.287	1251.7314	1079.5166
2	90 %	19K5	359.0661	-0.2315	-21.4483	-19.2922	2.358	1260.8747	1069.4368
3	80 %	19K5	403.9494	-0.8637	-21.3629	-18.5629	2.8295	1273.5898	1080.6994
4	70 %	19K5	461.6564	0.3056	-21.2609	-17.3515	3.0692	1286.3935	1094.0989
5	60 %	12K5	538.5991	1.2792	-20.1592	-16.1644	3.2827	1310.7656	1111.2503

Keterangan:

f_c = 45 MPa	W_0 = 600 KN/m
f_{pu} = 1860 MPa	W_L = 1000 KN/m
f_y = 360 MPa	W_D = 437.5 KN/m
f_{ci} = -21.6 MPa	f_{ti} = +1.5 MPa
f_{cs} = -20.25 MPa	f_{ts} = +3.35 MPa
f_t = Tegangan serat atas saat transfer (MPa)	f_b = Tegangan serat bawah saat transfer (MPa)
f_t = Tegangan serat atas saat layan (MPa)	f_b = Tegangan serat bawah saat layan (MPa)
f_{pi} = Tegangan tendon saat transfer (MPa)	f_{pe} = Tegangan tendon saat layan (MPa)
E = Eksentrisitas (mm)	

Tabel 5.2 Luasan tulangan baja prategang dan baja non-prategang serta kapasitas momen untuk panjang bentang (L) = 20 meter

NO	% PRATEGANG	TYPE TENDON	P_i (MPa)	P_e (MPa)	M_{np} (MPa)	A_{ps} (mm)	A_s (mm)
1	100 %	27K5	3250	2600	3425	2405.59	0
2	90 %	27K5	2925	2340	3425	2152.37	266.2307
3	80 %	27K5	2600	2080	3425	1899.15	3239.441
4	70 %	27K5	2275	1820	3425	1645.93	3849.5656
5	60 %	12K5	1950	1560	3425	1392.7	4493.3349

Keterangan:

f'_c = 45 MPa
 f_{pu} = 1860 MPa
 f_y = Gaya prategang awal (KN)
 P_i = Gaya prategang awal (KN)
 A_{ps} = Luas baja prategang (mm^2)
 M_{np} = Kapasitas tampang perlu (KN-m)

W_0 = 7 KN/m
 W_L = 18 KN/m
 W_D = 8.75 KN/m
 P_e = Gaya prategang efektif (KN)
 A_s = Luas baja non-prategang (mm^2)

Tabel 5.3 Kehilangan gaya prategang pada balok prategang penuh dan prategang sebagian untuk panjang bentang (L) = 20 meter

N0	% PRATEGANG	Δfs_1 (%)	Δfs_2 (%)	Δfs_3 (%)	Δfs_4 (%)	Δfs_5 (%)	TOTAL Δfs (%)
1	100 %	1.9761	2.0478	2.7421	8.4	4.7850	19.9511
2	90 %	1.7525	2.0358	2.7699	8.4	4.7570	19.7154
3	80 %	0.5101	2.0209	3.0041	8.4	4.7721	18.5672
4	70 %	0.3566	2.0016	3.2781	8.4	4.6771	17.4002
5	60 %	0.2595	1.9759	3.5777	8.4	4.6171	15.9759

Keterangan:

f_c = 45 MPa

f_{pu} = 1860 MPa

f_y = 360 MPa

Δfs_1 = Kehilangan gaya prategang akibat rangkai

Δfs_2 = Kehilangan gaya prategang akibat susut beton

Δfs_3 = Kehilangan gaya prategang akibat relaksasi beton

Δfs_4 = Kehilangan gaya prategang akibat friksi beton

Δfs_5 = Kehilangan gaya prategang akibat pergeseran jangkar

Tabel 5.4 Lendutan jangka pendek pada balok prategang penuh dan prategang sebagian untuk panjang bentang (L) = 20 meter

NO	% PRATEGANG	MOMEN INERSIA EFEKTIF (I_e) mm^4	LENDUTAN JANGKA PENDEK					
			SAAT TRANSFER			SAAT LAYAN		
			GAYA PRATEGANG (δ_{pi}) mm	BERAT SENDIRI (δ_o) mm	TOTAL (δ_T) mm	BEBAN MATI (δ_D) mm	BEBAN HIDUP (δ_L) mm	TOTAL (δ_T) mm
1	100 %	$3.3364 \cdot 10^{10}$	-54.119	15.483	-38.6813	29.7068	18.1082	47.8150
2	90 %	$3.1372 \cdot 10^{10}$	-54.593	15.483	-38.6813	31.5937	18.4300	50.0237
3	80 %	$3.0286 \cdot 10^{10}$	-54.741	15.483	-38.6813	32.7258	19.0900	51.8163
4	70 %	$2.9569 \cdot 10^{10}$	-54.851	15.483	-38.6813	33.5196	19.5538	53.0730
5	60 %	$2.9191 \cdot 10^{10}$	-54.929	15.483	-38.6813	33.9537	19.8062	53.7603

Keterangan:

$$f_c = 45 \text{ MPa}$$

$$f_{pu} = 1860 \text{ MPa}$$

$$f_y = 360 \text{ MPa}$$

$$\delta_{pi} = \text{Lendutan akibat gaya prategang (mm)}$$

$$\delta_o = \text{Lendutan akibat gaya prategang (mm)}$$

$$I_e = \text{Momen inersia efektif (mm}^4\text{)}$$

$$W_0 = 600 \text{ KN/m}$$

$$W_L = 1000 \text{ KN/m}$$

$$W_D = 437.5 \text{ KN/m}$$

$$\delta_D = \text{Lendutan akibat beban mati (mm)}$$

$$\delta_L = \text{Lendutan akibat beban hidup (mm)}$$

$$\delta_T = \text{Lendutan total (mm)}$$

Tabel 5.5 Lendutan jangka panjang pada balok prategang penuh dan prategang sebagian untuk panjang bentang (L) = 20 meter

NO	% PRATEGANG	LENDUTAN JANGKA WAKTU (t) dalam HARI					
		$\delta_{28 \text{ hari}}$ (mm)	$\delta_{30 \text{ hari pertama}}$ (mm)	$\delta_{30 \text{ hari}}$ (mm)	$\delta_{120 \text{ hari}}$ (mm)	$\delta_{360 \text{ hari}}$ (mm)	$\delta_{1825 \text{ hari}}$ (mm)
1	100 %	-38.6813	-43.7581	10.7840	1.9856	-5.6476	-15.6491
2	90 %	-38.6813	-43.6294	14.3772	6.0016	-1.4667	-11.4925
3	80 %	-38.6813	-43.7181	16.2491	8.0082	0.5600	-9.5545
4	70 %	-38.6813	-43.7181	17.3926	9.1792	1.7008	-8.5174
5	60 %	-38.6813	-43.7181	20.3199	12.5485	5.3362	-4.6731

Keterangan:

$$f_c = 45 \text{ MPa}$$

$$f_{pu} = 1860 \text{ MPa}$$

$$f_y = 360 \text{ MPa}$$

$$\delta_{pi} = \text{Lendutan akibat gaya prategang (mm)}$$

$$\delta_o = \text{Lendutan akibat gaya prategang (mm)}$$

$$I_e = \text{Momen inersia efektif (mm}^4\text{)}$$

$$W_o = 7 \text{ KN/m}$$

$$W_L = 18 \text{ KN/m}$$

$$W_D = 8.75 \text{ KN/m}$$

$$\delta_D = \text{Lendutan akibat beban mati (mm)}$$

$$\delta_L = \text{Lendutan akibat beban hidup (mm)}$$

$$\delta_T = \text{Lendutan total (mm)}$$

Tabel 5.6 Tegangan yang terjadi pada balok prategang penuh dan prategang sebagian untuk panjang bentang (L) = 25 meter

NO	% PRATEGANG	TYPE TENDON	E (mm)	TEGANGAN BETON (MPa)				TEGANGAN TENDON (MPa)	
				SAAT TRANSFER		SAAT LAYAN		SAAT TRANSFER	SAAT LAYAN
				f_t	f_b	f_t	f_b	F_{pi}	F_{pe}
1	100 %	27K5	640.43	-0.8653	-21.4112	-16.6052	-0.9265	1143.384	992.1413
2	90 %	27K5	682.99	0.8461	-19.9969	-13.8242	2.8408	1145.88	988.1886
3	80 %	19K5	768.11	1.2958	-19.2299	-12.9540	2.8617	1012.322	879.1596
4	70 %	19K5	875.19	1.3667	-18.4624	-12.0945	3.0809	878.2931	771.0606
5	60 %	19K5	1018.4	1.4224	-17.6950	-11.241	3.2995	744.2453	662.8711

Keterangan:

f_c	= 45 MPa	W_0	= 11.76 KN/m
f_{pu}	= 1860 MPa	W_L	= 20 KN/m
f_y	= 360 MPa	W_D	= 8.75 KN/m
f_{ci}	= -21.6 MPa	f_{ti}	= +1.5 MPa
f_{cs}	= -20.25 MPa	f_{ts}	= +3.35 MPa
f_{ti}	= Tegangan serat atas saat transfer (MPa)	f_b	= Tegangan serat bawah saat transfer (MPa)
f_t	= Tegangan serat atas saat layan (MPa)	f_b	= Tegangan serat bawah saat layan (MPa)
f_{pi}	= Tegangan tendon saat transfer (MPa)	f_{pe}	= Tegangan tendon saat layan (MPa)
E	= Eksentrisitas (mm)		

Tabel 5.7 Luasan tulangan baja prategang dan baja non-prategang serta kapasitas momen untuk panjang bentang (L) = 25 meter

N0	% PRATEGANG	TYPE TENDON	P_i (MPa)	P_e (MPa)	M_{np} (MPa)	A_{ps} (mm)	A_s (mm)
1	100 %	27K5	4123.57	3298.856	5825	3212.0298	0
2	90 %	27K5	3711.213	2968.9704	5825	2903.4878	3868.6369
3	80 %	27K5	3298.856	2639.0848	5825	2594.9459	4748.8725
4	70 %	19K5	2886.499	2309.1992	5825	2286.4039	5659.2682
5	60 %	19K5	2474.142	1979.3136	5825	1977.9	6600.2

Keterangan:

f'_c = 45 MPa
 f_{pu} = 1860 MPa
 f_y = Gaya prategang awal (KN)
 P_i = Gaya prategang awal (KN)
 A_{ps} = Luas baja prategang (mm²)
 M_{np} = Kapasitas tampang perlu (KN-m)

W_0 = 11.76 KN/m
 W_L = 20 KN/m
 W_D = 8.75 KN/m
 P_e = Gaya prategang efektif (KN)
 A_s = Luas baja non-prategang (mm²)

Tabel 5.8 Kehilangan gaya prategang pada balok prategang penuh dan prategang sebagian untuk panjang bentang (L) = 25 meter

N0	% PRATEGANG	Δfs_1 (%)	Δfs_2 (%)	Δfs_3 (%)	Δfs_4 (%)	Δfs_5 (%)	TOTAL Δfs (%)
1	100 %	1.6841	2.2029	3.0738	9.16	4.1529	20.2739
2	90 %	2.1397	2.2125	2.9946	9.16	4.1711	20.6779
3	80 %	1.3181	2.2246	3.1834	9.16	4.1939	20.0800
4	70 %	0.4352	2.2411	3.3902	9.16	4.2231	19.4487
5	60 %	0.2347	2.2607	3.6231	9.16	4.2621	18.7713

Keterangan:

f'_c = 45 MPa

f_{pu} = 1860 MPa

f_y = 360 MPa

Δfs_1 = Kehilangan gaya prategang akibat rangkai

Δfs_2 = Kehilangan gaya prategang akibat susut beton

Δfs_3 = Kehilangan gaya prategang akibat relaksasi beton

Δfs_4 = Kehilangan gaya prategang akibat friksi beton

Δfs_5 = Kehilangan gaya prategang akibat pergeseran jangkar

Tabel 5.9 Lendutan jangka pendek pada balok prategang penuh dan prategang sebagian untuk panjang bentang (L) = 25 meter

NO	% PRATEGANG	MOMEN INERSIA EFEKTIF (I_e) mm^4	LENDUTAN JANGKA PENDEK					
			SAAT TRANSFER			SAAT LAYAN		
			GAYA PRATEGANG (δ_p) mm	BERAT SENDIRI (δ_o) mm	TOTAL (δ_T) mm	BEBAN MATI (δ_D) mm	BEBAN HIDUP (δ_L) mm	TOTAL (δ_T) mm
1	100 %	$9.6741 \cdot 10^{10}$	-71.299	27.4100	-44.0899	7.4862	18.2416	55.7278
2	90 %	$8.5835 \cdot 10^{10}$	-71.454	27.4100	-44.0899	40.3251	16.4455	56.7706
3	80 %	$8.1868 \cdot 10^{10}$	-71.528	27.4100	-44.0899	42.2287	17.2426	59.471
4	70 %	$7.8729 \cdot 10^{10}$	-71.713	27.4100	-44.0899	43.5878	17.9297	61.5175
5	60 %	$7.6355 \cdot 10^{10}$	-71.825	27.4100	-44.0899	45.8821	18.4871	64.3692

Keterangan:

$$f_c = 45 \text{ MPa}$$

$$f_{pu} = 1860 \text{ MPa}$$

$$f_y = 360 \text{ MPa}$$

$$\delta_{pi} = \text{Lendutan akibat gaya prategang (mm)}$$

$$\delta_o = \text{Lendutan akibat gaya prategang (mm)}$$

$$I_e = \text{Momen inersia efektif (mm}^4\text{)}$$

$$W_0 = 600 \text{ KN/m}$$

$$W_L = 1000 \text{ KN/m}$$

$$W_D = 437.5 \text{ KN/m}$$

$$\delta_D = \text{Lendutan akibat beban mati (mm)}$$

$$\delta_L = \text{Lendutan akibat beban hidup (mm)}$$

$$\delta_T = \text{Lendutan total (mm)}$$

Tabel 5.10 Lendutan jangka panjang pada balok prategang penuh dan prategang sebagian untuk panjang bentang (L) = 25 meter

NO	% PRATEGANG	LENDUTAN WAKTU (t) dalam HARI					
		$\delta_{28 \text{ hari}}$ (mm)	$\delta_{30 \text{ hari pertama}}$ (mm)	$\delta_{30 \text{ hari}}$ (mm)	$\delta_{120 \text{ hari}}$ (mm)	$\delta_{360 \text{ hari}}$ (mm)	$\delta_{1825 \text{ hari}}$ (mm)
1	100 %	-44.0899	-49.0059	19.8189	11.1798	3.0774	-7.9094
2	90 %	-44.0899	-50.3654	23.6718	15.7842	8.0084	-2.9455
3	80 %	-44.0899	-50.2143	25.4808	17.7078	9.9528	-1.0672
4	70 %	-44.0899	-49.6519	30.5759	23.3561	15.8249	4.7883
5	60 %	-44.0899	-50.3837	33.8563	26.9776	19.5325	14.7347

Keterangan:

$$f_c = 45 \text{ MPa}$$

$$f_{pu} = 1860 \text{ MPa}$$

$$f_y = 360 \text{ MPa}$$

$$\delta_{pi} = \text{Lendutan akibat gaya prategang (mm)}$$

$$\delta_o = \text{Lendutan akibat gaya prategang (mm)}$$

$$I_e = \text{Momen inersia efektif (mm}^4\text{)}$$

$$W_0 = 11.76 \text{ KN/m}$$

$$W_L = 20 \text{ KN/m}$$

$$W_D = 8.75 \text{ KN/m}$$

$$\delta_D = \text{Lendutan akibat beban mati (mm)}$$

$$\delta_L = \text{Lendutan akibat beban hidup (mm)}$$

$$\delta_T = \text{Lendutan total (mm)}$$

Tabel 5.11 Tegangan yang terjadi pada balok prategang penuh dan prategang sebagian untuk panjang bentang (L) = 30 meter

NO	% PRATEGANG	TYPE TENDON	E (mm)	TEGANGAN BETON (MPa)				TEGANGAN TENDON (MPa)	
				SAAT TRANSFER		SAAT LAYAN		SAAT TRANSFER	SAAT LAYAN
				f_t	f_b	f_t	f_b	F_{pt}	F_{pe}
1	100 %	37K5	1195.6	0.2398	-21.3859	-16.1884	0.1495	1158.3	1005
2	90 %	37K5	1328.4	0.5829	-21.0911	-13.6995	1.3084	1156.709	997.025
3	80 %	37K5	1494.4	1.3641	-21.0166	-12.7508	2.9461	1153.352	741.199
4	70 %	27K5	1707.9	1.4034	-20.2032	-11.8174	3.2183	1151.4473	1000.0396
5	60 %	27K5	1992.6	1.4341	-19.3262	-10.9627	2.3109	1147.988	995.2592

Keterangan:

f_c = 45 MPa	W_0 = 12.5 KN/m
f_{pu} = 1860 MPa	W_L = 22 KN/m
f_y = 360 MPa	W_D = 8.75 KN/m
f_{ci} = -21.6 MPa	f_{ti} = +1.5 MPa
f_{cs} = -20.25 MPa	f_{ts} = +3.35 MPa
f_t = Tegangan serat atas saat transfer (MPa)	f_{bt} = Tegangan serat bawah saat transfer (MPa)
f_t = Tegangan serat atas saat layan (MPa)	f_b = Tegangan serat bawah saat layan (MPa)
f_{pt} = Tegangan tendon saat transfer (MPa)	f_{pe} = Tegangan tendon saat layan (MPa)
E = Eksentrisitas (mm)	

Tabel 5.12 Luasan tulangan baja prategang dan baja non-prategang serta kapasitas momen untuk panjang bentang (L) = 30 meter

N0	% PRATEGANG	TYPE TENDON	P_i (MPa)	P_e (MPa)	M_{np} (MPa)	A_{ps} (mm)	A_s (mm)
1	100 %	37K5	5938	4750.4	9358.0929	4754.7352	0
2	90 %	37K5	5344.2	4275.36	9358.0929	4291.9268	5107.9205
3	80 %	37K5	4750.4	3900.32	9358.0929	3829.1144	6413.5724
4	70 %	27K5	4156.6	3325.28	9358.0929	3366.3612	7767.3625
5	60 %	27K5	3562.8	2850.24	9358.0929	2903.4885	9169.8801

Keterangan:

f'_c = 45 MPa
 f_{pu} = 1860 MPa
 f_y = Gaya prategang awal (KN)
 P_i = Gaya prategang awal (KN)
 A_{ps} = Luas baja prategang (mm²)
 M_{np} = Kapasitas tampang perlu (KN-m)

W_0 = 12.5 KN/m
 W_L = 22 KN/m
 W_D = 8.75 KN/m
 P_e = Gaya prategang efektif (KN)
 A_s = Luas baja non-prategang (mm²)

Tabel 5.13 Kehilangan gaya prategang pada balok prategang penuh dan prategang sebagian untuk panjang bentang (L) = 30 meter

NO	% PRATEGANG	Δfs_1 (%)	Δfs_2 (%)	Δfs_3 (%)	Δfs_4 (%)	Δfs_5 (%)	TOTAL Δfs (%)
1	100 %	5.2874	2.1603	2.2959	9.7333	3.4153	22.8436
2	90 %	6.2426	2.1667	2.0982	9.7333	3.4254	23.6662
3	80 %	5.971	2.1746	2.1739	9.7333	3.4380	23.4571
4	70 %	5.7324	2.1849	2.2323	9.7333	3.4543	23.3373
5	60 %	5.7198	2.1986	2.2563	9.7333	3.4759	23.3841

Keterangan:

$f_c' = 45 \text{ MPa}$

$f_{pu} = 1860 \text{ MPa}$

$f_y = 360 \text{ MPa}$

$\Delta fs_1 =$ Kehilangan gaya prategang akibat rangkai

$\Delta fs_2 =$ Kehilangan gaya prategang akibat susut beton

$\Delta fs_3 =$ Kehilangan gaya prategang akibat relaksasi beton

$\Delta fs_4 =$ Kehilangan gaya prategang akibat friksi beton

$\Delta fs_5 =$ Kehilangan gaya prategang akibat pergeseran jangkar

Tabel 5.14 Lendutan jangka pendek pada balok prategang penuh dan prategang sebagian untuk panjang bentang (L) = 30 meter

NO	% PRATEGANG	MOMEN INERSIA EFEKTIF (I_e) mm^4	LENDUTAN JANGKA PENDEK					
			SAAT TRANSFER			SAAT LAYAN		
			GAYA PRATEGANG (δ_{pi}) mm	BERAT SENDIRI (δ_o) mm	TOTAL (δ_T) mm	BEBAN MATI (δ_D) mm	BEBAN HIDUP (δ_L) mm	TOTAL (δ_T) mm
1	100 %	$2.115.10^{11}$	-77.897	30.6009	-48.0157	42.5875	20.3738	62.19613
2	90 %	$1.6958.10^{11}$	-78.156	30.6009	-48.0157	44.8711	17.2606	62.1316
3	80 %	$1.5775.10^{11}$	-78.482	30.6009	-48.0157	47.1128	18.5543	65.6671
4	70 %	$1.4781.10^{11}$	-78.616	30.6009	-48.0157	48.9982	19.8023	68.8006
5	60 %	$1.3963.10^{11}$	-78.708	30.6009	-48.0157	50.5892	20.9626	71.5518

Keterangan:

$$f_c = 45 \text{ MPa}$$

$$f_{pu} = 1860 \text{ MPa}$$

$$f_y = 360 \text{ MPa}$$

$$\delta_{pi} = \text{Lendutan akibat gaya prategang (mm)}$$

$$\delta_o = \text{Lendutan akibat gaya prategang (mm)}$$

$$I_e = \text{Momen inersia efektif (mm}^4\text{)}$$

$$W_0 = 600 \text{ KN/m}$$

$$W_L = 1000 \text{ KN/m}$$

$$W_D = 437.5 \text{ KN/m}$$

$$\delta_D = \text{Lendutan akibat beban mati (mm)}$$

$$\delta_L = \text{Lendutan akibat beban hidup (mm)}$$

$$\delta_T = \text{Lendutan total (mm)}$$

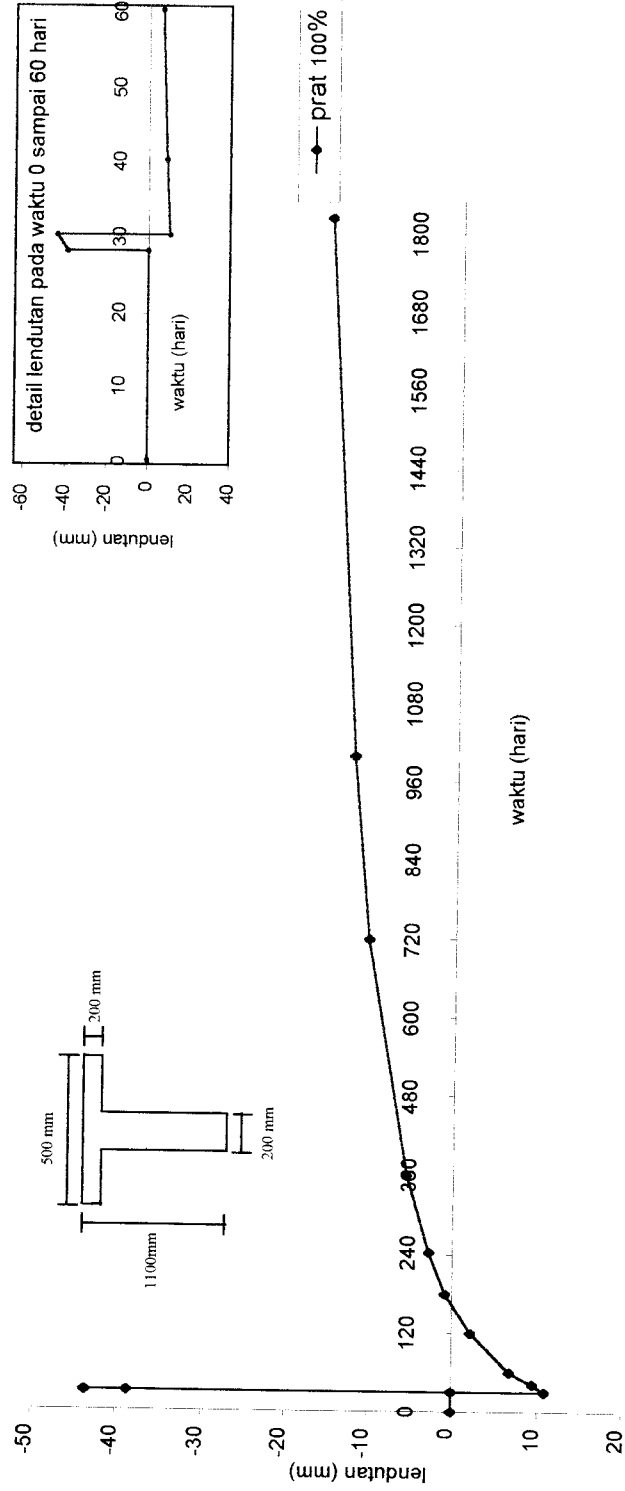
Tabel 5.15 Lendutan jangka panjang pada balok prategang penuh dan prategang sebagian untuk panjang bentang (L) = 30 meter

NO	% PRATEGANG	LENDUTAN WAKTU (t) dalam HARI					
		$\delta_{28 \text{ hari}}$ (mm)	$\delta_{50 \text{ hari pertama}}$ (mm)	$\delta_{90 \text{ hari}}$ (mm)	$\delta_{120 \text{ hari}}$ (mm)	$\delta_{360 \text{ hari}}$ (mm)	$\delta_{1825 \text{ hari}}$ (mm)
1	100 %	-48.0157	-49.579	28.6122	20.1481	11.8464	0.1953
2	90 %	-48.0157	-51.715	30.6689	22.9084	14.9360	3.3724
3	80 %	-48.0157	-50.67	35.830	28.5690	20.7917	9.9162
4	70 %	-48.0157	-49.744	40.2170	32.7581	24.7316	12.7291
5	60 %	-48.0157	-48.348	44.5344	38.0950	30.6519	19.0361

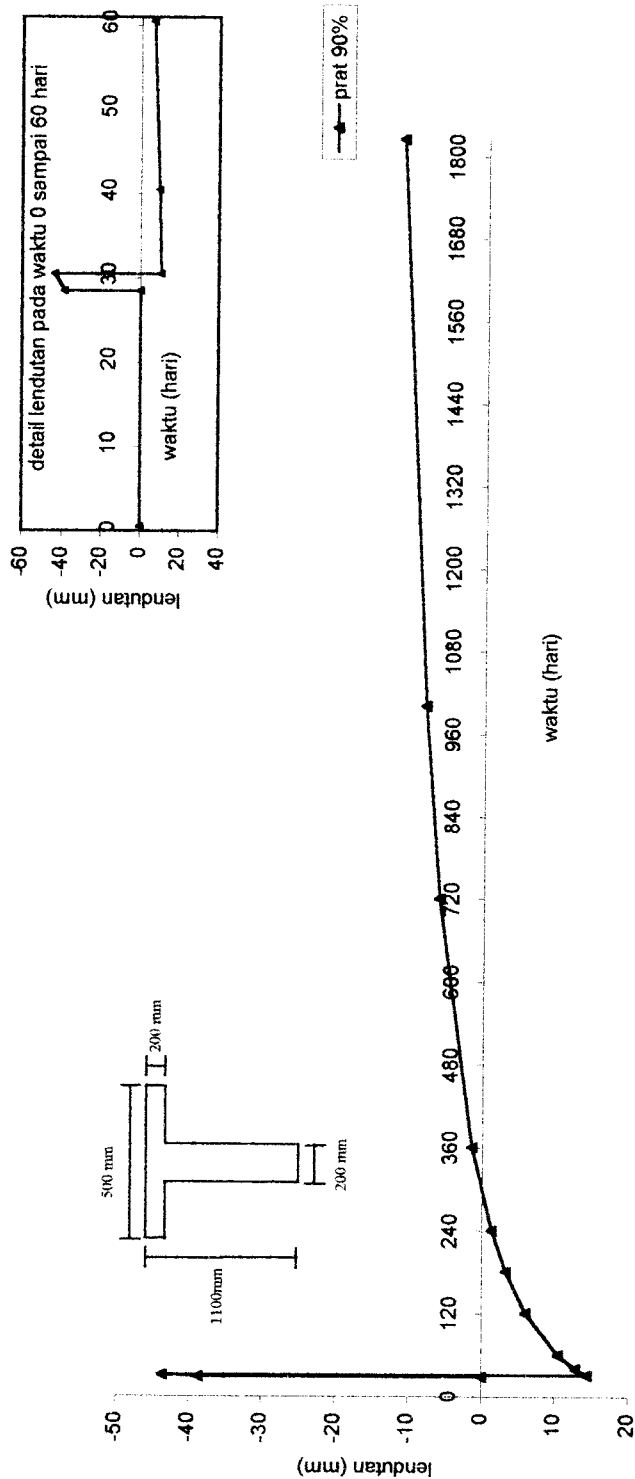
Keterangan:

f_c	= 45 MPa	W_0	= 12.5 KN/m
f_{pu}	= 1860 MPa	W_L	= 22 KN/m
f_y	= 360 MPa	W_D	= 8.75 KN/m
δ_{pi}	= Lendutan akibat gaya prategang (mm)	δ_D	= Lendutan akibat beban mati (mm)
δ_o	= Lendutan akibat gaya prategang (mm)	δ_L	= Lendutan akibat beban hidup (mm)
I_c	= Momen inersia efektif (mm^4)	δ_T	= Lendutan total (mm)

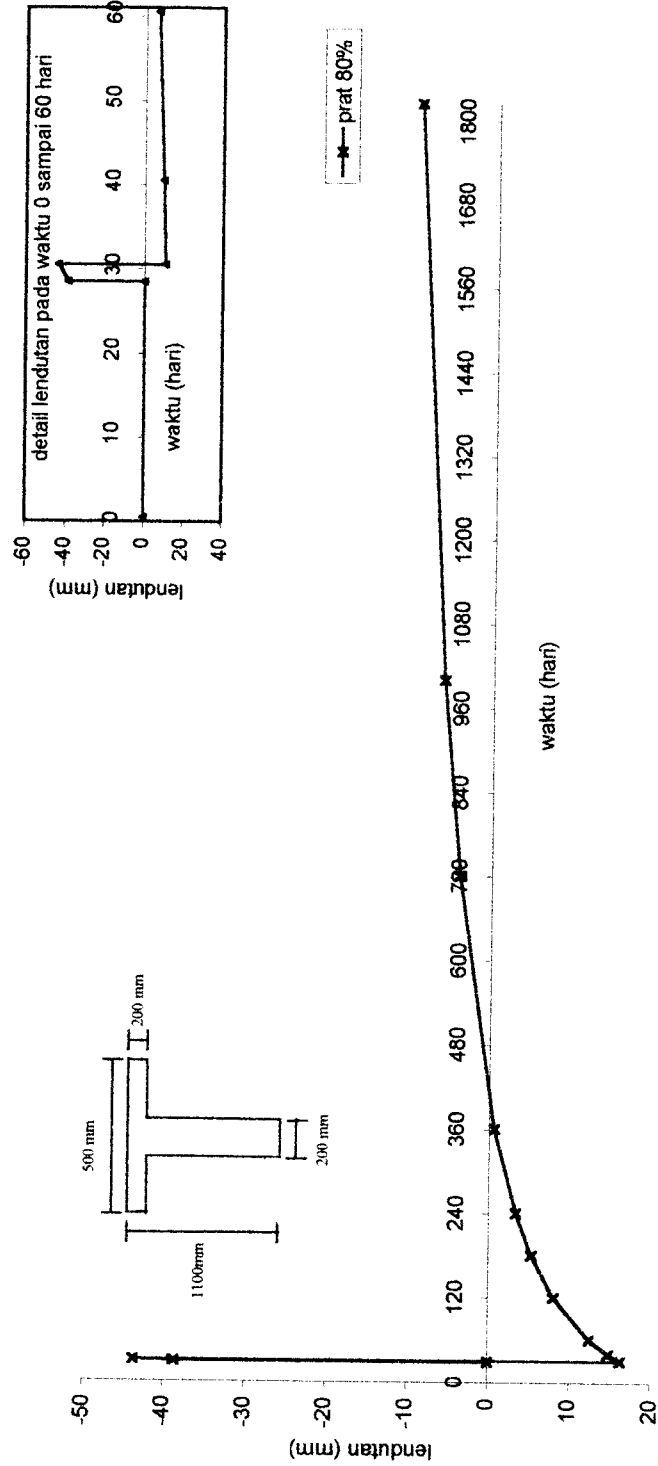
Grafik 5.1 Lendutan balok prategang penuh bentang 20m



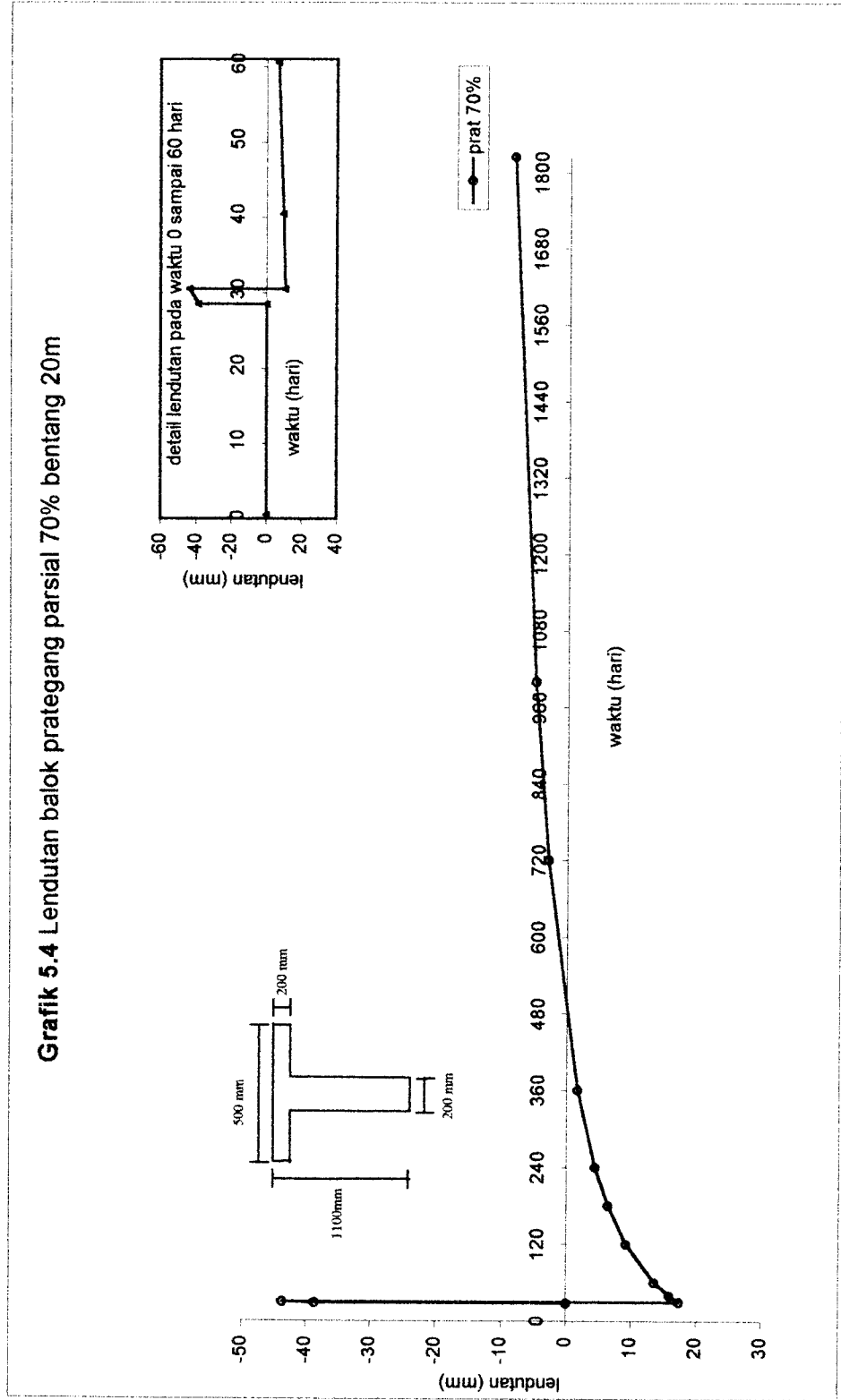
Grafik 5.2 Lentutan balok prategang parsial 90% bentang 20m



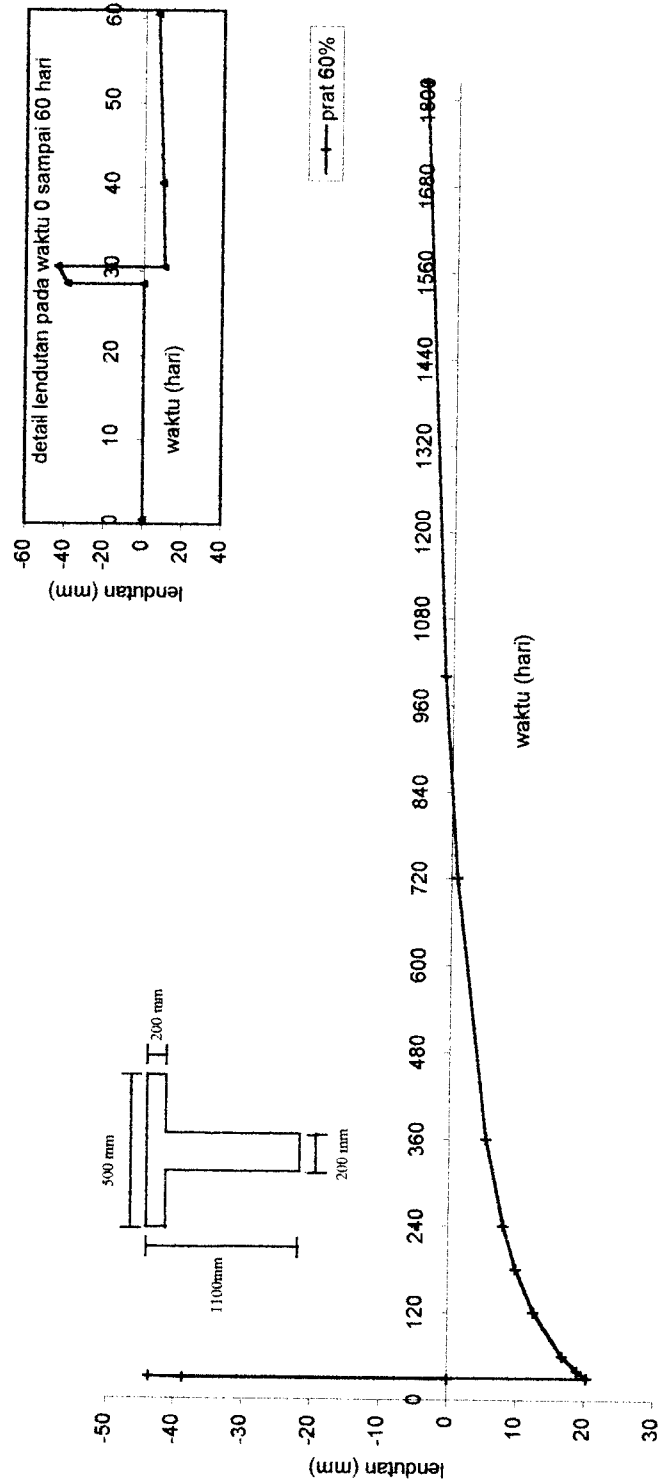
Grafik 5.3 Lendutan balok prategang parsial 80% bentang 20m



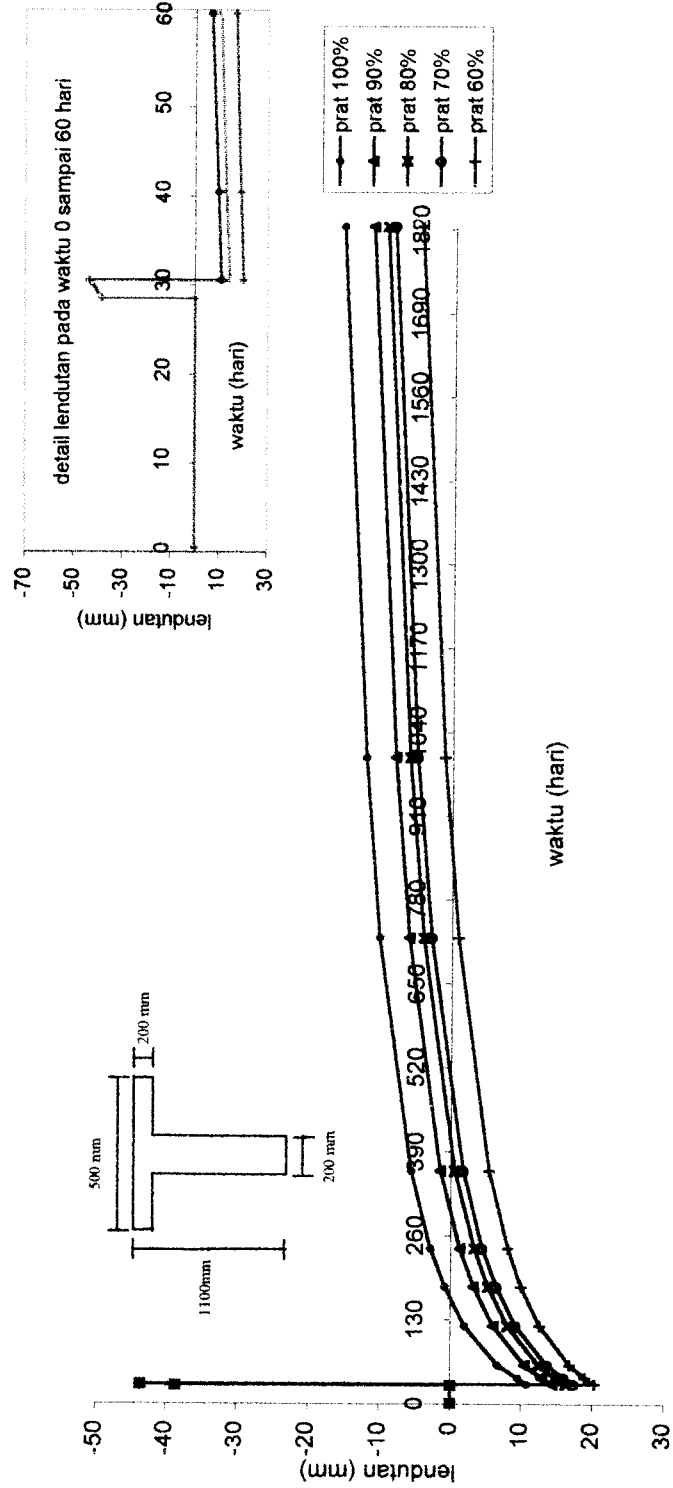
Grafik 5.4 Lentutan balok prategang parsial 70% bentang 20m



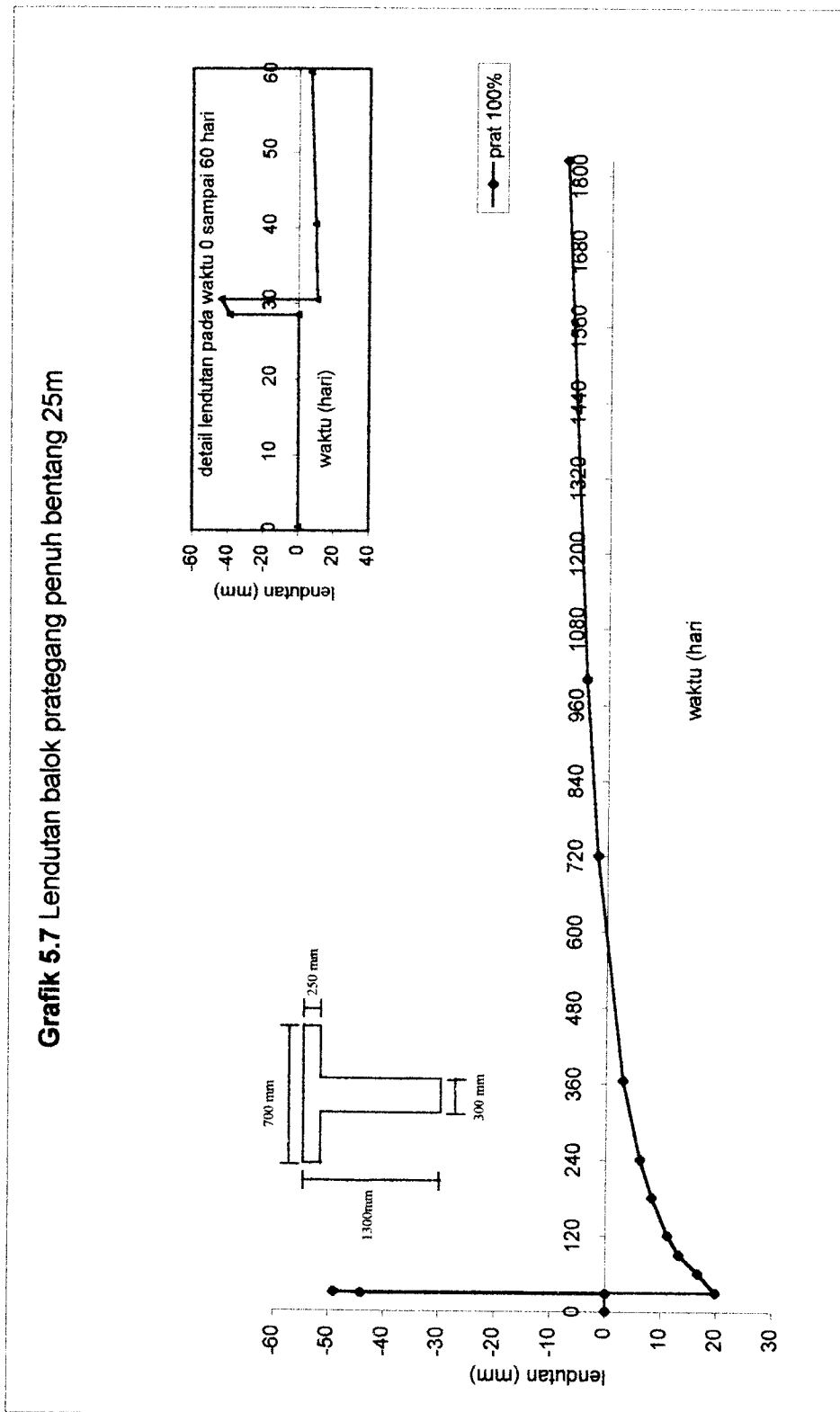
Grafik 5.5 Lentutan balok prategang parsial 60% bentang 20m



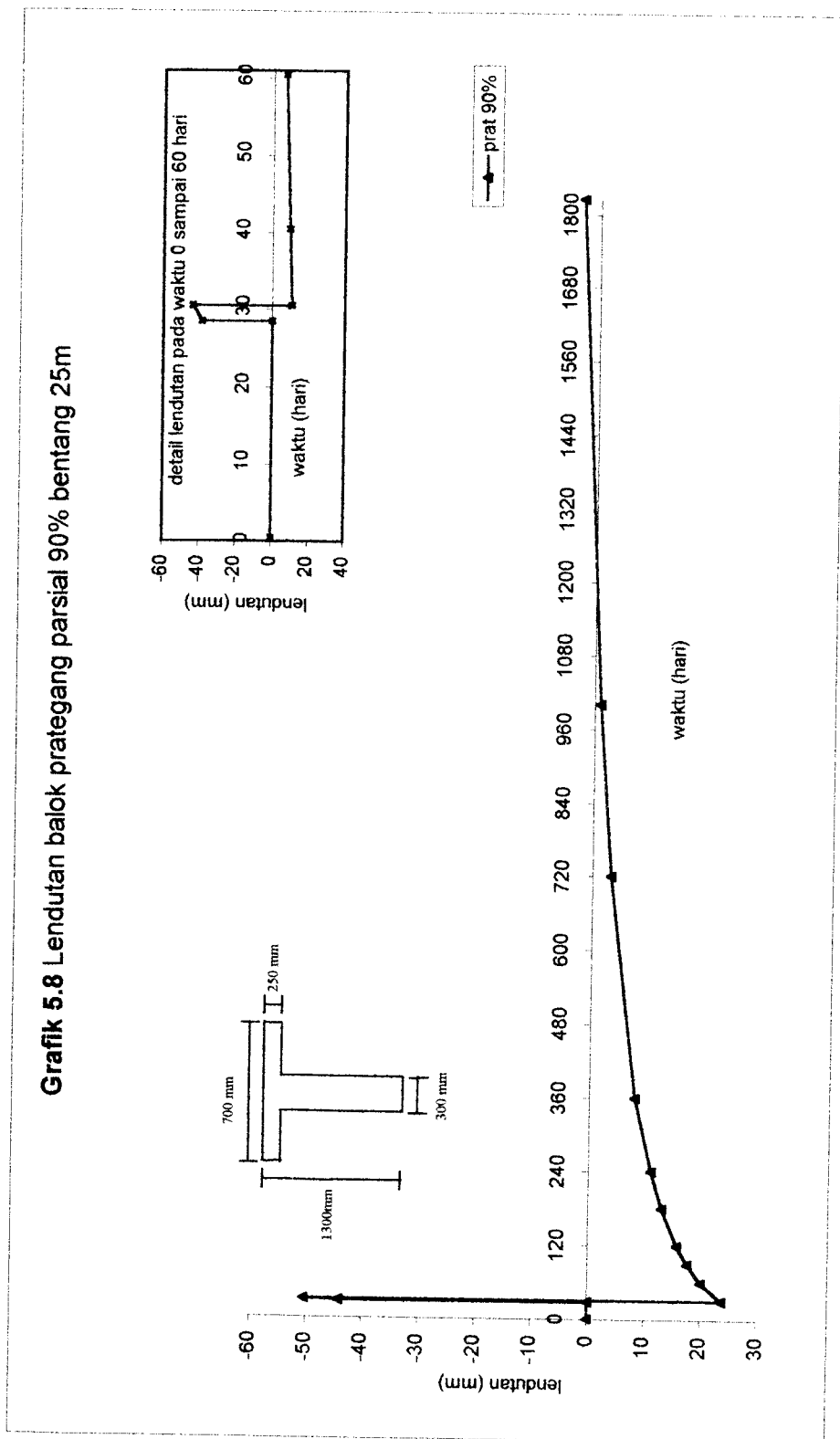
Grafik 5.6 Lentutan balok prategang penuh, parsial 90%, 80%, 70%, dan 60% bentang 20m



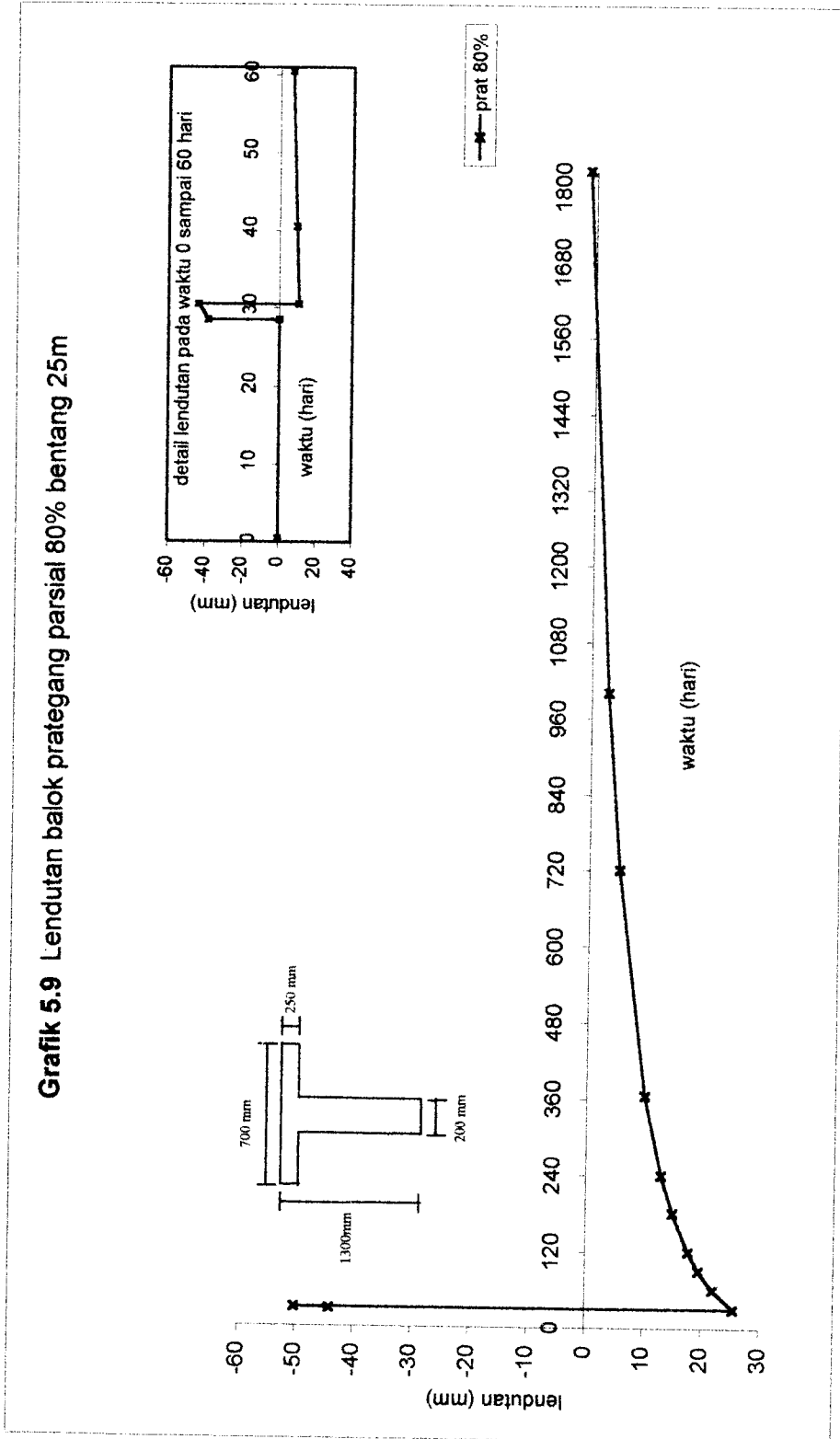
Grafik 5.7 Lendutan balok prategang penuh bentang 25m



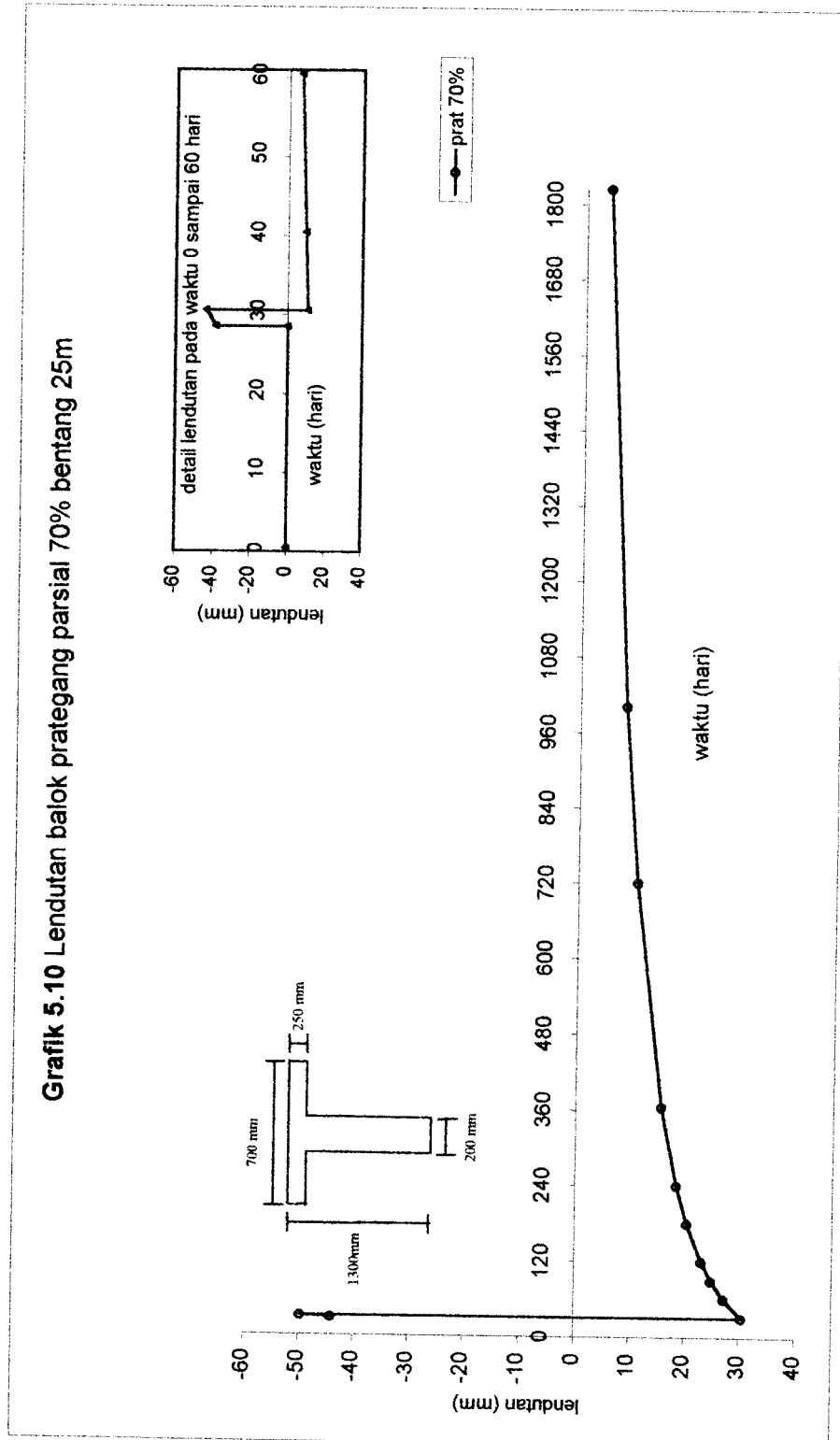
Grafik 5.8 Lendutan balok prategang parsial 90% bentang 25m



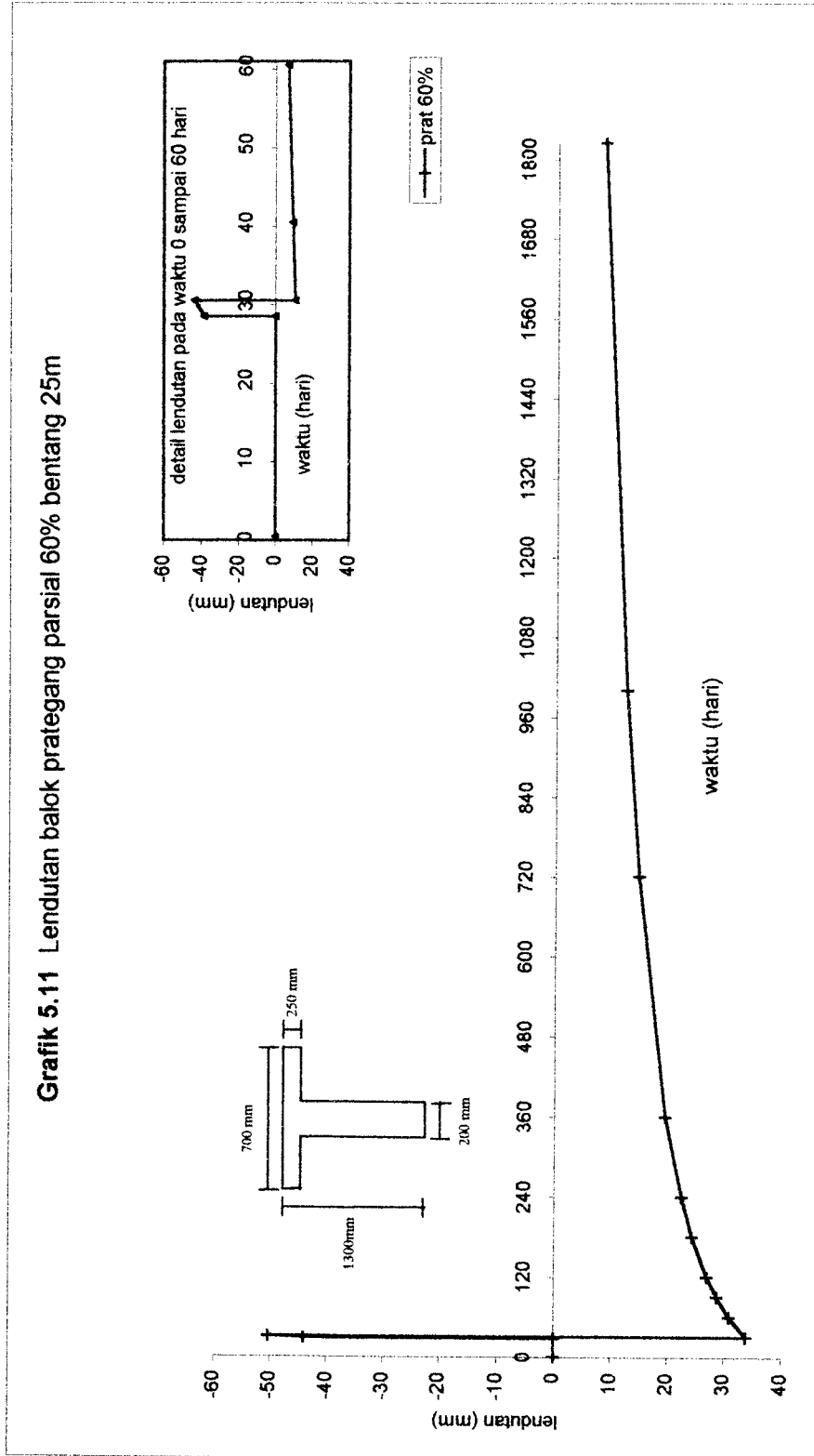
Grafik 5.9 Lendutan balok prategang parsial 80% bentang 25m



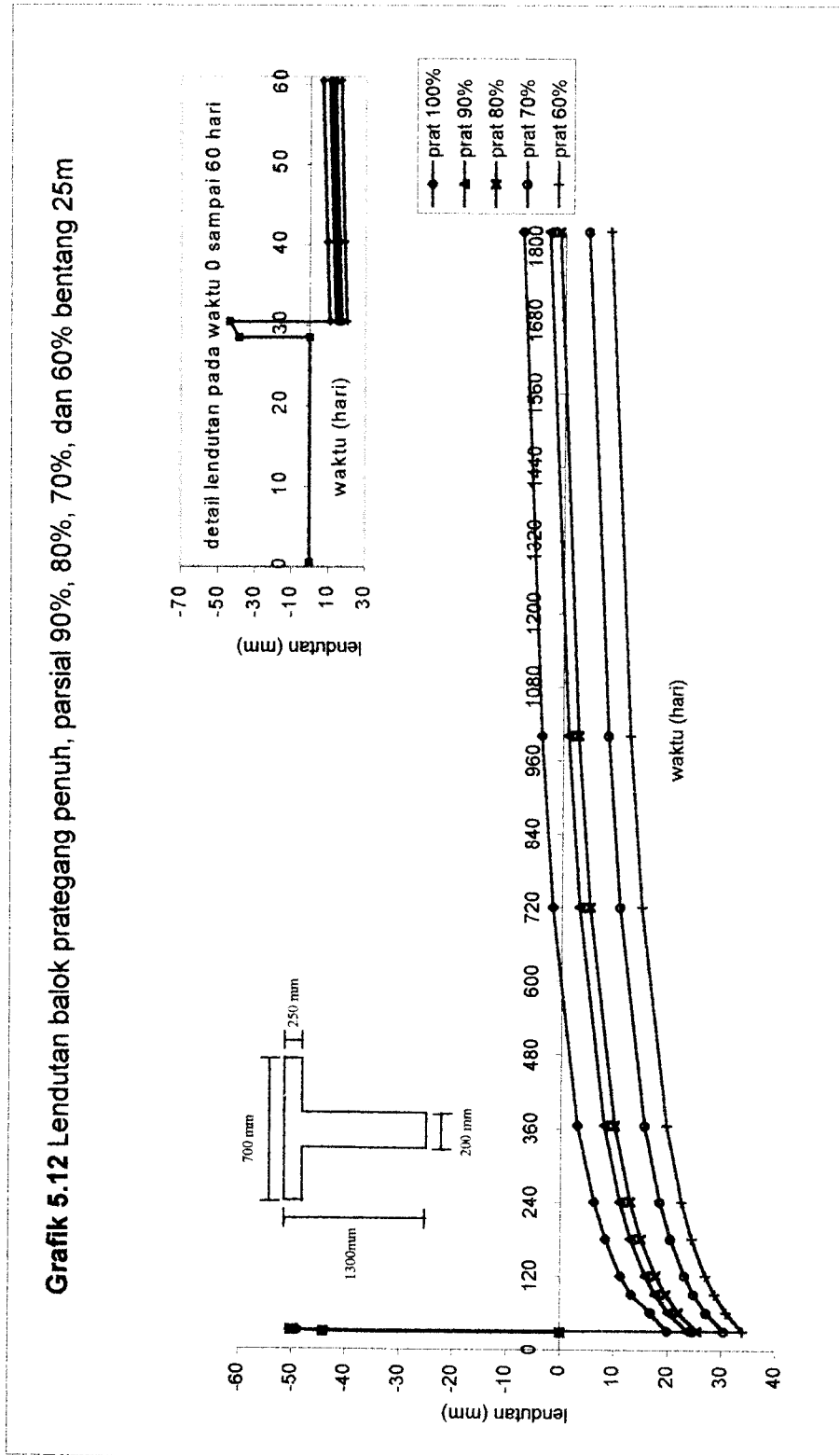
Grafik 5.10 Lendutan balok prategang parsial 70% bentang 25m



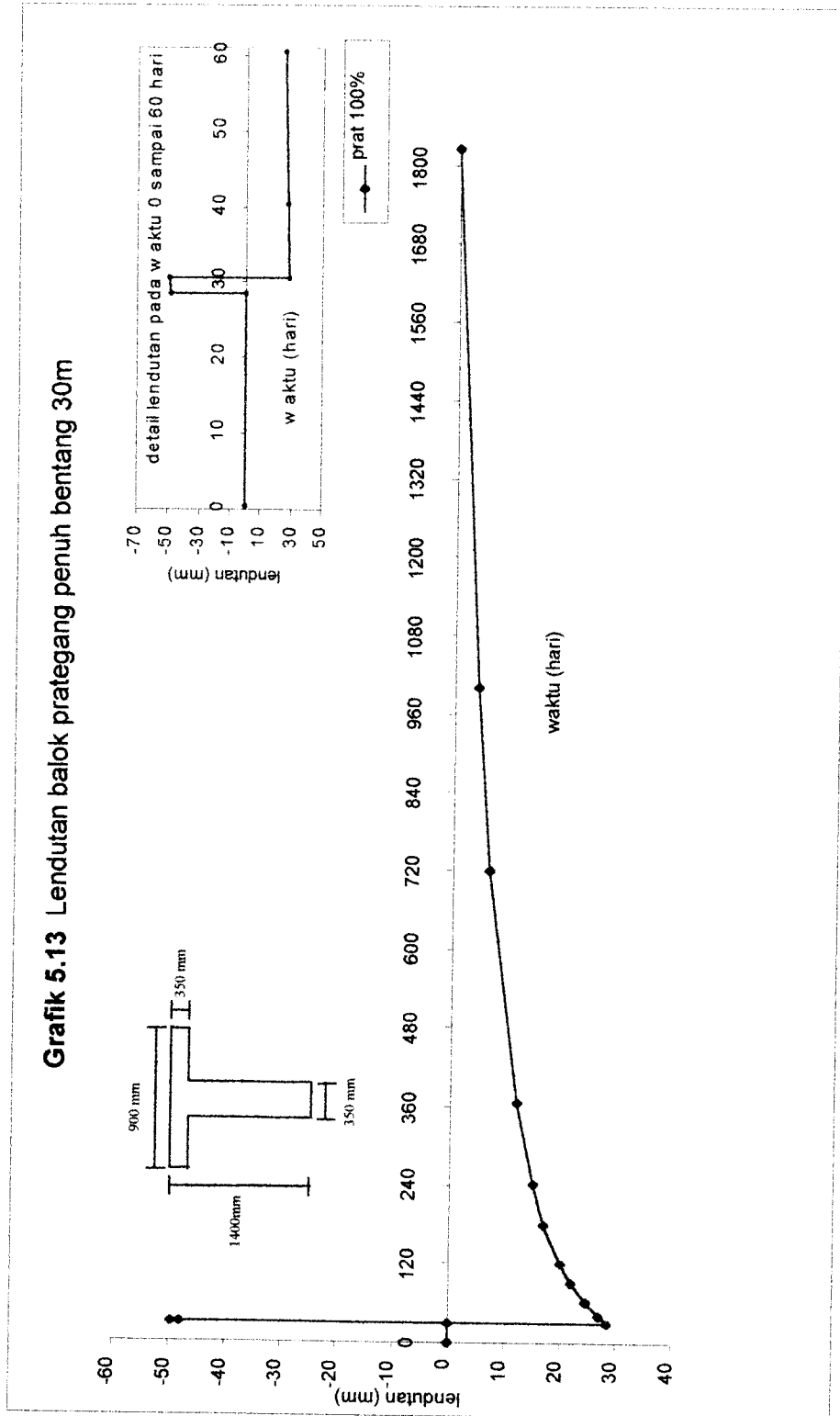
Grafik 5.11 Lendutan balok prategang parsial 60% bentang 25m



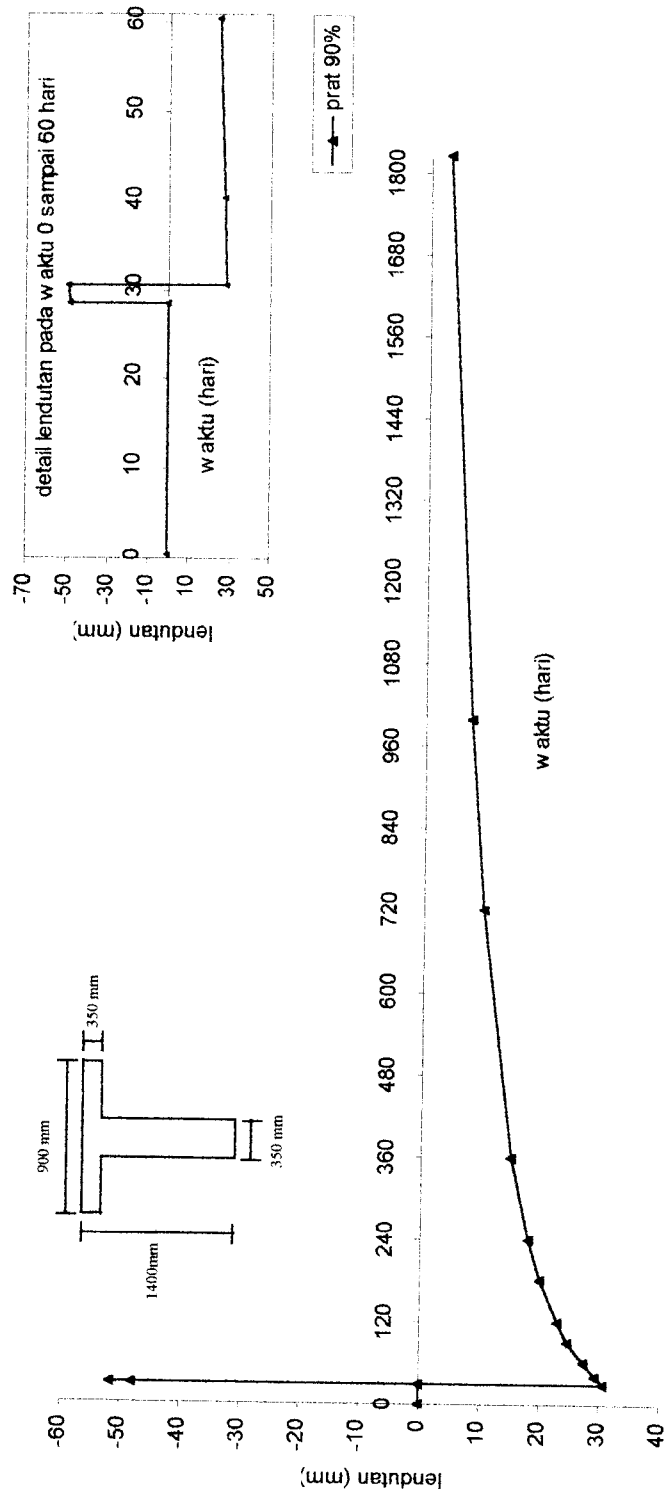
Grafik 5.12 Lentutan balok prategang penuh, parsial 90%, 80%, 70%, dan 60% bentang 25m



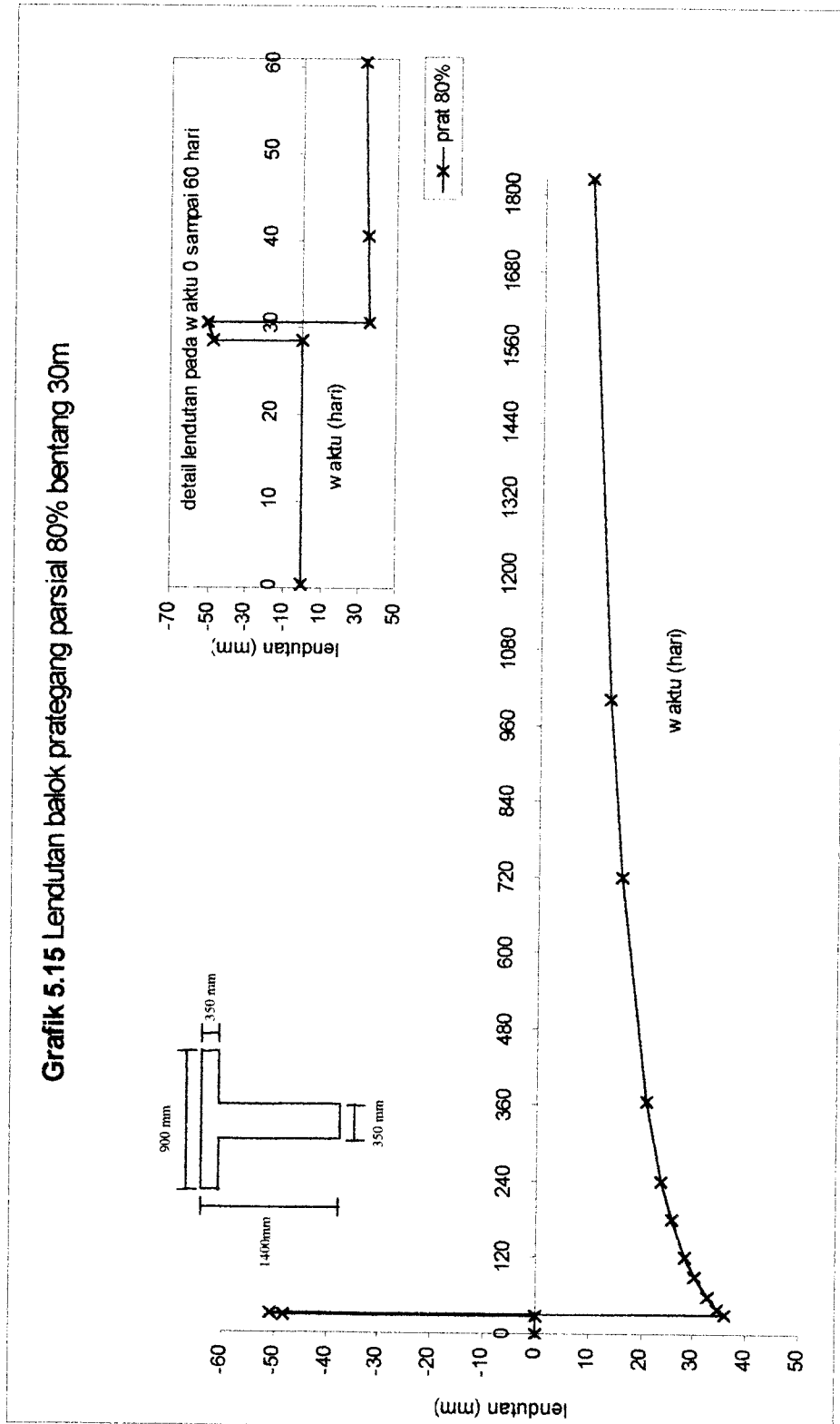
Grafik 5.13 Lendutan balok prategang penuh bentang 30m



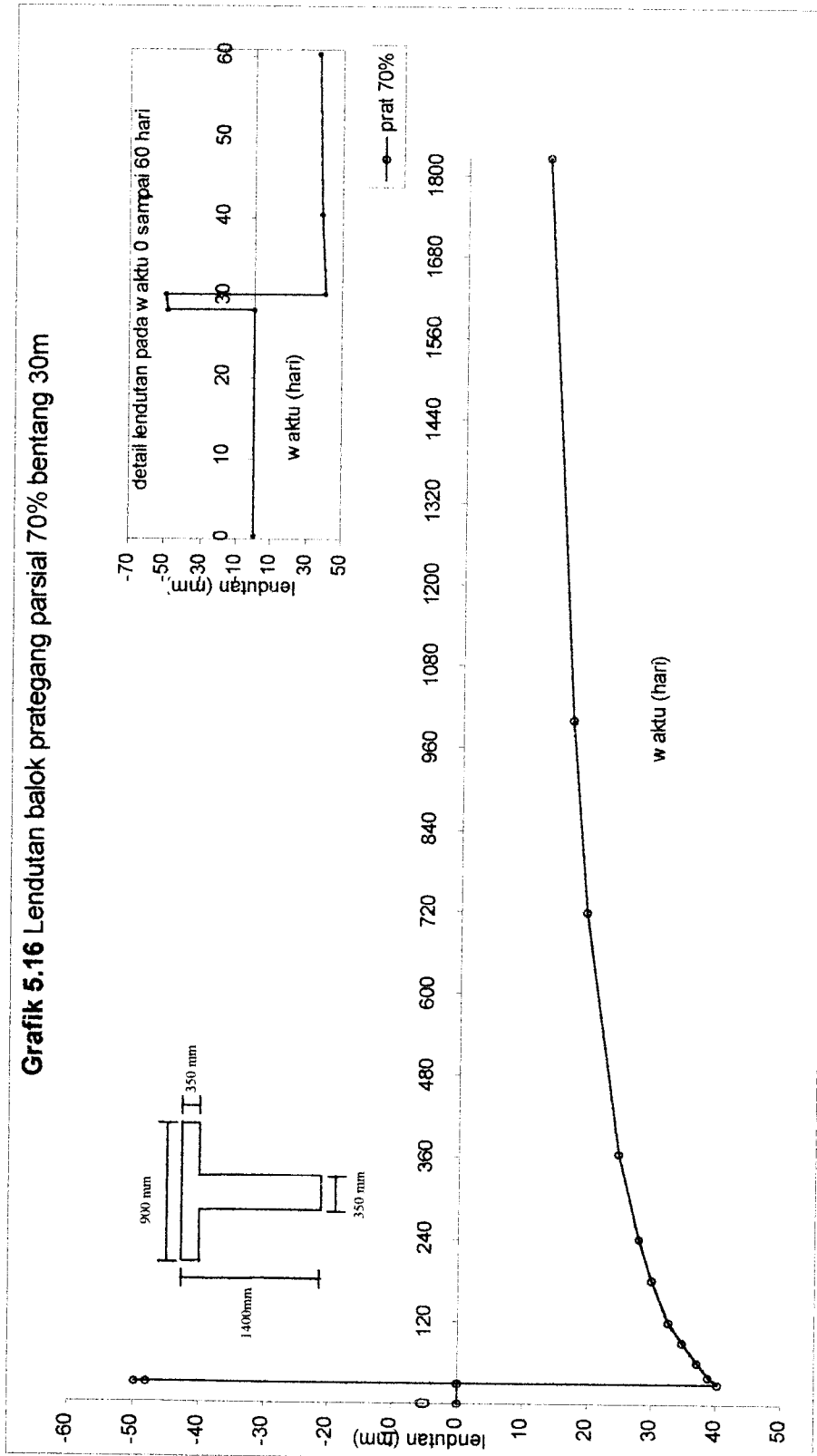
Grafik 5.14 Lendutan balok prategang parsial 90% bentang 30m

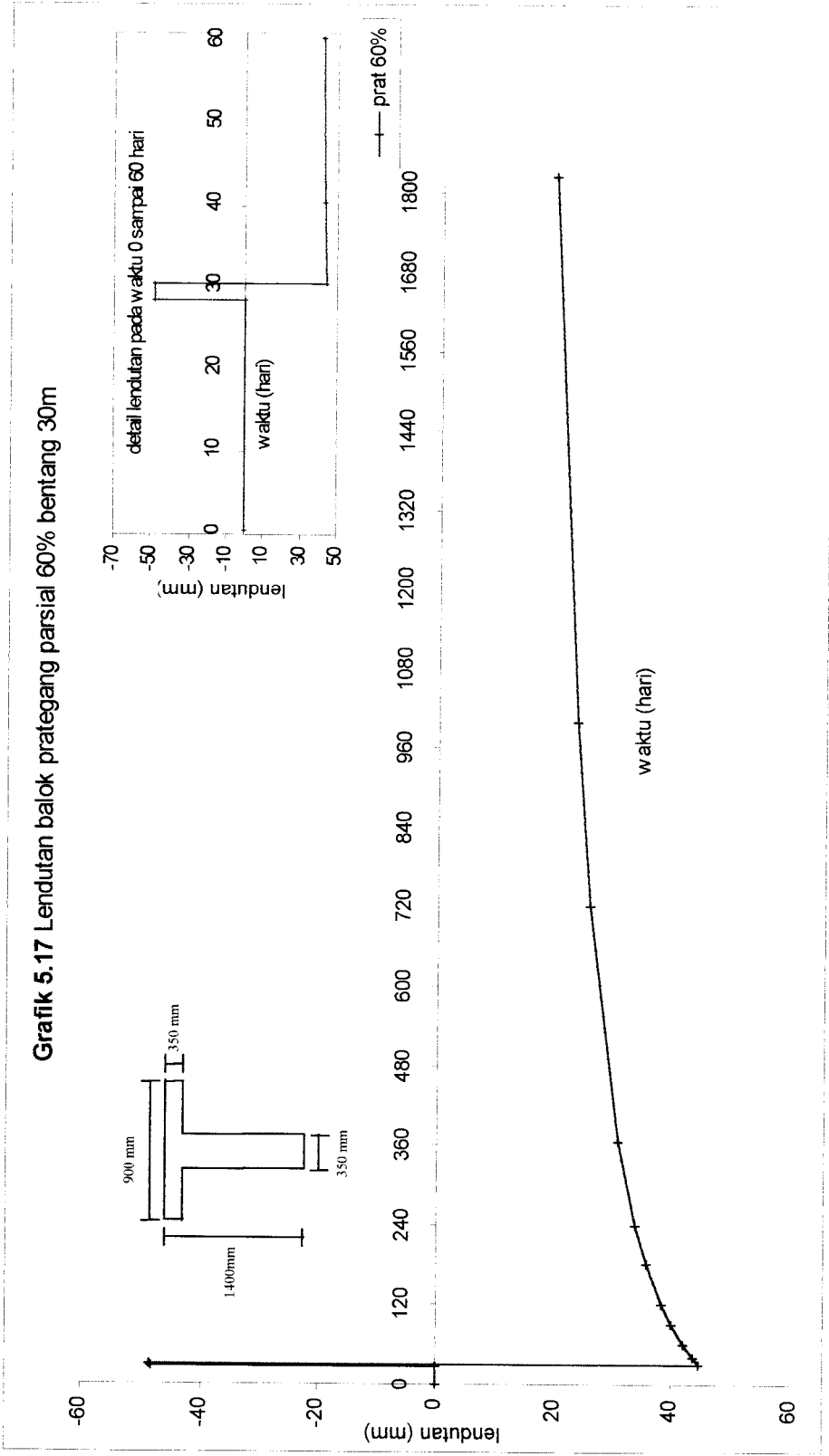


Grafik 5.15 Lentutan balok prategang parsial 80% bentang 30m

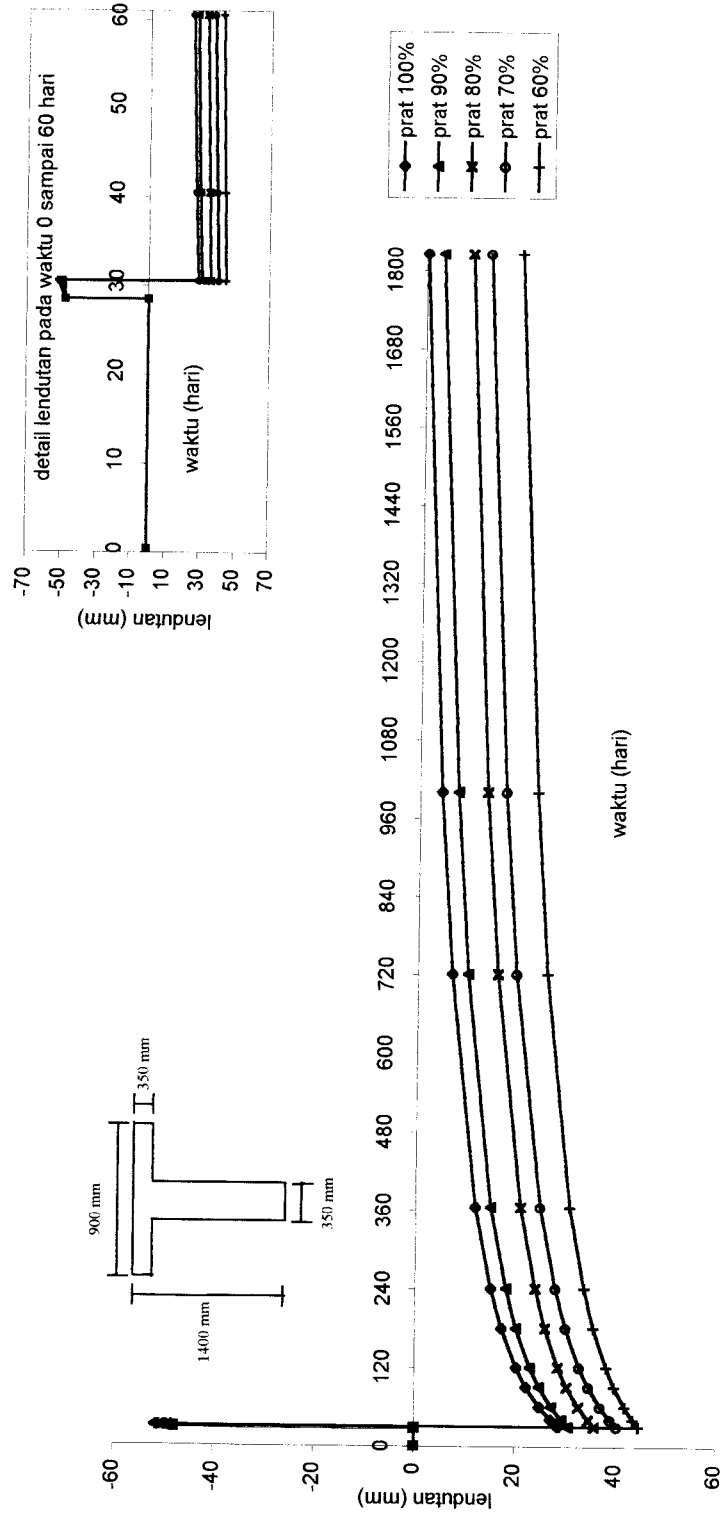


Grafik 5.16 Lentutan balok prategang parsial 70% bentang 30m





Grafik 5.18 Lendutan balok prategang penuh, parsial 90%, 80%, 70%, dan 60% bentang 30m



BAB VI

KESIMPULAN DAN SARAN

6.1 Kesimpulan

Berdasarkan uraian dari Bab I sampai dengan Bab V, disini dapat disimpulkan sebagai berikut :

1. Besarnya gaya prategang dalam desain prategang parsial menjadi dasar dalam penggunaan jumlah tulangan prategang (serat tendon) dan tulangan non-prategang. Untuk mencapai kapasitas penampang yang sama dengan kapasitas penampang prategang penuh, maka semakin berkurang jumlah serat tendon yang digunakan semakin banyak jumlah tulangan non-prategang yang digunakan.
2. Pengurangan jumlah tendon akan memperbesar tegangan tarik yang terjadi karena eksentrisitas yang terjadi semakin besar, tetapi akan tetap aman apabila masih dibawah tegangan tarik ijin beton.
3. Pada setiap bentang adanya pengurangan gaya prategang akan tetap menghasilkan lendutan ke atas (camber) yang sama karena eksentrisitas tendon terhadap titik berat beton semakin besar.
4. Pengaruh faktor yang berhubungan dengan umur beton pada saat penambahan beban adalah memperbesar lendutan baik itu lendutan akibat gaya prategang (lendutan ke atas), lendutan akibat berat sendiri (lendutan ke bawah) dan lendutan akibat beban luar (lendutan ke bawah).

5. Semakin panjang bentang semakin besar pula lendutan akibat berat sendiri balok dan beban luar, sehingga pada umur pembebanan yang relatif lama superposisi lendutan pada bentang panjang dapat berupa lendutan ke bawah.

6.2 Saran

1. Untuk mengantisipasi semakin berkembangnya teknologi dan ilmu pengetahuan dimana beton prategang parsial akan sering digunakan pada pembangunan bidang teknik sipil. Hendaknya materi prategang parsial dapat ikut ditambahkan pada silabus materi beton prategang.
2. Perlu adanya kerja sama yang lebih jauh lagi antara pihak akademis dengan instansi terkait juga para praktisi dilapangan untuk mengetahui lebih jauh tentang desain prategang khususnya prategang parsial.
3. Sebaiknya dalam menentukan persentase gaya prategang yang akan diberikan meninjau karakteristik lendutannya sesuai dengan fungsi struktur.

DAFTAR PUSTAKA

1. Edward g. Nawy, 1995, **PRESTRESSED CONCRETE**
“FUNDAMENTAL APPROACH”, Second edition, Upper Saddle River
Jersey, USA.
2. TY Lin, 1981, **DESIGN OF PRESTRESSED STRUCTURE**, Third edition,
Jhon Wiley and Son, New York, USA.
3. Istmawan Dipohusodo, **STRUKTUR BETON BERTULANG**, Edisi ketiga,
PT Gramedia Pustaka Utama, Jakarta, Indonesia.
4. Arthur H Nelson, 1987, **DESIGN OF PRESTRESSED CONCRETE**,
Second edition, Jhon Wiley and Son, New York, USA.
5. N Krisna Raju, 1981, **BETON PRATEKAN**, Terjemahan, Erlangga, Jakarta,
Indonesia.
6. N.C Sinha dan S.K roy, 1991, **FUNDAMENTAL OF PRESTRESSED**
CONCRETE, Second edition, S Chan and Company, Ram Nagar, New
Delhi, India.
7. **SK SNI-15-1991, 1991**, Cipta Karya, Direktorat Jendral Pekerjaan Umum,
Jakarta, Indonesia.

LAMPIRAN



UNIVERSITAS ISLAM INDONESIA
FAKULTAS TEKNIK SIPIL DAN PERENCANAAN
JURUSAN TEKNIK SIPIL
Jl. Kaliurang Km. 14,4 Telp. 95330 Yogyakarta

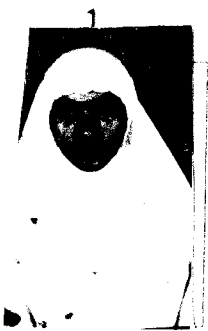
Program 168
 TA 3 sk
 R

KARTU PESERTA TUGAS AKHIR

No.	Nama	No. Mhs.	N.I.R.M.	Bidang Studi
1	INDRA	12110007		ISS
2	OWE INDIRA ANE	12110007		ISS

JUL TUGAS AKHIR :

Pen Pembimbing I : DR. H. ALA ARSUDIN, MS
 Pen Pembimbing II : DR. H. A. B. ABU ARIF, MS



Yogyakarta, April 2008
 Dekan,
 Fakultas Teknik Sipil
 dan Perencanaan

 DR. H. ALA ARSUDIN, MS

Konstanta - konstanta untuk penampang balok T

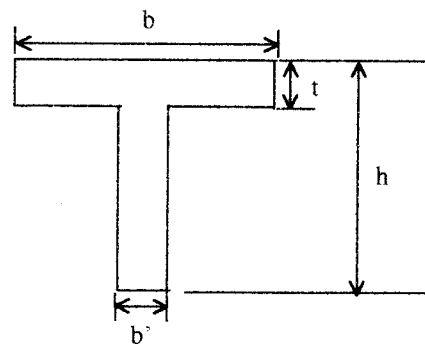
Penampang	b'/b	t/h	A^a	c_b^b	c_t^b	I^c	r^{2d}	K_t^b	K_b^b
1-a	0.1	0.1	0.19h	0.714h	0.286h	$0.0179bh^3$	$0.0945bh^3$	0.132h	0.333h
1-b	0.1	0.2	0.28	0.756	0.244	0.0192	0.0688	0.0910	0.282
1-c	0.1	0.3	0.37	0.755	0.245	0.0193	0.0520	0.0689	0.212
1-d	0.1	0.4	0.46	0.735	0.265	0.0202	0.0439	0.0597	0.165
1-e	0.2	0.1	0.28	0.629	0.371	0.0283	0.1010	0.161	0.272
1-f	0.2	0.2	0.36	0.678	0.322	0.0315	0.0875	0.129	0.272
1-g	0.2	0.3	0.44	0.691	0.309	0.0319	0.0725	0.105	0.234
20h	0.2	0.4	0.52	0.684	0.316	0.0316	0.0616	0.090	0.195
1-I	0.3	0.1	0.37	0.585	0.415	0.0365	0.0985	0.169	0.237
1-j	0.3	0.2	0.44	0.626	0.374	0.0408	0.0928	0.148	0.248
1-k	0.3	0.3	0.51	0.645	0.355	0.0417	0.0819	0.127	0.231
1-l	0.3	0.4	0.58	0.645	0.355	0.0417	0.0720	0.112	0.203
1-m	0.4	0.1	0.46	0.559	0.441	0.0440	0.0854	0.171	0.216
1-n	0.4	0.2	0.52	0.592	0.408	0.0486	0.0935	0.158	0.229
1-o	0.4	0.3	0.58	0.609	0.391	0.0499	0.0860	0.141	0.220
1-p	0.4	0.4	0.64	0.612	0.388	0.0502	0.0785	0.128	0.205
1-q	1.0	1.0	1.00	0.500	0.500	0.0833	0.0833	0.167	0.167

^a Diberikan sebagai fungsi bh

^b Diberikan sebagai fungsi h

^c Diberikan sebagai fungsi bh^3

^d Diberikan sebagai fungsi h^2



Penampang untuk konstanta-konstanta tabel di atas

Tabel jenis tendon sistem rentang K- Freyssinet

Batas-batas monogrup K 0.5 in

Type angkurr	Jumlah strand	Diameterselongsong dalam (min) (inc)	Gaya prategang (k) % Kekuatan patah minimum			Sistem dan type dongkrak
			70%	80%	100%	
1M5	1	1	28.9	33.0	41.3	K100
7K5	2		57.8	66.0	82.6	
	3		86.7	99.0	124	
	4		116	132	165	
	5		145	165	207	
	6		174	198	248	
	7	2 ^{1/8}	202	231	289	
12K5	8		231	264	330	K200
	9		260	297	372	
	10		289	330	413	
	11		318	363	454	
	12	2 ^{1/2}	347	396	496	
19K5	13		376	429	537	K350
	14		405	462	578	
	15		434	495	620	
	16		463	528	661	
	17		491	561	702	
	18		520	594	743	
	19		549	627	785	
	20	3 ^{3/8}	578	660	826	
27K5	21		607	693	867	K500
	22		636	726	909	
	23		665	759	950	
	24		694	792	991	
	25		729	825	1032	
	26		752	858	1074	
	27	3 ^{3/4}	781	891	1115	
37K5	28		810	924	1156	K700
	29		838	957	1198	
	30		867	990	1239	
	31		896	1023	1280	
	32		925	1056	1322	
	33		954	1089	1363	
	34		982	1122	1404	
	35		1012	1155	1033	
	36		1041	1188	1074	
	37	4 ^{1/2}	1070	1221	1528	
55K5	38					K1000
	to 55	5 ^{1/8}	1590	1817	2271	

(1 k = 4.448 kN)

Digunakan atas ijin Freyssinet International Konversi S.I.

Nilai K_{SH} untuk komponen struktur PASCA-TARIK

Jangka waktu								
setelah perawatan								
basah sampai								
pada penerapan								
prategang, hari	1	3	5	7	10	20	30	60
K_{SH}	0.92	0.85	0.80	0.77	0.73	0.64	0.58	0.45

Nilai-nilai K_{re} dan J

Tipe tendon	K_{re} (MPa)	J
Strand atau kawat stress-relieved		
derajat 1860 MPa	138	0.15
Strand atau kawat stress-relieved		
derajat 1720 MPa	128	0.14
Kawat stress-relieved derajat 1655 MPa		
atau 1620 MPa	121	0.13
Strand relaksasi-rendah derajat 1860 MPa	35	0.040
Kawat relaksasi-rendah derajat 1720 MPa	32	0.037
Kawat relaksasi-rendah derajat 1655 MPa		
atau 1620 MPa	30	0.035
Batang stress-relieved derajat 1000 MPa		
atau 1100 MPa	41	0.05

Sesuai dengan ASTM A416-74, ASTM A421-76 atau ASTM A722-75

Nilai-nilai C

f_{pi}/f_{pu}	Strand atau kawat stress-relieved	Batang stress-relieved Atau Strand atau kawat Relaksasi-rendah
0.80		1.28
0.79		1.22
0.78		1.16
0.77		1.11
0.76		1.05
0.75	1.45	1.00
0.74	1.36	0.95
0.73	1.27	0.90
0.72	1.18	0.85
0.71	1.09	0.80
0.70	1.00	0.75
0.69	0.94	0.70
0.68	0.89	0.66
0.67	0.83	0.61
0.66	0.78	0.57
0.65	0.73	0.53
0.64	0.68	0.49
0.63	0.63	0.45
0.62	0.58	0.41
0.61	0.53	0.37
0.60	0.49	0.33

Lendutan ijin maksimum

Tipe komponen struktur	Lendutan yang diperhitungkan	Batas lendutan
Atap dasar tidak menahan atau berhubungan dengan komponen nonstruktural yang mungkin akan rusak akibat lendutan yang besar	Lendutan akibat beban hidup (L)	/ 180
Lantai tidak menahan atau berhubungan dengan komponen nonstruktural yang mungkin rusak akibat lendutan yang besar	Lendutan akibat beban hidup (L)	/ 360
Konstruksi atap atau lantai yang menahan atau berhubungan dengan komponen nonstruktural yang mungkin rusak akibat lendutan yang besar	Bagian dari lendutan total yang terjadi setelah pemasangan komponen nonstruktural (jumlah dari lendutan jangka panjang akibat semua beban yang bekerja dan lendutan seketika yang terjadi akibat penambahan sembarang beban hidup)	/ 480
Konstruksi atap atau lantai yang menahan atau berhubungan dengan komponen nonstruktural yang mungkin tidak rusak akibat lendutan yang besar		/ 240

Dikutip dari Tabel 3.2.5 (b) SK SNI T-15-1991-03

