

TUGAS AKHIR

**ANALISIS DAN PERENCANAAN
BALOK HYPERSTATIS NONPRISMATIS
BETON PRATEGAN**



Disusun oleh :

1. Nama : Arfani
No. Mhs : 92 310 127
NIRM : 920051013114120127
2. Nama : Zulfan Setyanto
No. Mhs : 92 310 239
NIRM : 920051013114120239

**JURUSAN TEKNIK SIPIL
FAKULTAS TEKNIK SIPIL DAN PERENCANAAN
UNIVERSITAS ISLAM INDONESIA
YOGYAKARTA
1998**

TUGAS AKHIR

ANALISIS DAN PERENCANAAN
BALOK HYPERSTATIS NONPRISMATIS
BETON PRATEGANG

Diajukan kepada Universitas Islam Indonesia
untuk memenuhi sebagian persyaratan memperoleh
derajat Sarjana Teknik Sipil

Oleh :

1. Nama : Arfani
No. Mhs : 92 310 127
NIRM : 920051013114120127
2. Nama : Zulfan Setyanto
No. Mhs : 92 310 239
NIRM : 920051013114120239

JURUSAN TEKNIK SIPIL
FAKULTAS TEKNIK SIPIL DAN PERENCANAAN
UNIVERSITAS ISLAM INDONESIA
YOGYAKARTA
1998

HALAMAN PENGESAHAN
TUGAS AKHIR


**ANALISIS DAN PERENCANAAN
BALOK HYPERSTATIS NONPRISMATIS
BETON PRATEGANG**

Disusun oleh :

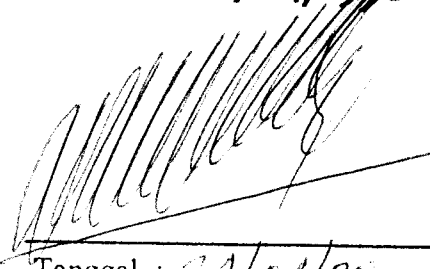
1. Nama : Arfani
No. Mhs : 92 310 127
NIRM : 920051013114120127
2. Nama : Zulfan Setyanto
No. Mhs : 92 310 239
NIRM : 920051013114120239

Telah diperiksa dan disetujui oleh :

Ir. H. Moch. Teguh, MSCE
Dosen Pembimbing I


Tanggal : 27/04/1998

Ir. A. Kadir Aboe, MS
Dosen Pembimbing II


Tanggal : 24/04/98

“ Bacalah dengan menyebut nama Tuhanmu, Yang menciptakan. Dia telah menciptakan manusia dari segumpal darah. Bacalah ! dan Tuhanmu yang paling Pemurah. Yang telah mengajar (manusia) dengan perantaraan kalam. Dia telah mengajarkan pada manusia apa yang yang tidak diketahuinya.”

Q.S. Al-'Alaq 1-5

..... Katakanlah : “ Adakah sama orang-orang yang mengetahui dengan orang-orang yang tidak mengetahui? Sesungguhnya orang yang berakallah yang dapat menerima pelajaran.”

Q.S. Az-Zumar 9

“ Allah meninggikan orang – orang yang beriman diantara kamu dan orang-orang yang diberi ilmu pengetahuan, beberapa derajat

Q.S. Al-Mujaadalah 11

*Tugas akhir ini kami persembahkan kepada :
Kedua Orang tua kami yang tercinta, kakak
dan adik-adik tersayang serta orang-orang
yang kami cintai.*

PRAKATA

Assalamu'alaikum Wr. Wb.

Puji syukur kehadiran Allah SWT, berkat rahmat dan hidayah-Nya, laporan tugas akhir ini dapat diselesaikan dengan baik.

Tugas akhir merupakan syarat mutlak bagi seorang mahasiswa yang ingin menyelesaikan studi S1 Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Islam Indonesia. Tugas akhir ini dilaksanakan setelah mahasiswa menempuh semua mata kuliah dan telah menyelesaikan tugas-tugas yang diwajibkan dalam kurikulum Program Strata 1 tahun 1995. Selain itu tugas akhir ini juga dapat melatih ketajaman berfikir serta ketajaman menganalisa suatu permasalahan dan dapat menyelesaikan permasalahan tersebut.

Dalam tugas akhir ini dibahas salah satu cara untuk mendesain dan menganalisis suatu struktur balok yang mempunyai dimensi penampang berubah-ubah sepanjang bentangan dan digunakan metode beton prategang dengan tujuan diperoleh balok yang efisien dan aman.

Disadari bahwa tugas akhir ini tidak lepas dari kesalahan dan kekurangan, maka dibutuhkan kritik dan saran dari pembaca, demi perbaikan dan kesempurnaan. Tugas akhir ini, diharapkan dapat dimanfaatkan oleh pembaca untuk menambah wawasan di bidang teknik sipil.

Akhirnya disampaikan terima kasih yang sedalam-dalamnya kepada :

1. Bapak Ir. Susastrawan, MS. ; selaku Dekan Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Islam Indonesia.

2. Bapak Ir. Bambang Sulistio, MSCE. ; selaku Ketua Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Islam Indonesia.
3. Bapak Ir. M. Teguh, MSCE ; selaku Dosen Pembimbing I Tugas Akhir.
4. Bapak Ir. A. Kadir Aboe, MS ; selaku Dosen Pembimbing II Tugas Akhir.
5. Semua rekan-rekan yang telah membantu baik langsung maupun tidak langsung dalam penyelesaian tugas akhir ini.

Wassalamu'alaikum Wr. Wb.

Yogyakarta, April 1998

Penyusun

DAFTAR ISI

	Halaman
HALAMAN JUDUL	i
LEMBAR PENGESAHAN	ii
LEMBAR PERSEMBAHAN	iii
PRAKATA	iv
DAFTAR ISI	vi
DAFTAR GAMBAR	ix
DAFTAR TABEL	x
DAFTAR LAMPIRAN	xi
ABSTRAK	xii
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Maksud dan Tujuan.....	3
1.3 Manfaat.....	3
1.4 Batasan Masalah.....	4
BAB II TINJAUAN UMUM	6
2.1 Pengertian Balok Hyperstatis Nonprismatis Beton Prategang.....	6
2.2 Cara Pencapaian Penegangan	6
2.2.1 Sistem Pratarik	7
2.2.2 Sistem Pasca Tarik.....	9

2.3	Kehilangan Gaya Prategang.....	10
BAB III	ANALISIS BALOK HYPERSTASTIS NONPRISMATIS BETON PRATEGANG.....	12
3.1	Analisis Dimensi Penampang.....	12
3.1.1	Momen rencana.....	12
3.1.2	Modulus penampang.....	12
3.1.3	Dimensi penampang rencana.....	13
3.2	Analisis Beton Prategang.....	13
3.2.1	Gaya prategang.....	13
3.2.2	Luas baja prategang.....	14
3.2.3	Tata letak tendon.....	14
3.2.4	Tegangan beton dan tendon	16
3.3	Analisis Kekuatan Struktur.....	19
3.3.1	Analisis lentur.....	19
3.3.2	Analisis geser.....	21
3.3.3	Analisis lendutan.....	23
BAB IV	PERENCANAAN BALOK HYPERSTATIS NONPRISMATIS BETON PRATEGANG	29
4.1	Desain Balok Hyperstatis Nonprismatis.....	29
4.1.1	Momen rencana.....	30
4.1.2	Modulus penampang.....	31
4.1.3	Dimensi penampang nonprismatis.....	32
4.2	Desain Momen yang terjadi.....	36

4.3	Desain Beton Prategang.....	44
4.4	Kontrol Tegangan.....	48
4.5	Kapasitas Layan Struktur.....	53
4.5.1	Kekuatan lentur penampang.....	53
4.5.2	Kontrol kuat geser.....	57
4.5.3	Kontrol lendutan	59
BAB V	PEMBAHASAN	71
5.1	Balok Hyperstatis Prismatis.....	71
5.2	Balok Hyperstatis Nonprismatis.....	71
5.3	Tata Letak Tendon.....	72
BAB VI	KESIMPULAN DAN SARAN	74
6.1	Kesimpulan.....	74
6.2	Saran-saran	75
	DAFTAR PUSTAKA	76
	Lampiran-Lampiran	

DAFTAR GAMBAR

	Halaman
Gambar 1.1 Balok hyperstatis nonprismatis beton prategang	4
Gambar 3.1 Diagram momen lentur untuk balok menerus dengan beban terbagi merata	27
Gambar 3.2 Balok-balok konjugasi	27
Gambar 4.1 Rencana bentuk penampang memanjang balok	30
Gambar 4.2 Balok menerus prismatis persegmen	30
Gambar 4.3 Sket mencari tinggi balok	35
Gambar 4.4 Diagram momen akibat beban luar (Ms)	37
Gambar 4.5 Superposisi diagram momen	43
Gambar 4.6 Diagram momen akibat beban luar balok A-B.....	61
Gambar 4.7 Diagram momen jepit di B	62
Gambar 4.8 Diagram momen akibat beban luar balok B-C	63
Gambar 4.9 Diagram momen jepit di B	64
Gambar 4.10 Diagram momen jepit di C	65

DAFTAR TABEL

	Halaman
Tabel 4.1 Besar momen rencana	31
Tabel 4.2 Besar modulus penampang	32
Tabel 4.3 Batas minimal tinggi balok rencana	33
Tabel 4.4 Tinggi balok tiap segmen	35
Tabel 4.5 Tinggi balok rencana	36
Tabel 4.6 Perhitungan untuk mendapatkan nilai K, COF dan FEM...	38
Tabel 4.7 Momen akibat beban luar	42
Tabel 4.8 Momen akibat berat sendiri balok	43
Tabel 4.9 Tata letak tendon	47
Tabel 4.10 Kontrol tegangan beton	52
Tabel 4.11 Kontrol tegangan tendon	52
Tabel 4.12 Kuat regangan dan kapasitas momen lentur	56
Tabel 4.13 Kontrol kuat geser balok	60
Tabel 4.14 Lendutan akibat beban luar	66
Tabel 4.15 Lendutan akibat berat sendiri	67
Tabel 4.16 Lendutan akibat P_o	68
Tabel 4.17 Lendutan akibat P_e	68
Tabel 4.18 Lendutan jangka pendek	69
Tabel 4.19 Lendutan jangka panjang	70

ABSTRAK

Penggunaan balok dengan dimensi yang kecil dan ringan, mempunyai dampak yang buruk yaitu terjadinya retak dan lendutan yang cukup besar. Retak yang terjadi di daerah tarik pada suatu penampang balok akibat regangan tarik yang besar dari penggunaan baja tulangan dapat dihindari dengan cara memberikan gaya tekan di daerah tarik penampang beton tersebut atau sering disebut dengan beton prategang. Sedangkan untuk mendapatkan struktur balok yang ekonomis dan lendutan yang terjadi tidak terlalu besar, maka digunakan struktur balok *menerus* (*hyperstatis*) dengan dimensi penampang balok berubah-ubah (*nonprismatis*) sesuai dengan besar momen yang terjadi di sepanjang bentangan. Dalam tugas akhir ini kedua cara tersebut digunakan secara bersama-sama sehingga masalah retak dan lendutan dapat diatasi serta balok dapat direncanakan lebih ekonomis. Gaya-gaya yang terjadi pada balok *hyperstatis nonprismatis* beton prategang dianalisis dengan metode momen distribusi, metode balok konjugasi dan metode luas bidang momen, selanjutnya untuk pemberian gaya prategangan digunakan sistem pasca tarik dengan tendon terrekat. Dari hasil analisis dapat disimpulkan bahwa tegangan yang terjadi pada beton hampir seluruhnya merupakan tegangan desak dan hanya sebagian kecil tegangan tarik, tetapi tidak melampaui batas tegangan tarik ijin, sehingga retak pada struktur tidak terjadi. Begitu pula terhadap lendutan yang terjadi tidak terlalu besar, hal ini disebabkan oleh adanya gaya prategang yang menimbulkan lendutan yang berlawanan dengan arah lendutan akibat beban dan penggunaan struktur balok *menerus* yang mengakibatkan terjadinya pengurangan momen.

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Akhir-akhir ini struktur beton cenderung berkembang ke arah struktur yang lebih ekonomis dan efisien. Salah satu cara untuk mendapatkan struktur yang ekonomis dan efisien adalah dengan menggunakan material berkekuatan tinggi, sehingga didapatkan struktur dengan dimensi penampang yang lebih kecil, tetapi mempunyai kemampuan yang besar dalam menerima beban. Namun, pemakaian material yang bermutu tinggi khususnya pada pemakaian tulangan beton juga membawa dampak yang buruk bagi struktur tersebut, yaitu terjadinya retak yang lebih besar. Hal ini dapat dijelaskan, bahwa penggunaan tulangan yang bermutu tinggi akan dihasilkan tegangan tarik yang tinggi, sehingga regangan tarik yang terjadipun lebih besar (Winter, George dan Nilson, Arthur H., 1993). Dengan bertambahnya regangan tarik maka kemampuan tulangan dalam menerima tarik semakin besar (daerah tarik semakin besar), hal ini menyebabkan kemampuan desak yang ada pada beton semakin berkurang (daerah desak semakin kecil). Berkurangnya kemampuan beton dalam menahan desak mengakibatkan apabila balok menerima beban kemungkinan retak yang terjadi semakin besar.

Pemakaian dimensi penampang yang lebih kecil akan berakibat terjadinya lendutan yang lebih besar dibandingkan dengan pemakaian penampang yang berdimensi besar. Hal ini dikarenakan pada struktur dengan dimensi penampang yang kecil akan dihasilkan momen inersia yang kecil, sehingga lendutan yang terjadi akan besar, karena lendutan yang terjadi berbanding terbalik dengan momen inersia yang dimiliki oleh struktur tersebut.

Lendutan yang terjadi pada suatu balok bukan hanya dipengaruhi oleh penampang balok tetapi juga dipengaruhi oleh jumlah, letak dan jenis tumpuan dari balok. Lendutan pada balok dengan bentangan yang panjangnya sama di atas tumpuan sederhana akan berbeda dengan lendutan yang terjadi pada balok menerus. Dibandingkan dengan balok sederhana balok menerus akan menghasilkan lendutan yang lebih kecil, hal ini dikarenakan pada balok menerus akan timbul pengurangan momen yang disebabkan oleh adanya momen tumpuan. dengan berkurangnya momen maka lendutan yang terjadi juga akan berkurang.

Telah diketahui bahwa penentuan ukuran/dimensi penampang balok menerus bergantung pada besar momen yang terjadi (Schodek, Daniel L., 1991) Besar momen yang terjadi pada balok menerus di sepanjang bentangan umumnya bervariasi (tidak sama di sepanjang bentangan), hal ini bisa dimanfaatkan untuk mendapatkan dimensi penampang balok yang efisien, yaitu dengan membuat dimensi penampang balok bervariasi (nonprismatis) di sepanjang bentangan, sesuai dengan besar momen yang terjadi.

Penggunaan beton prategang pada struktur balok hyperstatis (dalam penelitian ini menggunakan balok menerus) diharapkan mampu untuk mereduksi

atau menghilangkan masalah retak dan lendutan yang besar. Dengan bentangan dan beban yang besar, dimensi penampang struktur yang menggunakan balok hyperstatis dan beton prategang dapat dibuat lebih kecil, ringan serta biaya lebih ekonomis dibandingkan dengan balok beton bertulang biasa di atas tumpuan sederhana.

Dengan pertimbangan kelebihan sifat-sifat di atas maka dibuatlah struktur balok menerus nonprismatis beton prategang yang mempunyai beberapa keunggulan, antara lain bentangan balok dapat dibuat lebih panjang, retak dan lendutan yang terjadi lebih kecil.

1.2 Maksud dan Tujuan

Maksud dan tujuan dari studi literatur dalam rangka penyusunan tugas akhir ini adalah :

1. menganalisis gaya-gaya yang bekerja pada balok hyperstatis nonprismatis beton prategang,
2. menganalisis tampang balok hyperstatis nonprismatis sehingga dapat diketahui kapasitas tahanannya,
3. mendesain balok sesuai dengan variasi/distribusi gaya yang bekerja.

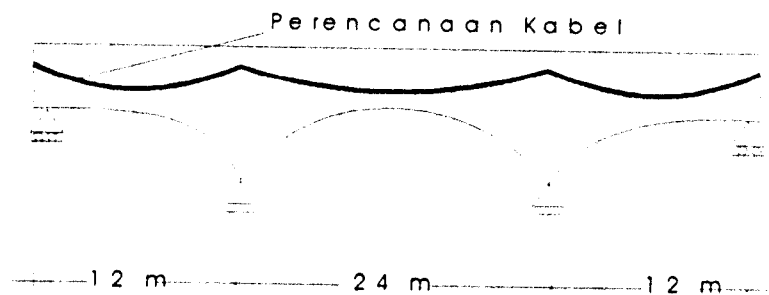
1.3 Manfaat

Adapun manfaat dari penyusunan tugas akhir ini adalah dapat memberikan alternatif lain dalam merencanakan struktur balok menerus prategang nonprismatis yang aman dan ekonomis, khususnya pada bentangan dan beban yang besar.

1.4 Batasan Masalah

Analisis balok hyperstatis nonprismatis beton prategang dalam tugas akhir ini dibatasi oleh ketentuan-ketentuan sebagai berikut :

1. perhitungan hanya dilakukan untuk beban vertikal (beban mati dan beban hidup),
2. struktur yang dianalisis berupa balok hyperstatis nonprismatis bentangan menerus,
3. penampang balok berbentuk persegi panjang dengan lebar tetap dan tinggi balok tidak konstan,
4. kabel direncanakan melengkung dan menerus sepanjang bentangan seperti pada gambar 1.1,
5. bentangan total diambil 48 m terletak di atas 4 perletakan seperti pada gambar 1.1, berikut :



Gambar 1.1 balok hyperstatis non prismatis beton prategang

6. beton prategang yang dianalisis menggunakan sistem pascatarik dan tendon terrekat,
7. kekuatan beton pada penampang dikontrol pada saat pelimpahan gaya prategang atau transfer dan pada saat beban layan telah bekerja,

8. perhitungan kapasitas tampang balok dibagi persegmen dengan panjang segmen 100 cm,
9. dalam tugas akhir ini beban yang diterima oleh balok (belum termasuk berat sendiri balok) ditetapkan sebesar 25 KN/m, yang merupakan beban terfaktor yang diterima oleh balok pada struktur gedung,
10. end block tidak dibahas dalam tugas akhir ini.

BAB II

TINJAUAN UMUM

2.1 Pengertian Balok Hypestatis Nonprismatis Beton Prategang

Balok hyperstatis atau balok statis tak tentu adalah balok yang mempunyai reaksi, gaya geser dan momen lentur yang tidak dapat ditentukan hanya dengan menggunakan persamaan keseimbangan statika dasar yakni $\Sigma H = 0$, $\Sigma V = 0$ dan $\Sigma M = 0$ (Ghali, A. dan Neville, A.M., 1990). Nonprismatis adalah suatu istilah untuk penampang struktur yang dimensinya tidak konstan.

Beton Prategang adalah beton yang telah diberikan tegangan-tegangan dalam, dalam jumlah tertentu sehingga dapat menetralisasi sejumlah tertentu tegangan-tegangan yang dihasilkan oleh beban luar sesuai dengan beban yang direncanakan. Pengertian dari balok hyperstatis nonprismatis beton prategang adalah balok menerus yang mempunyai variasi dimensi penampang di sepanjang bentangan dan terbuat dari beton yang diberikan beban tekan terlebih dahulu untuk dapat mengurangi atau menghilangkan tegangan-tegangan tarik yang terjadi pada balok tersebut.

2.2 Cara Pencapaian Penegangan

Cara yang biasa dilakukan untuk mendapatkan tegangan awal (pemberian tegangan) terhadap beton adalah dengan menggunakan tendon baja yang ditarik.

Terdapat dua macam cara pelaksanaan pemberian prategangan, yaitu pratarik (*pretensioning*) dan pasca tarik (*post-tensioning*).

2.2.1 Sistem Pratarik

Sistem pratarik didefinisikan sebagai cara pemberian prategangan pada beton, yakni tendon ditarik sebelum dilakukan pengecoran adukan beton ke dalam acuan yang telah disiapkan dan gaya prategangan dipertahankan sampai beton cukup keras. Sistem ini biasanya dilakukan di suatu tempat khusus di lapangan pencetakan (*casting yard*) disebut juga beton pracetak. Pada dasarnya sistem pratarik dilaksanakan dalam lima tahapan/langkah berikut ini.

1. Pertama-tama tendon dipasang memanjang di antara dua jangkar di tempat pengecoran mengikuti pola tertentu sesuai dengan perhitungan perencanaan. Tendon tersebut ditarik hingga mencapai nilai tegangan tarik tidak lebih dari 85% kuat tarik baja (f_{pu}) dan tidak lebih dari 94% kuat luluh f_{py} . Kemudian tendon tersebut dijangkarkan kuat-kuat pada kedua ujungnya sedemikian rupa sehingga gaya tarik tetap tertahan pada tendon baja.
2. Disiapkan acuan beton dan dipasang mengitari tendon sesuai dengan bentuk komponen yang direncanakan.
3. Setelah acuan beton dan tendon siap, dilakukan pengecoran adukan beton ke dalam acuan beton tersebut dan dilanjutkan dengan pekerjaan rawatan pengerasan beton. Dalam pelaksanaannya harus disertai upaya pengendalian kualitas pekerjaan mengingat bahaya resiko kecelakaan yang terjadi dan didapat hasil akhir berupa beton mutu tinggi yang melekat dengan baik pada tendon yang sudah ditegangkan (ditarik).

4. Jika beton telah mencapai kekerasan dan kekuatan (f_{ci}') tertentu, umumnya ditetapkan sekitar 27,5 - 30 Mpa yang memerlukan waktu 24 jam atau kurang, tendon dipotong di tempat penjangkaran. Karena tendon melekat kuat terhadap beton, seketika setelah tendon dipotong terjadi pelimpahan gaya prategangan tinggi P_o kepada beton. Dengan demikian, gaya tarik tinggi P_o yang semula ditahan tendon beralih dan berubah menjadi gaya desak terhadap keseluruhan penampang efektif (transformasi) beton. Tegangan-tegangan yang timbul sesaat setelah tendon dipotong dari jangkarnya disebut sebagai tegangan pada saat transfer (pelimpahan) tegangan. Dengan diputusnya tendon dan berlangsung pelimpahan tegangan, beban mati, (berat sendiri) diperhitungkan bekerja serentak bersamaan dengan gaya prategangan. Keadaan ini merupakan keadaan tegangan paling kritis yang timbul sesaat setelah berlangsung pelimpahan, tetapi sebelum terjadi kehilangan gaya prategangan. Pada saat transfer tegangan ini, SK SNI T-15-1993-03 pasal 3.11.4 ayat 1 memberikan harga-harga batas tegangan tarik balok tidak melampaui $0,25 \sqrt{f_{ci}'}$, dan tegangan tekan tidak lebih dari $0,60 f_{ci}$. Apabila tegangan tarik melampaui nilai tersebut, harus dipasang tulangan tambahan (nonprategang atau prategang) di daerah tarik untuk memikul gaya tarik total dalam beton
5. Setelah cukup kuat dan sesuai persyaratan, komponen prategang dapat dilepas dan diangkat dari cetakannya untuk dipindahkan ke lapangan penyimpanan sehingga tempat pencetakan dapat digunakan untuk proses prategangan berikutnya.

Setelah seluruh proses kehilangan gaya prategang berlangsung, pada tahap pelayanan beban kerja tersusun suatu kombinasi beban mati, beban hidup, dan gaya prategangan. SK-SNI T-15-1993-03 pasal 3.11.4 ayat 2 memberikan batasan tegangan tarik pada balok tidak lebih dari $0,5\sqrt{f_c'}$, sedangkan tegangan tekan tidak melebihi $0,45f_c'$.

2.2.2 Sistem Pasca Tarik

Sistem pasca tarik atau disebut juga penarikan purna adalah cara pemberian prategangan pada beton, yakni tendon ditarik setelah betonnya dicetak terlebih dahulu dan mempunyai cukup kekerasan untuk menahan tegangan sesuai yang diinginkan. Sistem pasca tarik dilakukan dengan tahapan berikut ini.

1. Acuan beton dipasang di tempat yang sesuai dengan rencana letak komponen struktur dengan sekaligus dipasang pipa selongsong lentur yang dibuat dari plastik atau metal, yang akan menyelubungi beton. Pipa selongsong tendon diletakkan di dalam acuan dengan posisinya diatur dan ditahan untuk membentuk pola tertentu, umumnya berpola melengkung sesuai dengan momen perlawanan yang direncanakan.
2. Adukan beton dicorkan ke dalam acuan dengan menjaga agar pipa selongsong tendon tetap kokoh pada posisinya dan tidak kemasukan adukan, kemudian dilakukan rawatan pengerasan beton secukupnya sampai mencapai kekuatan tertentu.
3. Selanjutnya tendon dimasukkan ke dalam pipa selongsong yang sudah disiapkan dalam beton. Pada cara lain ada yang menempatkan pipa

selongsong lengkap dengan tendon di dalam acuan sebelum dilakukan pengecoran adukan beton.

4. Tendon ditarik dengan menggunakan dongkrak di satu ujung dan jangkar mati atau plat penahan pada ujung lainnya. Fungsi jangkar adalah untuk mencengkeram tendon agar tidak terjadi slip (penggelinciran) sehingga beban atau tegangan tarik tetap bertahan pada beton. Pembatasan tegangan-tegangan ijin pada tahap-tahap pelimpahan dan pelayanan diambil sama dengan yang diberikan pada sistem pratarik.
5. Apabila digunakan "bonded tendon", terutama untuk lingkungan yang korosif, ruang kosong di dalam pipa mengelilingi tendon diisi penuh pasta semen dengan cara disuntikkan (*grouting*) setelah tendon ditarik dan sebelum beban hidup bekerja. Tegangan akibat beban hidup pada keadaan "bonded tendon", dihitung berdasarkan penampang transformasi seperti yang dilakukan pada penampang pada sistem pratarik. Tetapi ada juga tendon yang dibiarkan tidak disuntik pasta semen (*unbonded tendon*), untuk keadaan ini, gaya prategang hanya diperhitungkan bekerja terhadap penampang betonnya saja (penampang netto).

Sistem ini biasanya dilaksanakan langsung di tempat komponen struktur direncanakan, tetapi ada juga yang dikerjakan dengan menggunakan sistem pracetak.

2.3 Kehilangan Gaya Prategang

Gaya prategang pada beton secara berangsur-angsur mengalami pengurangan sejak dari tahap transfer yang diakibatkan terjadinya perpendekan

(deformasi elastis) dari beton, slip pada ankur, kehilangan akibat gesekan yang terjadi sepanjang kabel. Selanjutnya gaya tersebut juga masih akan mengalami pengurangan untuk jangka waktu tertentu akibat adanya perubahan panjang karena terjadinya penyusutan dan rangkai pada beton serta relaksasi pada baja yang bertegangan tinggi sampai akhirnya gaya tersebut mencapai harga efektif P_e . Penurunan besar gaya prategangan mulai dari P_o sampai P_e inilah, yang disebut sebagai kehilangan prategangan.

Perkiraan besar kehilangan gaya yang terjadi dapat dilakukan pada beberapa tingkatan yang berbeda. Pada perencanaan yang praktis, umumnya tidak diperlukan perhitungan secara terinci, cukup dengan mempertimbangkan suatu nilai R , yang didasarkan pengalaman atau atas dasar beberapa hasil percobaan. Nilai R tersebut dipakai pada rumus

$$R = P_o P_e \dots\dots\dots(2.1)$$

Kehilangan prategangan total menurut ACI adalah :

- a. 241 Mpa untuk proses pratarik dan
- b. 172 Mpa untuk proses pasca tarik.

Perkiraan kehilangan prategang total ini sudah termasuk kehilangan prategang yang terjadi akibat perpendekan elastis, penyusutan, rangkai, serta relaksasi, tetapi tidak termasuk kehilangan akibat gesekan serta slip pada ankur. Secara umum T.Y. Lin juga mengungkapkan sebuah dasar untuk mempertimbangkan besar kehilangan gaya prategang yang terjadi. Dasar ini dapat dilihat pada lampiran 1.

BAB III
ANALISIS BALOK HYPERSTATIS NONPRISMATIS
BETON PRATEGANG

3.1 Analisis Dimensi Penampang

Untuk menentukan dimensi penampang suatu struktur pertama kali diperlukan data perhitungan mengenai beberapa hal, antara lain penentuan besar momen yang direncanakan.

3.1.1 Momen rencana

Perhitungan dilakukan dengan menganggap bahwa penampang adalah berbentuk prismatis 2 dimensi, dan perhitungan momen dilakukan dengan bantuan program komputer.

3.1.2 Modulus penampang

Besarnya penampang yang direncanakan harus mampu untuk menahan tegangan akibat momen yang terjadi, yaitu momen akibat berat sendiri (M_o), momen akibat beban mati (M_d), dan momen akibat beban hidup (M_l). Agar dapat dicapai kondisi yang demikian maka modulus penampang yang diperlukan baik terhadap sisi tepi atas maupun sisi bawah adalah :

$$S_t \geq \frac{(1-R)M_o + M_d + M_l}{Rf_{tt} - f_{cs}} \dots\dots\dots(3.1)$$

$$S_b \geq \frac{(1-R)M_o + M_d + M_l}{f_{ts} - Rf_{ci}} \dots\dots\dots(3.2)$$

untuk perencanaan nilai antara S_t dan S_b diambil nilai yang besar.

3.1.3 Dimensi penampang rencana

Dari modulus penampang yang didapat maka dimensi penampang dapat direncanakan dengan menggunakan persamaan :

$$S = \frac{I}{C} \dots\dots\dots(3.3)$$

dengan I = momen inersia

C = jarak garis netral ke sisi luar penampang

Dengan ditetapkan nilai lebar balok “b” maka tinggi balok “h” dapat dicari.

3.2 Analisis Beton Prategang

3.2.1 Gaya Prategang

- Tegangan beton pada pusat beton (f_{ci})

$$f_{ci} = f_{ti} - \frac{ct}{h}(f_{ti} - f_{ci}) \dots\dots\dots(3.4)$$

- Gaya prategang awal (P_o)

$$P_o = |f_{ci}| A_c \dots\dots\dots(3.5)$$

- Gaya prategang efektif (P_e)

$$R = 1 - LOP \dots\dots\dots(3.6)$$

$$P_e = P_o \cdot R \dots\dots\dots(3.7)$$

3.2.2 Luas baja prategang

- Luas baja prategang yang diperlukan :

$$A_{ps} = \frac{P_o}{f_{ps}} \quad \text{dengan :}$$

$$f_{ps} = 0.7 f_{pu} \quad \text{untuk tendon pasca tarik}$$

$$f_{ps} = 0.94 f_{py} \quad \text{tetapi tidak lebih besar dari } 0.85 f_{pu}, \quad \text{akibat gaya penjangkaran tendon}$$

$$f_{ps} = 0.82 f_{py} \quad \text{tetapi tidak lebih besar dari } 0.74 f_{pu}, \quad \text{sesaat setelah pemindahan gaya pratekan}$$

- Menentukan jenis dan jumlah baja prategang, yang dapat dipilih dengan menggunakan sistem yang sering digunakan seperti :
 - Freyssinet system
 - ASTM system
 - BBRV system
 - VSL system, dan lain-lain

3.2.3 Tata letak tendon

Proses perhitungan perencanaan balok prategang terdiri dari beberapa langkah. Pertama kali dilakukan pemilihan bentuk dan ukuran penampang, kemudian peninjauan besar gaya prategang dan eksentrisitas tendon untuk penampang dengan beban atau momen kritis, dan berikutnya adalah penentuan tata letak tendon di sepanjang balok.

Persamaan-persamaan tegangan di bawah ini merupakan dasar penting dalam analisis balok beton prategang (Nilson, Arthur H., 1987).

1. Saat transfer

$$f_{ti} \geq -\frac{P_o}{A_c} \left(1 - \frac{e(x)c_1}{r^2} \right) - \frac{M_o(x)}{S_1} \dots\dots\dots(3.8)$$

$$|f_{ci}| \geq \left| -\frac{P_o}{A_c} \left(1 + \frac{e(x)c_2}{r^2} \right) + \frac{M_o(x)}{S_2} \right| \dots\dots\dots(3.9)$$

2. Saat layan

$$|f_{cs}| \geq \left| -\frac{P_e}{A_c} \left(1 - \frac{e(x)c_1}{r^2} \right) - \frac{M_1(x)}{S_1} \right| \dots\dots\dots(3.10)$$

$$f_{ts} \geq -\frac{P_e}{A_c} \left(1 + \frac{e(x)c_2}{r^2} \right) + \frac{M_1(x)}{S_2} \dots\dots\dots(3.11)$$

Persamaan-persamaan tersebut digunakan untuk mengontrol agar tegangan di sepanjang bentangan tidak melampaui nilai-nilai tegangan ijin, dengan demikian persamaan tersebut dapat digunakan untuk perencanaan penampang yang memenuhi syarat tegangan ijin.

Pada balok menerus misalnya dengan 4 perletakan, dengan prinsip bahwa titik berat tendon diletakkan pada sisi momen lentur yang menyebabkan tarik, maka perletakan kabel untuk daerah lapangan berada di bawah garis netral dan di tumpuan perletakan kabel di atas garis netral. Dengan demikian, eksentrisitas letak kabel prategang di sepanjang balok harus diatur sedemikian rupa sehingga tidak menyebabkan timbulnya tegangan-tegangan yang melampaui tegangan ijin yang diharapkan, dengan kata lain, letak tendon prategang diatur tidak menetap pada elevasi tertentu di sepanjang balok, terkadang di bawah atau di atas garis netral bervariasi sesuai dengan kebutuhannya. Dengan mengembangkan

persamaan (3.8,3.9,3.10 dan 3.11) maka tata letak tendon dapat diperhitungkan dengan menggunakan batasan-batasan (Arthur H. Nilson, 1987) :

$$e(x) \leq \frac{f_{ti} S_t}{P_o} + \frac{S_t}{A_c} + \frac{M_o(x)}{P_o} \dots\dots\dots(3.12)$$

$$e(x) \leq -\frac{f_{ci} S_b}{P_o} - \frac{S_b}{A_c} + \frac{M_o(x)}{P_o} \dots\dots\dots(3.13)$$

$$e(x) \geq \frac{f_{cs} S_t}{P_e} + \frac{S_t}{A_c} + \frac{M_t(x)}{P_e} \dots\dots\dots(3.14)$$

$$e(x) \geq -\frac{f_{ts} S_b}{P_e} - \frac{S_b}{A_c} + \frac{M_t(x)}{P_e} \dots\dots\dots(3.15)$$

3.2.4 Tegangan beton dan tendon

Kontrol tegangan dilakukan pada beton prategang sistem pasca tarik dengan kondisi terrekat.

- Pada saat transfer , dipakai penampang netto

$$A_c \text{ netto} = A_c - A \text{ selubung}$$

- Pada saat layan , dipakai penampang bruto

$$A_c \text{ bruto} = A_c + (n-1).A_{ps}$$

A. Tegangan pada saat transfer

1. Tegangan beton

- Pada serat tarik :

$$f_{ti} = -\frac{P_o}{A_{cnet}} + \frac{P_o \cdot e_{net} \cdot C_{tnet}}{I_{cnet}} - \frac{M_o \cdot C_{tnet}}{I_{cnet}} \leq 0,25 \sqrt{f'_{ci}} \dots\dots\dots(3.16)$$

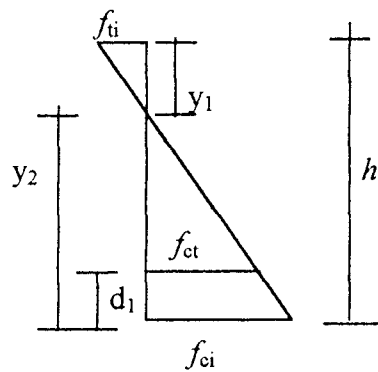
- Pada serat tekan :

$$f_{ci} = -\frac{P_o}{Acnet} - \frac{P_o \cdot e \cdot net \cdot Cbnet}{Icnet} + \frac{M_o \cdot Cbnet}{Icnet} \leq 0,6f'_{ci} \dots \dots \dots (3.17)$$

2. Tegangan tendon

- Tegangan pada saat penarikan (f_{si})

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



$$y_1 = \frac{f_{ti}}{f_{ti} + f_{ci}} h$$

$$y_2 = h - y_1$$

- Tegangan beton di daerah tendon (f_{ct})

$$f_{ct} = \frac{y_2 - d_1}{y_2} f_{ci} \dots \dots \dots (3.18)$$

- Tegangan tendon saat transfer (f_s)

$$f_s = f_{si} + n \cdot f_{ct} \leq f_{si} \dots \dots \dots (3.19)$$

B. Tegangan pada saat akhir/layan

1. Tegangan beton (terrekat)

- Pada serat tarik :

$$f_{ts} = -\frac{P_e}{Ac_{brut}} - \frac{P_e \cdot e_{brut} \cdot C_{tbrut}}{I_{cbrut}} + \frac{M_t \cdot C_{tbrut}}{I_{cbrut}} \leq 0,5\sqrt{f'_c} \dots\dots\dots(3.20)$$

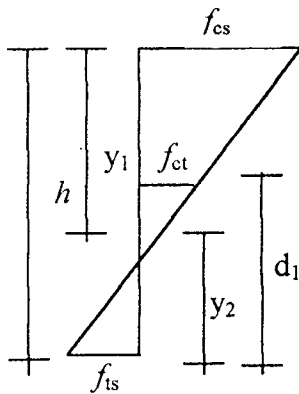
- Pada serat tekan :

$$f_{cs} = -\frac{P_e}{Ac_{brut}} + \frac{P_e \cdot e_{brut} \cdot C_{bbrut}}{I_{cbrut}} - \frac{M_t \cdot C_{bbrut}}{I_{cbrut}} \leq 0,45f'_c \dots\dots\dots(3.21)$$

2. Tegangan tendon

- Tegangan efektif tendon

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



$$y_1 = \frac{f_{cs}}{f_{cs} + f_{ts}} h$$

$$y_2 = h - y_1$$

- tegangan beton di daerah tendon (f_{ct})

$$f_{ct} = \frac{d_1 - y_2}{y_1} f_{cs} \dots\dots\dots(3.22)$$

- tegangan tendon saat akhir/layan (f_s)

$$f_s = f_{se} + n \cdot f_{ct} \leq f_{si} \dots\dots\dots(3.23)$$

3.3 Analisis Kekuatan Struktur

Setelah dilakukan perencanaan mengenai dimensi penampang serta beton prategang, maka untuk meninjau apakah struktur balok sudah layak/aman diperlukan suatu sistem kontrol. Sistem kontrol yang dimaksud adalah pemeriksaan hasil perencanaan terhadap seluruh tegangan-tegangan yang timbul, momen lentur, kemampuan terhadap geser dan lendutan pada beban kerja. Berikut ini akan dijelaskan satu persatu mengenai syarat batas tersebut.

3.3.1 Analisis lentur

Saat beban yang bekerja pada beton bertulang sama dengan nol, maka tegangan pada tulangan juga nol, sedang pada beton prategang terjadi sebaliknya, tanpa beban luar besar tegangan pada kabel-kabel tarik tidak sama dengan nol melainkan sebesar tegangan prategang efektif f_{sc} , yaitu besar tegangan prategang yang terjadi setelah dikurangi dengan kehilangan tegangan pada proses pelaksanaan prategang (Winter, George dan Nilson, Arthur H., 1993). Besar regangan tulangan pada saat beban kerja sama dengan nol adalah :

$$\epsilon_{sc} = \frac{f_{sc}}{E_s} \dots \dots \dots (3.24)$$

Selanjutnya, besar regangan dan tegangan yang terjadi karena bekerjanya beban luar dapat ditambahkan pada tegangan dan regangan awal ini.

Karakteristik tegangan-regangan baja prategang sama sekali berbeda dengan karakteristik baja pada beton bertulang. Hal ini disebabkan karena baja yang digunakan pada beton prategang menggunakan baja yang berkekuatan tarik tinggi, berbeda dengan tulangan biasa, baja tersebut tidak memperlihatkan daerah

leleh yang jelas. Proses pelepasan berlangsung secara perlahan-lahan dan pada daerah inelastik, grafik tegangan-regangan terus naik sampai dicapainya kekuatan tarik. Prosentase perbedaan antara tegangan tarik f_{pu} dengan tegangan leleh f_{py} juga jauh lebih kecil pada baja prategang dibandingkan dengan pada tulangan biasa.

Untuk baja prategang (baja mutu tinggi), keruntuhan terjadi hanya setelah baja melampaui tegangan leleh, f_{py} . Seluruh kekuatan tarik baja prategang f_{pu} , tidak dapat dipakai untuk memikul besar momen nominal melainkan hanya suatu bagian yang lebih kecil dari kekuatan tersebut yaitu pada besar $f_{ps} < f_{pu}$ yang dapat dipakai. Untuk perencanaan nilai perkiraan f_{ps} disusun melalui persamaan berikut (Nilson, Arthur H., 1987) ini.

$$f_{ps} = f_{pu} \left(1 - \frac{\gamma_p \rho_p f_{pu}}{\beta_1 f_c'} \right) \dots \dots \dots (3.25)$$

dengan $\gamma_p = 0,28$ untuk $\frac{f_{py}}{f_{pu}} \geq 0,9$

$\gamma_p = 0,40$ untuk $\frac{f_{py}}{f_{pu}} = 0,85$

β_1 = konstanta yang merupakan fungsi kelas mutu beton

$$\rho_{ps} = \frac{A_{ps}}{bd} = \text{rasio penulangan penampang komponen prategang}$$

A_{ps} = luas penampang baja prategang

Teori kekuatan, dengan memakai blok tegangan persegi ekuivalen dapat memberikan gambaran mengenai terjadinya keruntuhan dengan ketepatan yang cukup baik. Berdasar teori ini maka besar gaya tarik yang terjadi pada saat keruntuhan adalah:

$$\sum N_T = A_{ps} f_{ps} \dots\dots\dots(3.26)$$

Sedang besar gaya tekan yang terjadi pada saat keruntuhan adalah :

$$\sum N_D = 0,85 f_c' ab \dots\dots\dots(3.27)$$

Dengan keseimbangan gaya-gaya, $\sum N_T = \sum N_D$, maka didapatkan :

$$a = \frac{A_{ps} f_{ps}}{0,85 f_c' b} = \frac{\rho_p b d f_{ps}}{0,85 f_c' b} = \frac{\rho_p f_{ps} d}{0,85 f_c'} \dots\dots\dots(3.28)$$

dengan A_{ps} = luas tulangan baja prategang

$$\rho_p = \frac{A_{ps}}{bd} = \text{rasio penulangan penampang komponen prategang}$$

f_{ps} = tegangan tarik dalam tulangan prategang, yang merupakan nilai tegangan rata-rata di dalam baja prategang pada saat dicapainya kuat momen nominal M_n . Nilai tersebut sebagai pengganti dari f_y , karena baja kuat tarik mutu tinggi tidak menunjukkan titik leleh yang jelas, sedang besarnya f_{ps} dapat dihitung dengan rumus (3.25) di atas.

Selanjutnya, apabila persamaan-persamaan tersebut dimasukkan ke dalam persamaan kuat momen nominal akan didapatkan :

$$M_n = \sum N_T \left(d - \frac{a}{2} \right) = A_{ps} f_{ps} \left(d - \frac{\rho_p f_{ps} d}{1,7 f_c'} \right) \dots\dots\dots(3.29)$$

3.3.2 Analisis geser

Analisis geser untuk komponen struktur beton prategang pada dasarnya sama dengan yang dikerjakan untuk beton bertulang. Kuat geser nominal total

dinyatakan sebagai jumlah kuat geser yang disumbangkan oleh beton V_c dan tulangan geser V_s (Istimawan Dipohusodo, 1995).

Sesuai dengan SK SNI T-15-1991-03, dan seperti yang diperlakukan pada struktur beton bertulang, tersedia dua cara untuk menentukan V_c . Apabila tegangan prategang efektif (f_{se}) tidak kurang dari 40% kuat tarik tulangan baja lentur (f_{pu}), V_c dapat dihitung dengan persamaan :

$$V_c = \left(\frac{1}{20} \sqrt{f'_c} + \frac{5V_u d}{M_u} \right) b_w d \dots\dots\dots(3.30)$$

dengan batasan $V_c \leq (0,4\sqrt{f'_c}) b_w d$, dan tidak kurang dari $(1/6\sqrt{f'_c}) b_w d$, serta $\frac{V_u d}{M_u}$ tidak boleh lebih dari 1, dengan M_u adalah momen terfaktor yang terjadi secara bersamaan dengan V_u pada penampang yang ditinjau. Unsur d dalam persamaan (3.30) adalah jarak dari serat tepi tekan terluar ke titik berat tulangan prategang.

Kuat geser V_c boleh pula diperhitungkan sebagai nilai terkecil dari persamaan-persamaan V_{ci} dan V_{cw} berikut :

$$V_{ci} = \left\{ \left(\frac{1}{20} \sqrt{f'_c} \right) b_w d + V_d + \frac{V_i M_{cr}}{M_{maks}} \right\} \geq \left(\frac{1}{7} \sqrt{f'_c} \right) b_w d \dots\dots\dots(3.31)$$

$$\text{dengan, } M_{cr} = \frac{I}{y} \left(\frac{1}{2} \sqrt{f'_c} + f_{pe} - f_d \right) \dots\dots\dots(3.32)$$

dan nilai M_{maks} dan V_i harus dihitung dari kombinasi beban yang menimbulkan momen maksimum pada penampang yang ditinjau, dengan y adalah jarak titik pusat penampang balok ke tepi luar sisi desak.

$$V_{cw} = 0,30(\sqrt{f'_c} + f_{pe}) b_w d + V_p \dots\dots\dots(3.33)$$

Sebagai batas jika nilai $V_u > 0.5\phi V_c$, maka balok prategang harus diberi jumlah minimum tulangan geser, sedangkan jika nilai $V_u > \phi V_c + \frac{2}{3} \sqrt{f_c} b d$ maka penampang harus didesain ulang.

3.3.3 Analisis lendutan

Lendutan yang terjadi pada balok beton prategang dipengaruhi oleh faktor-faktor berikut ini (Raju, N. Khrisna, 1989).

1. Beban terpasang dan berat sendiri.
2. Besar gaya prategang.
3. Profil kabel.
4. Momen inersia potongan melintang.
5. Modulus elastisitas beton.
6. Susut, rangkak, dan relaksasi tegangan baja.
7. Bentangan batang yang bersangkutan.
8. Kondisi tumpuan.

Dalam perencanaan suatu balok prategang, lendutan yang terjadi dalam suatu proses prategang harus dapat diperhitungkan dengan teliti. Banyak balok beton prategang walaupun telah memenuhi persyaratan-persyaratan lainnya ternyata tidak dapat digunakan karena adanya lendutan yang terlampau besar.

Pada saat gaya prategang pertama kali dikerjakan, umumnya sebuah balok akan melendut ke atas. Seiring berjalannya waktu, rangkak, dan penyusutan yang terjadi pada beton akan menyebabkan besar gaya prategang berkurang secara berangsur-angsur. Dengan bekerjanya beban-beban mati dan hidup, maka

lendutan ke atas ini sebagian atau seluruhnya dapat diatasi dan akan diperoleh suatu balok dengan lendutan sebesar nol atau lendutan yang arahnya ke bawah.

Perkiraan mengenai besarnya lendutan yang terjadi dapat dilakukan dengan beberapa tingkat ketelitian, tergantung pada sifat-sifat serta pentingnya konstruksi yang bersangkutan. Pada umumnya, besar lendutan yang terjadi harus dihitung (berdasarkan ketentuan dalam Pedoman ACI, untuk semua balok beton prategang diperlukan perhitungan besar lendutan yang terjadi). lendutan yang perlu ditentukan adalah lendutan yang terjadi pada tahap awal, yaitu pada balok dibebani gaya prategang awal sebesar P_o beserta beratnya sendiri, dan pada saat bekerjanya kombinasi pembebanan ketika besar gaya prategang berkurang dengan terjadinya kehilangan-kehilangan gaya prategang hingga mencapai harga efektifnya sebesar P_e . Lendutan-lendutan yang terjadi juga dipengaruhi oleh adanya rangkai yang timbul akibat bekerjanya beban tetap dari gaya prategang ataupun beban-beban tetap yang lainnya.

Besar lendutan jangka pendek δ_{P_o} akibat gaya prategang awal P_o dapat ditentukan berdasarkan perubahan momen prategang sepanjang bentang, dengan memakai prinsip luas momen (George Winter & Arthur H. Nilson, 1993). Dan lendutan yang arahnya ke bawah akibat berat sendiri balok δ_g , dapat diperoleh dengan menggunakan metode balok konjugasi. Dengan demikian besarnya lendutan netto yang diperoleh sesaat setelah dilakukan proses prategang adalah :

$$\delta_o = - \delta_{po} + \delta_g \dots\dots\dots(3.34)$$

tanda negatif menunjukkan lendutan yang arahnya ke atas.

Lendutan-lendutan jangka panjang akibat gaya prategang terjadi setelah gaya tersebut secara berangsur-angsur berkurang besarnya dari P_o menjadi P_e . Hal ini dapat dipakai di dalam perhitungan dengan menganggap bahwa rangkakan terjadi akibat suatu pengaruh gaya prategang yang besarnya konstan yaitu sebesar harga rata-rata dari gaya pratarik dan harga akhirnya. Berkenaan dengan anggapan ini, lendutan total yang terjadi akibat gaya prategang saja adalah :

$$\delta = -\delta_{pe} - \frac{\delta_{po} + \delta_{pe}}{2} C_c \dots\dots\dots(3.35)$$

dengan

$$\delta_{pe} = \delta_{po} \frac{P_e}{P_o} \dots\dots\dots(3.36)$$

dan C_c merupakan koefisien rangkakan untuk beton (nilai C_c dapat dilihat pada lampiran 2). Lendutan jangka panjang akibat berat sendiri dengan adanya rangkakan menjadi lebih besar dan harganya dapat diperoleh dengan memasukkan nilai koefisien rangkakan langsung pada harga lendutan yang dimaksud. Dengan demikian, lendutan total dari batang, setelah terjadinya lendutan akibat adanya kehilangan gaya prategang dan rangkakan, pada saat gaya prategang efektif dan berat sendiri bekerja adalah :

$$\delta_e = -\delta_{pe} - \frac{\delta_{po} + \delta_{pe}}{2} C_c + (\delta_g + \delta_d)(1 + C_c) \dots\dots\dots(3.37)$$

dengan δ_d merupakan lendutan yang terjadi akibat beban luar.

Ada bermacam-macam metode yang tersedia di dalam analisis struktur untuk menghitung lendutan penampang yang diakibatkan oleh beban luar dengan momen inersia tetap maupun berubah dalam struktur yang statis tertentu maupun

yang tak tentu. Secara umum lendutan maksimum pada balok dapat dinyatakan sebagai :

$$\delta_{\text{maks}} = \beta_a \frac{ML^2}{EI_c} \dots\dots\dots(3.38)$$

dengan

M = harga momen lentur

L = panjang bentang

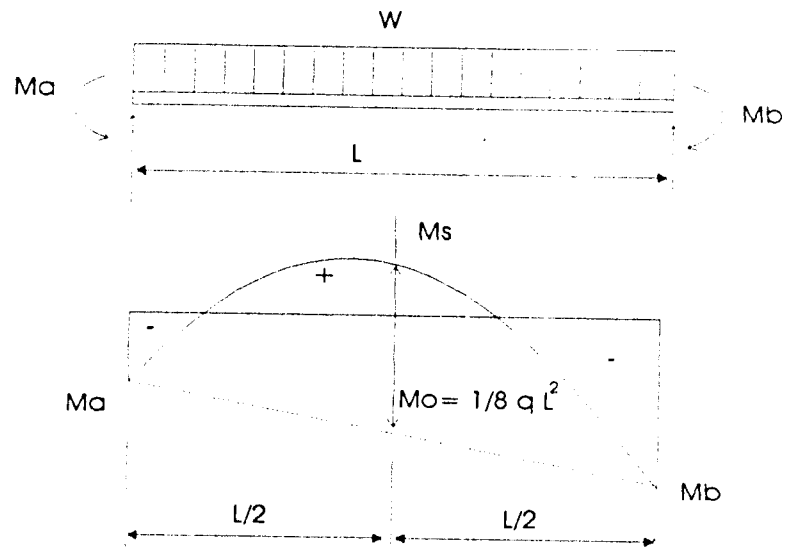
E = modulus elastis

I_c = momen inersia dari penampang

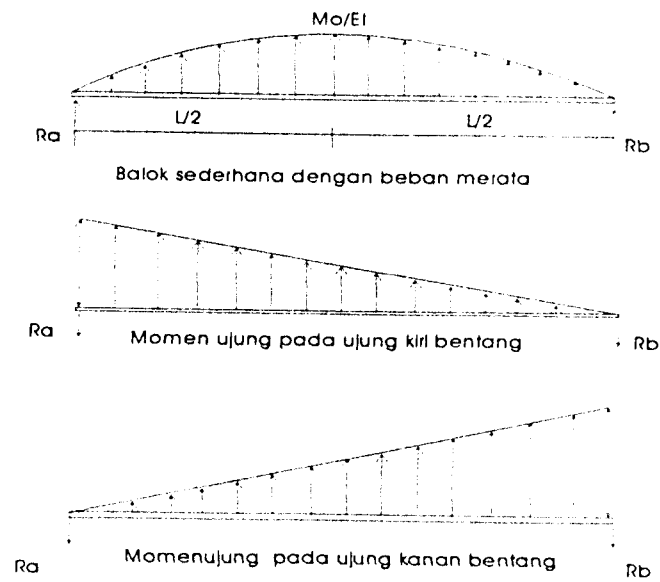
β_a = suatu koefisien yang tergantung pada derajat jepitan pada tumpuan, variasi dari momen inersia sepanjang bentangan dan distribusi beban.

Salah satu metode untuk mencari rumus lendutan adalah dengan menggunakan metode balok konjugasi (Wang, Chu-Kia dan Solmon, Charles G., 1989). Adapun penggunaan dari metode ini dapat dijelaskan dengan menggunakan contoh sebuah balok yang dibebani dengan beban terbagi merata dan momen ujung yang tidak sama, seperti terlihat dalam gambar 3.1, dari keadaan tersebut, maka dibuatlah balok-balok konjugasi (gambar 3.2.).

Di dalam metode balok konjugasi ini lendutan pada suatu titik tertentu sama dengan momen lentur pada titik tersebut untuk balok yang dibebani dengan diagram M/EI . Sistem dalam gambar 3.1 dapat dianggap terdiri dari tiga balok konjugasi terpisah yang diperlihatkan pada gambar 3.2.



Gambar 3.1 Diagram momen lentur untuk balok menerus dengan beban merata



Gambar 3.2. Balok-balok konjugasi

Lendutan di titik tengah pada ketiga balok konjugasi tersebut adalah :

$$\text{beban merata, } \delta_s = \frac{2}{3} \left(\frac{L}{2} \right) \left(\frac{M_o}{EI} \right) \left[\frac{L}{2} - \frac{3}{8} \left(\frac{L}{2} \right) \right] = \frac{5M_o L^2}{48EI} \dots\dots\dots(3.39)$$

momen ujung kiri $\delta_a =$

$$\frac{1}{3} \left(\frac{-M_a}{EI} \right) \left(\frac{L}{2} \right) \left(\frac{L}{2} \right) - \frac{1}{2} \left(\frac{-M_a}{2EI} \right) \left(\frac{L}{2} \right) \left(\frac{1}{3} \right) \left(\frac{L}{2} \right) = \frac{-M_a L^2}{16EI} \dots\dots\dots(3.40)$$

$$\text{momen ujung kanan } \delta_b = \frac{-M_b L^2}{16EI} \dots\dots\dots(3.41)$$

Lendutan total titik tengah bentang δ_m adalah

$$\delta_m = \delta_s - \delta_a - \delta_b \dots\dots\dots(3.42)$$

$$= \frac{5M_o L^2}{48EI} - \frac{M_a L^2}{16EI} - \frac{M_b L^2}{16EI}$$

$$= \frac{L^2}{48EI} [5M_o - 3(M_a + M_b)] \dots\dots\dots(3.43)$$

Persamaan ini dapat digunakan dengan hasil yang memuaskan untuk semua balok prismatis (yaitu dengan kekakuan lentur yang tetap). Untuk balok menerus dengan kekakuan lentur yang bervariasi di sepanjang bentangan, maka perubahan yang demikian harus ditinjau sewaktu melakukan analisis statis tak tentu di dalam mendapatkan momen-momen ujung (Wang, Chu-Kia dan Solmon, Charles.G.,1989).

Syarat batas lendutan yang diperkenankan dalam SK SNI T -15-1991-03 dan ACI, dapat dilihat pada lampiran 3. Dalam tugas akhir ini dipakai lendutan

$$\text{ijin} = \frac{L}{240}.$$

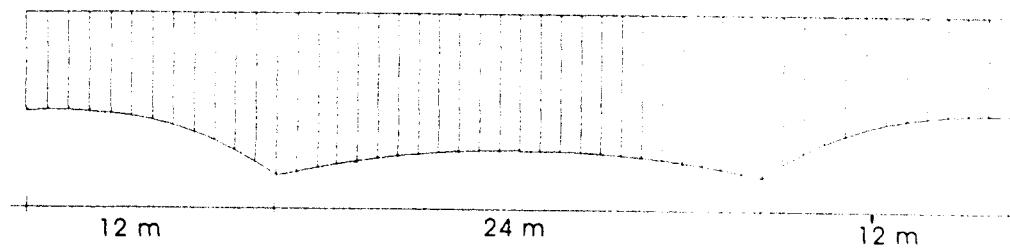
BAB IV
PERENCANAAN BALOK HYPERSTATIS NONPRISMATIS
BETON PRATEGANG

Dalam tugas akhir ini, tinjauan perencanaan dilakukan dengan beban yang bekerja, desain mutu baja dan beton telah diketahui. Selanjutnya proses perhitungan desain balok hyperstatis dengan penampang nonprismatis beton prategang dilakukan dalam beberapa langkah/tahap.

4.1 Desain Balok Hyperstatis Nonprismatis

Direncanakan sebuah balok dengan bentuk sebagai berikut (Gambar 4.1) :

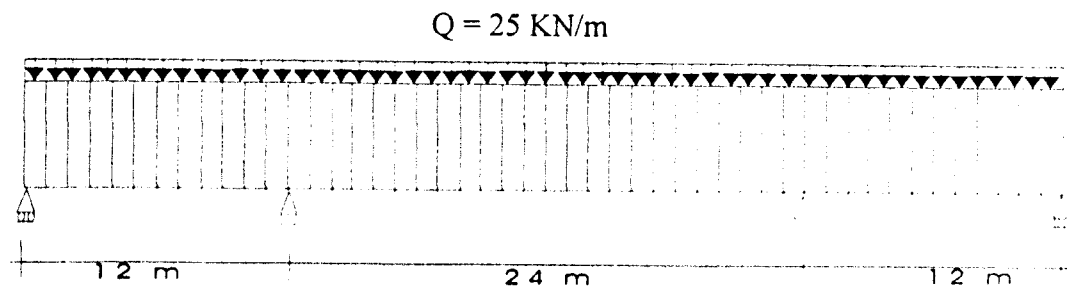
- Mutu beton $f'_c = 40$ Mpa
- Kuat tarik ultimit baja prategang (f_{pu}) = 1800 MPa
- Modulus elastisitas beton (E_c) = 29000 MPa
- Modulus elastisitas baja prategang (E_s) = $2 \cdot 10^5$ MPa
- Regangan desak batas beton (ϵ'_{cu}) = 0.003
- Regangan leleh baja prategang (ϵ_{py}) = 0,01, karena tegangan leleh baja prategang tidak tampak dengan jelas.
- Modulus ratio (n) = $E_c/E_s = 7$
- $f'_u = 0,25 \cdot \sqrt{40} = 1,5811$ MPa, $f'_{ci} = -0,6 \cdot 40 = -24$ MPa
- $f'_{ts} = 0,5 \cdot \sqrt{40} = 3,1623$ MPa, $f'_{cs} = -0,45 \cdot 40 = -18$ MPa



Gambar 4.1 Rencana bentuk penampang memanjang balok

4.1.1 Momen rencana

Perhitungan momen rencana didapatkan dengan menganggap penampang berbentuk prismatis dua dimensi, selanjutnya untuk mendapatkan momen pada titik-titik yang akan ditinjau maka panjang bentangan dibagi menjadi segmen-segmen dengan panjang tiap segmen 1 meter. Karena panjang bentangan dan sistem tumpuan adalah simetris maka perhitungan dilakukan untuk setengah dari panjang keseluruhan. Selanjutnya untuk lebih memperjelas uraian di atas maka dapat dilihat dalam gambar 4.2, berikut ini.



Gambar 4.2 Balok menerus prismatis persegmen

Dengan memberikan beban luar yang berupa beban merata sebesar 25 KN/M dan berat sendiri ditaksir sebesar 15 KN/M, maka momen yang timbul akibat berat sendiri (M_0) dapat dihitung dengan menggunakan program komputer. Hasilnya terdapat dalam tabel 4.1, berikut ini.

Tabel 4.1 Besar momen rencana

Titik	Mo (KNm)	Ml (KNm)
1	0	0
2	31,87	53,12
3	48,75	81,25
4	50,62	84,37
5	37,5	62,5
6	9,37	15,62
7	-33,75	-56,25
8	-91,88	-153,13
9	-165	-275
10	-253,13	-421,88
11	-356,25	-593,75
12	-474,38	-790,63
13	-607,5	-1012,5
14	-435	-725
15	-277,5	-462,5
16	-135	-225
17	-7,5	-12,5
18	105	175
18	202,5	337,5
20	285	475
21	352,5	587,5
22	405	675
23	442,5	737,5
24	465	775
25	472,5	787,5

4.1.2 Modulus penampang

- Untuk titik 1

$$S_t = \frac{((1-0,8)0+0)10^6}{0,8 \cdot 1,5811 - (-18)} = 0$$

$$S_b = \frac{(0,2 \cdot 0 + 0)10^6}{3,1623 - 0,8 \cdot (-24)} = 0$$

- Untuk titik 2

$$S_t = \frac{((1-0,8)31,87 + 53,12)10^6}{0,8 \cdot 1,5811 - (-18)} = 3088210,256 \text{ mm}^3$$

$$S_b = \frac{((1-0,8)31,87 + 53,12) 10^6}{3,1623 - 0,8(-24)} = 2660459,792 \text{ mm}^3$$

untuk perencanaan yang diambil adalah yang terbesar yaitu 3088210,256 mm³

- dan seterusnya

Tabel 4.2 Besar modulus penampang

Titik	S_i (mm ³)	S_b (mm ³)
1	0	0
2	3088210.256	2660459.792
3	4723621.429	4069348.859
4	4904987.729	4225593.968
5	3633554.946	3130268.353
6	908077.2888	782298.7796
7	3270199.451	2817241.518
8	8902521.064	7669425.775
9	15987641.76	13773180.76
10	24526807.33	21129579.69
11	34518771.98	29737549.36
12	45964781.51	39598162.98
13	58863590.12	50710347.33
14	42149237.37	36311112.9
15	26888306.6	23163985.82
16	13080797.8	11268966.07
17	726710.9891	626053.6707
18	10173953.85	8764751.39
19	19621196.71	16903449.11
20	27615017.59	23790039.49
21	34155416.49	29424522.52
22	39242393.41	33806898.22
23	42875948.36	36937166.57
24	45056081.33	38815327.58
25	45782792.31	39441381.25

4.1.3 Dimensi penampang nonprismatis

Untuk menghitung tinggi balok yang diperlukan (h_{min}) digunakan rumus

$$S = \frac{I}{C} = \frac{\frac{1}{12}bh^3}{\frac{1}{2}h} = \frac{1}{6}bh^2. \text{ Lebar balok } (b) \text{ telah ditetapkan maka tinggi balok } (h$$

$_{min}$) dapat dicari dengan menjabarkan rumus di atas, $h = \sqrt{\frac{6S}{b}}$.

- Untuk titik 1, dengan menentukan lebar balok tetap sepanjang bentangan sebesar 500 mm maka,

$$h_{\min 1} = \sqrt{\frac{6.0}{500}} = 0$$

- Untuk titik 2

$$h_{\min 2} = \sqrt{\frac{6 \times 3088210,256}{500}} = 192,506 \text{ mm}$$

- dan seterusnya

Tabel 4.3 Batas minimal tinggi balok rencana

Titik	S (mm ³)	h _{min} (mm)
1	0	0
2	3088210.256	192.505904
3	4723621.429	238.0828787
4	4904987.729	242.610496
5	3633554.946	208.8124981
6	908077.2888	104.3883493
7	3270199.451	198.0969293
8	8902521.064	326.8489755
9	15987641.76	438.0087912
10	24526807.33	542.5142284
11	34518771.98	643.6033435
12	45964781.51	742.6825554
13	58863590.12	840.4540924
14	42149237.37	711.1897415
15	26888306.6	568.0314068
16	13080797.8	396.1938587
17	726710.9891	93.38378804
18	10173953.85	349.4101403
19	19621196.71	485.2363965
20	27615017.59	575.6563307
21	34155416.49	640.2069961
22	39242393.41	686.2278929
23	42875948.36	717.2944865
24	45056081.33	735.3046824
25	45782792.31	741.2108389

Dari h_{min} yang didapat, maka dapat direncanakan tinggi balok yang sebenarnya,

- untuk h₁ diambil = 500 mm
- untuk h₁₃ diambil = 850 mm

- untuk h_{25} diambil = 750 mm

Sedangkan untuk menghitung h (tinggi balok) pada tiap-tiap titik yang ditinjau, dihitung dengan menggunakan persamaan lingkaran. Hal ini didasarkan pada perbandingan antara selisih tinggi maksimal dan minimal dengan panjang bentangan adalah kecil. Dengan batasan bahwa tinggi balok yang direncanakan tidak kurang dari lebar balok (Istimawan, 1994), maka bentuk lingkaran akan lebih efektif jika dibandingkan dengan bentuk parabola (periksa lampiran 9).

Perhitungannya diuraikan sebagai berikut :

1. mencari jari-jari lingkaran

$$R^2 = (R-350)^2 + 12000^2$$

$$R^2 = R^2 - 700R + 122500 + 144000000$$

$$R = 205889,2875 \text{ mm}$$

2. mencari tinggi balok pada tiap-tiap titik yang ditinjau

- untuk titik 1 $h_1 = 500$ mm

- untuk titik 2

$$h_2 = (R+500) - \sqrt{R^2 - 1000^2}$$

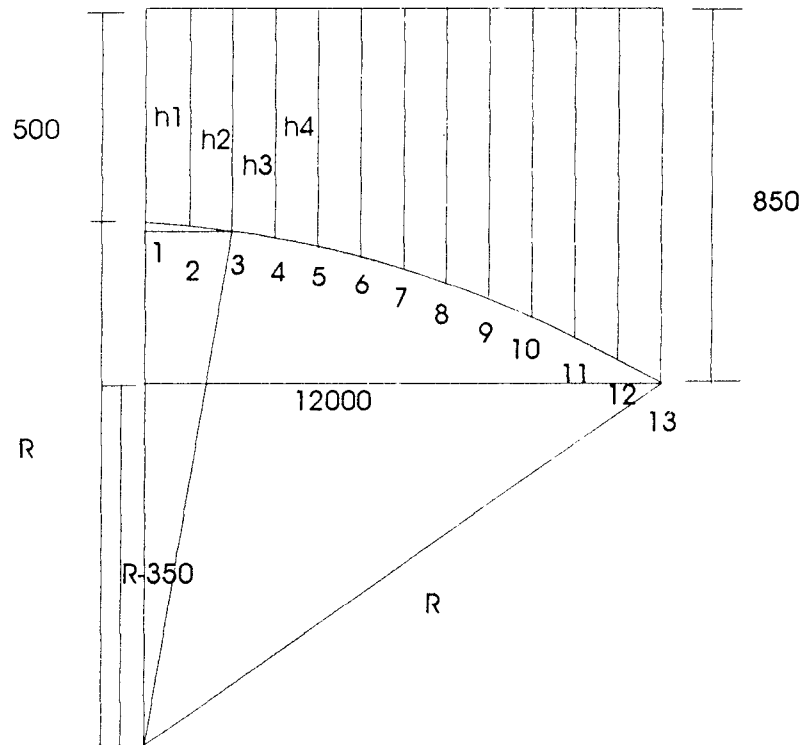
$$= (205889,2857 + 500) - \sqrt{205889,2889^2 - 1000^2} = 502,4285 \text{ mm}$$

- untuk titik 3

$$h_3 = (R+500) - \sqrt{R^2 - 2000^2}$$

$$= (205889,2857 + 500) - \sqrt{205889,2857^2 - 2000^2} = 509,7142 \text{ mm}$$

- dan seterusnya



Gambar 4.3. Sket mencari tinggi balok

Tabel 4.4 Tinggi balok tiap segmen

No	h_0 (mm)	X (mm)	R (mm)	h (mm)
1	500	0	205889.2857	500
2	500	1000	205889.2857	502.428504
3	500	2000	205889.2857	509.7141878
4	500	3000	205889.2857	521.8575671
5	500	4000	205889.2857	538.8595016
6	500	5000	205889.2857	560.7211953
7	500	6000	205889.2857	587.4441969
8	500	7000	205889.2857	619.0304004
9	500	8000	205889.2857	655.4820457
10	500	9000	205889.2857	696.8017195
11	500	10000	205889.2857	742.9923562
12	500	11000	205889.2857	794.0572387
13	500	12000	205889.2857	850
14	750	11000	720050	834.0268457
15	750	10000	720050	819.4429709
16	750	9000	720050	806.248291
17	750	8000	720050	794.4427298
18	750	7000	720050	784.0262189
19	750	6000	720050	774.998698

20	750	5000	720050	767.3601148
21	750	4000	720050	761.1104253
22	750	3000	720050	756.2495931
23	750	2000	720050	752.7775902
24	750	1000	720050	750.6943966
25	750	0	720050	750

Dari tabel-tabel di atas dibuat tabel yang lebih sederhana sebagai berikut :

Tabel 4.5 Tinggi balok rencana

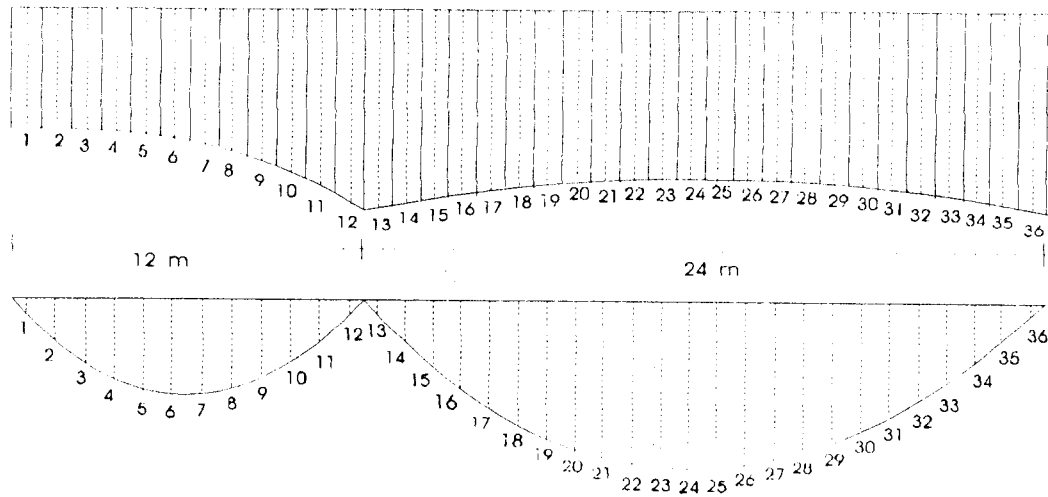
Titik	S(mm ³)	h min(mm)	h(mm)	Keterangan
1	0	0	500	h min < h
2	3088210.256	192.505904	502.428504	h min < h
3	4723621.429	238.0828787	509.7141878	h min < h
4	4904987.729	242.610496	521.8575671	h min < h
5	3633554.946	208.8124981	538.8595016	h min < h
6	908077.2888	104.3883493	560.7211953	h min < h
7	3270199.451	198.0969293	587.4441969	h min < h
8	8902521.064	326.8489755	619.0304004	h min < h
9	15987641.76	438.0087912	655.4820457	h min < h
10	24526807.33	542.5142284	696.8017195	h min < h
11	34518771.98	643.6033435	742.9923562	h min < h
12	45964781.51	742.6825554	794.0572387	h min < h
13	58863590.12	840.4540924	850	h min < h
14	42149237.37	711.1897415	834.0268457	h min < h
15	26888306.6	568.0314068	819.4429709	h min < h
16	13080797.8	396.1938587	806.248291	h min < h
17	726710.9891	93.38378804	794.4427298	h min < h
18	10173953.85	349.4101403	784.0262189	h min < h
19	19621196.71	485.2363965	774.998698	h min < h
20	27615017.59	575.6563307	767.3601148	h min < h
21	34155416.49	640.2069961	761.1104253	h min < h
22	39242393.41	686.2278929	756.2495931	h min < h
23	42875948.36	717.2944865	752.7775902	h min < h
24	45056081.33	735.3046824	750.6943966	h min < h
25	45782792.31	741.2108389	750	h min < h

4.2 Desain momen yang terjadi

Setelah mendapatkan bentuk yang direncanakan selanjutnya dilakukan perhitungan momen yang terjadi sesuai dengan bentuk yang sebenarnya.

1. Akibat beban luar, perhitungan momen dilakukan dengan menggunakan metode momen distribusi. Adapun perhitungan nilai Fixed End Moment, Stiffness dan

Carry Over Factor dilakukan dengan langkah-langkah berikut ini (J.S. Kinney), dan untuk memperjelas urutan perhitungan dapat dilihat pada tabel 4.6.



Gambar 4.4. Diagram momen akibat beban luar (M_s) dihitung perpias
Balok dianggap sebagai balok sederhana perbagian

□ Bagian AB

a. Fixed End Moment

$$M_A = \frac{\sum w}{\sum A} + \frac{\sum My \cdot (-X_o)}{\sum I + \sum AX^2} = \frac{2249,637}{7,462364} + \frac{1180,47 \cdot (-4,531781)}{0,621864 + 72,58775} = -228,3917$$

$$M_B = \frac{\sum w}{\sum A} + \frac{\sum My \cdot (L - X_o)}{\sum I + \sum AX^2} = \frac{2249,637}{7,462364} + \frac{1180,47 \cdot (12 - 4,531781)}{0,621864 + 72,58775} = 421,8858$$

b. Carry Over Factors (COF)

• COF dititik A (C_A)

$$f^a = \frac{1}{\sum A} + \frac{-X_o \cdot -X_o}{\sum I + \sum AX^2} = \frac{1}{7,462364} + \frac{(-4,531781) \cdot (-4,531781)}{(0,621864 + 72,58775)} = 0,4145$$

$$f^b = \frac{1}{\sum A} + \frac{-X_o \cdot (L - X_o)}{\sum I + \sum AX^2} = \frac{1}{7,462364} + \frac{(-4,531781) \cdot (12 - 4,531781)}{(0,621864 + 72,58775)} = -0,3283$$

Tabel 4.6 Perhitungan untuk mendapatkan stiffness, Carry Over Factor, Fixed End Moment

1. BAGIAN A - B

PIAS (1)	H (2)	L (3)	d (4)	A (5)	X (6)	I (7)	AX (8)	X ₀ (9)	X' (10)	AX ² (11)	Ms (12)	W (13)	My (14)
1	500.6071	1	1	1	0.5	0.083333	0.5	4.531781	-4.031781	16.25526	71.875	71.875	-289.784243
2	505.4642	1	0.971449	0.971449	1.5	0.080954	1.457173		-3.031781	8.929259	196.875	191.253935	-579.840004
3	515.1786	1	0.917524	0.917524	2.5	0.07646	2.293811		-2.031781	3.787662	296.875	272.390024	-553.436812
4	529.7511	1	0.84387	0.84387	3.5	0.070322	2.953544		-1.031781	0.89836	371.875	313.814059	-323.787311
5	549.1828	1	0.757426	0.757426	4.5	0.063119	3.408417		-0.031781	0.000765	421.875	319.539112	-10.1551988
6	573.4749	1	0.665193	0.665193	5.5	0.055433	3.658562		0.968219	0.623584	446.875	297.258191	287.811097
7	602.6293	1	0.573245	0.573245	6.5	0.04777	3.726093		1.968219	2.220686	446.875	256.168865	504.1964857
8	636.6479	1	0.486176	0.486176	7.5	0.040515	3.646316		2.968219	4.283364	421.875	205.105295	608.7974805
9	675.5332	1	0.406959	0.406959	8.5	0.033913	3.459154		3.968219	6.408291	371.875	151.33797	600.5422425
10	719.288	1	0.337118	0.337118	9.5	0.028093	3.202626		4.968219	8.321164	296.875	100.082051	497.2295701
11	767.9153	1	0.277045	0.277045	10.5	0.023087	2.908977		5.968219	9.86826	196.875	54.5433268	325.526532
12	821.4186	1	0.226359	0.226359	11.5	0.018863	2.603126		6.968219	10.9911	71.875	16.26954	113.3697215
				7.462364		0.621864	33.8178			72.58775		2249.63737	1180.469561

Keterangan :

- Kolom 1 = Titik tengah antar segmen
Kolom 2 = Tinggi balok tiap pias (mm)
Kolom 3 = Lebar antar pias (m)
Kolom 4 = $(H_{pias\ 1})^3 / (H_{pias\ n})^3$
Kolom 5 = Kolom (3) X Kolom (4)
Kolom 6 = Jarak pias ke tumpuan A (m)
Kolom 7 = Kolom (5) X Kolom (3) / 12

- Kolom 8 = Kolom (5) X Kolom (6)
Kolom 9 = Σ Kolom (8) / Σ Kolom (5)
Kolom 10 = Kolom (6) - Kolom (9)
Kolom 11 = Kolom (5) X Kolom (10)
Kolom 12 = Momen tiap pias akibat beban merata
pada balok sederhana
Kolom 13 = Kolom (12) X Kolom (5)
Kolom 14 = Kolom (10) X Kolom (13)

Lanjutan tabel 4.6
2. BAGIAN B - C

PIAS (1)	H (2)	L (3)	d (4)	A (5)	X (6)	I (7)	AX ² (8)	Ms (9)	W (10)	My (11)
13	841.8398	1	0.707615	0.707615	-11.5	0.058968	93.58207	146.875	103.9309379	-1195.206
14	826.5613	1	0.747584	0.747584	-10.5	0.062299	82.42116	421.875	315.3870935	-3311.564
15	812.672	1	0.786574	0.786574	-9.5	0.065548	70.988279	671.875	528.4792266	-5020.553
16	800.1719	1	0.824016	0.824016	-8.5	0.068668	59.535128	896.875	739.0390043	-6281.832
17	789.0608	1	0.859318	0.859318	-7.5	0.07161	48.336639	1096.875	942.5644638	-7069.233
18	779.3388	1	0.89188	0.89188	-6.5	0.074323	37.681931	1271.875	1134.359898	-7373.339
19	771.0058	1	0.921112	0.921112	-5.5	0.076759	27.863635	1421.875	1309.705986	-7203.383
20	764.0617	1	0.946455	0.946455	-4.5	0.078871	19.165717	1546.875	1464.047808	-6588.215
21	758.5064	1	0.967403	0.967403	-3.5	0.080617	11.850691	1646.875	1593.192369	-5576.173
22	754.34	1	0.983522	0.983522	-2.5	0.08196	6.1470102	1721.875	1693.501313	-4233.753
23	751.5624	1	0.994467	0.994467	-1.5	0.082872	2.2375498	1771.875	1762.070483	-2643.106
24	750.1736	1	1	1	-0.5	0.083333	0.25	1796.875	1796.875	-898.4375
25	750.1736	1	1	1	0.5	0.083333	0.25	1796.875	1796.875	898.4375
26	751.5624	1	0.994467	0.994467	1.5	0.082872	2.2375498	1771.875	1762.070483	2643.106
27	754.34	1	0.983522	0.983522	2.5	0.08196	6.1470102	1721.875	1693.501313	4233.753
28	758.5064	1	0.967403	0.967403	3.5	0.080617	11.850691	1646.875	1593.192369	5576.173
29	764.0617	1	0.946455	0.946455	4.5	0.078871	19.165717	1546.875	1464.047808	6588.215
30	771.0058	1	0.921112	0.921112	5.5	0.076759	27.863635	1421.875	1309.705986	7203.383
31	779.3388	1	0.89188	0.89188	6.5	0.074323	37.681931	1271.875	1134.359898	7373.339
32	789.0608	1	0.859318	0.859318	7.5	0.07161	48.336639	1096.875	942.5644638	7069.233
33	800.1719	1	0.824016	0.824016	8.5	0.068668	59.535128	896.875	739.0390043	6281.832
34	812.672	1	0.786574	0.786574	9.5	0.065548	70.988279	671.875	528.4792266	5020.553
35	826.5613	1	0.747584	0.747584	10.5	0.062299	82.42116	421.875	315.3870935	3311.564
36	841.8398	1	0.707615	0.707615	11.5	0.058968	93.58207	146.875	103.9309379	1195.206
				21.25989		1.771658	920.11962		26766.30716	6.82E-13

$$C_A = \frac{f'b}{f'a} = \frac{-0,3283}{0,4145} = -0,7920$$

- C_B

$$f'b = \frac{1}{7,462364} + \frac{(12 - 4,531781) \cdot (12 - 4,531781)}{(0,621864 + 72,58775)} = 0,89585$$

$$f'a = \frac{1}{7,462364} + \frac{(12 - 4,531781) \cdot (-4,531781)}{(0,621864 + 72,58775)} = -0,3283$$

$$C_B = \frac{-0,3283}{0,89585} = -0,3665$$

c. Stiffness coefficient (K)

- Relatif stiffnes

$$\text{Rel } K_A = f'a \cdot b \cdot h^3 = 0,4145 \cdot 0,5 \cdot (0,5006071)^3 = 0,02600$$

$$\text{Rel } K_B = f'b \cdot b \cdot h^3 = 0,89585 \cdot 0,5 \cdot (0,5006071)^3 = 0,05619$$

- Absolute stiffnes

$$\text{Abs } K_A = \text{Rel } K_A \cdot E_c / 12 = 0,02603 \cdot 290000000 / 12 = 62839,58$$

$$\text{Abs } K_B = \text{Rel } K_B \cdot E_c / 12 = 0,056195 \cdot 290000000 / 12 = 135804,1$$

Perletakan A sesungguhnya rol , sehingga Abs K_B perlu disesuaikan,

$$S'_{BA} = S_{BA} \cdot (1 - C_{AB} \cdot C_{BA})$$

$$= 135804,1 \cdot (1 - 0,7920 \cdot 0,3665) = 96391,95141$$

□ **Bagian BC**

a. FEM

$$M_B = \frac{26766,31}{21,25989} + \frac{(6,28 \cdot 10^{-3}) \cdot (-12)}{1,771658 + 920,1196} = 1259,005$$

$$M_C = \frac{26766,31}{21,25989} - \frac{(6,28 \cdot 10^{-3}) \cdot (-12)}{1,771658 + 920,1196} = 1259,005$$

b. Carry Over Factors (COF)

- C_B

$$f''_b = \frac{1}{21,25989} + \frac{(-12) \cdot (-12)}{1,771658 + 920,1196} = 0,2032$$

$$f''_c = \frac{1}{21,25989} - \frac{(-12) \cdot (12)}{1,771658 + 920,1196} = -0,1092$$

$$C_B = \frac{-0,1092}{0,2032} = -0,5371$$

- $C_C = C_B = -0,5371$

c. Stiffnes coefficient (K)

- Relatif stiffnes

$$\text{Rel } K_B = 0,2032 \cdot 0,5 \cdot (0,7501736)^3 = 0,0429$$

$$\text{Rel } K_C = 0,2032 \cdot 0,5 \cdot (0,7501736)^3 = 0,0429$$

- Absolute stiffnes

$$\text{Abs } K_B = 0,0429 \cdot 29000000/12 = 103675,5$$

$$\text{Abs } K_C = 0,0429 \cdot 29000000/12 = 103675,5$$

Kekakuan BC perlu disesuaikan

$$S'_{BC} = S_{BC} \cdot (1 - C_{BC})$$

$$= 103675,5 \cdot (1 - 0,5371) = 47988,90074$$

Perhitungan momen pada tumpuan dengan menggunakan metode momen distribusi akibat beban luar seperti di bawah :

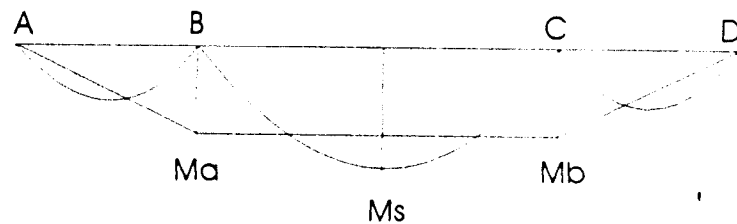
	A	B	
	ab	ba	bc
SF	62839.6	96391.80211	47988.90074
DF	1	0.667622475	0.332377525
COF	0.79195	0.366454	0.537124
FEM	-228.39	421.8858	-1259.005
	204.8037	558.8795918	278.2396082
	23.58804	18.68061752	
	-4.570268	-12.47160009	-6.209017425
	4.570268	3.619437248	
	-0.885506	-2.416417652	-1.203019596
	0.885506	0.701279065	
	-0.17157	-0.468189665	-0.2330894
	0.17157	0.135875357	
	-0.033242	-0.090713442	-0.045161915
	0.033242	0.026326342	
	-0.006441	-0.017576058	-0.008750284
	0.006441	0.005100824	
	-0.001248	-0.003405425	-0.001695399
	0.001248	0.000988303	
	-0.000242	-0.000659813	-0.00032849
	0.000242	0.000191487	
	-4.68E-05	-0.000127841	-6.36461E-05
	4.68E-05	3.171014E-05	
	-9.08E-06	-2.47697E-05	-1.23317E-05
	9.08E-06	7.18852E-06	
		-4.79922E-06	-2.3839E-06
	0	988.4665327	-988.4665327

Jadi momen yang terjadi pada tumpuan A = D = 0 dan pada tumpuan B = C = - 998,4665327 KNm. Momen total akibat beban luar yang terjadi dapat dilihat pada gambar 4.5 dan tabel 4.7

Tabel 4.7 Momen akibat beban luar

TITIK	Ms (Nmm)	Mj (Nmm)	Ml (Nmm)
1	0	0	0
2	137500000	-82372211.06	55127788.94
3	250000000	-164744422.1	85255577.88
4	337500000	-247116633.2	90383366.83
5	400000000	-329488844.2	70511155.77
6	437500000	-411861055.3	25638944.71
7	450000000	-494233266.4	-44233266.35
8	437500000	-576605477.4	-139105477.4
9	400000000	-658977688.5	-258977688.5

10	337500000	-741349899.5	-403849899.5
11	250000000	-823722110.6	-573722110.6
12	137500000	-906094321.6	-768594321.6
13	0	-988466532.7	-988466532.7
14	287500000	-988466532.7	-700966532.7
15	550000000	-988466532.7	-438466532.7
16	787500000	-988466532.7	-200966532.7
17	1000000000	-988466532.7	11533467.3
18	1187500000	-988466532.7	199033467.3
19	1350000000	-988466532.7	361533467.3
20	1487500000	-988466532.7	499033467.3
21	1600000000	-988466532.7	611533467.3
22	1687500000	-988466532.7	699033467.3
23	1750000000	-988466532.7	761533467.3
24	1787500000	-988466532.7	799033467.3
25	1800000000	-988466532.7	811533467.3



Gambar 4.5 Superposisi Diagram momen

2. Akibat berat sendiri, dengan memberikan nilai berat volume beton = 24 KN/m^3 maka dengan digunakan metode momen distribusi seperti pada perhitungan momen akibat beban luar, besar momen yang terjadi dapat dihitung. Hasilnya terlihat pada tabel 4.8 di bawah ini :

Tabel 4.8 Momen akibat berat sendiri

TITIK	Ms (Nmm)	Mj (Nmm)	Mo (Nmm)
1	2	3	4
1	0	0	0
2	44637085.8	-34678595.73	9958490.067
3	82033371.84	-69357191.47	12676180.37
4	112083937.9	-104035787.2	8048150.72
5	134613897.6	-138714382.9	-4100485.333
6	149378364	-173392978.7	-24014614.67

7	156062410.6	-208071574.4	-52009163.84
8	154281012.5	-242750170.1	-88469157.65
9	143578982.4	-277428765.9	-133849783.5
10	123430874.8	-312107361.6	-188676486.8
11	93240912	-346785957.3	-253545045.3
12	52342894.56	-381464553.1	-329121658.5
13	0	-416143148.8	-416143148.8
14	129297503.5	-416143148.8	-286845645.3
15	246680020.8	-416143148.8	-169463128
16	352417555.1	-416143148.8	-63725593.72
17	446720100.5	-416143148.8	30576951.68
18	529737642	-416143148.8	113594493.2
19	601560168.5	-416143148.8	185417019.7
20	662217678.4	-416143148.8	246074529.6
21	711680163.8	-416143148.8	295537015
22	749857616.6	-416143148.8	333714467.8
23	776600064	-416143148.8	360456915.2
24	791697519.4	-416143148.8	375554370.6
25	794880000	-416143148.8	378736851.2

4.3 Desain Beton Prategang

1. Perhitungan besar gaya prategang

- Tegangan beton pada pusat beton

$$f_{c_{ci}} = f_{ti} - \frac{c_i}{h} (f_{ti} - f_{ci}), \text{ pada penampang simetris } c_1 = c_2 = \frac{1}{2} h$$

$$= 1,5811 - \frac{1}{2} (1,5811 + 24) = -11,20945 \text{ Mpa}$$

- Gaya prategang awal

$$P_o = |f_{c_{ci}}| \cdot A_c$$

$$= 11,20945 \cdot (750 \cdot 500)$$

$$= 4203543.75 \text{ N} = 4203.54375 \text{ KN}$$

- Gaya prategang efektif

$$P_e = R \cdot P_o$$

$$= 0,8 \cdot 4203.54375 \text{ KN}$$

$$= 3362.835 \text{ KN}$$

2. Perhitungan luas baja prategang

$$A_{ps} = \frac{P_o}{f_{ps}}, f_{ps} = \text{untuk pasca tarik tidak boleh lebih dari } 0,7 f_{pu} \text{ (SKSNI)}$$

$$f_{ps} = 0,7 \cdot 1800 = 1260 \text{ Mpa}$$

$$A_{ps} = \frac{4203543.75}{1260} = 3336.145833 \text{ mm}^2$$

Dipakai baja prategang jenis "Freyssinet System" dengan tendon $\varnothing 15$

$$\text{Luas } \varnothing 15 = 0,25 \cdot \pi \cdot 15^2 = 176,7146 \text{ mm}^2$$

$$\text{Jumlah straint (n)} = \frac{3336.145833}{176,7146} = 18.8787$$

dipakai tendon ukuran 19 K 15 dengan diameter selubung 101 mm. Lihat lampiran 5.

3. Tata letak tendon

Perhitungan tata letak tendon ditentukan dengan menggunakan persamaan (3.12,3.13,3.14,3.15).

- Untuk titik 1

$$S_t = S_b = 1/6 bh^2 = 1/6 \cdot 500 \cdot 500^2 = 20833333,3 \text{ mm}^3$$

$$A_c = b \cdot h = 500 \cdot 500 = 250000 \text{ mm}^2$$

$$f_u' = 1,5811 \text{ Mpa}, f_{ci}' = -24 \text{ Mpa}, f_{ts}' = 3,1623 \text{ Mpa} \text{ dan } f_{cs}' = -18 \text{ Mpa}$$

Alternatif 1

$$e_{i1} = \frac{1,5811 \cdot 20833333,3}{4203543.75} + \frac{20833333,3}{250000} + \frac{0}{4203543.75} = 91,1695 \text{ mm}$$



$$e_{i_2} = -\frac{24.20833333,3}{4203543,75} - \frac{20833333,3}{250000} + \frac{0}{4203543,75} = 35,6139 \text{ mm}$$

$$e_{s_1} = \frac{-18.20833333,3}{3362835} + \frac{20833333,3}{250000} + \frac{0}{3362835} = -28,1797 \text{ mm}$$

$$e_{s_2} = -\frac{3,1623.20833333,3}{3362835} - \frac{20833333,3}{250000} + \frac{0}{3362835} = -102,9243 \text{ mm}$$

dipilih $e_{\text{atas}} = -28,1797 \text{ mm}$

$$e_{\text{bawah}} = 35,6139 \text{ mm}$$

Alternatif 2

$$e_{i_1} = \frac{-24.20833333,3}{4203543,75} + \frac{20833333,3}{250000} + \frac{0}{4203543,75} = -35,6139 \text{ mm}$$

$$e_{i_2} = -\frac{1,5811.20833333,3}{4203543,75} - \frac{20833333,3}{250000} + \frac{0}{4203543,75} = -91,1694 \text{ mm}$$

$$e_{s_1} = \frac{3,1623.20833333,3}{3362835} + \frac{20833333,3}{250000} + \frac{0}{3362835} = 102,9243 \text{ mm}$$

$$e_{s_2} = -\frac{18.20833333,3}{3362835} - \frac{20833333,3}{250000} + \frac{0}{3362835} = 28,1797 \text{ mm}$$

dipilih $e_{\text{atas}} = -35,6139 \text{ mm}$

$$e_{\text{bawah}} = 28,1797 \text{ mm}$$

Dari kedua alternatif diatas, dipilih nilai e :

$$e_{\text{atas}} = -28,1797 \text{ mm}$$

$$e_{\text{bawah}} = 28,1797 \text{ mm}$$

- dan seterusnya

Hasil lengkap dapat dilihat pada tabel 4.9.

Tabel 4.9 Tata letak tendon (harga batas "e"/eksentrisitas)

Titik	Alternatif 1										Alternatif 2									
	ei1	ei2	es1	es2	ei terpakai	ec terpakai	ec terpakai	ei1	ei2	es1	es2	ei terpakai	ei2	es1	es2	ei terpakai	ec terpakai			
1	91.16948	35.61392	-28.17972	-102.9243	35.6	-28.2	-28.2	-35.61392	-91.16948	102.9243	28.17972	35.6	-91.16948	102.9243	28.17972	12	13			
2	93.9347	38.60314	-9.38569	-84.06011	38.6	-9.3	-9.3	-33.865	-89.19656	122.7693	48.09486	38.6	-89.19656	122.7693	48.09486	-35.6	28.2			
3	96.16832	41.76832	-1.896396	-76.26068	41.7	-1.8	-1.8	-35.73713	-90.13713	134.5042	60.13997	41.7	-90.13713	134.5042	60.13997	-33.8	48.1			
4	97.45551	44.55951	-5.271694	-79.08252	44.5	-5.2	-5.2	-40.73029	-93.62629	137.6233	63.81249	44.5	-93.62629	137.6233	63.81249	-35.7	60.1			
5	97.96411	47.41789	-20.00578	-92.85129	47.4	-20	-20	-49.36885	-99.91508	132.3481	59.50262	47.4	-99.91508	132.3481	59.50262	-40.7	63.8			
6	97.65185	50.52785	-46.39898	-117.6798	50.5	-46.3	-46.3	-61.95374	-109.0777	118.6458	47.36502	50.5	-109.0777	118.6458	47.36502	-49.3	59.5			
7	96.26101	53.73612	-84.48187	-153.4546	53.5	-84.4	-84.4	-78.48151	-121.0064	96.21568	27.243	53.5	-121.0064	96.21568	27.243	-78.4	27.2			
8	94.13036	58.09081	-135.4166	-200.8661	58.1	-135.4	-135.4	-100.1835	-136.223	65.51923	0.069699	58.1	-136.223	65.51923	0.069699	-100.1	0			
9	90.77215	63.11659	-199.0153	-259.6011	63.1	-199	-199	-126.8009	-154.4564	25.97238	-34.61349	63.1	-154.4564	25.97238	-34.61349	-126.8	-34.6			
10	86.50905	70.09082	-276.728	-330.435	70.1	-276.7	-276.7	-159.861	-176.2792	-21.9619	-75.66896	70.1	-176.2792	-21.9619	-75.66896	-159.8	-75.7			
11	80.8201	78.50855	-368.4122	-413.097	78.5	-368.4	-368.4	-199.1425	-201.4541	-78.90883	-123.5936	78.5	-201.4541	-78.90883	-123.5936	-199.1	-123.6			
12	73.79785	89.32496	-475.2998	-508.1625	73.7	-475.2	-475.2	-245.9174	-230.3903	-144.689	-177.5517	73.7	-230.3903	-144.689	-177.5517	-230.3	-177.6			
13	65.31496	103.0927	-598.2922	-615.9708	65.3	-598.2	-598.2	-301.0891	-263.3113	-219.4016	-237.0801	65.3	-263.3113	-219.4016	-237.0801	-263.3	-237.1			
14	92.56291	123.6989	-464.9982	-487.2504	92.5	-464.9	-464.9	-260.1769	-229.0409	-100.2374	-122.4896	92.5	-229.0409	-100.2374	-122.4896	-229	-122.5			
15	117.2104	142.3264	-343.4733	-369.8424	117.2	-343.4	-343.4	-222.9551	-197.8391	8.28456	-18.08448	117.2	-197.8391	8.28456	-18.08448	-197.8	-18.1			
16	139.5359	159.5964	-234.1492	-263.9524	139.5	-234.1	-234.1	-189.9163	-169.8559	106.5304	76.72724	139.5	-169.8559	106.5304	76.72724	-169.8	76.7			
17	159.3682	174.8953	-136.3517	-169.2145	159.3	-136.3	-136.3	-160.3471	-144.82	194.2591	161.3963	159.3	-144.82	194.2591	161.3963	-144.8	161.3			
18	176.9563	188.8034	-50.53641	-85.86794	176.9	-50.5	-50.5	-134.7564	-122.9093	271.7991	236.4676	176.9	-122.9093	271.7991	236.4676	-122.9	236.4			
19	192.1027	200.7138	23.90221	-13.58836	192.1	23.9	23.9	-112.4944	-103.8833	338.8797	301.3891	192.1	-103.8833	338.8797	301.3891	-103.8	301.3			
20	204.8128	210.6079	86.9971	47.6374	204.8	87	87	-93.52834	-87.73323	395.5054	356.1457	204.8	-87.73323	395.5054	356.1457	-87.7	356.1			
21	215.2923	219.0127	138.249	97.51833	215.2	138.2	138.2	-78.39945	-74.67901	441.9494	401.2187	215.2	-74.67901	441.9494	401.2187	-74.6	401.2			
22	223.3034	225.3194	178.1714	136.3185	223.3	178.2	178.2	-66.54172	-64.52572	477.8941	436.0412	223.3	-64.52572	477.8941	436.0412	-64.5	436			
23	229.0234	230.0274	206.2286	163.7111	229	206.2	206.2	-58.52594	-57.52194	503.5773	461.0598	229	-57.52194	503.5773	461.0598	-57.5	461			
24	232.1874	232.5211	222.8778	179.921	232.1	222.9	222.9	-53.8365	-53.50272	518.649	475.6922	232.1	-53.50272	518.649	475.6922	-53.5	475.6			
25	232.7307	232.7307	228.0441	184.8688	232.7	228	228	-52.53191	-52.53191	523.0282	479.8528	232.7	-52.53191	523.0282	479.8528	-53.53	479.8			

4.4 Kontrol Tegangan Beton dan Tendon

1. Tegangan beton

- Untuk titik 1

$$A_{net} = A_c - A_{selubung}$$

$$= 500.500 - 0,25 \cdot \pi \cdot 101^2 = 241988,1533 \text{ mm}^2$$

$$I_{net} = I_c - I_{selubung}$$

$$= (1/12 \cdot b \cdot h^3 + b \cdot h \cdot y^2) - (1/64 \cdot \pi \cdot d^4 + 0,25 \cdot \pi \cdot d^2 \cdot e^2)$$

$$= (1/12 \cdot 500 \cdot 500^3 + 500 \cdot 500 \cdot 0,2318^2) - (1/64 \cdot \pi \cdot 101^4 + 0,25 \cdot \pi \cdot 101^2 \cdot (-7,2318)^2) = 5202819702 \text{ mm}^4$$

$$A_{br} = A_c + (n-1) \cdot A_{ps}$$

$$= 500.500 + 6 \cdot 19 \cdot 0,25 \cdot \pi \cdot 15^2 = 270145,4626 \text{ mm}^2$$

$$I_{br} = I_c + I_{ps}$$

$$= (1/12 \cdot b \cdot h^3 + b \cdot h \cdot y^2) + (n-1) \cdot A_{ps} \cdot e^2$$

$$= (1/12 \cdot 500 \cdot 500^3 + 500 \cdot 500 \cdot 0,522^2) + 6 \cdot 19 \cdot 0,25 \cdot \pi \cdot 15^2 \cdot (-6,477991)^2$$

$$= 5209246848 \text{ mm}^4$$

a. saat transfer

$$f_{ti} = -\frac{4203543,8}{241988,1533} + \frac{4203543,8 \cdot (-7,2318) \cdot 250,06621}{5203192172} - 0$$

$$= -18,8329 \text{ MPa}$$

$$f_{bi} = -\frac{4203543,8}{241988,1533} - \frac{4203543,8 \cdot (-7,2318) \cdot 249,93378}{520319216851} + 0$$

$$= -15,91152 \text{ MPa}$$

b. saat layan

$$f_{ts} = -\frac{3362835}{270145,4626} + \frac{3362835 \cdot (-6,478) \cdot 249,85085}{5208407906} - 0 = -13,4915 \text{ MPa}$$

$$f_{bs} = -\frac{3362835}{270145,4626} - \frac{3362835 \cdot (-6,478) \cdot 250,14915}{5208407906} + 0 = -11,4006 \text{ Mpa}$$

- dan seterusnya.

Hasil lengkap dilihat pada tabel 4.10 halaman 52.

2. Tegangan tendon

- Untuk titik 1

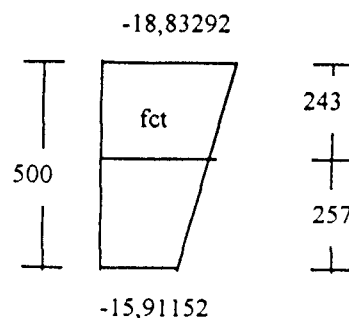
a. saat transfer

1. Tegangan pada saat penarikan

$$f_{si} = \frac{P_0}{A_{ps}} = \frac{4203543,8}{3357,5771} = 1251,9575 \text{ MPa}$$

2. Tegangan beton dalam tendon

$$f_{ct} = -15,9115 + \frac{(-18,8329 - (-15,9115))}{500} \cdot (500 - 243) = -17,4131 \text{ MPa}$$



3. Tegangan tendon saat transfer

$$f_s = f_{si} + n \cdot f_{ct}$$

$$= 1251,9575 + 7 \cdot (-17,4131) = 1130,6257 \text{ Mpa} < f_{si} = 1251,9575 \text{ Mpa}$$

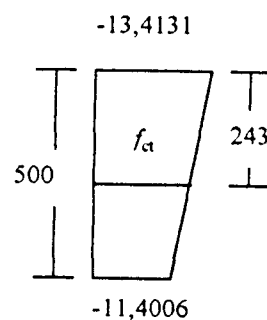
b. Saat layan

1. Tegangan efektif tendon (f_{se})

$$f_{se} = \frac{P_e}{A_{ps}} = \frac{3362835}{3357,5771} = 1001,566 \text{ MPa}$$

2. Tegangan beton dalam tendon

$$f_{ct} = -11,4006 + \frac{(-13,4131 - (-11,4006))}{500} \cdot (500 - 243) = -12,4753 \text{ Mp}$$



3. Tegangan tendon saat layan

$$\begin{aligned} f_s &= f_{se} + n \cdot f_{ct} = 1001,566 + 7 \cdot (-12,4753) \\ &= 914,2387 \text{ Mpa} < f_{si} = 1251,9575 \text{ Mpa} \end{aligned}$$

• Untuk titik 2

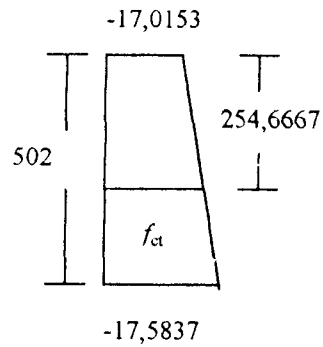
a. saat transfer

1. Tegangan pada saat penarikan

$$f_{si} = 1251,9575 \text{ Mpa}$$

2. Tegangan beton dalam tendon

$$\begin{aligned} f_{ct} &= -17,5837 + \frac{(-17,0153 - (-17,5837))}{502} \cdot (502 - 254,6667) \\ &= -17,3037 \text{ Mpa} \end{aligned}$$



3. Tegangan tendon saat transfer

$$f_s = 1251,9575 + 7.(-17,3037) = 1130,8314 \text{ Mpa} < f_{si} = 998,4747 \text{ Mpa}$$

b. Pada saat layan

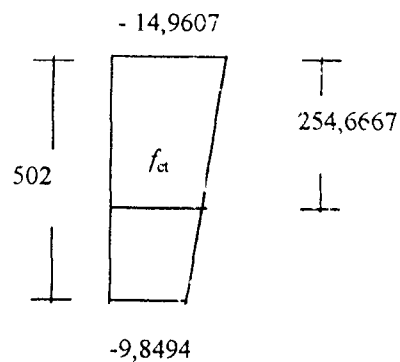
1. Tegangan efektif tendon

$$f_{se} = 1001,56598 \text{ Mpa}$$

2. Tegangan beton dalam tendon

$$f_{ct} = -9,8494 + \frac{(-14,9607 - (-9,8494))}{502} (502 - 254,6667)$$

$$= -12,3678 \text{ MPa}$$



3. Tegangan tendon saat layan

$$f_s = 1001,566 + 7.(-12,3678) = 914,9916 \text{ Mpa} < f_{si} = 1251,9575 \text{ Mpa}$$

- dan seterusnya

Hasil lengkap terdapat dalam tabel 4.11.

Tabel 4.10 Besar tegangan beton

Titik	f_{ti} (N/mm ²)	f_{ci} (N/mm ²)	f_{ls} (N/mm ²)	f_{bs} (N/mm ²)
1	-18.83292	-15.91152	-13.49152	-11.40059
2	-17.0153	-17.58373	-14.96075	-9.849454
3	-15.93553	-18.1052	-15.54914	-8.910795
4	-15.44216	-17.79127	-15.20262	-8.733976
5	-15.51807	-16.63313	-14.0746	-9.14851
6	-16.02431	-14.82987	-12.34114	-10.02456
7	-16.75803	-12.69998	-10.16854	-11.28122
8	-17.66063	-10.25508	-7.836962	-12.61087
9	-18.52683	-7.848863	-5.442388	-14.01802
10	-19.31654	-5.476127	-3.204301	-15.24483
11	-19.92578	-3.347562	-1.123674	-16.35892
12	-20.34185	-1.457658	0.709428	-17.24904
13	-20.55181	0.165572	2.281558	-17.90641
14	-17.62972	-3.03897	-0.072359	-15.59556
15	-14.8113	-6.168803	-2.536314	-13.23488
16	-12.12248	-9.166909	-5.054109	-10.86334
17	-9.565519	-12.05007	-7.501315	-8.61873
18	-7.194117	-14.72862	-9.815107	-6.532769
19	-5.007967	-17.22165	-11.90241	-4.701106
20	-3.034697	-19.49272	-13.71426	-3.15465
21	-1.362776	-21.41111	-15.22181	-1.882291
22	0.021439	-23.01188	-16.39355	-0.919421
23	1.023397	-23.15743	-17.21871	-0.24003
24	1.180137	-23.51137	-17.687	0.133589
25	1.380252	-23.85806	-17.79321	0.202418

Syarat Batas

 $f_{ti}' = 1,5811 \text{ MPa}$, $f_{ci}' = -24 \text{ MPa}$, $f_{ls}' = 3,1623 \text{ MPa}$, $f_{cs}' = -18 \text{ MPa}$

Tabel 4.11 Kontrol tegangan tendon

	Saat Transfer		Saat Layan		Ket
	f_{ct}	f_s	f_{ct}	f_s	
	-17.41312	1130.066	-12.47533	914.239	$f_s < f_{si}$
	-17.30367	1130.832	-12.36777	914.992	$f_s < f_{si}$
	-17.05582	1132.567	-12.1215	916.715	$f_s < f_{si}$
	-16.65272	1135.388	-11.86916	918.482	$f_s < f_{si}$
	-16.08008	1139.397	-11.59175	920.424	$f_s < f_{si}$
	-15.44661	1143.831	-11.2207	923.021	$f_s < f_{si}$
	-14.90529	1147.62	-10.67654	925.83	$f_s < f_{si}$
	-14.53012	1150.247	-9.855012	932.581	$f_s < f_{si}$
	-14.41323	1151.065	-8.746079	940.343	$f_s < f_{si}$
	-14.55083	1150.102	-7.350251	950.114	$f_s < f_{si}$
	-14.9129	1147.567	-5.730474	961.453	$f_s < f_{si}$
	-15.4345	1143.916	-3.95736	973.864	$f_s < f_{si}$
	-16.04273	1139.658	-2.112294	986.78	$f_s < f_{si}$
	-13.21517	1159.451	-4.769026	968.183	$f_s < f_{si}$
	-11.49957	1171.46	-6.635907	955.115	$f_s < f_{si}$
	-10.76754	1176.585	-7.717274	947.545	$f_s < f_{si}$
	-10.87768	1175.814	-8.091453	944.926	$f_s < f_{si}$
	-11.64691	1170.429	-7.87529	946.439	$f_s < f_{si}$
	-12.9114	1161.578	-7.242469	950.869	$f_s < f_{si}$
	-14.48951	1150.531	-6.364754	957.013	$f_s < f_{si}$
	-16.1246	1139.085	-5.399764	963.768	$f_s < f_{si}$
	-17.68009	1128.197	-4.501395	970.056	$f_s < f_{si}$
	-18.11039	1125.185	-3.783832	975.079	$f_s < f_{si}$
	-18.70568	1121.018	-3.334822	978.222	$f_s < f_{si}$
	-19.07961	1118.4	-3.204754	979.133	$f_s < f_{si}$

Keterangan :

 $f_{si}' = 1251,9575 \text{ MPa}$ $f_{sc}' = 1001,566 \text{ MPa}$

4.5 Kapasitas Layan Struktur

4.5.1 Kekuatan lentur penampang

- Untuk titik 1

$$\rho_p = \frac{A_{ps}}{b \cdot d} = \frac{3357,5771}{500 \cdot 243} = 0,0276$$

$$f_c = 40 \text{ Mpa, sehingga } \beta_1 = 0,85 - 0,008(40-30) = 0,77$$

$$\frac{f_{py}}{f_{pu}} \geq 0,85, \text{ sehingga } \gamma_p = 0,4$$

$$\begin{aligned} f_{ps} &= f_{pu} \left(1 - \frac{\gamma_p \cdot \rho_p \cdot f_{pu}}{\beta_1 \cdot f_c} \right) \\ &= 1800 \left(1 - \frac{0,4 \cdot 0,02765 \cdot 1800}{0,77 \cdot 40} \right) = 639,6494 \text{ MPa} \leq 0,7 f_{pu} = 1260 \text{ MPa} \end{aligned}$$

$$f_{se} = \frac{P_c}{A_{ps}} = \frac{3362835}{3357,5771} = 1001,56598 \text{ MPa}$$

1. Kontrol regangan

- Regangan baja akibat P_c

$$E_p = \frac{f_{py}}{\epsilon_{py}} = \frac{0,85 \cdot 1800}{0,01} = 153000$$

$$\epsilon_1 = \frac{f_{se}}{E_p} = \frac{1001,566}{153000} = 0,0065$$

- Regangan baja akibat tata letak tendon

$$r^2 = \frac{I_{\text{bruto}}}{A_{\text{bruto}}} = \frac{5209246848}{270145,4626} = 19283,11539$$

$$\varepsilon_2 = \frac{P_e}{A_{\text{bruto}} \cdot E_c} \left(1 + \frac{e^2}{r^2} \right) = \frac{3362835}{270145,4626 \cdot 29000} \left(1 + \frac{-6,478^2}{19283,11539} \right) = 0,00043$$

- Regangan baja pada keadaan beban batas

$$a = \frac{A_p \cdot f_{ps}}{0,85 \cdot f'c \cdot b} = \frac{3357,5771 \cdot 638,6494}{0,85 \cdot 40 \cdot 500} = 126,1361 \text{ mm}$$

$$c = \frac{a}{\beta_1} = \frac{126,1361}{0,77} = 163,8131 \text{ mm}$$

$$\varepsilon_3 = \frac{d - c}{c} \cdot \varepsilon'_{cu} = \frac{243 - 163,8131}{163,8131} \cdot 0,003 = 0,00145$$

- Regangan baja total

$$\varepsilon_{ps} = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3 = 0,0065 + 0,00043 + 0,00145 = 0,0084 \leq 0,01$$

2. Kapasitas momen tampang

$$M_n = A_{ps} \cdot f_{ps} (d - \frac{1}{2} \cdot a)$$

$$= 3357,5771 \cdot 638,6494 (243 - \frac{1}{2} \cdot 126,1361) = 385830707,5 \text{ Nmm}$$

$$M_n \text{ perlu} = \frac{M_u}{\phi} = \frac{0}{0,8} = 0 < M_n = 421535260,9 \text{ Nmm.}$$

- Untuk titik 2

$$\rho_p = \frac{3357,5771}{500.254,6667} = 0,02637$$

$$\beta_1 = 0,77$$

$$\gamma_p = 0,4$$

$$f_{ps} = 1800 \left(1 - \frac{0,4 \cdot 0,02637 \cdot 1800}{0,77 \cdot 40} \right) = 690,4052 \text{ MPa}$$

$$f_{sc} = 1001,566 \text{ Mpa}$$

1. Kontrol regangan

- Regangan baja akibat P_e

$$E_p = 153000$$

$$\varepsilon_1 = \frac{1001,566}{153000} = 0,0065$$

- Regangan baja akibat tata letak tendon

$$e = 3,3942 \text{ cm}$$

$$r^2 = \frac{5271334388}{271145,4626} = 19440,9832 \text{ cm}$$

$$\varepsilon_2 = \frac{3362835}{271145,4626 \cdot 29000} \left(1 + \frac{3,3942^2}{19440,9832} \right) = 0,00043$$

- Regangan baja pada keadaan beban batas

$$a = \frac{3357,5771 \cdot 690,4052}{0,85 \cdot 40 \cdot 500} = 136,3581 \text{ mm}$$

$$c = \frac{136,3581}{0,77} = 177,0885 \text{ mm}$$

$$\epsilon_3 = \frac{254,6667 - 177,0885}{177,0885} \cdot 0,003 = 0,0013$$

- Regangan baja total

$$\epsilon_{ps} = 0,0065 + 0,00043 + 0,0013 = 0,0082 \leq 0,01$$

2. Kapasitas momen tampang

$$\begin{aligned} M_n &= 3357,5771 \cdot 690,4052 (254,6667 - \frac{1}{2} \cdot 136,3581) \\ &= 432294912,1 \text{ Nmm} \end{aligned}$$

$$M_{n\text{perlu}} = \frac{M_u}{\phi} = \frac{65086279,01}{0,8} = 81357848,76 \text{ Nmm}$$

$$M_n > M_{n\text{perlu}} \quad (\text{Struktur aman})$$

- dan seterusnya

Hasil lengkap didalam tabel 4.12

Tabel 4.12 Kontrol regangan dan kapasitas momen lentur

ϵ_1	ϵ_2	ϵ_3	ϵ_{tot}	ket	M_n	$M_{n\text{perlu}}$
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
0.006546	0.00043	0.00146	0.008437	etot<0.01	385262312.7	0
0.006546	0.000428	0.001314	0.008288	etot<0.01	432321396.8	81357848.76
0.006546	0.000423	0.001237	0.008205	etot<0.01	467537561.5	122414697.8
0.006546	0.000414	0.001197	0.008157	etot<0.01	490718369.2	123039396.9
0.006546	0.0004	0.001181	0.008128	etot<0.01	501674172.7	83013338.04
0.006546	0.000387	0.001183	0.008116	etot<0.01	500302987.2	2030412.553
0.006546	0.000378	0.001081	0.008005	etot<0.01	702072676.7	-120303037.7
0.006546	0.000375	0.001141	0.008063	etot<0.01	873143796.5	-284468293.9
0.006546	0.000383	0.001288	0.008217	etot<0.01	1084912644	-491034339.9
0.006546	0.0004	0.001523	0.008469	etot<0.01	1350214078	-740657983
0.006546	0.000425	0.001831	0.008802	etot<0.01	1661784223	-1034083945
0.006546	0.000455	0.00221	0.009212	etot<0.01	2025918647	-1372144975
0.006546	0.000489	0.002656	0.009691	etot<0.01	2443342803	-1755762103
0.006546	0.000381	0.002177	0.009104	etot<0.01	1993987408	-1234765223
0.006546	0.000312	0.001762	0.00862	etot<0.01	1593966126	-759912075.9
0.006546	0.000279	0.001429	0.008255	etot<0.01	1248794898	-330865158
0.006546	0.00028	0.00119	0.008017	etot<0.01	952972729.1	52638023.73
0.006546	0.000308	0.001553	0.008407	etot<0.01	1381843893	390784950.6
0.006546	0.000354	0.001743	0.008643	etot<0.01	1575165144	683688108.8
0.006546	0.00041	0.001914	0.00887	etot<0.01	1742206211	931384996.1
0.006546	0.000468	0.002058	0.009072	etot<0.01	1881061354	1133838103

0.006546	0.00052	0.002173	0.009239	etot<0.01	1990443976	1290934919
0.006546	0.000561	0.002256	0.009364	etot<0.01	2069495486	1402487979
0.006546	0.000588	0.002305	0.009438	etot<0.01	2114987578	1468234798
0.006546	0.000598	0.002326	0.00947	etot<0.01	2134653510	1487837899

4.5.2 Kontrol Kuat Geser

- Kuat geser nominal (V_c) yang disumbangkan beton prategang

$$\text{Karena } f_{sc} = \frac{3362835}{3357,5771} = 1001,566 \text{ Mpa} > 0,4 f_{pu} = 0,4 \cdot 1800 = 720 \text{ MPa}$$

$$\text{Maka } V_c = \left(\frac{\sqrt{f'_c}}{20} + \frac{5 \cdot V_u \cdot d}{\mu} \right) b \cdot d$$

Dengan V_u = gaya geser akibat beban terfaktor

b = lebar balok

d = jarak pusat tendon ke tepi luar sisi desak

μ = momen ultimit akibat beban terfaktor

f'_c = kuat desak beton

$$V_c \text{ min} = 1/6 \sqrt{f'_c} \cdot b \cdot d$$

$$V_c \text{ maks} = 0,4 \sqrt{f'_c} \cdot b \cdot d$$

$$V_c \text{ min} \leq V_c < V_c \text{ maks}$$

Jika $V_c < V_c \text{ min}$, maka dipakai $V_c = V_c \text{ min}$

Jika $V_c > V_c \text{ maks}$, maka dipakai $V_c = V_c \text{ maks}$

- Kuat geser yang ditumpu oleh tulangan geser

$$V_s = \frac{V_u}{\phi} - V_c, \text{ dengan } \phi = \text{faktor reduksi kekuatan} = 0,6$$

$$V_s \text{ maks} \leq \frac{2\sqrt{f'_c}}{3} \cdot b \cdot d$$

- Perencanaan tulangan geser

Jika $V_u \leq \frac{1}{2} \phi V_c$, tidak perlu tulangan geser

Jika $V_u \geq \phi V_c + \frac{2}{3} \sqrt{f'_c} \cdot b \cdot d$, maka penampang harus diperbesar.

- Perhitungan kuat geser nominal (V_c)

- Untuk jarak 1 m dari tumpuan A

$$V_u = 49000,85 \text{ N}$$

$$M_u = 65086279 \text{ Nmm}$$

$$V_c = \left[\frac{\sqrt{40}}{20} + \frac{5 \cdot 49000,85 \cdot 254,6667}{65086279} \right] \cdot 500 \cdot 254,6667 = 162333,37 \text{ N}$$

$$V_c \text{ min} = \frac{\sqrt{40}}{6} \cdot 500 \cdot 254,6667 = 134221,118 \text{ N}$$

$$V_c \text{ maks} = 0,4\sqrt{40} \cdot 500 \cdot 254,6667 = 322130,684 \text{ N}$$

$$\text{Jadi } V_c = 162333,368 \text{ N}$$

$$\phi V_c = 0,6 \cdot 162333,368 = 97400,0208 \text{ N}$$

$0,5 \phi V_c = 0,5 \cdot 0,6 \cdot 162333,368 = 48700,0104 \text{ N} < V_u$, maka perlu tulangan geser (V_s tidak perlu).

- Untuk jarak 2 m dari tumpuan A

$$V_u = 16882,4495 \text{ N}$$

$$M_u = 97931758,3 \text{ Nmm}$$

$$V_c = \left[\frac{\sqrt{40}}{20} + \frac{5 \cdot 16882,4495 \cdot 263,3333}{97931758,3} \right] \cdot 500 \cdot 263,3333 = 71522,3667 \text{ N}$$

$$V_{c \text{ min}} = \frac{\sqrt{40}}{6} \cdot 500 \cdot 263,3333 = 138788,853 \text{ N}$$

$$V_{c \text{ maks}} = 0,4 \sqrt{40} \cdot 500 \cdot 263,3333 = 333093,27 \text{ N}$$

$$\text{Jadi } V_c = 138788,853 \text{ N}$$

$$\phi V_c = 0,6 \cdot 138788,853 = 83273,3117 \text{ N}$$

$0,5 \phi V_c = 0,5 \cdot 0,6 \cdot 138788,853 = 41636,656 \text{ N} > V_u$, maka tidak perlu tulangan geser (V_s tidak perlu).

- dan seterusnya

Hasil lengkap di dalam tabel 4.13.

4.5.3 Kontrol Lendutan

Kontrol lendutan yang terjadi meliputi lendutan jangka pendek dan lendutan jangka panjang dengan memperhitungkan lendutan akibat gaya prategang awal, gaya prategang efektif, akibat berat sendiri dan akibat beban luar.

Tabel 4.13a. Kontrol Kuat Geser bagian A-B

X (m)	Vu (N)	Mu (N.mm)	Vc (N)	Vcmin (N)	Vcmak (N)	Vcpakai (N)	ϕVc (N)	$0.5\phi Vc$ (N)	KET	$\phi Vc + \frac{2\sqrt{f'c}bd}{3}$
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)
1	49000.85	65086279	162333.368	134221.118	322130.684	162333.37	97400.0208	48700.01	PERLU	634284.4946
2	16882.4495	97931758.3	71522.3667	138788.853	333093.247	138788.85	83273.3117	41636.656		638428.7232
3	-15096.0574	98431517.5	70276.9443	141775.448	340261.076	141775.45	85065.2691	42532.635		652167.0628
4	-46864.7044	66410670.4	173157.195	143180.905	343634.172	173157.19	103894.317	51947.158		676617.9374
5	-78353.498	1624330.04	8921213.96	143005.223	343212.535	343212.54	205927.521	102963.76		777948.4135
6	-109492.414	-96242430.2	339865.183	168127.762	403506.629	339865.18	203919.11	101959.55	PERLU	876430.1588
7	-140211.385	-227574635	253173.155	188331.203	451994.887	253173.15	151903.893	75951.946	PERLU	905228.7043
8	-170440.298	-392827472	239541.255	212223.967	509337.522	239541.25	143724.753	71862.376	PERLU	992620.6225
9	-200108.973	-592526386	248590.103	240860.148	578064.356	248590.1	149154.062	74577.031	PERLU	1112594.656
10	-229147.172	-827267156	268004.552	273185.653	655645.568	273185.65	163911.392	81955.696	PERLU	1256654.006
11	-257484.587	-1097715980	295436.139	309727.529	743346.069	309727.53	185836.517	92918.259	PERLU	1424746.632

Tabel 4.13b. Kontrol Kuat Geser bagian B-C

X (m)	Vu (N)	Mu (N.mm)	Vc (N)	Vcmin (N)	Vcmak (N)	Vcpakai (N)	ϕVc (N)	$0.5\phi Vc$ (N)	KET	$\phi Vc + \frac{2\sqrt{f'c}bd}{3}$
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)
1	398273.343	-1404609682	331805.338	306565.251	735756.602	331805.34	199083.203	99541.602	PERLU	1425344.207
2	361466.694	-987812178	313328.924	266246.211	638990.906	313328.92	187997.354	93998.677	PERLU	1252982.197
3	324900.049	-607929661	323585.377	230055.7	552133.679	323585.38	194151.226	97075.613	PERLU	1114374.025
4	288533.4	-264692126	441787.347	197466.672	473920.012	441787.35	265072.408	132536.2	PERLU	1054939.095
5	252326.742	42110419	3289146.71	169006.173	403614.815	3289146.7	1973488.03	986744.01	PERLU	2950280.461
6	216240.075	312627961	514194.955	264313.708	634352.899	514194.95	308516.973	154258.49	PERLU	1365771.804
7	180233.401	546950487	319174.326	281354.871	675251.69	319174.33	191504.596	95752.298	PERLU	1316924.079
8	144266.721	745107997	240574.178	293321.597	708771.833	293321.6	177192.958	88596.479	PERLU	1358479.346
9	108300.035	907070482	192622.235	306213.887	734913.328	306213.89	183728.332	91864.166	PERLU	1408583.879
10	72293.3504	1032747935	156338.415	314031.74	753676.176	314031.74	188419.044	94209.522		1444546.003
11	36206.6714	1121990383	125145.381	318775.156	765060.375	318775.16	191265.094	95632.547		1466365.719
12	-2.8422E-11	1174587838	96133.2409	320444.136	769065.927	769065.93	461439.556	230719.78		1743216.101

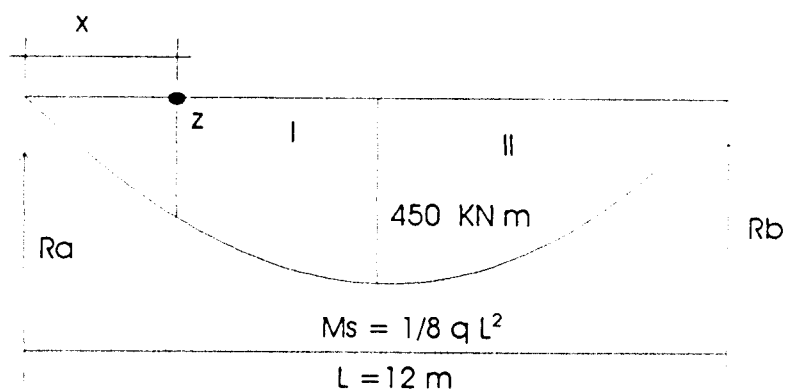
X = Jarak titik yang ditinjau dihitung dari tumpuan

1. Perhitungan lendutan akibat beban luar

Perhitungan lendutan dilakukan dengan menggunakan metode balok konjugasi dengan langkah - langkah perhitungan seperti di bawah ini.

□ Bagian A-B

a. Akibat momen beban luar



Gambar 4.6. Diagram momen akibat beban luar

$$R'_A = \text{luas bidang I} = \frac{2}{3} \cdot 6 \cdot 450 = 1800 \text{ KNm}$$

$$\delta_x = \frac{R'_A \cdot X - \text{luas bidang sepanjang X dikali titik berat bidang tersebut ketitik Z}}{EI}$$

- Untuk titik 1

$$\delta_1 = 0$$

- Untuk titik 2

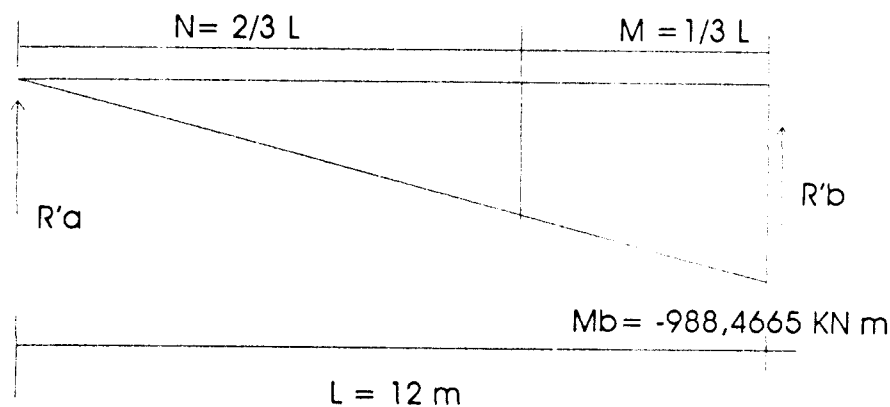
$$\delta_2 = \frac{1800 \cdot 1 - \frac{2}{3} \cdot 1.137,5 \cdot \frac{3}{8} \cdot 1}{2,9 \cdot 10^7 \cdot 5,2713344 \cdot 10^{-3}} = 0,01154994 \text{ m} = 11,54994 \text{ mm}$$

- Untuk titik 3

$$\delta_3 = \frac{1800.2 - \frac{2}{3} \cdot 2.250 \cdot \frac{3}{8} \cdot 2}{2,9 \cdot 10^7 \cdot 5,5284215 \cdot 10^{-3}} = 0,020895157 \text{ m} = 20,89516 \text{ mm}$$

- dan seterusnya

- b) Akibat momen jepit kanan



Gambar 4.7. Diagram momen jepit di B

$$R'_A = \text{luas bidang total} \times \frac{m}{L}$$

$$= \frac{1}{2} \cdot 12.988,4665 \cdot \frac{4}{12} = 1976,9331$$

$$\delta_X = \frac{R'_A \cdot X - \text{luas bidang sepanjang X dikali titik berat bidang tersebut ketitik Z}}{EI}$$

- Untuk titik 1

$$\delta_1 = 0$$

- Untuk titik 2

$$\delta_2 = \frac{1976,9331 \cdot 1 - \frac{1}{2} \cdot 1.82,3722 \cdot \frac{1}{3} \cdot 1}{2,9 \cdot 10^7 \cdot 5,2713344 \cdot 10^{-3}} = 0,012842422 \text{ m} = 12,8424 \text{ mm}$$

- Untuk titik 3

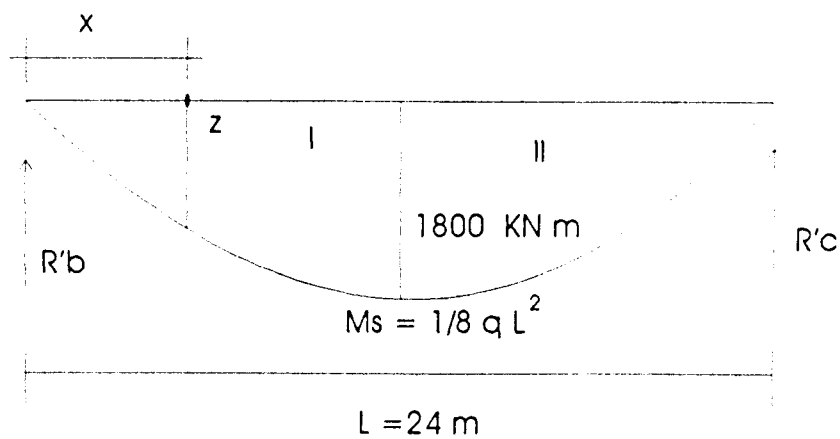
$$\delta_3 = \frac{1976,9331 \cdot 2 - \frac{1}{2} \cdot 2.164,7444 \cdot \frac{1}{3} \cdot 2}{2,9 \cdot 10^7 \cdot 5,528422 \cdot 10^{-3}} = 0,02397664 \text{ m} = 23,9766 \text{ mm}$$

- c. Akibat momen jepit kiri

$$\delta_B = 0$$

□ **BAGIAN B-C**

- a. Akibat momen beban luar



Gambar. 4.8 Diagram momen akibat beban luar

$$R'_A = \frac{2}{3} \cdot 12 \cdot 1800 = 14400 \text{ KN m}$$

- Untuk titik 13

$$\delta_{13} = 0$$

- Untuk titik 14

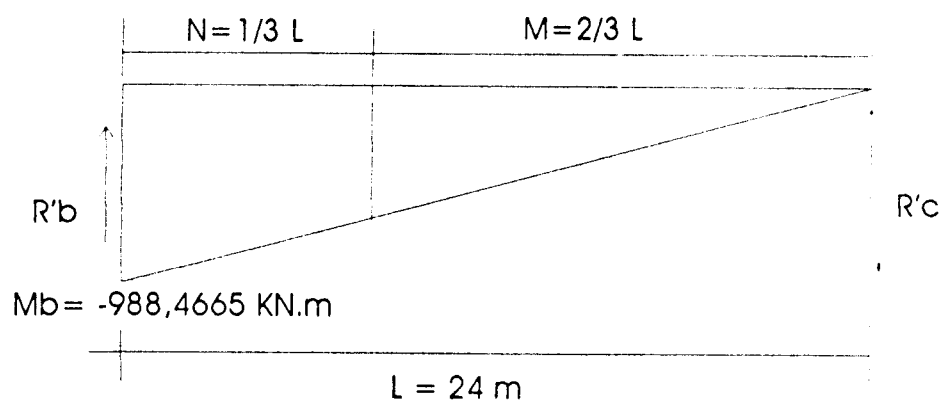
$$\delta_{14} = \frac{14400 \cdot 1 - \frac{2}{3} \cdot 1.287,5 \cdot \frac{3}{8} \cdot 1}{2,9 \cdot 10^7 \cdot 2,4691644 \cdot 10^{-2}} = 0,020009735 \text{ m} = 20,0097 \text{ mm}$$

- Untuk titik 15

$$\delta_{15} = \frac{14400.2 - \frac{2}{3} \cdot 2.550 \cdot \frac{3}{8} \cdot 2}{2,9 \cdot 10^7 \cdot 2,30654476 \cdot 10^{-2}} = 0,042233645 \text{ m} = 42,2336 \text{ mm}$$

- Dan seterusnya

b. Akibat momen jepit kanan



Gambar.4.9 Diagram momen jepit di B

$$R'_B = \frac{1}{2} \cdot 24 \cdot 988,4665327 \cdot \frac{8}{24} = 3953,866131$$

- Untuk titik 13

$$\delta_{13} = 0$$

- Untuk titik 14

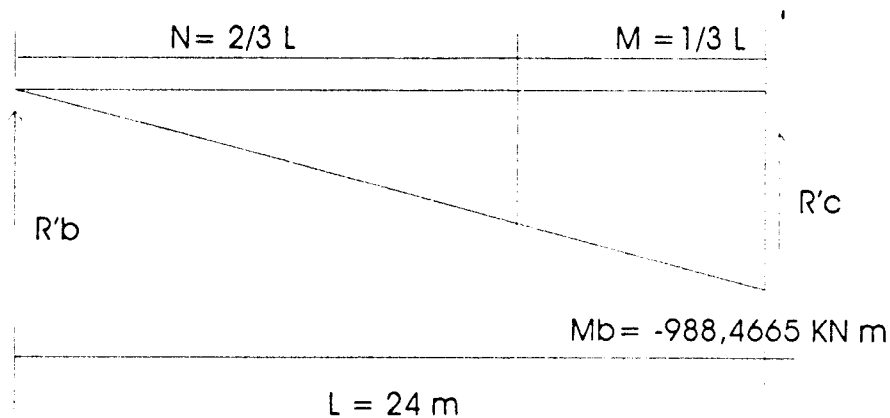
$$\delta_{14} = \frac{3953,8661 \cdot 1 - \frac{1}{2} \cdot 1.41,186105 \cdot \frac{1}{3} \cdot 1}{2,9 \cdot 10^7 \cdot 2,4691644171 \cdot 10^{-2}} = 0,005512128 \text{ m} = 5,5121 \text{ mm}$$

- Untuk titik 15

$$\delta_{15} = \frac{3953,8661 \cdot 2 - \frac{1}{2} \cdot 2.83,372211 \cdot \frac{1}{3} \cdot 2}{2,9 \cdot 10^7 \cdot 2,3065447626 \cdot 10^{-2}} = 0,011739932 \text{ m} = 11,7399 \text{ mm}$$

- dan seterusnya

- c. Akibat momen jepit kiri



Gambar 4.10 Diagram momen jepit di C

$$R'c = \frac{1}{2} \cdot 24 \cdot 988,4665327 \cdot \frac{8}{24} = 3953,866131$$

- Untuk titik 13

$$\delta_{13} = \frac{3953,8661 \cdot 24 - \frac{1}{2} \cdot 24 \cdot 988,46653 \cdot \frac{1}{3} \cdot 24}{2,9 \cdot 10^7 \cdot 2,66964063 \cdot 10^{-2}} = 0$$

- Untuk titik 14

$$\delta_{14} = \frac{3953,8661 \cdot 23 - \frac{1}{2} \cdot 23 \cdot 947,2043 \cdot \frac{1}{3} \cdot 23}{2,9 \cdot 10^7 \cdot 2,4691644171 \cdot 10^{-2}} = 0,0103628011 \text{ m} = 10,3628 \text{ mm}$$

- Untuk titik 15

$$\delta_{15} = \frac{3953,8661.22 - \frac{1}{2}.22.906,0943216.\frac{1}{3}.22}{2,9.10^7.2,306544762.10^{-2}} = 0.0207707 \text{ m} = 20,7707 \text{ mm}$$

- dan seterusnya

Hasil selengkapnya di dalam tabel 4.14.

Tabel 4. 14 Lendutan akibat beban luar

Titik (1)	$\delta_s(\text{mm})$ (2)	$\delta_a(\text{mm})$ (3)	$\delta_b(\text{mm})$ (4)	$\delta_d(\text{mm})$ 5
1	0	0	0	0
2	11.54994	0	-12.84242	-1.29248
3	20.89516	0	-23.97664	-3.08148
4	26.99545	0	-32.34436	-5.34891
5	29.59573	0	-37.14843	-7.55270
6	29.36269	0	-38.28052	-8.91783
7	27.57855	0	-36.34730	-8.76875
8	21.76747	0	-31.71719	-9.94972
9	16.34249	0	-25.64128	-9.29879
10	11.16463	0	-18.72753	-7.56290
11	6.60004	0	-11.90101	-5.30097
12	2.82471	0	-5.556812	-2.73210
13	0	0	0	0
14	20.00974	-10.36280	-5.512128	4.134806
15	42.23365	-20.77065	-11.73993	9.723062
16	65.41464	-30.72786	-18.43671	16.25008
17	88.57628	-39.92958	-25.40974	23.23696
18	110.3689	-47.92398	-32.32082	30.12411
19	130.3369	-54.65670	-39.04050	36.63969
20	148.0516	-60.04522	-45.40004	42.60635
21	162.7701	-63.84636	-51.07709	47.84669
22	175.1119	-66.31888	-56.11598	52.67707
23	184.7637	-67.30439	-60.21972	57.23960
24	192.8541	-67.13743	-63.50838	62.20829
25	200.0499	-65.91421	-65.91421	68.22148

2. Perhitungan lendutan akibat berat sendiri

Perhitungan lendutan dilakukan dengan prinsip sama dengan pada perhitungan lendutan akibat beban luar, dan hasil selengkapnya di dalam tabel 4.15.

Tabel 4.15 Lendutan akibat berat sendiri

Titik	$\delta_s(\text{mm})$	$\delta_a(\text{mm})$	$\delta_b(\text{mm})$	$\delta_g(\text{mm})$
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
1	0	0	0	0
2	3.90861	0	-5.41226	-1.50365
3	7.08245	0	-10.10689	-3.02445
4	9.15486	0	-13.63265	-4.47779
5	10.0163	0	-15.652	-5.63574
6	9.88213	0	-16.13223	-6.25011
7	9.19187	0	-15.34348	-6.15161
8	7.80412	0	-13.44392	-5.63980
9	5.86288	0	-10.94194	-5.07906
10	4.03621	0	-8.067675	-4.03146
11	2.41645	0	-5.186214	-2.76976
12	1.05019	0	-2.453153	-1.40298
13	0	0	0	0
14	9.11138	-4.49896	-2.393062	2.219362
15	18.85364	-8.84241	-4.997886	5.013343
16	28.91798	-12.95764	-7.774583	8.185763
17	39.11659	-16.82542	-10.70709	11.58408
18	49.03239	-20.32119	-13.70499	15.00620
19	58.54526	-23.44033	-16.74309	18.36184
20	67.44567	-26.12465	-19.75278	21.56824
21	75.25305	-28.19924	-22.55939	24.49442
22	82.09560	-29.70750	-25.13712	27.25098
23	87.59072	-30.48383	-27.27501	29.83189
24	92.15359	-30.63140	-28.97565	32.54654
25	96.01383	-30.15965	-30.15965	35.69454

3. Perhitungan lendutan akibat pengaruh dari gaya prategang

Perhitungan lendutan sama seperti pada perhitungan lendutan akibat beban luar dan berat sendiri dengan perbedaan pada perhitungan M_s , dimana pada perhitungan lendutan ini nilai M_s adalah hasil dari besar gaya prategang dikali eksentrisitas pada titik yang ditinjau. Akibat dari gaya prategang terjadi dua macam lendutan yaitu lendutan akibat gaya prategang awal (δP_o) dan lendutan akibat gaya prategang efektif (δP_e). Hasil lengkap pada tabel 4.16 dan 4.17.

Tabel 4.16 Lendutan akibat P_o

Titik (1)	δ_s (mm) (2)	δ_a (mm) (3)	δ_b (mm) (4)	δP_o (mm) (5)
1	0	0	0	0
2	-2.41040068	0	-0.508272	-2.918672794
3	-4.6869213	0	-0.949151	-5.63607248
4	-6.79864939	0	-1.280259	-8.078908719
5	-8.52481752	0	-1.469899	-9.994716684
6	-9.66439678	0	-1.514998	-11.17939505
7	-10.1766181	0	-1.440925	-11.61754329
8	-9.89941971	0	-1.262536	-11.16195526
9	-8.95139428	0	-1.027571	-9.978965735
10	-7.31131865	0	-0.757645	-8.068964138
11	-5.19516976	0	-0.487044	-5.682213669
12	-2.70593669	0	-0.230379	-2.936315389
13	0	0	0	0
14	6.91875697	-0.422503	-0.224736	6.271518709
15	15.3893668	-0.830402	-0.469358	14.08960673
16	24.9082986	-1.216868	-0.730121	22.96130974
17	35.2374487	-1.580097	-1.005516	32.65183607
18	46.068293	-1.908389	-1.287053	42.87285114
19	56.8860596	-2.201311	-1.572365	53.11238379
20	67.1772237	-2.453399	-1.855009	62.86881626
21	76.2119656	-2.648226	-2.118581	71.44515886
22	83.9082749	-2.789869	-2.360659	78.75774729
23	89.7982592	-2.862775	-2.56143	84.37405432
24	94.264973	-2.876634	-2.72114	88.66719935
25	98.7235642	-2.83233	-2.83233	93.05890352

Tabel 4.17 Lendutan akibat P_e

Titik (1)	δ_s (mm) (2)	δ_a (mm) (3)	δ_b (mm) (4)	δP_e (mm) (5)
1	0	0	0	0
2	-1.8185925	0	-0.2234	-2.041992455
3	-3.53209687	0	-0.417085	-3.949181801
4	-5.11528539	0	-0.562645	-5.67793066
5	-6.40607991	0	-0.646214	-7.052294356
6	-7.25351476	0	-0.665908	-7.919422421
7	-7.6222001	0	-0.632278	-8.254478466
8	-7.38674929	0	-0.551735	-7.938484706
9	-6.6411699	0	-0.446042	-7.087212011
10	-5.38165332	0	-0.325774	-5.70742745
11	-3.78783436	0	-0.207024	-3.994857985
12	-1.95201418	0	-0.096663	-2.048677535
13	0	0	0	0
14	4.97728724	-0.180266	-0.095886	4.701135396
15	11.2959525	-0.361315	-0.204222	10.73041565
16	18.4633688	-0.534525	-0.320715	17.60812808
17	26.1449131	-0.694594	-0.442014	25.00830498
18	33.9698446	-0.83366	-0.562236	32.57394869
19	41.4748151	-0.950779	-0.679128	39.84490839
20	48.2783803	-1.044515	-0.789755	46.44411052
21	53.9547461	-1.110637	-0.88851	51.95559873
22	58.5729525	-1.153648	-0.976164	56.44314075
23	61.998167	-1.170791	-1.04755	59.7798254
24	64.6106013	-1.167887	-1.104758	62.33795604
25	66.71987	-1.146609	-1.146609	64.42665261

4. Lendutan jangka pendek

Lendutan jangka pendek adalah lendutan total yang terjadi pada saat transfer gaya prategang, sehingga lendutan yang terjadi dipengaruhi oleh lendutan akibat gaya prategang awal (δ_{po}) dan lendutan akibat berat sendiri (δ_g).

$$\delta = -\delta_{po} + \delta_g$$

Tabel 4.18 Lendutan jangka pendek

Titik	δ_{po} (mm)	δ_g (mm)	δ_i (mm)	Keterangan
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
1	0	0	0	$\delta < 50$ mm
2	-2.91867	-1.50365	1.41503	$\delta < 50$ mm
3	-5.63607	-3.02445	2.61163	$\delta < 50$ mm
4	-8.07891	-4.47779	3.60112	$\delta < 50$ mm
5	-9.994717	-5.63574	4.35897	$\delta < 50$ mm
6	-11.17939	-6.25011	4.92929	$\delta < 50$ mm
7	-11.61754	-6.15161	5.46593	$\delta < 50$ mm
8	-11.16196	-5.63980	5.52216	$\delta < 50$ mm
9	-9.97897	-5.07906	4.89990	$\delta < 50$ mm
10	-8.06896	-4.03146	4.03750	$\delta < 50$ mm
11	-5.68221	-2.76976	2.91245	$\delta < 50$ mm
12	-2.93632	-1.40297	1.53335	$\delta < 50$ mm
13	0	0	0	
14	6.27152	2.21936	-4.05216	$\delta < 100$ mm
15	14.08961	5.01334	-9.07626	$\delta < 100$ mm
16	22.96131	8.18576	-14.77555	$\delta < 100$ mm
17	32.65184	11.58408	-21.06776	$\delta < 100$ mm
18	42.87285	15.00620	-27.86665	$\delta < 100$ mm
19	53.11238	18.36184	-34.75055	$\delta < 100$ mm
20	62.86882	21.56824	-41.30058	$\delta < 100$ mm
21	71.44516	24.49442	-46.95074	$\delta < 100$ mm
22	78.75775	27.25098	-51.50677	$\delta < 100$ mm
23	84.37405	29.83189	-54.54217	$\delta < 100$ mm
24	88.66720	32.54654	-56.12066	$\delta < 100$ mm
25	93.05890	35.69454	-57.36436	$\delta < 100$ mm

5. Lendutan jangka panjang

Lendutan jangka panjang adalah lendutan total pada saat layan.

$$\delta = -\delta_{pe} - \frac{\delta_{po} + \delta_{pe}}{2} \cdot C_c + (\delta_g + \delta_d)(1 + C_c)$$

C_c = koefisien rangkai = 2,4 untuk $f_c = 40$ MPa, lihat lampiran.

Tabel 4.19 Lendutan jangka panjang

Titik	δ_{ps} (mm)	δ_s (mm)	δ_{ps} (mm)	δ_d (mm)	δ_t (mm)	Keterangan
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
1	0	0	0	0	0	
2	-2.91867	-1.50365	-2.04199	-1.29248	-1.51203	$\delta < 50$ mm
3	-5.63607	-3.02445	-3.94918	-3.08148	-5.30868	$\delta < 50$ mm
4	-8.07891	-4.47779	-5.67793	-5.34891	-11.22464	$\delta < 50$ mm
5	-9.99472	-5.63574	-7.05229	-7.55270	-17.33200	$\delta < 50$ mm
6	-11.17939	-6.25011	-7.91942	-8.91783	-20.73300	$\delta < 50$ mm
7	-11.61754	-6.15161	-8.25448	-8.76875	-18.62832	$\delta < 50$ mm
8	-11.16196	-5.63980	-7.93848	-9.94972	-22.14535	$\delta < 50$ mm
9	-9.97897	-5.07906	-7.08721	-9.29879	-21.31807	$\delta < 50$ mm
10	-8.06896	-4.03146	-5.70743	-7.56290	-17.18173	$\delta < 50$ mm
11	-5.68221	-2.76976	-3.99486	-5.30097	-11.83315	$\delta < 50$ mm
12	-2.93632	-1.40297	-2.04868	-2.73210	-6.02856	$\delta < 50$ mm
13	0	0	0	0	0	$\delta < 50$ mm
14	6.27152	2.21936	4.70114	4.13481	3.73585	$\delta < 100$ mm
15	14.08961	5.01334	10.73042	9.72306	9.58933	$\delta < 100$ mm
16	22.96131	8.18576	17.60813	16.25008	16.79040	$\delta < 100$ mm
17	32.65184	11.58408	25.00830	23.23696	24.19106	$\delta < 100$ mm
18	42.87285	15.00620	32.57395	30.12411	30.33296	$\delta < 100$ mm
19	53.11238	18.36184	39.84491	36.63969	35.61151	$\delta < 100$ mm
20	62.86882	21.56824	46.44411	42.60635	40.57398	$\delta < 100$ mm
21	71.44516	24.49442	51.95560	47.84669	45.92326	$\delta < 100$ mm
22	78.75775	27.25098	56.44314	52.67707	53.07116	$\delta < 100$ mm
23	84.37405	29.83189	59.77983	57.23960	63.27857	$\delta < 100$ mm
24	88.66720	32.54654	62.33796	62.20830	78.62229	$\delta < 100$ mm
25	93.05890	35.69454	64.42665	68.22148	99.90517	$\delta < 100$ mm

BAB V

PEMBAHASAN

Dari analisis dan perencanaan yang telah diuraikan di dalam bab-bab sebelumnya, dapat diambil beberapa hal penting untuk dibahas sehingga bagian-bagian tersebut dapat diperjelas dan dimengerti.

5.1 Balok Hyperstatis Prismatis

Perencanaan dimensi penampang dibuat tetap di sepanjang bentangan, dengan penentuan dimensi penampang didasarkan pada momen maksimum. Hal ini berakibat penggunaan dimensi penampang balok tidak efisien karena pada daerah momen yang kecil terjadi pemborosan dimensi penampang.

5.2 Balok Hyperstatis Nonprismatis

Perencanaan dimensi penampang bervariasi di sepanjang bentangan, dengan penentuan dimensi penampang berdasarkan momen yang terjadi pada tiap-tiap segmen yang ditinjau. Dimensi penampang yang disesuaikan dengan momen yang terjadi pada tiap-tiap segmen yang ditinjau menyebabkan berkurangnya dimensi penampang secara keseluruhan, ini menyebabkan momen yang terjadi akibat berat sendiri juga berkurang.

Penggunaan balok menerus pada perencanaan ini ternyata menyebabkan berkurangnya momen yang terjadi. Hal ini dapat dijelaskan bahwa pada balok

menerus akan terjadi momen negatif pada tumpuan, dengan demikian momen positif pada daerah lapangan semakin kecil. Pengurangan momen yang terjadi ini menyebabkan dimensi penampang dapat direncanakan lebih kecil.

Perencanaan dimensi penampang yang dilakukan pada tugas akhir ini ternyata menunjukkan bahwa dimensi penampang terbesar berada di atas tumpuan dan bukan di tengah bentangan, hal ini dikarenakan momen (sebagai dasar perencanaan dimensi penampang) terbesar berada di tumpuan dan bukan di tengah bentangan (lihat perhitungan pada sub bab 4.1). Penggunaan dimensi penampang yang kecil di tengah bentangan menyebabkan kemampuan struktur balok dalam menerima lendutan semakin berkurang (persamaan 3.38), namun hal ini dapat diatasi dengan penggunaan beton prategang yang menimbulkan lendutan yang berlawanan dengan lendutan akibat beban. Pada daerah lendutan akibat beban yang arahnya ke bawah (pada daerah momen positif), dengan adanya tendon baja yang letaknya disesuaikan dengan momen yang terjadi (pada daerah momen positif letak tendon berada di bawah garis netral) akan terjadi lendutan akibat gaya prategang yang arahnya ke atas. Dengan demikian jumlah lendutan total yang arahnya ke bawah dapat dikurangi. Begitu juga dengan keadaan yang sebaliknya (lihat tabel 4.18 dan tabel 4.19).

5.3 Tata Letak Tendon

Seperti telah diketahui bahwa fungsi dari gaya prategang (tendon baja) adalah untuk mengurangi atau menghilangkan tegangan tarik akibat momen lentur. Dengan demikian agar tendon dapat berfungsi untuk menetralsasi

tegangan tarik yang terjadi maka letak tendon harus diletakkan pada sisi penampang yang mengalami tarik. Dari hasil perhitungan momen menunjukkan bahwa pada daerah tumpuan terjadi momen negatif (sisi tarik berada di atas garis netral), sedangkan pada daerah lapangan terjadi momen positif (sisi tarik berada di bawah garis netral). Hal ini mengakibatkan letak tendon terhadap garis netral tidak tetap, pada daerah tumpuan tendon berada di atas garis netral dan pada daerah lapangan berada di bawah garis netral (lihat lampiran 6 dan 7).

Letak tendon pada penampang berpengaruh pada tegangan yang terjadi (persamaan 3.8, 3.9, 3.10, 3.11). Dari persamaan tersebut dapat dijelaskan bahwa penurunan letak tendon akan mengakibatkan tegangan yang terjadi di tepi atas bertambah dan tegangan pada tepi bawah berkurang. Demikian pula sebaliknya, untuk kenaikan letak tendon mengakibatkan tegangan yang terjadi di tepi atas berkurang dan tegangan yang terjadi di tepi bawah bertambah (lihat lampiran 8). Hal ini dapat dimanfaatkan untuk merencanakan letak tendon agar dihasilkan tegangan yang masih di bawah tegangan yang diijinkan.

BAB VI

KESIMPULAN DAN SARAN

6.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisis dan perencanaan balok hiperstatis nonprismatis beton prategang, maka dapat ditarik beberapa kesimpulan.

1. Perencanaan dimensi penampang yang disesuaikan dengan momen yang ada pada masing-masing segmen yang ditinjau akan menghasilkan struktur yang lebih ekonomis dan efisien.
2. Letak tendon terhadap garis netral tidak tetap, hal ini dikarenakan pada balok hiperstatis terdapat dua momen yang berbeda yaitu momen positif dan negatif. Pada daerah momen positif letak tendon berada di bawah garis netral dan di daerah momen negatif berada di atas garis netral.
3. Lendutan terbesar yang terjadi di tengah bentangan dapat dikurangi dengan adanya gaya prategang yang menimbulkan lendutan yang arahnya berlawanan dengan arah gaya berat (*chamber*).
4. Penentuan besar gaya prategang yang dipakai perlu disesuaikan dengan dimensi penampang dan beban yang diterima oleh struktur. Penggunaan gaya prategang yang terlalu kecil menyebabkan fungsi dari baja prategang dalam

menahan tegangan tarik relatif kecil. Sedangkan penggunaan gaya prategang yang terlalu besar dapat menyebabkan tegangan desak yang diterima oleh struktur melampaui tegangan desak yang diijinkan.

6.2 Saran - saran

1. Untuk mendapatkan hasil yang ekonomis dan efisien, dalam pendimensian balok hyperstatis nonprismatis dilakukan dengan mencoba berbagai macam dimensi penampang.
2. Untuk lebih menjamin ketepatan hitungan, maka akan lebih teliti jika jarak segmen diperkecil.

DAFTAR PUSTAKA

1. Ghali, A. dan Neville, A.M., 1990, **ANALISA STRUKTUR**, edisi kedua, Penerbit Erlangga, Jakarta,
2. Istimawan Dipohusodo., 1994, **STRUKTUR BETON BERTULANG**, PT. Gramedia Pustaka Utama, Jakarta,
3. Kinney, J.S., 1957, **INDETERMINATE STRUCTURAL ANALYSIS**, Addison – Wesley Publishing Company, Inc, USA,
4. Lin,T.Y., 1993, **DESIGN OF PRESTRESSED CONCRETE STRUCTURES**, second edition, John Wiley & Sons, USA,
5. Lin,T.Y. dan Burns, Ned H., 1982, **DESIGN OF PRESTRESSED CONCRETE STRUCTURES**, third edition, John Wiley & Sons, New York,
6. Nilson, Arthur H., 1987, **DESIGN OF PRESTRESSED CONCRETE**, second edition, John Wiley & Son, Inc, Singapura,
7. Raju, N. Krishna, 1989, **BETON PRATEGANG**, edisi kedua, Penerbit Erlangga, Jakarta,
8. Schodek, D.L., 1991, **STRUKTUR**, Penerbit PT. Eresco, Bandung,
9. Wang, Chu-Kia dan Salmon, C.G., 1989, **DISAIN BETON BERTULANG**, edisi keempat, jilid dua, Penerbit Erlangga, Jakarta,
10. Winter, George dan Nilson, Arthur H., 1993, **PERENCANAAN STRUKTUR BETON BERTULANG**, PT. Pradya, Jakarta,
11. Winarni Hadipratomo, Ir., 1994, **STRUKTUR BETON PRATEGANG**, Penerbit Nova, Bandung,

Lampiran 1

Tabel Prosentase kehilangan gaya prategang total

Tipe kehilangan	Persentase kehilangan tegangan	
	Pratarik	Pasca tarik
1. Perpendekakan elastis dan lenturan beton	4	1
2. Rangkak beton	6	5
3. Susut beton	7	6
4. Rangkak pada baja	8	8
Jumlah	25	20

Lampiran 2

Tabel Koefisien rangkak beton

Kekuatan tekan		Rangkak spesifik		Koefisien c
Psi	MPa	10^{-6}Psi^{-1}	10^{-4}MPa^{-1}	Cc
3000	20.7	1.0	1.45	3.1
4000	27.6	0.80	1.16	2.9
6000	41.4	0.55	0.80	2.4
8000	55.2	0.40	0.58	2.0

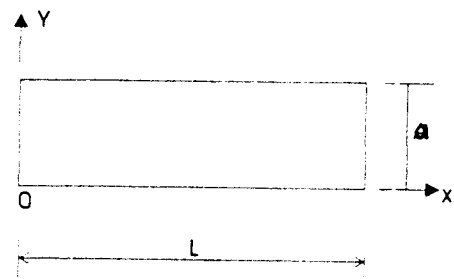
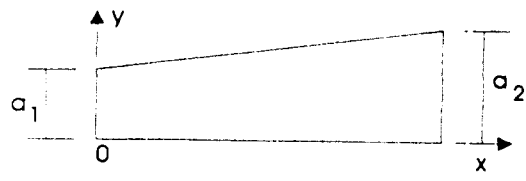
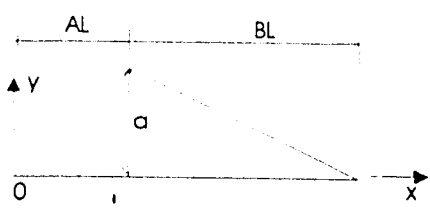
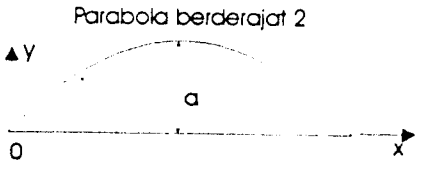
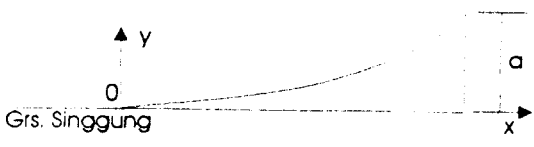
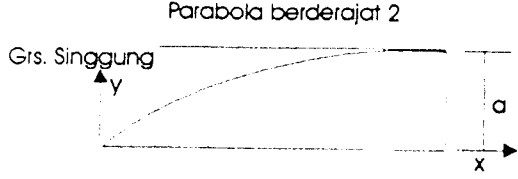
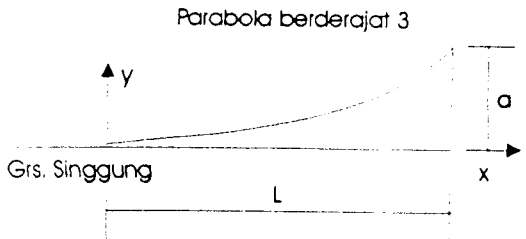
Lampiran 3

Tabel Lendutan ijin SK SNI-T-15-1991-03

TIPE KOMPONEN STRUKTUR	LENDUTAN YANG DIPERHITUNGKAN	BATAS LENDUTAN
Atap datar tidak menahan atau berhubungan dengan komponen nonstruktural yang mungkin 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)	L/480
Konstruksi atap atau lantai yang menahan atau berhubungan dengan komponen nonstruktural yang mungkin tidak rusak akibat lendutan yang besar		L/240

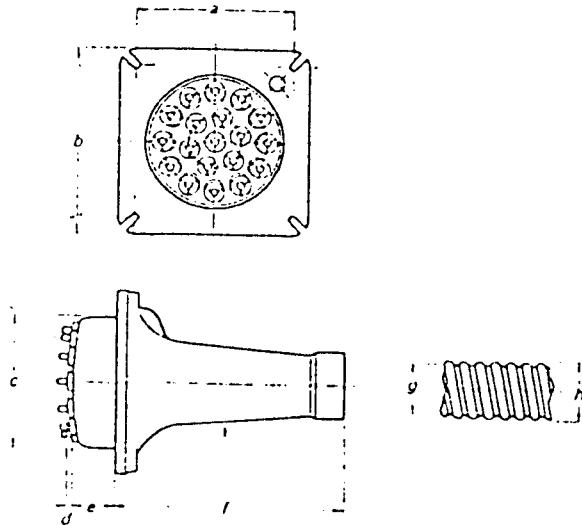
Lampiran 4

Luas dan Titik Berat bentuk Geometris

	Luas	Titik berat
	$a \times L$	$x = L/2$ $y = a/2$
	$\frac{(a_1 + a_2)}{2} \times L$	$x = \frac{L(a_1 + a_2)}{3(a_1 + a_2)}$ $y = \frac{(a_1^2 + a_1 a_2 + a_2^2)}{3(a_1 + a_2)}$
	$\frac{a \times L}{2}$	$x = 1/3 (AL + L)$ $y = a/3$
<p>Parabola berderajat 2</p> 	$2/3 a \times L$	$x = L/2$ $y = 2/5 a$
<p>Parabola berderajat 2</p>  <p>Grs. Singgung</p>	$1/3 a \times L$	$x = 3/4 L$ $y = 3/10 a$
<p>Parabola berderajat 2</p>  <p>Grs. Singgung</p>	$2/3 a \times L$	$x = 5/8 L$ $y = 2/5 a$
<p>Parabola berderajat 3</p>  <p>Grs. Singgung</p>	$1/4 a \times L$	$x = 4/5 L$ $y = 2/7 a$

Lampiran 5

Tabel jenis baja pretegang (tendon) System Fressinet Monogroup K



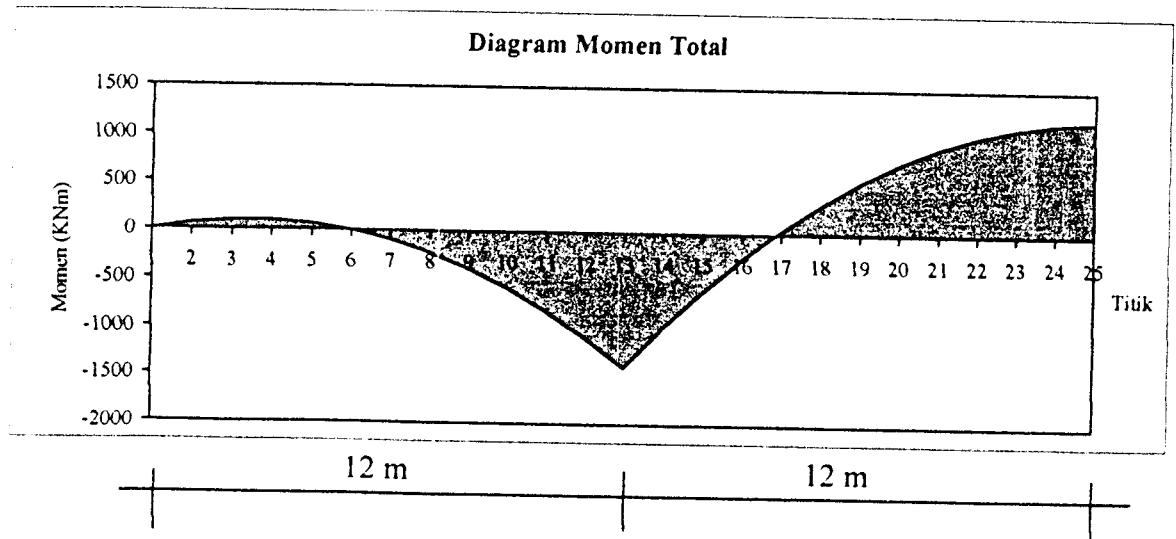
612/APP C POSTTENSIONING SYSTEMS

Table C3 Anchorage dimensions

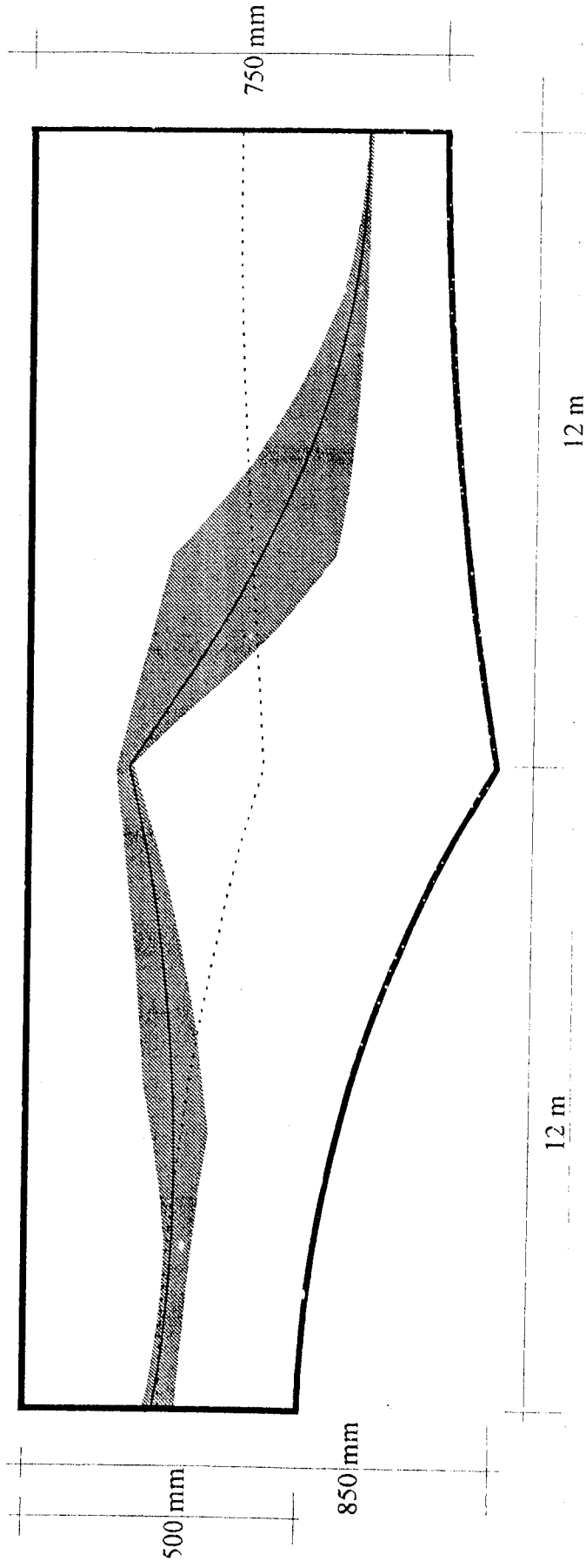
	12K 13	19K 13 12K 15	27K 13 19K 15	37K 13 27K 15	55K 13 37K 15
a	170	225	250	300	370
b	210	270	315	365	450
c	140	190	220	260	320
d	10	10	10	10	10
e	60	60	65	80	95
f	145	290	385	435	465
g	65	85	95	105	130
h	71	91	101	111	140

Dimensions in millimeters.

Lampiran 6



Lampiran 7
Tata letak tendon setengah bentangan



Keterangan

- Grs Netral
- Letak Tendon
- ▨ Batas Tendon

Lampiran 8

Tabel pengaruh letak tendon terhadap tegangan beton.

Ttk	H (mm)	B (mm)	Z (mm)	Anet (mm ²)	Ctnet (mm)	Cbnet (mm)	enet (mm)	Inet (mm ⁴)	Abrut (mm ²)	Ctbrut (mm)	Cbbrut (mm)	ebrut (mm)	Ibrut (mm ⁴)
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
1	500	500	243	241988.2	250.2318	249.7682	-7.231759	5202819702	270145.5	249.478	250.522	-6.477991	5209246848
2	502	500	254.6667	242988.2	250.8791	251.1209	3.787565	5265864347	271145.5	251.2724	250.7276	3.394242	5271334388
3	510	500	263.3333	246988.2	254.7297	255.2703	8.603652	5521442521	275145.5	255.6101	254.3899	7.723188	5528421560
4	522	500	269	252988.2	260.7466	261.2534	8.253351	5920889950	281145.5	261.5732	260.4268	7.42676	5927723924
5	539	500	271.6667	261488.2	269.4336	269.5664	2.233052	6519470642	289645.5	269.6507	269.3493	2.01597	6524705452
6	561	500	271.3333	272488.2	280.7695	280.2305	-9.43619	7350802310	300645.5	279.8858	281.1142	-8.552432	7358182725
7	587	500	268	285488.2	294.2156	292.7844	-26.21562	8417119499	313645.5	291.8621	295.1379	-23.86213	8439841658
8	619	500	261.6667	301488.2	310.7711	308.2289	-49.10447	9858434268	329645.5	306.5768	312.4232	-44.91012	9925637288
9	655	500	252.3333	319488.2	329.385	325.615	-77.05163	11657296912	347645.5	323.1442	331.8558	-70.81089	11816033899
10	697	500	240	340488.2	351.0531	345.9469	-111.0531	14007058192	368645.5	342.5708	354.4292	-102.5708	14332900462
11	743	500	224.6667	363488.2	374.7364	368.2636	-150.0698	16908865905	391645.5	363.9472	379.0528	-139.2805	17502512275
12	794	500	206.3333	388988.2	400.9271	393.0729	-194.5938	20554556392	417145.5	387.792	406.208	-181.4587	21553919514
13	850	500	185	416988.2	429.6113	420.3887	-244.6113	25113084503	445145.5	414.1386	435.8614	-229.1386	26696406322
14	834	500	252.3333	408988.2	420.2257	413.7743	-167.8924	23943965183	437145.5	409.4115	424.5885	-157.0781	24691644171
15	819	500	313.8333	401488.2	411.4091	407.5909	-97.57573	22809822527	429645.5	405.0143	413.9857	-91.18099	23065447626
16	806	500	369.5	394988.2	403.6795	402.3205	-34.17951	21802660608	423145.5	401.4051	404.5949	-31.9051	21838474227
17	794	500	419.3333	388988.2	396.54	397.46	22.79332	20847737842	417145.5	398.0786	395.9214	21.25478	20866487183
18	784	500	463.3333	383988.2	390.5116	393.4884	72.82169	20032036163	412145.5	395.4867	388.5133	67.8466	20176261142
19	775	500	501.5	379488.2	385.0932	389.9068	116.4068	19283754031	407645.5	393.1338	381.8662	108.3662	19644054294
20	767	500	533.8333	375488.2	380.2923	386.7077	153.541	18610695791	403645.5	391.003	375.997	142.8304	19233302687
21	761	500	560.3333	372488.2	376.632	384.368	183.7014	18093177257	400645.5	389.5425	371.4575	170.7909	18981707226
22	756	500	581	369988.2	373.6042	382.3958	207.3958	17660966358	398145.5	388.2714	367.7286	192.7286	18791553000
23	753	500	595.8333	368488.2	371.7311	381.2689	224.1022	17390992388	396645.5	387.6399	365.3601	208.1935	18709825154
24	751	500	604.8333	367488.2	370.5002	380.4998	234.3332	17212863322	395645.5	387.1772	363.8228	217.6561	18654108366
25	750	500	608	366988.2	369.9133	380.0867	238.0867	17128566144	395145.5	386.8789	363.1211	221.1211	18616043744

Lanjutan tabel pengaruh letak tendon terhadap tegangan beton

Po (N)	Pe (N)	Mo (N.mm)	Mt (N.mm)	Fti (N/mm ²)	Fbi (N/mm ²)	Fts (N/mm ²)	Fbs (N/mm ²)
15	16	17	18	19	20	21	22
4203543.8	3362835	0	0	-18.83292	-15.91152	-13.49152	-11.40059
4203543.8	3362835	9958490.067	65086279.01	-17.0153	-17.58373	-14.96075	-9.849454
4203543.8	3362835	12676180.37	97931758.26	-15.93553	-18.1052	-15.54914	-8.910795
4203543.8	3362835	8048150.72	98431517.55	-15.44216	-17.79127	-15.20262	-8.733976
4203543.8	3362835	-4100485.333	66410670.43	-15.51807	-16.63313	-14.0746	-9.14851
4203543.8	3362835	-24014614.67	1624330.042	-16.02431	-14.82987	-12.34114	-10.02456
4203543.8	3362835	-52009163.84	-96242430.19	-16.75803	-12.69998	-10.16854	-11.28122
4203543.8	3362835	-88469157.65	-227574635.1	-17.66063	-10.25508	-7.836962	-12.61087
4203543.8	3362835	-133849783.5	-392827471.9	-18.52683	-7.848863	-5.442388	-14.01802
4203543.8	3362835	-188676486.8	-592526386.4	-19.31654	-5.476127	-3.204301	-15.24483
4203543.8	3362835	-253545045.3	-827267155.9	-19.92578	-3.347562	-1.123674	-16.35892
4203543.8	3362835	-329121658.5	-1097715980	-20.34185	-1.457658	0.709428	-17.24904
4203543.8	3362835	-416143148.8	-1404609682	-20.55181	0.165572	2.281558	-17.90641
4203543.8	3362835	-286845645.3	-987812178	-17.62972	-3.03897	-0.072359	-15.59556
4203543.8	3362835	-169463128	-607929660.7	-14.8113	-6.168803	-2.536314	-13.23488
4203543.8	3362835	-63725593.72	-264692126.4	-12.12248	-9.166909	-5.054109	-10.86334
4203543.8	3362835	30576951.68	42110418.98	-9.565519	-12.05007	-7.501315	-8.61873
4203543.8	3362835	113594493.2	312627960.5	-7.194117	-14.72862	-9.815107	-6.532769
4203543.8	3362835	185417019.7	546950487	-5.007967	-17.22165	-11.90241	-4.701106
4203543.8	3362835	246074529.6	745107996.9	-3.034697	-19.49272	-13.71426	-3.15465
4203543.8	3362835	295537015	907070482.3	-1.362776	-21.41111	-15.22181	-1.882291
4203543.8	3362835	333714467.8	1032747935	0.021439	-23.01188	-16.39355	-0.919421
4203543.8	3362835	360456915.2	1121990383	1.023397	-23.15743	-17.21871	-0.24003
4203543.8	3362835	375554370.6	1174587838	1.180137	-23.51137	-17.687	0.133589
4203543.8	3362835	378736851.2	1190270319	1.380252	-23.85806	-17.79321	0.202418

Lampiran 9
Perbandingan bentuk lingkaran dan parabola pada perencanaan dimensi penampang

