

TUGAS AKHIR

**DESAIN "EXTERNAL PRESTRESSING"
UNTUK PENINGKATAN KAPASITAS LENTUR
BALOK BETON BERTULANG KONVENSIONAL**

(EXTERNAL PRESTRESSING DESIGN for FLEXURAL CAPACITY
ENHANCEMENT of CONVENTIONALLY REINFORCED CONCRETE BEAMS)



Oleh :

Hadi Nugroho

No. Mhs. : 91310096

NIRM : 910051013114120092

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

1999

TUGAS AKHIR

**DESAIN "EXTERNAL PRESTRESSING"
UNTUK PENINGKATAN KAPASITAS LENTUR
BALOK BETON BERTULANG KONVENSIONAL**

**(EXTERNAL PRESTRESSING DESIGN for FLEXURAL CAPACITY
ENHANCEMENT of CONVENTIONALLY REINFORCED CONCRETE BEAMS)**

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

Oleh :

Hadi Nugroho

No. Mhs. : 91310096
NIRM : 910051013114120092

Dwi Darmanto

No. Mhs. : 91310238
NIRM : 910051013114120231

**JURUSAN TEKNIK SIPIL
FAKULTAS TEKNIK SIPIL DAN PERENCANAAN
UNIVERSITAS ISLAM INDONESIA
YOGYAKARTA
1999**

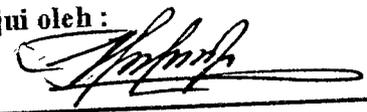
TUGAS AKHIR
DESAIN "EXTERNAL PRESTRESSING"
UNTUK PENINGKATAN KAPASITAS LENTUR
BALOK BETON BE RTULANG KONVENSIONAL
(EXTERNAL PRESTRESSING DESIGN for FLEXURAL CAPACITY
ENHANCEMENT of CONVENTIONALLY REINFORCED CONCRETE BEAMS)

Oleh :
Hadi Nugroho
No. Mhs.: 91310096
NIRM. 910051013114120092

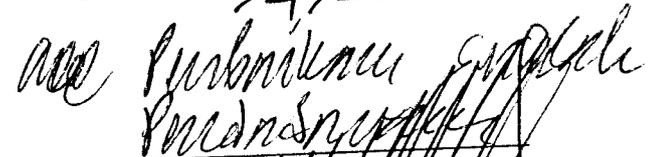
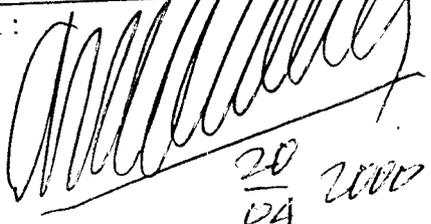
Dwi Darmanto
No. Mhs.: 91310238
NIRM. 910051013114120231

Telah diperiksa dan disetujui oleh :

Ir. H. Moch Teguh, MSCE
Dosen Pembimbing I


Tanggal : 20/4/2000

Ir. A Kadir Aboe, Ms
Dosen Pembimbing II


Tanggal : 
20
04 2000

Motto :

Berdo'a dan berusaha serta mencoba
Adalah jalan menuju kesuksesan

Kupersembahkan untuk :
Ayahanda, Ibunda, Mas
Tri, Iwan dan Dhik Dwi
tercinta.

PRAKATA

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

Puji syukur ke hadirat Allah SWT, atas segala limpahan rahmat dan hidayah-Nya yang telah diberikan, sehingga Tugas Akhir ini dapat diselesaikan.

Berdasarkan kurikulum yang berlaku, Tugas Akhir ini diselesaikan sebagai salah satu syarat yang harus dipenuhi untuk dapat memperoleh derajat sarjana jenjang strata satu (S1) pada Jurusan Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Islam Indonesia, Yogyakarta.

Pada kesempatan ini disampaikan banyak terima kasih kepada semua pihak yang telah turut membantu baik secara langsung maupun tidak langsung dalam rangka penyusunan Tugas Akhir ini, terutama kepada :

1. Bapak Ir. Mochammad Teguh, MSCE, selaku pembimbing I,
2. Bapak Ir. A Kadir Aboe, MS, selaku pembimbing II,
3. Para Dosen yang telah memberikan ajaran dan bimbingan selama ini,
4. Rekan-rekan dan semua pihak yang telah memberikan bantuan baik dorongan maupun sarana dalam penyusunan Tugas Akhir ini.

Semoga segala bantuan dan saran yang telah diberikan dapat menjadi amal soleh dan mendapat balasan dari Allah SWT. Terakhir dan tidak terlupakan kami ucapkan terima kasih kepada orang tua dan saudara-saudara, serta sahabat-sahabat kami yang memberikan doa maupun dorongan hingga selesainya Tugas Akhir ini. Disadari bahwa

Tugas Akhir ini masih jauh dari sempurna, untuk itu kritik dan saran yang membangun sangat diharapkan untuk lebih menyempurnakan tulisan ini.

Yogyakarta, Januari 2000

Penyusun

DAFTAR ISI

Lembar Judul	i
Lembar Pengesahan	ii
Prakata	iii
Daftar Isi	iv
Daftar Notasi dan Simbol	viii
Daftar Tabel	xi
Daftar Gambar	xii
Abstrak	xiii
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Permasalahan	5
1.3 Batasan Masalah.....	5
1.4 Tujuan	7
1.5 Manfaat.....	7
1.6 Metode Penulisan	7
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	8
2.1 Tinjauan Umum	8
2.2 Metode Perkuatan dan Perbaikan Struktur Beton Bertulang....	9

2.2.1 Perbesaran Tampang (“Section Enlargement”).....	10
2.2.2 Penguatan dengan Menggunakan Komposit Beton Polimer (“Polymer Concrete Composites”).....	11
2.2.3 Pelat Baja Terekat.....	13
2.2.4 Metode Pratekan Luar (“External Prestressing”)	14
2.3 Konsep Dasar Beton Prategang.....	19
2.4 Prategang Penuh dan Prategang Sebagian.....	21
2.5 Kuat Tekan Beton.....	24
2.6 Baja Tulangan	25
2.7 Tendon Prategang.....	26
BAB III DESAIN BETON PRATEGANG.....	29
3.1 Kuat Lentur Gelagar Prategang	29
3.2 Blok Tekan Eekivalen untuk Beton	31
3.3 Kuat Lentur dengan Analisis Kompabilitas Regangan.....	31
3.4 Desain Gelagar Prategang dengan “Ultimate Strength Design Method”	32
BAB IV DESAIN dan ANALISIS “EXTERNAL PRESTRESSING”	37
4.1 Tinjauan Umum	37
4.2 Metode Desain yang Digunakan untuk Perencanaan Tendon Pratekan Luar	38

4.3	Kuat Tarik yang disyaratkan untuk Tendon Partegang.....	39
4.4	Tegangan Efektif f_{pe}	39
4.5	Analisis Penambahan Tendon eksternal Prestressing pada Gelagar Beton Bertulang.....	39
4.5.1	Analisis Kuat Lentur Balok Beton Bertulang	41
4.5.2	Perhitungan Lendutan Balok Beton Bertulang.....	44
4.5.3	Analisis Geser Balok Beton Bertulang.....	46
4.6	Desain dan Analisis Penambahan Tendon Luar.....	48
4.6.1	Desain Tendon dan Analisis Momen Nominal Balok	49
4.6.2	Analisis kekuatan daerah pengangkuruan	49
4.6.3	Analisis Geser Balok setelah Penambahan Tendon Eksternal	55
4.7	Perhitungan Penambahan Tendon pada Balok Beton Bertulang dengan Mutu Bahan dan Kedalaman Efektif (d_p) yang Bervariasi.....	57
4.8	Perhitungan “External Prestressing” sesuai dengan Kebutuhan Pembebanan.....	58
BAB V PEMBAHASAN		60
5.1	Luas Tendon yang Diperlukan	60

5.2	Pertambahan Momen Nominal	61
5.3	Indeks Penulangan	62
5.4.	Kuat Geser Beton	63
BAB VI KESIMPULAN DAN SARAN		64
6. 1	KESIMPULAN	64
6.2	SARAN-SARAN	64

DAFTAR GAMBAR

	Halaman
Gambar 2.1 Perkuatan dengan pelat baja terekat	13
Gambar 2.2 Pemasangan tendon luar dan detail deviator.....	18
Gambar 2.3 Konsep beban berimbang dari prategang	20
Gambar 2.4 Grafik beban versus lendutan pada gelagar beton bertulang dengan berbagai macam perkuatan	23
Gambar 2.5 Diagram tegangan-regangan untuk baja tulangan biasa	26
Gambar 2.6 Diagram tegangan-regangan untuk baja prategang	28
Gambar 4.1 Denah balok dan kolom	40
Gambar 4.2 Dimensi tampang balok	40
Gambar 4.3 Diagram momen pada gelagar dengan dukungan jepit- jepit	45
Gambar 4.4 Tampang penempatan tendon prategang pada balok	49
Gambar 4.5. Pengangkuran pada kolom	53
Gambar 4.6. Distribusi gaya-gaya akibat gaya prategang	56

DAFTAR NOTASI DAN SIMBOL

a	= Tinggi blok tekan ekuivalen, mm
A_p	= Luas tendon prategang yang diperlukan, mm ²
A_{ps}	= Luas tendon prategang dalam daerah tarik, mm ²
A_{pw}	= Luas tampang desak pada badan balok, mm
A_s	= Luas tulangan tarik, mm ²
A_s'	= Luas tulangan desak, mm ²
b	= Lebar efektif balok, mm
b_w	= lebar badan balok, mm
c	= Jarak dari serat tekan terluar ke garis netral, mm
c_b	= Jarak serat bawah terluar dari garis netral, mm
d	= Kedalaman efektif tulangan non prategang, mm
d_p	= Kedalaman efektif tendon prategang, mm
E_c	= Modulus elastisitas beton, MPa
E_p	= Modulus elastisitas tendon prategang, MPa
E_s	= Modulus elastisitas tulangan non prategang, MPa
F	= Gaya prategang
f_c'	= Kuat tekan beton yang disyaratkan, MPa
f_{pe}	= Tegangan efektif tendon prategang (sesudah memperhitungkan semua kehilangan gaya prategang yang mungkin terjadi), MPa
f_{ps}	= Tegangan dalam tendon prategang pada kuat nominal, MPa
f_{pu}	= Kuat tarik tendon prategang yang ditentukan, MPa

- f_{py} = Kuat leleh tendon prategang yang ditentukan, MPa
 f_y = Kuat leleh tulangan non prategang, MPa
 h = Tinggi balok, mm
 L = Bentang bersih balok, mm
 M_n = Kuat momen nominal suatu penampang, Nm
 M_u = Momen terfaktor pada penampang, Nm
 P_e = Gaya prategang efektif (setelah memperhitungkan semua kehilangan gaya prategang yang mungkin terjadi)
 r = Radius girasi penampang komponen struktur tekan
 w_b = Beban yang terdistribusi merata ke arah atas (pada metode perimbangan beban)
 z = Lengan kopel internal
 β_1 = Faktor reduksi tinggi blok tegangan tekan ekuivalen beton
 ϵ_{cu} = Regangan runtuh beton
 ϵ_s = Regangan tulangan tarik non prategang saat regangan beton mencapai nilai
 ρ = $\frac{0,003}{\epsilon_s}$ Rasio tulangan non prategang
 ρ_p = Rasio tendon prategang
 ω = Indeks penulangan tulangan tarik non prategang
 ω' = Indeks penulangan tulangan desak non prategang
 ω_p = Indeks penulangan tendon prategang

DAFTAR TABEL

	Halaman
Tabel 4.1 Perhitungan kebutuhan sengkang	48
Tabel 4.2 Momen akibat tegangan beton dan gaya prategang	42
Tabel 4.3 Pertambahan Momen Nominal	57
Tabel 4.4 Rasio tulangan non prategang dan tendon eksternal	57
Tabel 4.5 Gaya prategang efektif dan tegangan tendon saat beban ultimit tercapai	58
Tabel 4.6 Tabel pertambahan momen retak dan tegangan serat beton ...	58
Tabel 4.7 Pertambahan momen nominal untuk mutu bahan lebih rendah.	58
Tabel 4.8 Pertambahan momen nominal	59

ABSTRAK

Struktur beton bertulang sampai saat ini mempunyai peranan penting dalam bidang rekayasa teknik sipil. Beton bertulang banyak dipilih karena ekonomis terutama di Indonesia, meski memiliki kelemahan, yaitu mengalami perlemahan akibat faktor-faktor alam, sifat material pembentuknya, maupun kesalahan manusia, hal ini bisa mengakibatkan kekuatan struktur beton bertulang berada di bawah beban rencana. Selain faktor tersebut, kadang-kadang ada perubahan fungsi bangunan terutama gedung maupun karena nilai historis suatu bangunan, di samping faktor ekonomi, menyebabkan bangunan tersebut tetap dipertahankan walaupun beban yang akan di dukungnya lebih besar dari kekuatannya, oleh karena itu lalu dicari cara untuk memperkuat suatu struktur beton bertulang. "External prestressing" atau pratekan luar adalah salah satu cara pemecahannya. Tugas akhir ini bermaksud untuk mengetahui keuntungan penggunaan pratekan luar dari sisi penambahan kekuatan yang dihasilkan terhadap struktur belok beton bertulang konvensional. Dari hasil analisis dapat diketahui bahwa dengan penambahan tendon luar pada balok beton bertulang, kekuatan nominal balok bertambah sampai dengan antara 30% ~ 50%, dan untuk balok beton bertulang yang memenuhi kriteria standar SK SNI T 15-03-1991 bisa didapatkan struktur yang memenuhi syarat daktilitas untuk nilai penambahan kuat nominal tersebut.

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Dalam bidang konstruksi, beton memiliki peranan penting. Sejak ditemukan beton menjadi bahan yang paling banyak digunakan bersama dengan baja. Beton dikombinasikan dengan baja kemudian yang banyak dimanfaatkan dalam dunia konstruksi. Karena dengan memanfaatkan beton yang mempunyai kuat tekan besar dan baja yang mempunyai kuat tarik yang tinggi, bisa didapatkan suatu struktur yang kuat, tahan lama dan ekonomis.

Sampai saat ini, struktur yang mengkombinasikan beton dengan baja, atau struktur beton bertulang masih dominan digunakan, atau bahkan sampai abad mendatang tampaknya masih tetap dominan. Akan tetapi, pemakaian beton yang berbahan dasar semen, agregat, dan air tidak tanpa masalah. Material ini rentan terhadap faktor lingkungan dan kesalahan manusia, serta sifat-sifat material pembentuknya. Oleh karena faktor-faktor tersebut suatu struktur beton bertulang bersifat kompleks.

Ada dua filsafat perencanaan struktur beton bertulang yang telah tampil. Metode Tegangan Kerja ("Working Stress method"), yang terpusat pada keadaan beban layan, dipakai sejak awal tahun 1900-an sampai awal tahun 1960-an (Wang & Salmon, 1985). Sejak 1983, peralihan telah berlangsung ke metode rencana kekuatan atau metode kekuatan batas ("Ultimate Strength Method"),

yang terfokus pada keadaan pembebanan yang melampaui beban kerja pada saat struktur terancam keruntuhan (Wang & Salmon, 1985). Metode rencana kekuatan ini secara konseptual dianggap lebih realistis dalam penetapan tingkat keamanan struktur.

Sebagai kombinasi dari dua jenis bahan yang berbeda, analisa kekuatan struktur beton bertulang secara sebagian bersifat empirik. Oleh karena itu prinsip-prinsip dan metode-metode perencanaan senantiasa disempurnakan sesuai dengan hasil penelitian dan eksperimen. Di Indonesia, peraturan atau pedoman standar yang mengatur perencanaan dan pelaksanaan bangunan beton bertulang telah beberapa kali mengalami penyempurnaan dan pembaharuan. Sejak Peraturan Beton Indonesia 1955 (PBI 1955) kemudian PBI 1971, dan yang terakhir adalah pedoman Standar Tata Cara Perhitungan Struktur Beton nomor: SK SNI T-15-1991-03. Pembaharuan tersebut ditujukan untuk mengimbangi pesatnya laju perkembangan ilmu pengetahuan dan teknologi khususnya yang berhubungan dengan beton atau beton bertulang.

PBI 1971 NI-2 diterbitkan dengan memberikan beberapa pembaharuan terhadap PBI 1955, di antaranya yang terpenting adalah : (1) dalam perhitungan menggunakan metode elastik atau disebut juga cara n atau metode tegangan kerja, menggunakan nilai n yang variabel tergantung pada mutu beton dan waktu (kecepatan) pembebanan, serta keharusan untuk memasang tulangan rangkap bagi balok-balok yang ikut menentukan kekuatan struktur; (2) diperkenalkan perhitungan metode kekuatan (ultimit), sebagai alternatif; (3) diperkenalkan

dasar-dasar perhitungan bangunan tahan gempa (Istimawan, 1994).

Sedangkan standar Tata Cara Perhitungan Struktur Beton SK SNI T-15-1991-03 memberikan ketentuan baru, antara lain yang terpenting adalah : (1) perhitungan perencanaan lebih diutamakan serta diarahkan untuk menggunakan metode kekuatan batas (ultimit), sedangkan metode beban kerja (cara elastik) masih tercantum sebagai alternatif dan diberikan di bagian belakang; (2) konsep hitungan keamanan yang lebih realistik dihubungkan dengan tingkat daktilitas struktur; (3) tata cara hitungan geser dan puntir pada keadaan ultimit (batas); (4) menggunakan satuan SI dan notasi yang dipakai di kalangan internasional; (5) ketentuan-ketentuan detail penulangan yang lebih rinci untuk beberapa komponen struktur; (6) mengetengahkan beberapa ketentuan yang belum tersedia pada peraturan sebelumnya, misalnya mengenai struktur bangunan tahan gempa, beton prategang, pracetak, komposit, cangkang, pelat lipat, dan lain-lain (Istimawan, 1994). Dalam standar SK SNI T-15-1991-03 juga menggunakan acuan standar dan peraturan dari berbagai negara, terutama ACI 318-83. Peraturan dan standarisasi ini pada hakekatnya untuk kesejahteraan manusia, yaitu untuk mencegah korban manusia, di samping itu peraturan tidak membebaskan perencana dari tujuan menghasilkan struktur bangunan yang ekonomis.

Selain konsep perencanaan, perkembangan teknologi beton bertulang juga memunculkan konsep prapenegangan ("prestressing"). Struktur beton prategang ini mengkombinasikan beton dan baja secara aktif. Jadi sebelum komponen

struktur tersebut dibebani dikerjakan terlebih dahulu gaya desak pada elemen betonnya dengan menarik elemen bajanya. Efek dari proses prategang ini adalah retakan akibat beban luar terjadi pada tingkat pembebanan yang jauh lebih tinggi daripada struktur beton bertulang. Prapenegangan memungkinkan untuk membuat tampang yang lebih kecil untuk mendukung beban yang sama besar. Dengan teknik prategang, deformasi dapat dikurangi atau bahkan dihilangkan sama sekali setidaknya pada tingkat beban kerja. Berbeda dengan struktur beton bertulang, struktur beton prategang tidak terlalu mengandalkan rekatan antara beton dengan bajanya.

Dalam struktur prategang, menurut T.Y Lin (Lin & Burn , 1982), berdasarkan cara pemberian gaya prategangnya, struktur beton prategang dibagi menjadi dua yaitu prategang internal dan prategang eksternal. Pada prategang internal (“internal prestressing”) tendon dipasang di dalam elemen beton (“internal tendon”), sedangkan pada prategang eksternal (“external prestressing”) tendon dipasang di luar elemen beton (“external tendon”). Umumnya struktur prategang dengan “external tendon” ini diterapkan pada box girder maupun girder tampang I. Struktur “external prestressing”, banyak diterapkan pada jembatan, ponton, dan perkerasan lapangan terbang (Ben Gerwick, 1993). “External prestressing” selain diterapkan sebagai sistem struktur juga diterapkan untuk perbaikan dan perkuatan struktur. Tujuannya untuk memperbaiki defleksi yang terlampau besar dan tidak dikehendaki, memperkuat struktur agar dapat mendukung beban yang lebih besar, dan memberikan kemungkinan penghilangan

dukungan tengah pada bentang menerus (Ben Gerwick, 1993). Dalam tugas akhir ini, topik yang diangkat adalah pemakaian metode “external prestressing” ini pada struktur gelagar beton bertulang yang direncanakan dengan metode kekuatan batas (“ultimit strength”), yang mengalami penambahan pembebanan.

1.2. Permasalahan

Daktilitas struktur adalah satu kriteria struktur yang harus dipenuhi di samping kekuatannya untuk menahan beban. “External prestressing” adalah penambahan elemen baja pada suatu struktur beton bertulang sehingga akan berpengaruh terhadap daktilitas struktur yang diberi “external prestressing”. Penerapan “external prestressing” pada struktur yang sudah jadi harus direncanakan sedemikian rupa agar didapatkan penambahan kekuatan yang maksimal dan tetap ekonomis. Penerapan “external prestressing” juga harus menghindari adanya efek anti lendutan yang terlalu besar karena diterapkan pada struktur yang berupa rangkaian komponen struktur yang berhubungan satu dengan yang lain (sistem). Oleh karena itu perlu diketahui berapa besar penambahan kekuatan yang didapatkan dari “external prestressing” terhadap struktur beton bertulang dengan tetap memenuhi keterbatasan tersebut, sebagai pertimbangan untuk pemakaiannya.

1.3. Batasan Masalah

Agar dapat terfokus permasalahan dalam tugas akhir ini dibatasi sebagai

berikut ini :

1. Desain “external prestressing” menggunakan metode desain gelagar prategang berdasarkan kekuatan batas (“ultimate strength”).
2. Analisis dilakukan dengan menggunakan batasan-batasan yang diberikan dalam standar SK SNI T-15-03-1991 dan ACI-138.
3. Dalam penulisan ini tidak dibahas aspek pelaksanaannya di lapangan seperti kemungkinan berkurangnya kekuatan pada bagian struktur akibat pemboran untuk pemasangan angkur.
4. Tingkat daktilitas struktur didasarkan pada regangan yang dihasilkan pada kondisi kekuatan batas.
5. Analisis yang dilakukan hanya didasarkan pada variabel yang menentukan pada perhitungan perancangan suatu struktur beton bertulang, yaitu batas maksimal tegangan baja dan beton yang diperkenankan.
6. Untuk menganalisis pengaruh pratekan luar terhadap peningkatan kapasitas balok dilakukan perbandingan antara kekuatan balok sebelum diberi pratekan luar dengan balok yang sama yang telah diberi pratekan luar.
7. Desain “external prestressing” dilakukan pada balok yang berhubungan dengan kolom dengan menganggap balok didukung dengan jepit-jepit.
8. Analisis “external prestressing” dilakukan pada tegangan efektif sebesar $f_{pe} = 0,5f_{pu}$.
9. Panjang bentang balok sebesar as ke as 8000 mm.
10. Dilakukan perbandingan hasil untuk kedalaman efektif tendon (d_p).

a. $d_p = \frac{r^2}{c^b}$.

b. $d_p = d$ (dengan d = kedalaman pusat tulangan non prategang).

c. $d_p = h$.

1.4. Tujuan

Tujuan dari penulisan ini adalah untuk mengetahui bagaimana analisis dan perancangan pemakaian metode pratekan luar untuk peningkatan kapasitas suatu struktur balok beton konvensional yang sudah jadi.

1.5. Manfaat

Manfaat yang diharapkan dari penulisan tugas akhir ini adalah untuk mengetahui seberapa besar peningkatan kapasitas balok dan tingkat daktilitas sebagai tolok ukur keamanan, dengan pemakaian Pratekan Luar ini.

1.6. Metode Penulisan

Metode yang digunakan dalam penyusunan tugas akhir ini adalah studi literatur dengan mengumpulkan teori-teori yang digunakan dalam analisis dan kepustakaan yang berkaitan dengan analisis pratekan luar.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Tinjauan Umum

Perencanaan struktur adalah suatu pekerjaan berupa penentuan bentuk umum dan dimensi-dimensi khusus dari struktur tertentu, sehingga struktur tersebut dapat menjalankan fungsinya sesuai dengan tujuan dibuatnya dan sekaligus memikul dengan aman semua pengaruh yang beban bekerja (Biemo W. Soewardi dan Dicky Rezady M, 1998). Jika suatu struktur tidak lagi mempunyai karakteristik dan kinerja seperti yang dirancang, dihitung, dan digambarkan oleh perancangannya, maka struktur tersebut dapat dikatakan telah mengalami kegagalan. Selain itu, perencanaan struktur juga mencakup bagaimana mengkombinasikan sifat dan perilaku material pembentuk struktur itu, sehingga menjadi suatu struktur yang aman dan ekonomis. Oleh karena itu, ditetapkanlah peraturan-peraturan perencanaan struktur, yang dimaksudkan sebagai panduan bagi perencana dan perencanaan.

Perencanaan komponen struktur beton bertulang dilakukan sedemikian rupa sehingga tidak timbul retak berlebihan pada penampang saat mendukung beban kerja, dan masih mempunyai cukup keamanan serta cadangan kekuatan untuk menahan beban dan tegangan lebih lanjut tanpa mengalami keruntuhan. Komponen struktur beton bertulang dikehendaki mempunyai daktilitas tertentu. Daktilitas adalah kemampuan

struktur untuk berdeformasi paska plastik secara berkelanjutan tanpa adanya penurunan kekuatan yang berarti (Widodo, 1998).

Selama kurun waktu cukup lama perencanaan serta analisis struktur didasarkan pada cara pendekatan elastis atau metode tegangan kerja. Untuk waktu sekarang ini digunakan metode pendekatan yang lebih realistis, ialah bahwa hubungan sebanding antara tegangan dan regangan dalam beton terdesak hanya berlaku sampai pada suatu batas, yaitu pada tingkat pembebanan sedang. Setelah melampaui batas tersebut hubungan tegangan-regangan sudah tidak lagi linier, oleh karena itu dalam tugas akhir ini digunakan metode desain berdasarkan kekuatan ultimit. Dengan metode desain berdasarkan kekuatan ultimit ini juga menghasilkan struktur yang lebih efektif dalam menahan tegangan-tegangan yang bekerja pada struktur tersebut.

2.2. Metode Perkuatan dan Perbaikan Struktur Beton Bertulang

Perkuatan beton bertulang telah menjadi seni yang telah dipraktikkan selama kurun waktu beberapa abad. Dan bidang ini adalah bidang yang berkembang. Pada masa sekarang, metode perkuatan struktur beton bertulang telah melibatkan suatu pengetahuan yang kompleks. Yang menjadi tujuan adalah didapatkan metode perbaikan yang menghasilkan efek perbaikan kekuatan yang kuat dan tahan lama.

Menurut pengamatan yang dilakukan oleh para ahli yang berkecimpung dalam bidang ini, dari dulu sampai sekarang perkuatan pada struktur jadi lebih kompleks dalam desain dan pelaksanaannya (Concrete International, Maret 1998), karena kondisi aktual suatu struktur jadi tidak dapat diketahui dengan pasti. Di samping itu,

karakter komposit antara material lama dengan material baru yang ditambahkan harus dievaluasi. Dengan demikian perilaku komposit dalam sistem ini harus lebih banyak dipelajari.

Perbaikan struktur sendiri telah mengenal berbagai macam metode yang dikelompokkan sebagai metode retrofit dan metode perkuatan eksternal (Konstruksi, no 242-Januari-A, 1997), dari kedua cara itu memiliki keunggulan dan kelemahan masing-masing. Pada metode pertama, memang sering digunakan untuk perbaikan struktur bangunan, misalnya penambahan tulangan pada balok atau kolom. Namun upaya ini kerap kali susah dilakukan, mengingat perbaikan di dalam struktur itu sendiri. Keuntungan yang diharapkan dari penambahan gaya prategang adalah terutama adalah memperbesar momen positif pada gelagar, di samping apabila dibuat sebagai struktur prategang yang baru dengan pemasangan tendon diluar ini didapatkan luas beton yang lebih kecil dari pada struktur dengan struktur prategang dengan tendon di dalam. Dalam sub bab-sub bab berikut ini akan diuraikan gambaran mengenai metode dan material yang digunakan dalam penguatan dan perbaikan struktur beton.

2.2.1. Perbesaran Tampang ("Section Enlargement")

Metode ini sudah seumur dengan konstruksi beton itu sendiri dan diperkenalkan pada tahun 1911 (Concrete International, Maret 1998). Yang dimaksud dengan perbesaran tampang ("section enlargement") adalah pemasangan beton bertulang tambahan pada elemen struktur jadi yang akan diperbaiki. Kolom, balok, pelat, dek jembatan, dan dinding dapat diperbesar tumpangya guna meningkatkan kapasitas dukung bebannya. Pembesaran tersebut harus terikat dengan struktur jadi yang

diperbaiki untuk dapat menghasilkan elemen struktur yang monolitik, sebagai sistem komposit.

Metode yang paling mutakhir adalah penggunaan beton dan mortar yang disemprotkan, proses ini dikenal sebagai "shortcrete". Paling banyak penggunaannya adalah dalam rehabilitasi dan perbaikan pelat ("deck") jembatan. Keuntungan dalam peningkatan ketebalan struktural ("structural depth") dari pelat jembatan tersebut akan didapat hanya apabila kinerja monolitik struktur pada kondisi batas kritisnya terjamin. Kinerja monolitik ini memerlukan rekatan yang baik dan kapasitas geser pada bagian pertemuan antara material baru dengan material lama yang tidak akan mengalami perlemahan lebih cepat ketika menderita beban siklis, kondisi lingkungan dan beban temperatur.

Metode perbesaran tampang ini relatif mudah dilaksanakan dan ekonomis. Kekurangannya adalah resiko besar akibat korosi pada baja tulangan yang dipasangkan dan perlemahan pada beton. Beton pada struktur lama, pada banyak kasus, akan terpengaruh oleh perubahan volume. Perubahan volume yang ditahan oleh material baru akan memberikan tambahan tegangan baja tariknya sehingga akan menyebabkan retak dan pengelupasan ("delaminasi") apabila tegangan yang terjadi lebih besar dari tegangan tarik material baru (Concrete International, Maret 1998).

2.2.2. Penguatan dengan Menggunakan Komposit beton-polimer ("Polymer Concrete Composites")

Beton polimer ini banyak digunakan untuk perbaikan dan penguatan, khususnya

pada struktur yang mempunyai kemungkinan besar akan mengalami perlemahan akibat korosi dan erosi. Efek yang dihasilkan pada struktur adalah meningkatkan sifat kompositnya, seperti kekuatan yang tinggi, permeabilitas yang rendah, daya tahan terhadap pengaruh kimiawi yang baik, dan tahan terhadap abrasi.

Sedangkan kerugiannya adalah :

- a retakan akibat menahan perubahan volume dan korosi pada tulangan,
- b daya tahan terhadap sinar ultra violetnya lemah,
- c rentan terhadap api.

Material yang digunakan untuk beton polimer ini umumnya dikategorikan sebagai berikut:

1. "Polymer cement concrete".

"Polymer cement concrete" didapatkan dengan menambahkan polimer atau monomer pada semen segar biasa sewaktu proses pencampuran.

2. "Polymer impregnated concrete".

"Polymer impregnated concrete" didapatkan dengan pembengkakan ("impregnation") polimer atau monomer pada semen beton yang mengeras, kemudian diikuti dengan polimerisasi dalam.

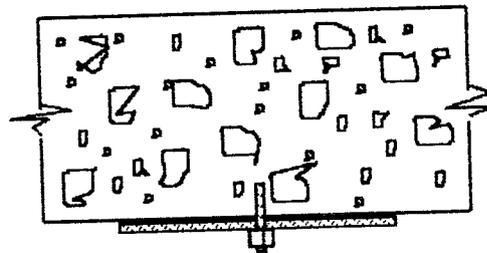
3. "Polimer concrete".

"Polimer concrete" didapatkan dengan mencampur resin sintetis atau monomer sebagai "binder" dengan agregat dan diikuti dengan polimerisasi.

2.2.3. Pelat Baja Terekat

Pelaksanaan metode ini sangat sederhana yaitu dengan melekatkan pelat baja atau elemen baja yang lain dengan dua komponen “epoxy adhesive”, sehingga membentuk tiga fase sistem komposit beton-lem-baja. Metode ini menghasilkan perubahan dimensi yang minimal. Di samping itu dengan desain yang memadai dan pelaksanaan akhirnya, akan menentukan aksi komposit yang terjadi ketika mengalami pembebanan. Baja yang direkatkan pada permukaan tarik suatu gelagar telah menunjukkan bahwa kekuatan lenturnya meningkat, dan diiringi dengan peningkatan kekakuan lenturnya dan pengurangan defleksi serta retakannya, seperti yang terlihat dalam gambar 2.1.

Pelat terekat ini sebagai penambah perkuatan baja yang terpasang dan dipertimbangkan sebagai tulangan sekunder yang tersedia untuk mereduksi tegangan baja agar masuk ke tingkat tegangan ijinnya.



Gambar 2.1. Perkuatan dengan pelat baja terekat

Meskipun prinsipnya sederhana akan tetapi dalam pelaksanaannya juga

memerlukan kualitas kerja yang tinggi. Metode pelat terekat akan efektif apabila memenuhi syarat berikut:

- a permukaan yang akan direkatkan harus bersih
- b bahan perekatnya harus mempunyai kuat lekat yang cukup kuat setidaknya untuk melekat pada beton
- c pelat harus cukup panjang dan tipis untuk mencegah kerusakan berupa pemisahan getas pada pelat. Untuk itu angkur tambahan perlu disediakan untuk mengatasi kerusakan seperti ini.

2.2.4. Metode Pratekan Luar (“External Prestressing”)

Metode Pratekan Luar pada dasarnya adalah pemasangan kabel-kabel prategang di luar dari elemen struktur dan penerapannya khususnya pada balok. Metode ini berkembang oleh karena perkembangan teknik prategang sebagian yang memungkinkan untuk membuat struktur dengan tendon tak terekat yang kemampuannya sebaik struktur dengan tendon terekat (Angel C. Aparacio dan Gonzalo Ramos, 1996). Sistem “External Prestressing” merupakan satu pengembangan teknik prategang yang cukup berhasil dewasa ini, baik untuk struktur baru maupun untuk perbaikan dan perkuatan struktur lama baik itu beton, baja, maupun komposit.

Penggunaan “external prestressing” mengalami peningkatan oleh karena dengan penempatan tendon di luar elemen struktur didapatkan luas beton yang lebih kecil dan dapat meningkatkan kapasitas struktur. Dalam pelaksanaannya tendon luar ini juga mereduksi gesekan (friksi) ketika terjadi tegangan (Ben Gerwick, 1993). Tendon eksternal ini dimungkinkan dipakai pada struktur berbentuk box dan “space frame”.

Tendon tersebut pada umumnya diselubungi dengan “polyethylene tube” kemudian diberi “cement grout”. Alternatif lain adalah penggunaan bahan “fiber reinforced plastic” yang terdiri dari kaca (“glass”), aramid, atau serat karbon yang dikelilingi “polyester resin” sebagai alternatif untuk unit baja tegangan tinggi (Concrete International, Maret 1998).

Menurut FX Supartono, metode pemasangan kabel di luar ini memiliki keuntungan sebagai berikut:

1. Penampang elemen lebih ramping.

Karena tidak adanya kabel di dalam elemen beton maka ketebalan elemen umumnya dapat dikurangi pada sistem pratekan luar dibandingkan dengan sistem pratekan dalam sehingga dengan demikian volume pemakaian beton dapat dikurangi, dan struktur menjadi lebih ringan secara keseluruhan.

2. Kemudahan pengecoran beton.

Seringkali dengan adanya kabel prategang di dalam elemen beton, pengecoran beton agak terhambat, terutama yang berhubungan dengan proses penggetaran dan pematatannya. Hal ini menjadi lebih mudah pada sistem pratekan luar.

3. Kemudahan pemasangan kabel prategang.

Pemasangan kabel di luar elemen beton akan lebih mudah daripada didalam elemen terutama karena adanya tulangan pasif dan sengkang di dalam beton, serta syarat kelengkungan kabel yang harus diikuti dengan cermat.

4. Kemudahan observasi dan pemeliharaan.

Pengamatan dan pemeliharaan kabel di luar elemen beton tentu saja lebih mudah

dibandingkan dengan kabel yang tertanam di dalam beton terutama yang berhubungan dengan masalah korosi. Demikian pula bila diperlukan perkuatan atau penggantian kabel selama masa layan konstruksi, akan lebih mudah dilakukan pada sistem pratekan luar daripada sistem pratekan dalam. Dengan diberikannya proteksi ganda berupa selongsong luar yang terbuat dari “High Density Poly - Ethylene” yang dipenuhi dengan gemuk (oli), maka masalah korosi pada kabel pratekan luar menjadi relatif aman dan terproteksi dengan baik.

5. Diiijinkan terjadinya retak.

Untuk elemen beton yang menggunakan total pratekan luar (tanpa kabel didalam elemen), maka keretakan pada sistem struktur betonnya masih bisa diijinkan seperti pada struktur beton bertulang, dengan tentu saja sudah memperhitungkan faktor keseimbangan tegangan untuk keamanan struktur.

6. Mudah untuk perkuatan struktur.

Untuk elemen struktur yang diperkuat, sistem pratekan luar menjadi pilihan yang menguntungkan karena pelaksanaannya yang relatif mudah tanpa banyak mengganggu elemen struktur asalnya kecuali di bagian angkur. Tentu saja dalam hal ini mutu betonnya harus memenuhi syarat minimal untuk menerima gaya prapenekan. Untuk mutu beton ini dalam Konstruksi No.242 Januari 1997 minimal adalah K250.

Akan tetapi “external prestressing” juga mempunyai kelemahan, yaitu antara lain adalah:

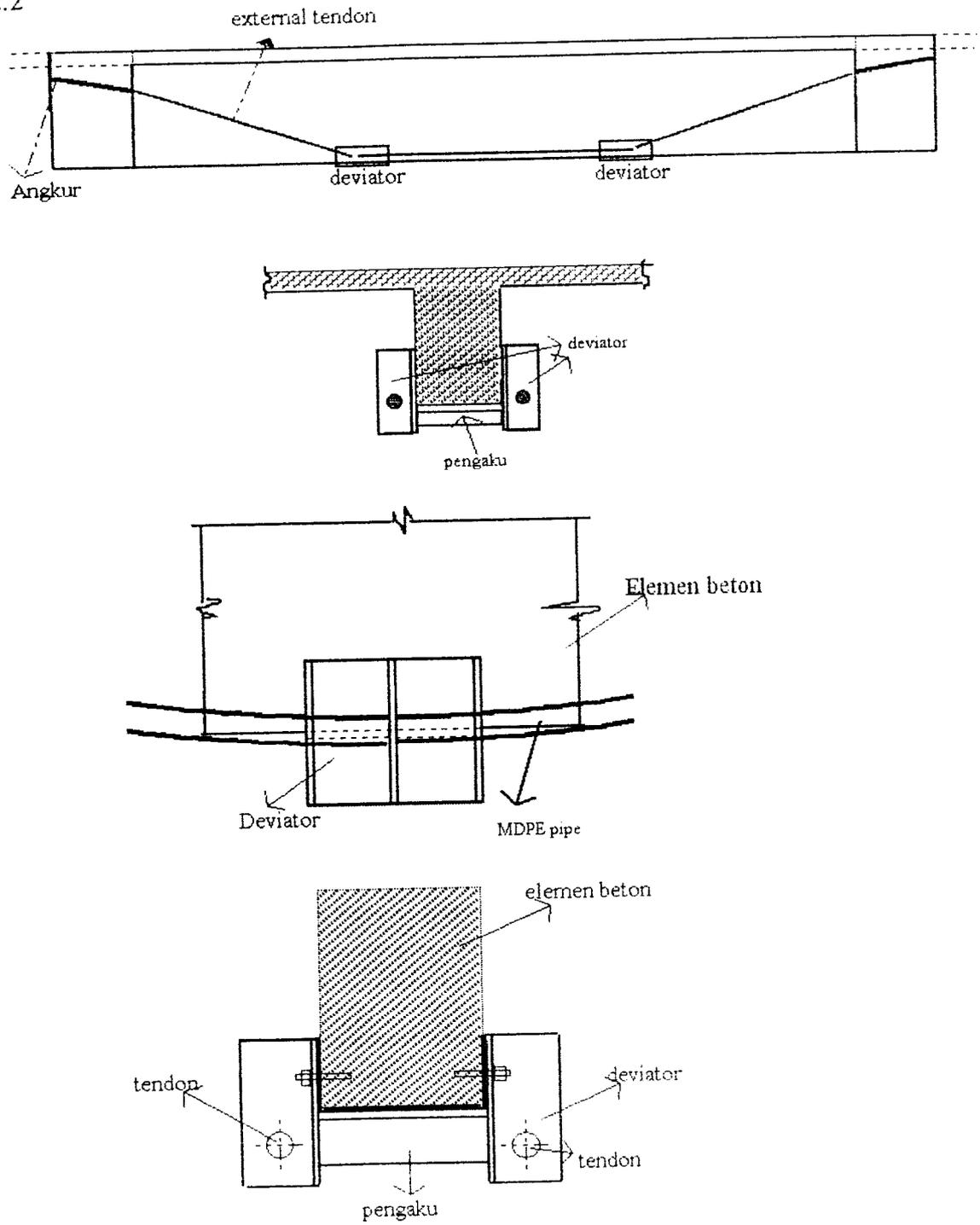
- a. rentan terhadap korosi,
- b. rentan terhadap api,
- c. rentan terhadap tindakan vandalisme.

Tendon pada Pratekan Luar tidak mengandalkan rekatan tendon terhadap beton. Dengan kata lain metode Pratekan Luar ini adalah suatu prategang tanpa rekatan (“unbonded”). Sebagai tendon tak terekat ketika beban dikerjakan pada elemen balok tersebut, tendon bebas memperpanjang diri di bawah aksi beban transversal dan bergerak relatif terhadap elemen balok tersebut.

Pratekan luar (‘eksternal prestressing’) dilakukan dengan tujuan sebagai berikut. Pertama, untuk memperbaiki defleksi struktur balok yang terlalu besar (Concrete International, Maret 1998). Kedua, untuk meningkatkan kekuatan struktur balok agar dapat memikul beban yang lebih besar dari kekuat nominal struktur tersebut (Konstruksi, no 242-Januari-A, 1997). Ketiga, untuk meningkatkan daya tahan terhadap beban seismik struktur rangka terutama struktur rangka beton bertulang (Ben Gerwick,1993). Keempat, untuk memperbaiki kapasitas geser dari balok lentur beton bertulang (FX. Supartono,1996). Untuk tujuan pertama dan kedua “external prestressing” dimaksudkan untuk mengatasi membesarnya momen lentur positif pada balok. Untuk meningkatkan ketahanan struktur terhadap beban seismik “external prestressing” dilakukan dengan memasang tendon secara diagonal bersilangan (berbentuk X). Pada balok, karena dipasang di luar elemen betonnya maka bentuk pemasangan tendon yang bisa dilakukan adalah “lay out” yang bukan parabolis. Skema

“external prestressing” untuk melawan momen lentur positif dapat dilihat pada gambar

2.2



Gambar. 2.2. Pemasangan tendon luar dan detail deviator.

“External prestressing” ini secara logis harus mempertimbangkan kekuatan elemen struktur yang akan diberi gaya prategang. Terutama karena struktur yang ada tidak direncanakan sebagai daerah pengankuran tendon prategang. Masalah yang akan dihadapi dalam pemasangan tendon ini adalah pada bagian pertemuan balok dan kolom pada kedua ujung balok. Pada bagian ini kondisi tulangan umumnya rapat. Untuk itu perlu perhitungan kembali pada bagian tersebut karena kemungkinan besar akan dilakukan pembuangan sebagian tulangan pada bagian tersebut. Hal ini tentunya akan menimbulkan berkurangnya luas tulangan dan luas beton yang mengarah pada berkurangnya kekuatan struktur tersebut. Di dalam tugas akhir ini yang akan dibahas adalah “external prestressing” untuk meningkatkan kekuatan balok yang harus menahan momen lentur positif yang lebih besar dari kekuatan nominalnya.

2.3. Konsep Dasar Beton Prategang

Menurut T.Y. Lin (1957), ada tiga konsep yang berbeda-beda yang dapat dipakai untuk menjelaskan dan menganalisis sifat-sifat dasar dari beton prategang. Hal ini penting bagi seorang perancang untuk mengerti ketiga konsep tersebut supaya dapat mendesain beton prategang seefisien mungkin. Ketiga konsep tersebut dapat diuraikan sebagai berikut ini:

1. Sistem Prategang untuk mengubah beton menjadi bahan yang elastis.

Konsep ini dikemukakan oleh Eugene Freyssinet. Beton prategang pada dasarnya adalah beton yang ditransformasikan dari bahan yang getas menjadi bahan yang elastis. Hal ini dikarenakan beton tidak mengalami retak di bagian tarik balok

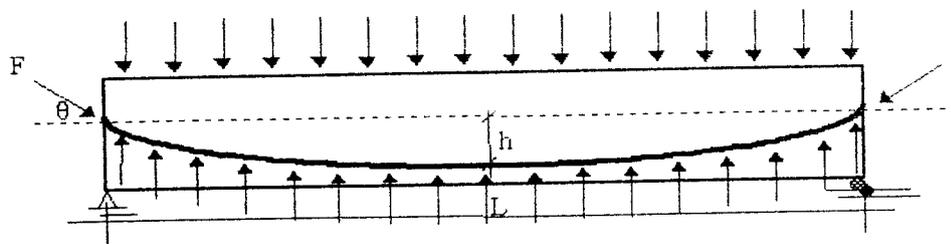
walaupun terjadi tarikan. Atas dasar pandangan ini, beton dianggap sebagai benda yang mengalami dua sistem pembebanan, yaitu: gaya internal prategang dan beban eksternal, dengan tegangan tarik akibat gaya eksternal dilawan oleh tegangan tekan akibat gaya prategang (tendon).

2. Sistem Prategang untuk kombinasi baja mutu tinggi dengan beton.

Seperti halnya pada beton bertulang, konsep ini mempertimbangkan juga kombinasi dari baja dan beton, yaitu: baja menahan tarik dan beton menahan gaya desak, dengan demikian kedua bahan membentuk kopel gaya untuk melawan momen eksternal. Kelebihan beton prategang merupakan modifikasi pemakaian beton bertulang dengan memakai baja berkekuatan tinggi.

3. Sistem Prategang untuk mencapai perimbangan beban.

Konsep ini menganggap beton sebagai benda bebas ("freebody") dan menggantikan tendon dengan gaya-gaya yang bekerja merata pada beton sepanjang bentangan, sehingga diperoleh gaya-gaya yang bekerja menjadi seimbang.



Gambar 2.3. Konsep beban berimbang dari prategang

jika F = gaya prategang,

L = panjang bentangan,

h = tinggi parabola.

Penjelasan mengenai gambar di atas adalah sebagai berikut. Mula-mula balok

prategang dianggap berada diatas dua tumpuan (simple beam) dengan tendon berbentuk parabola. Beban yang terdistribusi secara merata ke arah atas dinyatakan dalam rumus di bawah ini.

$$W_b = \frac{8Fh}{L^2} \dots\dots\dots(2-1)$$

dianggap menahan beban reaksi secara merata, sehingga beban yang bekerja adalah selisih beban di atasnya (eksternal) dengan reaksinya.

2.4. Prategang Penuh dan Prategang Sebagian

Pada awal perkembangan beton prategang, tujuan dari prapenegangan (“prestressing”) adalah menghilangkan semua gaya tarik yang terjadi pada struktur saat struktur tersebut menderita beban, yaitu dengan memakai konsep bahwa struktur adalah material homogen dan berperilaku elastis sampai dengan pada kondisi beban layan maksimum. Desain semacam ini di mana tegangan tarik pada beton saat beban layan adalah nol dinamakan prategang penuh (“full prestress”). Alternatif yang lain, yaitu: dengan mengijinkan terjadinya sejumlah tegangan tarik saat menderita beban layan disebut metoda prategang sebagian (“partial prestressing”). Menurut Lin&Burn (Lin&Burn. 1988) sebenarnya tidak ada perbedaan yang mendasar antara kedua metode tersebut. Karena, meskipun suatu struktur dapat didesain tanpa tegangan tarik pada tingkat beban kerja, struktur tersebut akan tetap mengalami tarikan pada kondisi beban berlebih (“overload”). Dengan demikian perbedaaan tersebut hanya pada menyangkut tingkatan tegangan tarik akan terjadi lebih tinggi atau lebih sering untuk

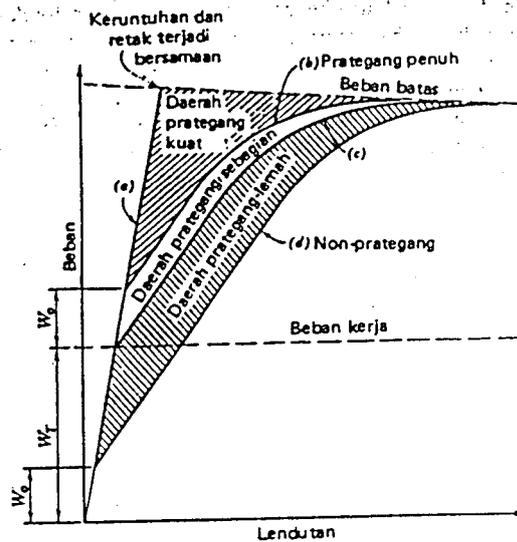
struktur yang sama apabila ia didesain dengan sebagai prategang sebagian dibandingkan apabila didesain sebagai prategang penuh.

Untuk menyediakan keamanan tambahan bagi beton prategang sebagian, tulangan non-prategang sering ditambahkan untuk memberikan kekuatan batas yang lebih tinggi, pada balok dan untuk memikul tarikan pada beton. Untuk balok yang demikian sebagian tulangan diprategangkan sebagian lagi tidak. Keadaan ini juga merupakan metode prategang sebagian, sehingga kadang-kadang prategang sebagian juga berarti salah satu atau kedua kondisi berikut ini, walaupun umumnya hanya digunakan untuk kondisi pertama saja.

1. Di bawah kondisi beban kerja, adanya tegangan tarik pada beton diijinkan.
2. Tulangan non-prategang (tulangan biasa) digunakan pada komponen struktur.

Suatu keuntungan penting dari prategang sebagian adalah berkurangnya lendutan ke atas. Metode ini juga akan mengurangi besar gaya prategang yang diperlukan pada suatu gelagar. Menurut Winter-Nilson, pengurangan gaya prategang ini tidak mempengaruhi kekuatan lentur gelagar, dengan syarat jumlah luas total dari tulangan tarik tidak dikurangi.

Gambaran mengenai hubungan lendutan dengan beban pada suatu gelagar dengan cara perkuatan yang berbeda diperlihatkan dalam grafik beban versus lendutan pada gambar 2.4 berikut ini:



Gambar 2.4. Grafik beban versus lendutan pada gelagar beton bertulang dengan berbagai macam perkuatan.

Gelagar dengan prategang sebagian diperlihatkan oleh grafik (B). Gelagar dengan prategang sebagian dapat menunda terjadinya retak sampai sesaat sebelum terjadinya beban kerja penuh. Lebih tinggi dari gelagar tanpa prategang. Untuk gelagar yang mengalami prategang penuh diperlihatkan oleh grafik (C), pada saat beban kerja besar tegangan tarik nol, dan tidak terjadi retak sampai penambahan beban selanjutnya yang memberikan tegangan yang besarnya sama dengan modulus keruntuhan. Pada gelagar yang mengalami gaya prategang berlebih (D), akan mengalami keruntuhan sebelum terjadinya beban yang menyebabkan retak, perilaku rapuh (getas) seperti ini tidak

diharapkan terjadi.

2.5. Kuat Tekan Beton

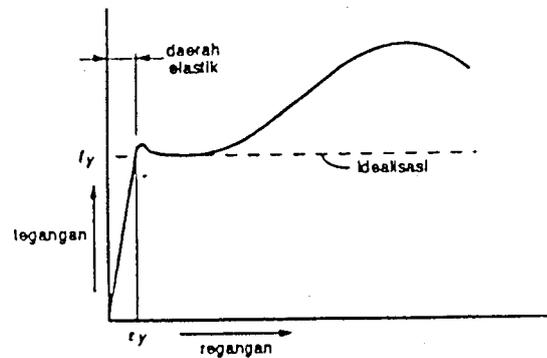
Kuat tekan beton diwakili oleh tegangan tekan maksimum f_c' dengan satuan N/mm^2 atau Mpa (Mega Pascal). Untuk struktur beton bertulang pada umumnya menggunakan beton dengan kuat tekan berkisar 17-30 MPa, sedangkan untuk beton prategang digunakan beton kuat tekan lebih tinggi berkisar antara 30-45 MPa (Istimawan,1994). Nilai kuat tekan beton didapatkan melalui tata cara pengujian standar, menggunakan mesin uji dengan cara memberikan beban bertingkat dengan kecepatan peningkatan beban tertentu atas benda uji silinder beton (diameter 150 mm, tinggi 300 mm) sampai hancur. Tegangan f_c' ini bukanlah tegangan yang timbul pada saat benda uji hancur melainkan tegangan maksimum pada saat regangan beton (ϵ_s) mencapai nilai $\pm 0,002$. Pada SK SNI T-15-1991-03 pasal 3.3.2 menetapkan bahwa regangan kerja maksimum yang diperhitungkan di serat tepi tekan terluar adalah 0,003 sebagai batas hancur.

Pada beton yang dijadikan dasar perilaku struktur saat dibebani adalah kuat tekannya f_c' ditentukan oleh kekuatan selinder beton pada umur 28 hari. Kekuatan beton mengalami perubahan sesuai dengan pertambahan usia. Menurut percobaan Rusch harga f_c' akan berkurang sebesar $0,75 f_c'$ untuk beban yang dipertahankan selama setahun.

2.6. Baja Tulangan

Dibandingkan dengan beton, baja mempunyai kekuatan tarik yang tinggi. Baja penguat, terutama pada struktur beton bertulang akan memikul gaya tarik maupun desak. Supaya pemakaian baja tulangan bisa efektif, harus diusahakan agar tulangan dan beton dapat mengalami deformasi bersama-sama, yaitu agar terdapat ikatan yang cukup kuat antara keduanya untuk memastikan tidak adanya selip antara kedua material tersebut. Untuk itu pada beton bertulang konvensional tulangan pokok biasanya memakai baja berulir.

Sifat fisik batang tulangan baja yang paling penting untuk digunakan dalam perhitungan perencanaan struktur beton adalah tegangan luluh (f_y) dan modulus elastisitas (E_s). Suatu diagram hubungan tegangan-regangan tipikal untuk baja tulangan biasa diperlihatkan dalam gambar 2.5. Tegangan luluh (titik luluh) baja ditentukan melalui prosedur pengujian standar sesuai dengan SII 0136-84 dengan ketentuan bahwa tegangan luluh adalah tegangan baja pada saat peningkatan regangan tidak disertai lagi dengan peningkatan tegangannya. Modulus elastisitas baja tulangan ditentukan berdasarkan kemiringan awal kurva tegangan-regangan di daerah elastik di mana antara mutu baja yang satu dengan yang lain tidak banyak bervariasi. Ketentuan SK SNI T-15-1991-03 menetapkan modulus elastisitas baja adalah sebesar 200.000 MPa, sedangkan modulus elastisitas untuk tendon prategang harus dibuktikan dan ditentukan melalui pengujian atau dipasok oleh pabrik produsen. Umumnya untuk tendon prategang nilai modulus elastisitasnya lebih rendah, sesuai dengan penetapan ASTM 416 biasanya dipakai nilai 186.000 MPa.



Gambar 2.5. Diagram tegangan-regangan untuk baja tulangan biasa

2.7. Tendon Pretegang

Baja mutu tinggi adalah bahan yang harus dipakai agar menghasilkan gaya prategang dan mensuplai gaya tarik pada beton. Cara pembuatan baja mutu tinggi dapat dikerjakan dengan pencampuran (“alloying”) baja dengan karbon. Semakin tinggi kadar karbon semakin kuat dan keras baja yang dihasilkan tetapi semakin kurang liat. Cara lain untuk memperbaiki sifat baja tersebut dapat dilakukan dengan beberapa cara, antara lain: pengerjaan panas (“flame hardening”) dan pengerjaan dingin (“cold work”). Pengerjaan panas dilakukan dengan cara memanasi permukaan baja sampai

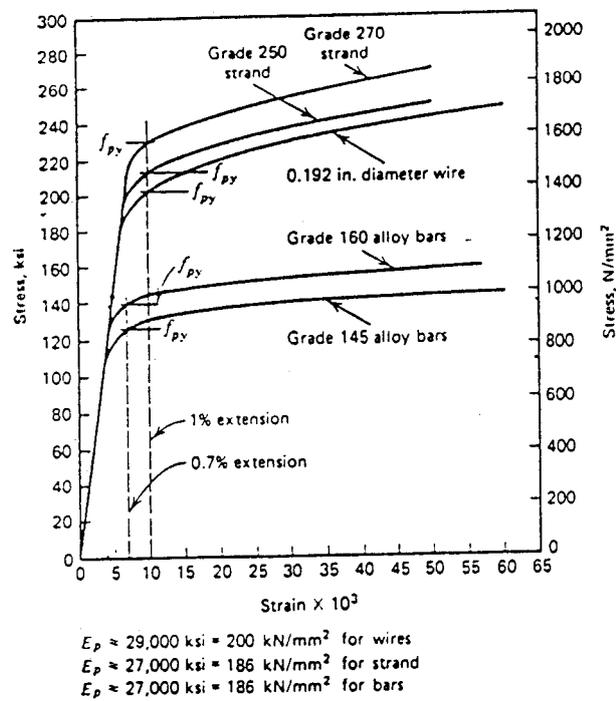
diatas suhu rekristalisasi kemudian didinginkan secara mendadak dengan cara dicelupkan ke dalam air atau minyak. Pengerjaan dingin dikerjakan dengan cara penggilasan permukaan baja oleh roda baja yang keras.

Pemakaian baja mutu tinggi untuk tendon dipilih antara tiga jenis, yaitu: kawat ("wire"), untaian kawat ("strand"), dan batang ("bar"). Tendon jenis kawat dilapangan terdapat dua bentuk, bentuk polos dan berulir, serta disuplai dalam bentuk gulungan panjang. Karena itu tendon kawat cocok digunakan untuk beton pratarik yang memerlukan rekatan langsung dengan beton. Keuntungan lainnya, karena kawat tendon sangat panjang sehingga dapat digunakan untuk membuat beberapa balok beton prategang dalam satu kali tarikan. Meskipun demikian tendon kawat dapat pula digunakan untuk beton pasca tarik tetapi dirasakan tidak efektif dibandingkan dengan tendon jenis untaian kawat ("strand")

"Strand" dibuat di pabrik dengan memuntir beberapa kawat bersama-sama sehingga dapat mengurangi jumlah satuan yang harus dikerjakan pada saat operasi penarikan tendon. Tendon jenis ini mempunyai kuat batas yang tinggi di atas 1700 Mpa. Di Amerika Serikat, "strand" dengan tujuh kawat sering digunakan dalam beton prategang baik untuk pratarik maupun pasca tarik, meskipun harganya lebih mahal daripada kumpulan kawat dengan kekuatan tarik yang sama. Tendon tujuh kawat mempunyai karakteristik rekatan dengan beton yang lebih baik dan hemat dalam penarikannya. Tendon "strand" diproduksi dalam dua "grade" yaitu Grade 250 dan Grade 270, dengan masing-masing mempunyai kuat ultimit minimum ("minimum ultimate strength") sebesar 1720 Mpa dan 1860 Mpa.

Pemakaian tendon batang di lapangan terdapat dalam bentuk polos dan ulir.

Pemakaian dalam beton prategang terbatas pada balok yang bentangnya pendek. Diameter tendon batang dimulai 25,4 mm sampai 34,9 mm dengan kekuatan tegangan tarik berkisar 1000 Mpa sampai 1600 Mpa.



Gambar 2.6. Diagram tegangan-regangan untuk baja prategang

BAB III

DESAIN BETON PRATEGANG

3.1. Kuat Lentur Gelagar Prategang

Satu yang paling penting dalam suatu struktur adalah kekuatan (“strength”) struktur tersebut, sebab kekuatan suatu anggota struktur berhubungan langsung dengan keamanannya. Nilai tambah dari suatu struktur prategang tidak otomatis terjamin oleh batas tegangan (“limiting stress”) pada tingkat beban kerja (Nilson,H Arthur,1978). Saat anggota struktur mengalami kelebihan beban, perubahan perilaku yang signifikan terjadi akibat adanya retakan, dan karena salah satu atau kedua materialnya akan mengalami penegangan (“stress”) sampai ke dalam rentang daerah inelastis sebelum keruntuhan.

Terdapat perbedaan perilaku antara gelagar beton bertulang dengan gelagar prategang. Saat beban mengalami peningkatan pada tingkat beban kerja, gaya-gaya yang membentuk kopel penahan cenderung tetap (konstan), peningkatan momen akibat pembebanan eksternal dilawan dengan penambahan lengan internalnya (z). Ketika retak terjadi, akan terjadi peningkatan yang tiba-tiba pada tegangan tendonnya, seiring dengan meningkatnya resultante tegangan desak pada beton. Selama penambahan beban sedikit, perilaku gelagar prategang lebih menyerupai gelagar beton bertulang biasa, lengan momen internalnya tetap konstan, dan peningkatan tegangan pada beton maupun pada bajanya (tendon) sebanding dengan penambahan beban. Sebagaimana

gelagar beton bertulang, kapasitas lentur dicapai ketika baja ditegangkan sampai kuat batasnya ("ultimate strength"), atau ketika kapasitas regangan tekan tercapai.

Disamping pada pembebanan dekat dengan kekuatan batasnya, ada perbedaan penting antara gelagar prategang dengan gelagar beton bertulang biasa, yaitu sebagai berikut : (1) pada beton bertulang biasa, jika beban sama dengan nol maka regangan pada tulangan adalah nol, pada beton prategang regangan tendon jika beban nol adalah tidak nol, akan tetapi berhubungan dengan gaya prategang setelah terjadi kehilangan prategang. Tiap penambahan regangan pada baja akibat beban ditambahkan terhadap regangan yang ada tersebut, (2) karakteristik hubungan tegangan-vs-regangan pada baja prategang berbeda dengan pada baja tulangan. Baja prategang tidak menunjukkan titik leleh ("yield plateau") yang pasti. Baja prategang akan meleleh secara bertahap, dan dalam rentang inelastis, kurva tegangan-regangan akan meningkat perlahan sampai kekuatan tariknya tercapai. Untuk tendon prategang batas tegangan baja yang digunakan untuk analisis dan desain adalah; f_{pe} yaitu tegangan baja prategang akibat gaya prategang efektif, f_{py} tegangan leleh baja prategang yang didefinisikan sebagai tegangan pada perpanjangan ("elongation") 1% baja prategang, f_{pu} tegangan tarik batas yang dijamin untuk baja prategang saat kekuatan batas tercapai ("ultimate tensile strength"), f_{ps} adalah tegangan baja pada keadaan beban batas ("ultimate stress in prestressing steel"). Selisih antara tegangan leleh nominal f_{py} dengan tegangan ultimit f_{pu} pada baja prategang jauh lebih kecil dari baja tulangan. Jadi perpanjangan total ("total elongation") ϵ_{pu} saat runtuh juga lebih kecil.

Untuk betonnya, kuat tekan beton f_c' adalah sama dengan definisi pada beton bertulang dan regangan runtuhnya ϵ_{cu} . Pengukuran regangan beton saat keruntuhan memperlihatkan bahwa ϵ_{cu} mempunyai harga antara 0,003 sampai 0,004. Peraturan ACI memberikan harga sebesar 0,003 untuk perencanaan dan analisis.

3.2. Blok Tekan Ekuivalen untuk Beton

Untuk analisis luas tekan beton pada kondisi kekuatan batas prategang disederhanakan dalam bentuk blok tekan ekuivalen dengan besar kuat tekan beton sama dengan $0,85 f_c'$ dan kedalaman blok tekan sebesar a . Hubungan antara blok tekan ekuivalen dan aktual diberikan dengan persamaan

$$a = \beta_1 \cdot c$$

Dengan harga β_1 ditetapkan secara eksperimental sebesar $\beta_1 = 0,85$ dan untuk tiap pertambahan 1 MPa di atas 30 MPa $\beta_1 = 0,85 - 0,008 (f_c' - 30)$.

3.3. Kuat Lentur dengan Analisis Kompatibilitas Regangan

Tegangan yang dihasilkan oleh gaya prategang efektif yang bekerja sendiri adalah sebagai berikut $f_{pe} = \frac{P_e}{A_p}$ (3-1)

$$\epsilon_1 = \epsilon_{pe} = \frac{f_{pe}}{E_p} \dots\dots\dots(3-2)$$

dengan E_p = modulus elastisitas baja prategang. Selanjutnya pada beban menengah, akibat adanya pengurangan tekanan (“decompression”) beton pada ketinggian titik berat baja prategang, regangan diekspresikan dengan

$$\varepsilon_2 = \frac{P_t}{A_c E_c} \left(1 + \frac{e_2}{r_2} \right) \dots\dots\dots (3-3)$$

ketika gelagar mengalami “overload” sampai ke tingkat keruntuhan, garis netral gelagar akan sejarak c di bawah tepi atas dari gelagar. Peningkatan regangan adalah

$$\varepsilon_3 = \varepsilon_{cu} \dots\dots\dots (3-4)$$

3.4. Desain Gelagar Prategang dengan “Ultimate strength Design Methode”

Analisis tegangan lentur komponen prategang dilakukan untuk beberapa tingkat pembebanan yang berbeda. Pada suatu struktur pasca tarik melalui tahap-tahap sebagai berikut: pertama, tahap beban kerja awal, yaitu periode selama pelaksanaan penarikan termasuk saat pelimpahan tegangan terhadap beton. Kedua, tahap pelayanan beban kerja, terjadi setelah kehilangan gaya prategang, di mana yang diperhitungkan adalah beban mati dan beban hidup ditambah gaya prategang. Tahap terakhir, adalah tahap kuat batas di mana diperhitungkan seluruh beban dan faktor-faktor pembatas kekuatan yang ada termasuk peninjauan terhadap retak.

Apabila pada penampang beton bertulang mencapai keadaan keseimbangan regangan, maka secara bersama-sama tercapai regangan beton $\varepsilon_b = 0,003$ di serat tepi tertekan dan regangan tulangan baja tarik mencapai luluhnya. Pada beton prategang, karena titik luluh baja kuat tinggi tidak jelas letaknya maka konsep keruntuhan berimbang berubah. Akan tetapi dalam SK SNI T-15-1991- 03 pasal 3.11.3 bahwa untuk perencanaan kekuatan komponen struktur pratekan terhadap gaya lentur dan aksial didasarkan pada asumsi dalam ayat 3.3.2.

Dalam SK SNI T-25-1991- 03 juga memperhitungkan keadaan prategang sebagian dimana pengaruh tulangan non prategang juga dipertimbangkan. Dalam peraturan ini kriteria batas rasio antara baja tulangan prategang dan tulangan non prategang adalah:

$$\omega_p = \frac{\rho_p f_{ps}}{f_c} = 0.36\beta_1 \dots\dots\dots(3-5)$$

dengan: β_1 = konstanta yang merupakan fungsi kelas mutu beton,

$$\rho_p = \frac{A_{ps}}{bd} = \text{rasio penulangan baja prategang,}$$

f_{ps} = tegangan dalam tulangan prategang bila kuat momen M_n dicapai.

Dengan demikian syarat persamaan menjadi:

$$\frac{\rho_p f_{ps}}{f_c} \leq 0,36\beta_1 \dots\dots\dots(3-6)$$

Menurut G. Nawy (1996) langkah untuk mendesain gelagar prategang dengan metode ultimate strength desain.

1. Dihitung luas pendekatan untuk tendon dengan persamaan sebagai berikut:

Diasumsikan kuat nominal tendon prategang $f_{ps} = 0,9f_{pu}$, dengan f_{pu} = kuat tarik yang disyaratkan untuk tendon prategang, maka luas perlu tendon prategang adalah:

$$A_p = \frac{M_n}{0,9 f_{pu} (0,8h)} \dots\dots\dots(3-7)$$

2. Dihitung nilai tegangan tendon pada kuat nominal f_{ps} .

Untuk menghitung f_{ps} dibatasi dengan $f_{ps} \geq 0,5f_{pu}$. Rumus pendekatan untuk tegangan tendon pada SK SNI T 1115-03-1991, yaitu:

$$f_{ps} = f_{pe} + 70 + \frac{f_c'}{100 \rho_p} \dots\dots\dots(3-8)$$

untuk $L/d_p \leq 35$ dan

$$f_{ps} = f_{pe} + \frac{f_c'}{300 \rho_p} \dots\dots\dots(3-9)$$

untuk $L/d_p > 35$ hanya berlaku untuk nilai $f_{pe} \geq 0,5f_{pu}$.

Jika $f_{pe} < 0,5f_{pu}$ maka f_{ps} dicari dengan kompatibilitas regangan. Persamaan-persamaan tersebut diatas harus memenuhi syarat-syarat sebagai berikut:

- a. Untuk persamaan (3-8) $f_{ps} \leq 0,5f_{py}$
 $\leq f_{pe} + 400$
- b. Untuk persamaan (3-9) $f_{ps} \leq 0,5f_{py}$
 $\leq f_{pe} + 200$

Dihitung apakah penampang harus diperhitungkan sebagai tampang persegi atau tampang bersayap (tampang T,I) dengan mencari posisi garis netral $c = \frac{a}{\beta_1}$

Jika tampang persegi, maka:

$$a = \frac{A_{ps} f_{ps} + A_s f_y - A_s' f_y}{0,85 \cdot f_c' \cdot b_w} \dots\dots\dots(3-10)$$

sedangkan untuk tampang bersayap, adalah:

$$a = \frac{A_{pw} f_{ps}}{0,85 \cdot f_c' \cdot b_w} \text{ dimana :}$$

$$A_{pw} \cdot f_{ps} = A_{ps} \cdot f_{ps} + A_s \cdot f_y - 0,85 \cdot f_c' \cdot (b - b_w) h_f \dots\dots\dots(3-11)$$

dengan A_{pw} = luas tampang desak pada badan balok,

b = lebar sayap(lebar efektif balok),

b_w = lebar badan balok.

3. Dibandingkan besar h_f terhadap a atau c . Apabila $h_f > c$ dan $h_f > a$, maka elemen dianalisis sebagai tampang persegi dengan tulangan sebelah atau rangkap.

4. Dicari indeks penulangan ω_p , ω dan ω' untuk kasus $a < h_f$, dengan menggunakan tampang persegi, dengan:

a. Tampang persegi dengan tendon prategang saja.

$$\omega_p = \rho_p \frac{A_{ps} f_{ps}}{b \cdot d \cdot f_c'} \dots\dots\dots(3-12)$$

b. Tampang persegi dengan tulangan non prategang saja baik tanpa tulangan desak maupun dengan tulangan desak.

$$\omega_p = \rho_p \frac{A_{ps} f_{ps}}{b \cdot d \cdot f_c'} \dots\dots\dots(3-13)$$

Apabila indeks total pada persamaan (3-12) dan (3-13) lebih kecil dari $0,36\beta_1$, maka momen nominal balok adalah:

$$M_n = A_{ps} \cdot f_{ps} \cdot (d_p - \frac{a}{2}) + A_s \cdot f_y \cdot (d - \frac{a}{2}) + A_s' \cdot f_y \cdot (\frac{a}{2} - d') \dots\dots\dots(3-14)$$

Indeks penulangan ω_{pw} , ω_w dan ω_w' untuk $a > h_f$ dengan persamaan

$$\omega_T = \omega_{pw} + \frac{d}{d_p} (\omega_w - \omega_w') \dots \dots \dots (3-15)$$

Indeks tersebut dihitung berdasarkan lebar badan balok b_w . Jika indeks total tulangan $\omega_T < 0,36\beta_1$, maka:

$$M_n = A_{pw} \cdot f_{ps} \left(d_p - \frac{a}{2}\right) + A_s \cdot f_y (d - d_p) + 0,85 f_c' (b - b_w) h_f \left(d_p - \frac{h_f}{2}\right) \dots \dots \dots (3-16)$$

dengan $a = \frac{A_{pw} f_{ps}}{0,85 f_c' b_w}$ dan $A_{pw} f_{ps} = A_{ps} f_{ps} + A_s f_y - 0,85 f_c' (b - b_w) h_f$.

Apabila indeks penulangan total $\omega_T > 0,36\beta_1$, maka gelagar mempunyai penampang bertulangan kuat dan kuat nominalnya adalah:

$$M_n = f_c' b_w d_p^2 (0,36\beta_1 - 0,008\beta_1^2) + 0,85 f_c' (b - b_w) h_f (d_p - 0,5h_f) \dots \dots (3-17)$$

BAB IV
DESAIN dan ANALISIS
“EXTERNAL PRESTRESSING”

4.1. Tinjauan Umum

Metode “External Prestressing” ini pada prinsipnya termasuk dalam metode pasca tarik dengan tendon tak terikat (“unbonded tendon”). Satu hal yang perlu diperhatikan adalah bahwa balok beton bertulang tidak direncanakan sebagai struktur prategang, oleh karena itu kemungkinan besar tidak memenuhi kriteria perencanaan tampang ideal yang dipakai dalam perencanaan struktur prategang. Maka dalam tugas akhir ini dalam penentuan desain tendon prategangnya dilakukan dengan metode desain berdasarkan kekuatan batas.

Seperti telah diuraikan di depan penambahan baja prategang pada struktur gelagar beton bertulang akan bermanfaat bagi momen positifnya. Di dalam tugas akhir ini yang akan menjadi obyek analisis adalah:

1. Pertambahan momen nominal yang terbesar dengan mempergunakan metode beban batas, dengan membandingkan dengan momen nominal tanpa tendon.
2. Efektifitas tulangan beton pada gelagar.

Untuk itu dalam tugas akhir ini analisis dilakukan terhadap beton bertulang dengan dimensi tertentu dan luas tulangan tertentu yang memenuhi syarat standar SK SNI T15-03-1991. Dengan kata lain gelagar beton bertulang dengan kuat

lentur tertentu yang didapatkan dari analisis kekuatan batas gelagar di mana gelagar tersebut telah memenuhi syarat standar SK SNI T 15-03-1991.

4.2. Metode Desain yang Digunakan untuk Perencanaan Tendon Patekan Luar

Dalam tugas akhir ini pendekatan desain yang digunakan untuk perencanaan tendon patekan luar berdasarkan metode “ultimate strength design”. Langkah ini dilakukan karena metode desain untuk “external prestresing” belum ada dalam peraturan-peraturan desain.

Pada struktur yang direncanakan dengan metode beban batas, struktur tersebut diharapkan akan menerima beban maksimum sebesar beban kali koefisien beban, seperti yang disyaratkan dalam peraturan, selama masa berdirinya. Sekarang permasalahannya apabila beban pada struktur tersebut oleh karena sebab-sebab yang telah disebutkan di awal harus mendukung beban yang lebih besar dari besar beban rencana. Sesuai dengan yang dibahas di awal, bahwa dalam perencanaan dengan metode kekuatan batas, metode itu didasarkan pada nilai regangan runtuh beton sebesar 0,003. Sebenarnya nilai regangan runtuh tersebut tidak dapat ditentukan dengan pasti, tapi dari hasil pengujian pada gelagar persegi nilai tersebut berkisar antara 0,003 sampai 0,004 (Nilson-Winter,1993), dan meskipun konservatif ditetapkan sebesar 0,003.

4.3. Kuat Tarik yang didisyaratkan untuk Tendon Prategang

Tendon yang dipakai dalam analisis adalah tendon tipe “strand”. Tendon tipe “strand ini diproduksi dalam dua “grade”, yaitu grade 250 ($f_{pu} = 250 \text{ ksi} = 1720 \text{ Mpa}$) dan grade 270 ($f_{pu} = 270 \text{ ksi} = 1860 \text{ Mpa}$). Nilai f_{pu} ini digunakan untuk mengasumsikan tegangan leleh tendon prategang $f_{py} = 0,8 f_{pu}$. Dalam perhitungan dipakai “strand” grade 270.

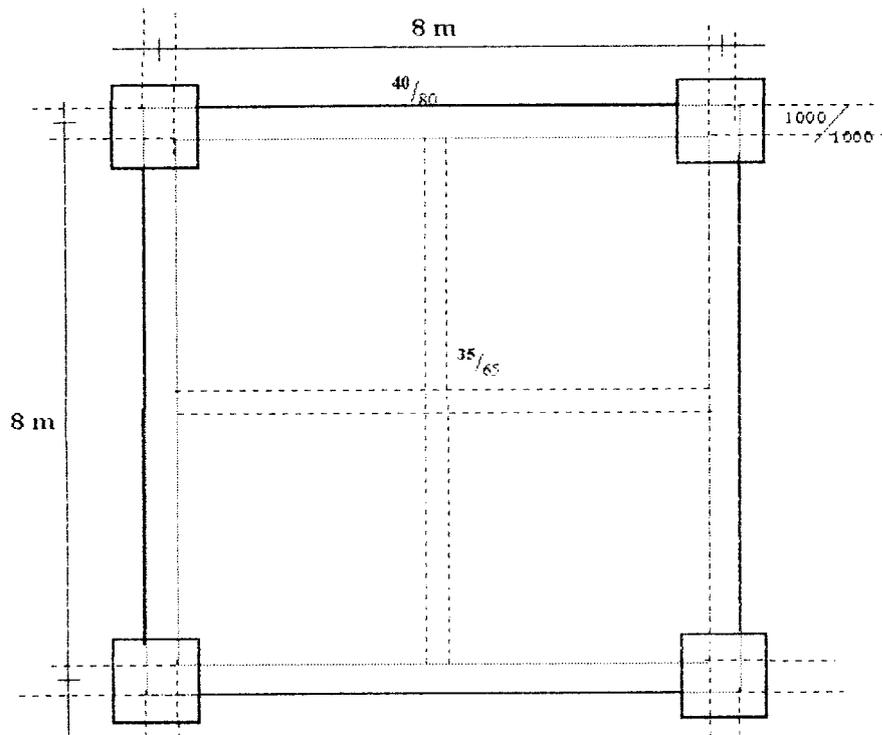
4.4. Tegangan efektif f_{pe}

Tegangan efektif tendon f_{pe} ditentukan berdasarkan batas tegangan efektif tendon yang memenuhi persamaan pendekatan untuk menentukan besarnya tegangan tendon saat kuat nominal struktur tercapai f_{ps} , yaitu sebesar $0,5 f_{pu}$. Penentuan nilai tegangan efektif ini dilakukan persamaan tegangan tendon dalam SK SNI T 15-03-1991 maupun yang ada dalam peraturan ACI tersebut mewakili nilai-nilai tegangan yang dihasilkan oleh suatu struktur prategang tanpa rekatan. Nilai tegangan efektif f_{pe} ini yang menentukan besarnya gaya prategang efektif yang diperlukan.

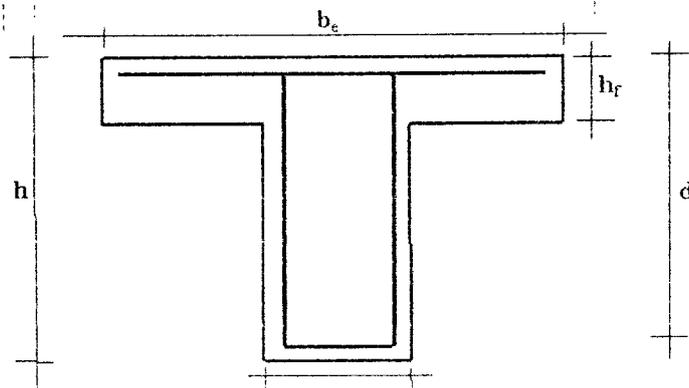
4.5. Analisis Penambahan Tendon Eksternal Prestressing pada Gelagar Beton Bertulang

Untuk lebih mempermudah, diambil suatu gelagar lentur dari sebuah gedung yaitu Plasa Simpang Lima Semarang. Dari struktur gedung tersebut diambil suatu ruangan yang terdiri dari balok dan kolom seperti gambar 4.1 berikut ini. Di sini

akan direncanakan agar balok-balok induk yang ada dapat ditingkatkan kapasitasnya dengan “external prestressing”. Data-data balok tersebut adalah sebagai berikut;



Gambar 4.1 Denah balok dan kolom



Gambar 4.2 Dimensi tampang balok

Diambil sebuah balok dengan tampang T dengan data-data sebagai berikut:

- dimensi : - $b_e = 2000 \text{ mm}$ - mutu bahan : - beton : $f'_c = 30 \text{ Mpa}$
- $b_w = 400 \text{ mm}$ - baja : $f_y = 400 \text{ Mpa}$
- $h = 800 \text{ mm}$ - Modulus elastisitas: $E_c = 4700 \sqrt{f'_c} = 25743 \text{ Mpa}$
- $h_f = 120 \text{ mm}$ $E_s = 200000 \text{ Mpa}$
- $d = 650,500 \text{ mm}$ $A_c = 512000 \text{ m}^2$
- $d' = 67 \text{ mm}$
- $\beta_1 = 0,85$

-Tulangan: $A_s = 4420 \text{ mm}^2$ -----> 9 D 25

$A_s' = 2455 \text{ mm}^2$ -----> 6 D 25

- Panjang bentang $L = 7200 \text{ mm}$

- Ditinjau dengan dukungan jepit-jepit.

4.5.1 Analisis Kuat Lentur Balok Beton Bertulang

1. Kedalaman blok tekan $a = \frac{A_s f_y}{0,85 \cdot f'_c \cdot b} = \frac{4420 \cdot 400}{0,85 \cdot 30 \cdot 2000} = 34,6639 \text{ mm}$
2. Letak garis netral (c), $c = \frac{a}{\beta_1} = 40,7810 \text{ mm}$, jika $a < h_f$ dianalisis sebagai

tampang I,

$a > h_f$ dianalisis sebagai

tampang bersayap.

3. Pemeriksaan regangan:

$$\varepsilon_y = \frac{f_y}{E_s} = \frac{400}{200000} = 0,0020$$

$$\varepsilon_s = \frac{(d - c)}{d} (0,003) = \frac{(650,500 - 40,7810)}{650,500} (0,003) = 0,0449$$

$$\varepsilon_s' = \frac{(c - d')}{c} (0,003) = \frac{(40,7810 - 67)}{40,7810} (0,003) = -0,0019$$

Karena regangan desak yang terjadi lebih kecil dari regangan leleh baja maka analisisnya menjadi sebagai berikut :

dengan melakukan beberapa substitusi

$$A_s \cdot f_y = (0,85 f_c') b \cdot \beta_1 \cdot c + 0,003 \left(\frac{d-c}{c} \right) E_s \cdot A_s'$$

dengan memasukan $E_s = 200000$ Mpa didapatkan persamaan sbb:

$$(0,85 f_c' \cdot b \cdot \beta_1) c^2 + (600 \cdot A_s' - A_s \cdot f_y) c - 600 \cdot d' \cdot A_s' = 0$$

maka letak garis netral dihitung dengan persamaan tersebut

$$c = 51,0586 \text{ mm}$$

$$f_s' = \frac{(c - d')}{c} 600 = 181,4550 \text{ MPa} < f_y$$

maka ,

$$a = 43,40 \text{ mm}$$

$$M_{n1} = N_{D1} \cdot \left(d - \frac{a}{2} \right) = 1505,6889 \text{ kNm}$$

$$M_{n2} = N_{D2} \cdot (d - d') = 206,8584 \text{ kNm}$$

Sehingga momen nominal balok tersebut adalah;

$$M_n = M_{n1} + M_{n2} = 1712,5473 \text{ kNm}$$

4. Kontrol daktilitas balok

Perhitungan A_s' efektif yang berlaku

$$N_{T2} = N_{D2}$$

$$A_{s2} \cdot f_y = A_s' \cdot f_s'$$

$$A_{s2} = \frac{A_s' \cdot f_s'}{f_y} = 885,5241 \text{ mm}^2,$$

$$A_{s1} = A_s - A_{s2} = 3534 \text{ mm}^2.$$

untuk pasangan kopel beton tekan dengan tulangan baja tarik

Sedangkan rasio tulangan maksimum:

$$\rho_{maks} = \frac{600(d)}{f_y + 600} (0.75) \frac{(0.85 \cdot f_c') \beta_1}{f_y} = \frac{600(445)}{300 + 600} (0.75) \frac{(0.85 \cdot 27.5) 0.85}{300} = 0,15$$

$$\rho = \frac{A_{s1}}{b \cdot d} = 0,0025 < 0,75 \rho_b = 0,02438 \text{ jadi daktilitas balok tersebut}$$

terpenuhi.

5. Menentukan momen inersia retak:

Balok tersebut mempunyai nilai $n = 8$, letak garis netral pada kondisi elastis adalah dipenuhi dengan persamaan berikut ini :

$$f(y) = \left(\frac{1}{2}\right) b y^2 - n A_s d + n A_s' y = 0$$

didapatkan $y = 147,8783 \text{ mm}$. Momen inersia untuk gelagar lentur dengan tulangan rangkap adalah:

$$I_{cr} = (1/3) b_c y^3 + n A_s (d - y)^2 + n A_s' (d - d')^2 = 1,65E+10 \text{ mm}^4.$$

6. Menentukan momen retak:

$$M_{cr} = \frac{f_r I_g}{y_t}, \text{ dengan } f_r = 0.7 \sqrt{f_c'} = 3,83406 \text{ Mpa}$$

y_t = jarak dari garis netral penampang utuh (mengabaikan tulangan baja) ke

serat tepi tertarik.

$$y_t = \frac{b_w \frac{1}{2} (h - h_f)^2 + b_c h_f (h - \frac{1}{2} h_f)}{b_w (h - h_f) + b_c h_f} = 527,5000 \text{ mm.}$$

a. jarak garis netral flens terhadap garis $y_t = 212,5000 \text{ mm}$

b. jarak garis netral badan balok terhadap $y_t = 187,5000 \text{ mm.}$

$$I_g = \frac{1}{12} b_w (h - h_f)^3 + b_w (h - h_f) (y_t - 0.5(h - h_f))^2 + \frac{1}{12} b_c h_f^3 + b_c h_f \{(h - y_t) - 0.5h_f\}^2$$

$$= 3,117E+10 \text{ mm}^4.$$

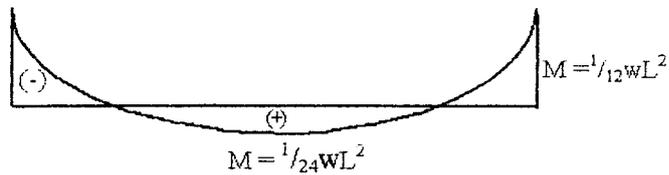
Sehingga momen retak $M_{cr} = 226,5479 \text{ k Nm.}$

4.5.2. Perhitungan Lendutan Balok Beton Bertulang

Beban yang diperkenankan menurut SK SNI adalah beban terfaktor sebesar :

$$U = 1,2 D + 1,6 L$$

Jika perbandingan beban diambil $D : L$, adalah 1 banding 4 maka apabila momen nominal $M_n = 1712,5473 \text{ kNm}$. Momen eksternal akibat beban terfaktor yang diperkenankan oleh SK SNI $M_u = \phi M_n$, jadi besarnya momen eksternal, $M_u = 1370,0378 \text{ kNm}$, nilai ini adalah besarnya momen maksimum akibat beban luar terfaktor yang diperkenankan untuk didukung oleh struktur tersebut. Pada gelagar dengan dukungan yang berupa jepit-jepit, distribusi momen yang terjadi adalah sebagai berikut:



Gambar 4.2 Diagram momen pada gelagar dengan dukungan jepit-jepit

Momen pada daerah lapangan (momen positif) $M = \frac{1}{24} w_u L^2$, maka pada daerah

momen lapangan beban w_u yang diperkenankan adalah :

$$w_u = \frac{12M_u}{L^2} = \frac{12 \cdot 1370,0378}{7,2^2} = 317,1384 \text{ kN/m'}$$

Oleh karena itu jika struktur

digunakan beton normal dengan berat jenis = 24 kN/m^3 , berat sendiri struktur

$$w_o = 12,2880 \text{ kN/m'}$$

Dengan perbandingan beban $w_L = 4w_D$ maka :

$$w_u = 1,2w_D + 1,6(4w_D) = 7,6w_D,$$

Sehingga didapatkan beban mati $w_D = 139,9140 \text{ kN/m'}$,

$$\text{beban hidup } w_L = 93,2760 \text{ kN/m'}$$

$$w_D + w_L = 233,1900 \text{ kN/m}$$

Momen maksimum ketika 100% beban eksternal maksimum bekerja adalah

$$M_a = 503,6904 \text{ kNm}$$

a. Momen Inersia efektif $I_e = \left(\frac{M_a}{M_s} \right)^3 I_g + \left\{ 1 - \left(\frac{M_a}{M_s} \right)^3 \right\} I_{cr} \leq I_g = 1,783E+10 \text{ mm}^4 <$

$$I_g \dots \dots \text{OK}$$

b. Lendutan seketika:

$$\Delta = \frac{kM (l_n)^2}{E_e I_e} = \dots \dots \dots ?$$



$$\text{Pada 100\% beban kerja } \Delta = \frac{M_a(8)^2}{384.E_c I_e} = 1,8288E-07 \text{ mm}$$

$$l_n/180 = 44,4444 \text{ mm} > \Delta$$

$$l_n/360 = 22,2222 \text{ mm} > \Delta$$

c. Lendutan jangka panjang :

$$M_{LL} = 248,7360 \text{ kNm}$$

$$M_{DL} = 373,1040 \text{ kNm} : \lambda = \frac{\xi}{1 + 50\rho'} = 2,0000$$

$$\Delta_{LL} = 0,0903 \text{ mm}$$

$$\Delta_{DL} = 0,1355 \text{ mm}$$

$$\text{rasio tulangan desak } \rho' = \frac{A_s'}{b.d} = 0,0019$$

sehingga lendutan jangka panjang dari balok tersebut adalah ;

$$\Delta_{LT} = \Delta_{LL} + \lambda(\infty)\Delta_{DL} + \lambda(t)\Delta_{SL} = 0,523501 \text{ mm}$$

$$l_n/480 = 16,6667 \text{ mm} > \Delta$$

$$l_n/204 = 33,3333 \text{ mm} > \Delta$$

4.5.3. Analisis Geser Balok Beton Bertulang

Gaya geser akibat beban luar terfaktor V persamaan umumnya

$$V = \frac{1}{2}.w_u.L - w_u.x,$$

untuk gaya geser ekstrim V_{maks} terletak pada dukungan sehingga $x = 0$, jadi

$$V_{maks} = V_u = \frac{1}{2}.w_u.L = \frac{1}{2}.317,1384.7200 = 1141,6982 \text{ kN.}$$

Pada balok ini sengkang yang dipakai adalah baja diameter 12 mm dengan $f_y = 400$

MPa. Menurut SK SNI pasal 3.4.3 :

1. Kuat geser V_c beton:

$$V_c = \frac{1}{2} \left(\sqrt{f_c'} + 120 \rho_w \frac{V_u d}{M_u} \right) b_w d \quad , \text{ dengan } \rho_w = \frac{A_s}{b_w d}$$

$$V_c = 244,667 \text{ kN} \qquad \rho_w = 0,0169856$$

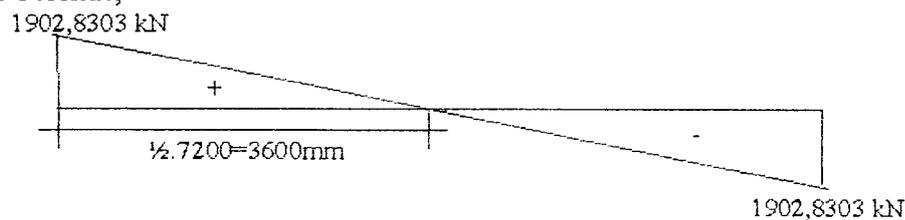
Kuat geser nominal (V_n) yang diperlukan untuk menahan gaya geser V_u minimal

adalah sebesar $V_n \geq \frac{V_u}{\phi} = \frac{1141,6982}{0,6} = 1902,8303 \text{ kN}$. Kuat geser nominal (V_n)

adalah jumlah dari kuat geser beton dan baja $V_n = V_c + V_s$, sehingga kuat geser baja yang diperlukan ;

$$V_{s \text{ perlu}} = V_n - V_c$$

Untuk menentukan berapa besar spasi tulangan sengkang, dilakukan perhitungan sebagai berikut;



Panjang $\frac{1}{2}L$ dari bentang balok dibagi menjadi 10 pias = 360 mm, sehingga dari kuat geser nominal pada masing-masing pias tersebut dapat diperoleh V_s , kemudian dengan persamaan dapat diketahui luas tulangan geser minimal dan spasi maksimal yang diperlukan untuk masing-masing pias. Dengan mengambil sengkang berdiameter 12mm dan kuat leleh 400 Mpa, selanjutnya dikontrol apakah $V_s > (\sqrt{f_c'/3})b_w d$, jika ya maka spasi maksimum $\leq (d/2 - 0,5.d/2) = 162,625 \text{ mm}$.

$$(\sqrt{f_c}'/3)b_w.d = 475,058 \text{ kN}$$

Perhitungan tulangan geser tersebut ditabelkan pada tabel 4.1

Tabel 4.1 Perhitungan kebutuhan sengkang,

x milimeter dari tumpuan	V_u $=1/2 \cdot w \cdot L - w \cdot x$ (kN)	V_n $= \frac{V_u}{\phi}$ (kN)	V_c (kN)	V_s $= V_n - V_c$ (kN)	A sengkang (mm ²)		spasi perlu (mm)	spasi sengkang (mm)
3600	0	0	244.6674	-	2x12	452.303	-	160
3240	114.17	190.283	244.6674	-	2x12	452.303	-	160
2880	288.34	380.566	244.6674	135.899	2x12	452.303	866.008	160
2520	342.509	570.848	244.6674	326.181	2x12	452.303	360.810	160
2160	456.769	761.282	244.6674	516.614	2x12	452.303	227.809	160
1800	570.849	951.415	244.6674	706.748	2x12	452.303	166.522	160
1440	685.019	1141.6983	244.6674	897.031	2x12	452.303	131.199	130
1080	799.189	1331.9817	244.6674	1087.314	2x12	452.303	108.238	100
720	913.359	1522.265	244.6674	1277.598	2x12	452.303	92.118	90
360	1027.528	1712.5467	244.6674	1467.879	2x12	452.303	80.176	80
0	1141.698	1902.83	244.6674	1658.163	2x12	452.303	70.976	70

Kuat geser baja dengan spasi sengkang terpasang :

$$V_s = \frac{A_s \cdot f_y \cdot d}{s} = \frac{452,5714 \cdot 400 \cdot 650,5}{70} \cdot 10^{-3} = 1682,2727 \text{ kN}$$

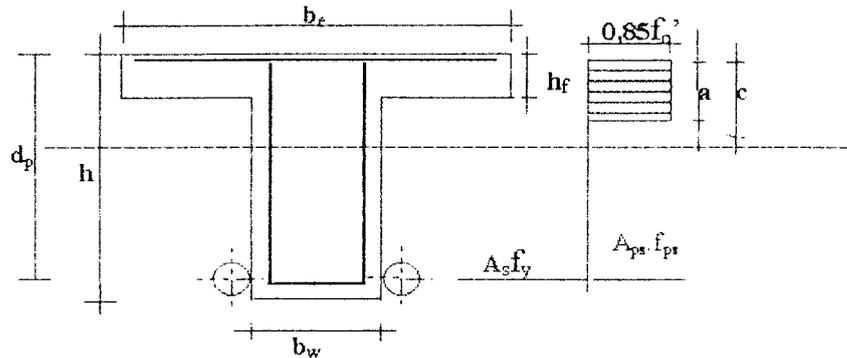
ternyata kuat geser sengkang yang ada lebih besar dari kuat geser tulangan minimum (V_s minimum) yang diperlukan, jadi struktur aman terhadap gaya geser akibat beban luar.

4.6 Desain dan Analisis Penambahan Tendon Luar

Pertama kali kedalaman tendon eksternal diambil sama dengan tinggi efektif balok yaitu $d_p = d = 650,500 \text{ mm}$. Momen nominal balok beton bertulang $M_o = 1712,5473 \text{ kNm}$.

Untuk mengetahui berapa penambahan momen nominal yang dihasilkan

dengan penambahan tendon luar diambil $M_n = M_o = 1712,5473$ kNm. Sebagai asumsi awal



Gambar 4.3. Tampang penempatan tendon prategang pada balok
tegangannya tendon saat mencapai kekuatan batas $= 0,9 f_{pu}$ dicoba dipakai tendon strand tujuh kawat dengan grade 270, $f_{pu} = 1860$ Mpa.

4.6.1. Desain Tendon dan Analisis Momen Nominal Balok

1. Kebutuhan tendon A_p perlu :

$$A_{ps \text{ perlu}} = \frac{M_n}{0,9 f_{pu} \cdot d_p} = \frac{1712,5473 \cdot 10^6}{0,9 \cdot 1860 \cdot 650,5} = 2359,017 \text{ mm}^2$$

Di sini dipakai tendon strand diameter nominal $\frac{3}{8}$ in, dengan luas nominal tendon $A_p = 0,08 \text{ in}^2 = 51,6128 \text{ mm}^2$.

$$\text{Jumlah tendon (n)} = \frac{1517,678}{51,6128} = 30,4707.$$

Dipakai tendon sejumlah 30 buah atau 2 x 15 strand tujuh kawat grade 270

2. Luas beton desak A_c' perlu :

$$A_c' \text{ perlu} = \frac{M_n}{0,68 f_c' h} = 104935,5 \text{ mm}^2$$

$$\text{Tinggi blok tekan } a = \frac{A_c' \rho_{ps} h}{b_e} = 52,4677 \text{ mm}$$

3. Nilai pendekatan untuk tegangan tendon :

Diambil $f_{pe} = 0,5f_{pu} = 930 \text{ MPa}$, sedangkan rasio $L/d_p = 8000/d_p$

$$= 11,0684 < 35$$

$$f_{ps} = f_{pe} + 70 + (f_c' / (100 \cdot \rho_p))$$

$$\rho_p = \frac{A_{ps}}{b_e d_p} = 0,00119$$

$$f_{ps} = 1252,0693 \text{ Mpa} < f_{py} = 0,8f_{pu} = 1488 \text{ Mpa}$$

$$< f_{pe} + 400 = 1330 \text{ Mpa}$$

4. Trial penampang:

$$a = \frac{A_{pw} f_{ps}}{0,85 f_c' b_w} = 30,6458 \text{ mm, dengan:}$$

$$A_{ps} = 22 \times 37,4193 = 603,8698 \text{ mm}^2$$

$$A_{pw} \cdot f_{ps} = A_{ps} f_{ps} + A_s f_y - 0,85 f_c' (b_e - b_w) h_f = 214903,7 \text{ N}$$

sehingga kedalaman blok tekan $a = 30,6458 \text{ mm} < h_f$.

Garis netral $c = \frac{a}{\beta_1} = 36,0538 \text{ mm} < h_f$, jadi gelagar dianalisis sebagai

penampang persegi dengan tulangan tarik dan tulangan desak dengan

kedalaman blok tekan $a = \frac{A_c' \rho_{ps} h}{b_e} = 52,4677 \text{ mm}$.

5. Index penulangan:

Untuk tampang persegi dengan tulangan non prategang tarik dan desak

$$-\omega_p = \frac{A_{ps} f_{ps}}{b d_p f_c'} = 4,9672E-02$$

$$-\omega_s = \frac{A_s f_y}{b_e d f_c'} = 0,0302$$

$$-\omega = \frac{A_s f_y}{b_e d f_c'} = 0,0453$$

$$-\omega_T = \omega_p + \left(\frac{d}{d_p}\right)(\omega - \omega_s) = 0,0648 \quad < 0,36 \beta_1 = 0,306 \quad \text{jadi balok tersebut merupakan balok daktail.}$$

6. Momen nominal dari balok tersebut setelah mengalami prapeneggangan eksternal menjadi:

$$M_n = A_{ps} f_{ps} (d_p - a/2) + A_s f_y (d - a/2) = 2284,682 \text{ kNm.}$$

Hasilnya naik 25,042 % dari momen nominal untuk perencanaan, yaitu momen nominal struktur balok tanpa tendon.

7. Perhitungan tegangan-tegangan pada kondisi beban kerja penuh, yaitu ketika gaya prategang yang bekerja adalah gaya prategang efektif.

- a. momen akibat berat sendiri struktur = 26.5421 kNm pada tengah bentang

$$M_o$$

$$= 53,0842 \text{ kNm pada dukungan}$$

- b. Momen akibat beban mati $M_D + M_L$ = 2015,8956 kNm pada tengah bentang (termasuk berat sendiri)

$$= 4031,7911 \text{ kNm pada dukungan}$$

8. Garis netral tampang beton:

$$y_t = \frac{b_w \frac{1}{2} (h - h_f)^2 + b_e h_f (h - \frac{1}{2} h_f)}{b_w (h - h_f) + b_e h_f} = 527,5 \text{ mm}$$

Eksentrisitas tendon $e = 378,0000 \text{ mm}$.

9. Perhitungan tegangan-tegangan serat pada beton:

Tegangan pada tengah bentang, pada kondisi beban layan.

eksentrisitas tendon $e = 378,0000 \text{ mm}$

$M_T = 2015,8956 \text{ kNm}$ pada tengah bentang

$$A_c = 249000 \text{ mm}^2$$

$$c_b = 527,5 \text{ mm}$$

$$c_t = 272,5 \text{ mm}$$

– Tegangan serat atas

$$f_t = -\frac{P_e}{A_c} \left[1 - \frac{e \cdot c_t}{r^2} \right] - \frac{M_T \cdot c_t}{I_g} = 1,8816 \text{ Mpa} < 0,5 \sqrt{f'_c} = 2,7386 \text{ Mpa}$$

– Tegangan serat bawah

$$f_b = -\frac{P_e}{A_c} \left[1 + \frac{e \cdot c_b}{r^2} \right] + \frac{M_T \cdot c_b}{I_g} = -2,7478 \text{ Mpa} < 0,45 f'_c = 13,5 \text{ Mpa}$$

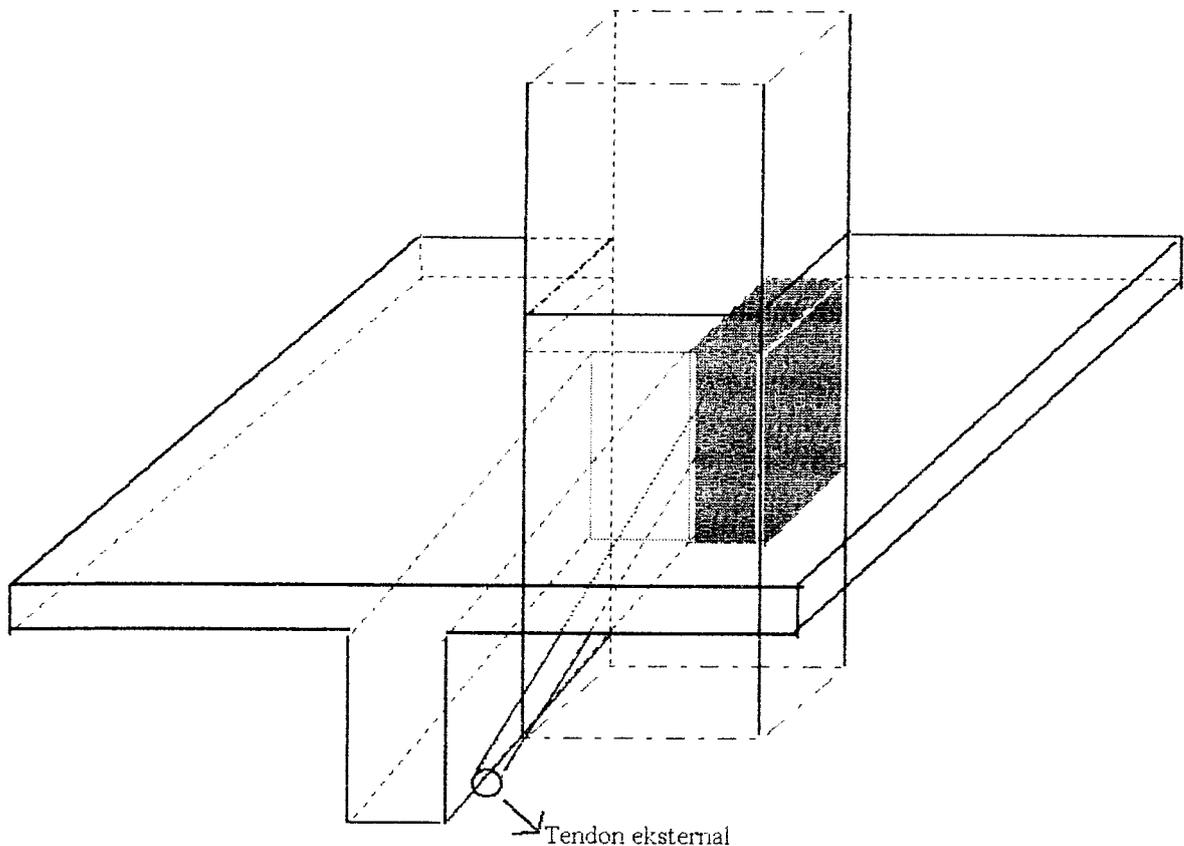
c) Tegangan serat pada saat momen mencapai momen retak.

$$M_{cr} = \frac{I_g}{y_t} \left[f_t + \frac{P_e}{A_c} \left(1 + \frac{e c_b}{r^2} \right) \right] = 227,2584 \text{ kNm.}$$

$$f_t = -\frac{P_e}{A_c} \left(1 - \frac{e_c c_t}{r^2} \right) - \frac{M_{gr}}{S_t} = -0,0405 \text{ MPa} < 0,45 f'_c = 13,5 \text{ Mpa}$$

$$f_b = -\frac{P_e}{A_c} \left(1 + \frac{e_c c_b}{r^2} \right) + \frac{M_{gr}}{S_b} = -8,1784 \text{ MPa} < 0,45 f'_c = 13,5 \text{ Mpa}$$

4.6.2 Analisis kekuatan daerah pengangkuran



Gambar 4.5. Pengangkuran pada kolom

Pengangkuran “external prestressing” adalah seperti pada gambar 4.5 tersebut. Daerah pengangkuran ditunjukkan dengan blok hitam pada gambar tersebut. Sehingga daerah pengangkuran adalah daerah dengan panjang sama dengan lebar atau panjang kolom dan lebarnya sama dengan lebar atau panjang

kolom tersebut dikurangi lebar balok dibagi dua. Untuk menghitung kekuatan daerah pengangkuran tersebut dilakukan perhitungan daerah pengangkuran tendon sebagaimana blok ujung pada struktur balok prategang maka perhitungannya adalah sebagai berikut;

- tegangan serat atas = 1,6730 MPa,
- tegangan serat bawah = -12,3049 MPa,
- gaya prategang yang diperlukan untuk mengakibatkan tegangan serat seperti itu adalah = 1581,1733 kN.
- kedalaman efektif tendon = 650,5000 mm

Untuk menghitung kekuatan blok ujung ketinggian balok dibagi menjadi 10 segmen $h = 800$ mm maka $h/10 = 80$ mm

Perhitungan momen-momen akibat gaya prategang dan tegangan beton dicantumkan dalam tabel 4.2.

Gaya yang harus ditahan oleh daerah pengangkuran adalah $T = \frac{M_{max}}{(h - x)}$, dengan

$$x = \text{titik pusat gaya tarik} = 200 \text{ mm}, \text{ maka } T = \frac{428,3186.1 \cdot 0^3}{(800 - 200)} \cdot 10^{-3}$$

$$= 713,8643 \text{ kN.}$$

Dengan menganggap tulangan pokok kolom adalah sengkang yang diperlukan untuk menahan gaya tarik T, maka dengan tulangan kolom yang dipakai = 4 x 9 D 36 jadi ada 10 buah tulangan untuk tiap sisi kolom; dimensi kolom $b/h = 1000/1000$ kekuatan daerah pengangkuran tersebut adalah sebagai berikut;

- f_y sengkang (tulangan kolom) = 400 MPa, sehingga $f_{s \text{ ijin}} = 170$ MPa,
- luas perlu sengkang (A_t) = $\frac{T}{f_{s \text{ ijin}}} = \frac{711,6788.10^3}{170} = 4186,346 \text{ mm}^2$,
- luas sengkang atau tulangan kolom = $0,25 \cdot \pi \cdot 36^2 \cdot 10 = 10571,43 \text{ mm}^2 > A_t$.

Jadi daerah pengangkutan tersebut aman.

Tabel 4.2. Momen akibat tegangan beton dan gaya prategang

Lengan dari tepi bawah mm	Tegangan Pada titik (MPa)	Momen of tegangan beton kNm	Momen akibat gaya prategang kNm	NET MOMEN kNm
0	-12.3049	0	0	0
40	-11.606	11.1418	0	11.1418
120	-10.2082	29.39974	0	29.3997
149.50	-9.69281	34.77779	0,0000	34.77779
200	-8.81045	42.29016	-79.8493	-37.5591
280	-7.41266	49.81305	-206.3431	-156.5301
360	-6.01486	51.9684	-332.837	-280.8686
440	-4.61707	48.75623	-459.3308	-410.5746
520	-3.21927	40.17652	-585.8247	-545.6482
600	-1.82148	26.22928	-712.3186	-686.0893
680	-0.42368	6.914514	-838.8124	-831.8979
760	0.9741	17.7678	-965.3063	-947.5358

4.6.3. Analisis Geser Balok setelah Penambahan Tendon Eksternal

Sumbangan kekuatan geser terhadap struktur dengan adanya penambahan

$$\text{tendon. } V_a = \left(\sqrt{f_c'} / 20 \right) b_w d + V_d + \frac{V_i M_a}{M_{\max}}$$

Dengan, V_d = gaya geser pada penampang akibat beban tidak terfaktor

$$= 0,5w_L L = 724,5498 \text{ kN}$$

V_i = gaya geser terfaktor yang terjadi bersamaan dengan M_{\max} .

$$= 0,5w_u L = 1101,3157 \text{ kN}$$

maka:

$$V_{ci} = 910,7362 > \left(\frac{1}{7} \sqrt{f_c'} \right) b_w d = 203,5963 \text{ kN.}$$

f_d = tegangan tarik akibat beban mati tak terfaktor, pada serat terluar dari penampang di mana tegangan tarik disebabkan oleh beban luar (Mpa),

$$= f_b = -2,5621 \text{ Mpa}$$

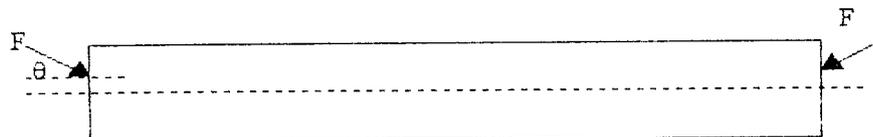
f_{pc} = tegangan tekan pada beton, setelah memperhitungkan semua kehilangan pratekan pada titik berat tampang yang menahan beban luar atau garis pertemuan antara badan balok dengan flens,

$$f_{pc} = 9,7317 \text{ Mpa (garis pertemuan flens dengan badan balok),}$$

V_p = komponen vertikal gaya prategang.

a. Eksentrisitas tendon pada dukungan = 152,5 mm.

b. Eksentrisitas tendon pada tengah bentang = 378 mm.



Gambar 4.5. Distribusi gaya-gaya akibat gaya prategang

Sudut antara tendon dengan sumbu horizontal balok (θ) = $8,3828^\circ$, sehingga jika

$$P = P_e, \text{ maka } V_p = 2P_e \sin \theta = 391,8739 \text{ kN}$$

Jadi $V_{cw} = 1579,08 \text{ kN} > V_{ci} = 910,7362 \text{ kN}$, maka diambil $V_{ci} = 910,7362 \text{ kN}$. Hasilnya 272% lebih besar dari kuat geser pada struktur tanpa tendon.

4.7. Perhitungan Penambahan Tendon pada Balok Beton Bertulang dengan Mutu Bahan dan Kedalaman Efektif Tendon (d_p) yang Bervariasi

Untuk mengetahui pengaruh penambahan tendon luar pada balok beton bertulang, maka dilakukan perhitungan pada balok dengan variasi mutu bahan dan kedalaman efektif tendon (d_p). Kedalaman garis pusat tendon (d_p) diambil sebagai variabel yang berubah-ubah dengan empat posisi :

1. $d_p = d$
2. $d_p = h$
3. $d_p = h_f + 100 \text{ mm}$

Dari perhitungan tersebut kemudian dibandingkan nilai-nilai luas tendon yang terpakai momen nominal, pertambahan momen nominal, tegangan ketika tercapai kekuatan batas (f_{ps}) dan indeks penulangan (ω_T). Hasil-hasil perhitungan tersebut dicantumkan dalam tabel-tabel di bawah ini:

Tabel 4.3. Pertambahan Momen Nominal

MUTU BAHAN		d_p mm	Luas Tendon perlu mm^2	Luas Tendon mm^2	Momen Nominal mula-mula (kNm)	Momen Nominal akhir (kNm)	
f_c'	f_y						
30,0	400	4,959,021	2062,96	1961,29	1712.5473	2128.7	19.550%
30,0	400	650,5	1572,68	1445,16	1712.5473	2221.95	22.926%
30,0	400	800	1278,78	1032,26	1712.5473	2250.26	23.896%

Tabel 4.4 Rasio tulangan non prategang dan tendon eksternal

MUTU BAHAN		d_p mm	Rasio tulangan, syarat $< 0,36\beta_1$				
f_c'	f_y		ω_p	ω	ω'	ω_T	β_1
30.0	400	495.902	7.5916E-02	0.04529	0.0302	0.09572	0.85
30.0	400	650.5	4.7027E-02	0.04529	0.0302	0.06213	0.85
30.0	400	800	3.1505E-02	0.04529	0.0302	0.04378	0.85

Tabel 4.5. Gaya prategang efektif dan tegangan tendon saat beban ultimit tercapai

MUTU BAHAN		d_p mm	f_{ps} MPa	Gaya prategang efektif kN
f_c'	f_y			
30.0	400	495.902	1151.71	1823.9964
30.0	400	650.5	1270.07	1343.9973
30.0	400	800	1465	959.9981

Tabel 4.6. Tabel penambahan momen retak dan tegangan serat beton

MUTU BAHAN		d_p mm	Momen retak balok sbl external prestress kNm	momen retak balok dengan exter prestress kNm	tegangan serat beton pd saat momen retak tercapai (Mpa)	
f_c'	f_y				atas	bawah
30.0	400	495.9	226.5479	227.166	-1.9860	-6.6142
30.0	400	650.5	226.5479	227.211	-0.1699	-7.3775
30.0	400	800	226.5479	227.165	0.5662	-6.6007

Tabel 4.7. Pertambahan momen nominal untuk mutu bahan lebih rendah

MUTU BAHAN		d_p mm	Luas tendon perlu mm ²	Luas Tendon mm	Momen Nominal balok tanpa external press kNm	Momen nominal akhir		f_{ps} MPa
f_c'	f_y							
27.5	300	495.9	960.615	929.0304	797.4447	1378.548	42.153%	1293.58
27.5	300	650.5	732.31482	722.5792		1488.893	46.440%	1495.14
27.5	300	800	595.46349	516.128		1554.318	48.695%	1852.5

4.8 Perhitungan "External Prestressing" Sesuai dengan Kebutuhan Pembebanan

Berikut ini adalah hasil dari perhitungan perencanaan "external prestressing" berdasarkan kebutuhan penambahan beban yang akan dikenakan pada struktur balok tersebut. Beban rencana untuk perencanaan "external prestressing" diambil

tiap pertambahan 10% dari kekuatan nominal balok bertulang sebelum diberi “external prestressing”. Hasil dari perhitungan tersebut dicantumkan dalam tabel-tabel berikut ini:

Tabel 4.8. Pertambahan momen nominal

MUTU BAHAN		d_p mm	Luas tendon perlu mm^2	Luas Tendon mm	Momen nominal balok sebelum ext. Prestress	Momen nominal perencanaan ex. Prestress		Momen nominal akhir	
f_c'	f_y								
30.0	400	650.5	1572.68	1445.16	1712.5473	1712.5470	0.00%	2221.95	22.926%
30.0	400	650.5	1729.95	1445.16	1712.5473	1883.8020	10.00%	2221.95	22.926%
30.0	400	650.5	1887.21	1445.16	1712.5473	2055.0560	20.00%	2221.95	22.926%
30.0	400	650.5	2044.48	1445.16	1712.5473	2226.3110	30.00%	2221.95	22.926%
30.0	400	650.5	2201.75	1445.16	1712.5473	2397.5660	40.00%	2221.95	22.926%
30.0	400	650.5	2359.02	1445.16	1712.5473	2568.8200	50.00%	2221.95	22.926%

BAB V

PEMBAHASAN

5.1 Luas Tendon yang Diperlukan

Luas tendon perlu yang dihasilkan dari persamaan pendekatan yang digunakan tersebut, tidak langsung memberikan nilai luas tendon yang menghasilkan tegangan beton pada kondisi beban layan yang lebih kecil dari tegangan ijin. Akan tetapi dalam kasus yang dijadikan obyek analisis, luas tendon dari persamaan tersebut hasilnya kebanyakan aman, meskipun bukan luas yang ekonomis. Yang dimaksud ekonomis di sini adalah luas tendon tersebut adalah luas minimal yang menghasilkan nilai tegangan pada kondisi beban layan di bawah tegangan ijin. Hasil tersebut karena h (tinggi balok) pada persamaan 4-1 diganti dengan kedalaman efektif tendon (d_p).

Berdasarkan analisa terlihat bahwa kedalaman efektif tendon (d_p) berpengaruh terhadap luas tendon. Dengan d_p yang semakin kecil, luas tendon yang dibutuhkan untuk mendapatkan nilai tegangan aman pada kondisi beban layan semakin besar. Dengan demikian untuk d_p yang kecil, luas tendon yang diperlukan untuk mendukung beban yang sama besar juga akan semakin besar gaya prategang yang diperlukan juga semakin besar.

5.2. Pertambahan Momen Nominal

Pertambahan kuat nominal dipengaruhi oleh kedalaman efektif tendon (d_p). Apabila d_p makin besar maka momen nominal yang dihasilkan akan makin besar. Dalam perhitungan tegangan dengan memakai persamaan 3.11-4 SK SNI, diketahui bahwa apabila d_p makin besar maka tegangan saat momen nominal tercapai (f_{ps}) makin besar. Berdasarkan hasil perhitungan, didapatkan bahwa kecenderungan pertambahan momen nominal dan kedalaman blok tekan (a) tidak konsisten, hal ini karena luas tulangan terpakai agar tegangan pada kondisi beban layan aman tidak sebanding dengan perubahan kedalaman efektif tendon. Penempatan kedalaman efektif tendon di dalam kern juga tidak berpengaruh terhadap besarnya pertambahan momen nominal.

Dalam analisis terlihat bahwa dengan menempatkan d_p dalam kern tidak didapatkan luas tendon yang ekonomis. Gaya prategang yang diperlukan juga lebih besar, karena pada kedalaman efektif tendon (d_p) yang kecil gaya prategang untuk mendapatkan tegangan aman saat bekerja 100% beban layan lebih besar daripada untuk penempatan d_p yang besar. Hal ini sangat penting untuk diperhatikan untuk pendesainan “external prestressing” terutama pada struktur rangka (gedung), yang kekuatan daerah pengangkurannya harus diperhatikan.

Momen retak yang dihasilkan setelah adanya tendon luar pada balok mengalami peningkatan jadi balok tersebut akan mengalami retak pada tingkat pembebanan yang lebih tinggi. Hal ini sesuai dengan perilaku umumnya struktur

prategang. Karena adanya gaya pratekan pada balok maka struktur tersebut akan mengalami gaya ke atas, terutama sebelum beban-beban eksternal bekerja. Kenyataan ini yang mempengaruhi keterbatasan pemakaian metode “eksternal prestressing” ini dalam perkuatan maupun perbaikan struktur, apalagi pada balok yang menahan bagian-bagian struktur lain. Jadi perilaku elemen struktur lainnya yang berhubungan dengan balok tersebut setelah memperoleh tambahan lendutan keatas harus diperhatikan. Dalam analisis momen retak pengaruh tulangan non prategang yang semula digunakan balok untuk menahan lentur tidak diperhitungkan, momen retak yang dihasilkan tentunya akan lebih tinggi.

5.3. Indeks Penulangan

Indeks penulangan total dalam kasus balok yang dianalisis berada di bawah batas indeks penulangan untuk balok prategang sebesar $0,36\beta_1$. Nilai batas tersebut adalah indikator daktilitas suatu struktur gelagar lentur. Nilai $0,36\beta_1$ ini dimodifikasi dari batas rasio tulangan agar daktilitas balok terjaga yaitu $0,75\rho_b$, dengan ρ_b adalah rasio tulangan pada keadaan seimbang. Dari analisis didapatkan bahwa indeks penulangan tendon tidak berpengaruh signifikan terutama untuk mendapatkan pertambahan kuat lentur seperti dalam analisis, dengan kata lain indeks penulangan tendon kecil apabila dibandingkan dengan indek penulangan total (ω_T). Dalam tabel 4.2 terlihat bahwa indeks penulangan makin kecil untuk d_p yang makin besar.

5.4. Kuat Geser Beton

Nilai kuat geser beton dengan memperhitungkan adanya penambahan tendon menunjukkan nilai yang lebih besar daripada kuat geser beton pada balok tanpa memperhitungkan tendon prategang eksternal. Dari analisis dengan $f'_c = 30$ Mpa dan $f_y = 400$ Mpa, dan dengan tegangan efektif $f_{pe} = 860$ Mpa nilai kuat geser mengalami pertambahan di atas 100%. Nilai kuat geser ini juga meningkat dengan semakin besarnya kedalaman efektif tendon (d_p) yang digunakan.

Secara keseluruhan ada kecenderungan yang berlaku pada gelagar eton bertulang yang diberi penambahan tendon prategang luar ini yaitu :

1. Tegangan ketika momen ultimit tercapai meningkat apabila d_p meningkat.
2. Kedalaman blok tekan akan semakin berkurang apabila d_p meningkat.
3. Luas tendon yang diperlukan untuk mendapatkan tegangan serat pada kondisi beban layan akan semakin berkurang jika d_p semakin besar tapi kembali naik apabila d_p lebih tinggi dari tinggi balok (h).
4. Tegangan serat beton pada kondisi beban layan dari $d_p =$ batas kern bawah dan tinggi balok, semakin membesar.

BAB VI

KESIMPULAN DAN SARAN

6.1. KESIMPULAN

Setelah dilakukan analisis terhadap penambahan tendon prategang luar tersebut, terdapat beberapa hal yang dapat disimpulkan

1. Luas tendon yang digunakan dapat diperkecil dengan meningkatkan kedalaman efektif tendon prategang sehingga akan memperkecil indeks penulangan total struktur tersebut, sehingga struktur akan menjadi lebih daktail.
2. Untuk beban dan luas tendon yang sama apabila d_p diperbesar, maka gaya prategang yang diperlukan semakin kecil.
3. Untuk beban dan gaya prategang yang sama besar, peningkatan d_p akan menyebabkan luas tendon yang dipakai lebih kecil
4. Berdasarkan analisis, penambahan tendon prategang dapat meningkatkan momen nominal dan daya dukung beban.
5. Balok beton bertulang bisa tetap memenuhi syarat daktilitas meskipun dengan eksternal prestressing, dengan hasil penambahan momen nominal akibat penambahan tendon dan gaya prategang sampai mendekati 50 % dari momen nominal balok sebelum dilakukan "external prestressing".

6.2 SARAN-SARAN

Setelah mempertimbangkan hal-hal tersebut dapat diberikan saran-saran

sebagai berikut:

1. Untuk mendapatkan penambahan tendon prategang luar yang optimal, yaitu dengan penambahan momen nominal dan daya dukung terhadap beban serta daktilitasnya terpenuhi maka sebaiknya pusat berat tampang tendon ditempatkan di bawah batas kern bawah.
2. Pada penulisan Tugas Akhir ini selanjutnya perlu dikembangkan dengan membahas aspek-aspek pelaksanaan di lapangan.
3. Untuk penulisan Tugas akhir selanjutnya perlu ditinjau pengaruh penambahan pratekan luar ini terhadap perubahan distribusi gaya-gaya dan momen-momen pada keseluruhan struktur rangka, serta contoh desain dengan bentuk penampang dan panjang bentangan yang lebih bervariasi.

DAFTAR PUSTAKA

1. , “Tata Cara Perhitungan Struktur Beton Untuk Bangunan Gedung” SK SNI T 15-1991-03, Departemen pekerjaan Umum, Bandung: Yayasan LPMB, 1991
2. , halaman: 25-26 Konstruksi No. 242- Januari-A, 1997
3. Angel C, Aparacio dan Gonzalo Ramos,” Flexural Strenght of Externally Prestressed Concrete Bridges”, ACI Structural Journal, September-Oktober 1996, Detroit: American Concrete Institute, 1996
4. Dipohusodo, Istimawan,” Struktur Beton Bertulang”, Jakarta: Gramedia Pustaka Utama, PT, 1994
5. Gerwick, Ben C,” Construction of Prestressed Concrete structures”, New York: John Wiley and Sons, 1993
6. Soemardi, Biemo W, Ir, Dr dan Rezady M, Dicky. Ms, Ir, Dr,” Aplikasi Rekayasa dalam Revitalisasi Stuktur Bangunan, Seminar Revitalisasi Struktur Bangunan Akibat Kerusakan Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan Universitas Islam Indonesia, Yogyakarta, 1998
7. Lin T.Y dan Burn, Ned H,” Desain Struktur Prategang”, Jakarta: Penerbit Erlangga, 1988
8. Nilson, Arthur H,” Design of Prestressed Concrete”, New York: John Wiley and Sons, Inc, 1978
9. Chakrabarti, P.R.” Ultimate Stress for Unbonded Post-Tensioning Tendons In Partially Prestressed Beams, ACI Structural Journal, Nopember-Desember 1995, Detroit: American Concrete Institute, 1995

10. Peter H, Emmons, Alexander M, Vaysburd, dan Jay Thomas," Strenghtening Concrete Structures", Concrete International, Maret 1998, Detroit: American Concrete Instittute,1998
11. Raju,N Krishna," Beton Prategang", Jakarta: Penerbit Erlangga, 1986
12. Rao, P Srivinasa dan Mathew George," Behavior of Externally Prestressed Beams with Multiple Deviator", ACI Structural Journal, Juli-Agustus 1996, Detroit: American Concrete Instittute, 1996
13. Supartono, F.X, Ir,Dr," Pemakaian Pratekan Luar untuk Perbaikan Struktur Gedung", Kursus Pendek Beton Pratekan Lembaga Teknologi Universitas Indonesia, Jakarta, 30 Oktober 1996
14. Tan, Kiang-Hwee dan Ng, Chee-Koon," Effects of Deviator and Tendon Configuration on Behavior of Externally Prestressed Beams", ACI Structural Journal, Januari-Februari 1997, Detroit: American Concrete Instittute, 1997

LAMPIRAN

LAMPIRAN A

**Hasil-hasil Analisis Prapenekanan Luar pada Balok yang ditabelkan
pada tabel 4.3 s/d 4.6**

ε

HASIL-HASIL ANALISIS

Data struktur balok beton bertulang konvensional

$b_e = 2000.000$ mm	- mutu bahan :	$f_c' = 30.0$ MPa
$b_w = 400.000$ mm		$f_y = 400$ MPa
$h = 800.000$ mm		$E_c = 25743$ MPa
$h_f = 120.000$ mm		$E_s = 200000$ MPa
$d = 650.500$ mm		$A_c = 512000$ mm ²
$A_s = 4419.643$ mm ²	----->	- $\beta_1 = 0.85$
$A_s' = 2946.429$ mm ²	----->	9 D 25
$L = 7200.000$ mm		6 D 25

ANALISIS KUAT NOMINAL

- a = 34.664 mm
- c = 40.781 mm
- y = 61.375 mm
- $M_n = 1712.547$ kNm
- $\epsilon_s = 0.045$ OK
- $\epsilon_s' = -0.002$
- $\epsilon_y = 0.002$

- seketika
- jk.panjang

LENDUTAN

- D = 1
- L = 4.00
- $w_u = 317.1384$ kN/m'
- $w_d = 139.9140$ kN/m'
- $w_l = 93.2760$ kN/m'
- $M_s = 503.6904$ kNm
- $I_a = 1.78E+10$ mm ⁴
$\Delta = 1.83E-07$ mm
$\Delta = 0.523501$ mm

RASIOTULANGAN

$\rho = 0.0170$	\leq	ρ_{max}
y = 147.8783 mm		
$I_g = 3.12E+10$ mm ⁴		
$M_{cr} = 226.5479$ kNm		
$I_{cr} = 1.65E+10$ mm ⁴		

GESER

$V_c = 244.667$ kN
$\rho_w = 0.0170$

tulangan geser tersedia

diameter 2 x 12 jarak

70 mm

V_n tersedia = 1926.9401 kN

V_n perlu = 1902.8303 kN

OK!!!!!!

Analisis momen nominal balok dengan penambahan pratekan luar

d_p	=	495.9021 mm			
M_n	=	1712.5473 kNm			
A_p perlu	=	2062.9616 mm ²	Jumlah tendon perlu	=	39.96996
A_p dipakai	=	2 x 19 D	3/8.in		
A_{ps}	=	1961.2864 mm ²	- a	=	44.29074 mm
f_{pe}	=	930.0000 MPa	- c	=	52.10675 mm
f_{ps}	=	1151.7072 MPa	- L/d _p	=	14.51899

INDEKS PENULANGAN

ω_p	=	7.5916E-02		
ω	=	0.04529483		
ω'	=	0.03019655		
ω_T	=	0.09572162 <	0,36 β_1	
M_n akhir	=	2128.701 kNm		
	=	19.550% atau	19.550% dari balok tanpa tendon luar	
P_e	=	1823.9964 kN		

momen tak terfaktor

Mtengah bentang	1878.265617 kNm	73.183%
Mdukungan		

TEGANGAN PADA TENDON SAAT BEBAN LAYAN

- TENGAH BENTANG

M_T	=	1878.2656 kNm	max beban
e	=	223.4021 mm	naik
f_a	=	-0.0603 Mpa <	0.45*f _c
f_b	=	-3.5022 Mpa <	0.45*f _c

- DUKUNGAN

M_T	=	3756.53 kNm
e	=	152.5 mm
f_a	=	-5.87382 Mpa < 0.45*f _c =
f_b	=	1.14503 Mpa < 0.5√(f _c) =

- TEGANGAN PADA SAAT MOMEN RETAK

M_{cr}	=	227.1659
f_a	=	-1.9860 Mpa < 0.45*f _c =
f_b	=	-6.6142 Mpa < 0.45*f _c =

GESER

V_{ci}	=	893.8006
V_{cw}	=	1345.0158 kN >
V_c	=	V_{ci} = 893.8006 kN
		265%

Peningkatan kemampuan dukung beban

M_u	=	1702.9608 kNm	
w_u	=	394.2039 kN/m'	NAIK 24%
w_d	=	173.9135 kN/m'	

$$w_L = 695.6539 \text{ kN/m'}$$

$$M_{\text{tdk terfaktor}} = \begin{matrix} 1878.2656 \text{ kNm} & \text{tengah bentang} \\ 3756.5312 \text{ kNm} & \text{pada dukungan} \end{matrix}$$

tegangan beton pada saat transfer

gaya prategang awal $P_i = 2145.87806 \text{ kNm}$
 dengan rasio kehilangan gaya prategang $R = 0.85$

- tegangan serat atas = $f_a = -0.4641 \text{ MPa}$

- tegangan serat bawah $f_b = -11.4060 \text{ MPa}$

kontrol daerah pengangkuran

kolom tulangan $4 \times 9 \text{ D}$ 36
 tulangan kolom dipak 36 jumlah 10 buah pada tiap sisi
 gaya tarik akibat gaya prategang $T = 1599.777191 \text{ kN}$

$f_y \text{ sengkang} = 400 \text{ MPa}$
 $f_s \text{ ijin} = 170 \text{ MPa}$

luas perlu $9410.45406 \text{ mm}^2 <$ luas tersedia 10183 mm^2 OK

HASIL-HASIL ANALISIS

Data struktur balok beton bertulang konvensional

$b_e = 2000.000$ mm		- mutu bahan :	$f_c' = 30.0$ MPa
$b_w = 400.000$ mm			$f_y = 400$ MPa
$h = 800.000$ mm			$E_c = 25743$ MPa
$h_f = 120.000$ mm			$E_s = 200000$ MPa
$d = 650.500$ mm			$A_c = 512000$ mm ²
			$\beta_1 = 0.85$
$A_s = 4419.643$ mm ²	----->		9 D 25
$A_s' = 2946.429$ mm ²	----->		6 D 25
$L = 7200.000$ mm			

ANALISIS KUAT NOMINAL

- a = 34.6639 mm
- c = 40.7810 mm
- y = 61.3753 mm
- $M_n = 1712.5473$ kNm
- $\epsilon_s = 0.0449$ OK
- $\epsilon_s' = -0.0019$
- $\epsilon_y = 0.0020$

seketika
jk panjang

LENDUTAN

- D = 1
- L = 4.00
- $w_2 = 317.1384$ kN/m'
- $w_3 = 139.9140$ kN/m'
- $w_1 = 93.2760$ kN/m'
- $M_3 = 503.6904$ kNm
- $I_g = 1.78E+10$ mm ⁴
$\Delta = 1.83E-07$ mm
$\Delta = 0.523501$ mm

RASIOTULANGAN

$\rho = 0.016985561 \leq \rho_{max}$
y = 147.8783 mm
$I_g = 3.12E+10$ mm ⁴
$M_{cr} = 226.5479$ kNm
$I_{cr} = 1.65E+10$ mm ⁴

GESER

$V_c = 244.667$ kN
$\rho_w = 0.01698556$

tulangan geser tersedia

diameter 2 x 12 jarak

70 mm

V_n tersedia = 1926.9401 kN

V_n perlu = 1902.8303 kN

OK!!!!!!

Analisis momen nominal balok dengan penambahan pratekan luar

d_p	=	850.5 mm		
M_n	=	1712.547291 kNm		
A_p perlu	=	1572.678025 mm ²	Jumlah tendon perlu	= 30.470698
A_p dipakai	=	2 x 14 D	3/8.in	
A_{ps}	=	1445.1584 mm ²	- a	= 35.98938 mm
f_{pe}	=	930 MPa	- c	= 42.340448 mm
f_{ps}	=	1270.074201 MPa	- L/d _p	= 11.068409

INDEKS PENULANGAN

ω_p	=	4.7027E-02	
ω	=	0.045294828	
ω'	=	0.030196552	
ω_T	=	0.062125137 <	0.36 β_1
M_n akhir	=	2221.9492 kNm	
	=	22.926% atau	22.926% dari balok tanpa tendon luar
P_e	=	1343.9973 kN	

momen tak terfaktor

Mtengah bentang	1960.543448 kNm	74%
Mdukungan		

TEGANGAN PADA TENDON SAAT BEBAN LAYAN

- TENGAH BENTANG

M_T	=	1960.5434 kNm	max beban	1666.46
e	=	378.0000 mm	naik	74.309%
f_a	=	1.7536 Mpa <	$0.5\sqrt{f'_c}$	
f_b	=	-2.5621 Mpa <	$0.45f'_c$	

- DUKUNGAN

M_T	=	3921.087 kNm
e	=	152.5 mm
f_a	=	-4.2910825 Mpa < $0.45f'_c$
f_b	=	0.8437066 Mpa < $0.5\sqrt{f'_c}$

- TEGANGAN PADA SAAT MOMEN RETAK

M_{cr}	=	227.2110168 kNm
f_a	=	-0.1699 Mpa < $0.45f'_c$
f_b	=	-7.3775 Mpa < $0.45f'_c$

GESER

V_{ci}	=	910.7361855 kN	
V_{cw}	=	1579.079574 kN >	$V_{ci} =$
V_c	=	$V_{ci} =$	910.7361855 kN
			272.2344%

Peningkatan kemampuan dukung beban

$M_u =$	1777.559393 kNm		
$w_u =$	411.4720818 kN/m'	NAIK	30%
$w_d =$	181.5318008 kN/m'		
$w_L =$	726.1272031 kN/m'		
M tdk terfaktor :	1960.543448 kNm	tengah bentang	100%
	3921.086897 kNm	pada dukungan	

tegangan beton pada saat transfer

gaya prategang awal $P_i =$	1581.173308 kNm		
dengan rasio kehilangan gaya prategang $R =$		0.85	
- tegangan serat atas =	f_a	1.6730 MPa	
- tegangan serat bawah =	f_b	-12.3049 MPa	

kontrol daerah pengangkuran

kolom	tulangan	4 x 9 D	36	
tulangan kolom dip	36 jumlah		10	buah pada tiap sisi
gaya tarik akibat gaya prategang $T =$			1579.230868 kN	
f_y sengkang =		400 MPa		
f_s ijin =		170 MPa		
luas perlu	9289.593339 mm ²			
luas tersedia	10182.85714 mm ²			

HASIL-HASIL ANALISIS

DATA :

b_e	=	2000 mm
b_w	=	400 mm
h	=	800 mm
h_f	=	120 mm
d	=	650.5 mm
A_s	=	4419.642857 mm ²
A_s'	=	2946.428571 mm ²
L	=	7200 mm

- mutu bahan :	f_c'	=	30 MPa
	f_y	=	400 MPa
	E_c	=	25742.96 MPa
	E_s	=	200000 MPa
	A_c	=	512000 mm ²
	β_1	=	0.85
	9 D	=	25
	6 D	=	25

ANALISIS KUAT NOMINAL

- a	=	34.66386555 mm
- c	=	40.78101829 mm
- y	=	61.3752952 mm
- M_{n1}	=	1712.547291 kNm
- ϵ_s	=	0.044853145 OK
- ϵ_s'	=	-0.001891982
- ϵ_y	=	0.002

RASIOTULANGAN

ρ	=	0.016985561	\leq
y	=	147.8783 mm	
I_g	=	31169066667 mm ⁴	
M_{cr}	=	226.5478794 kNm	
I_{cr}	=	16496173596 mm ⁴	

GESER

V_c	=	244.6674089 kN
ρ_w	=	0.016985561

tulangan geser tersedia

diameter 12 jarak

V_n tersedia = 1926.940062 kN

V_n perlu = 1902.830323 kN

OK!!!!!!

LENDUTAN

- D	=	1
- L	=	4
- w_u	=	317.13839 kN/m'
- w_d	=	139.91399 kN/m'
- w_l	=	93.275996 kN/m'
- M_2	=	503.69038 kNm
- I_e	=	1.783E+10 mm ⁴
Δ	=	1.829E-07 mm
Δ	=	0.5235013 mm

seketika
jk. panjang

ρ_{max}

70 mm

Analisis momen nominal balok dengan penambahan pratekan luar

d_p	=	800 mm			
M_n	=	1712.547291 kNm			
A_p perlu	=	1278.783819 mm ²		n_{perlu}	= 24.776486
A_p dipakai	=	10 D	3/8.		
A_{ps}	=	1032.256 mm ²		- a	= 29.652078 mm
f_{pe}	=	930 MPa		- c	= 34.884798 mm
f_{ps}	=	1465.00093 MPa		- L/d_p	= 9

INDEKS PENULANGAN

ω_p	=	0.031505333		
ω	=	0.045294828		
ω	=	0.030196552		
ω_T	=	0.043782119	<	$0.36\beta_1$
M_n akhir	=	2250.263332 kNm		
		23.896% atau		23.896% dari balok tanpa tendon luar
P_e	=	959.99808 kN		

momen tak terfaktor

Mtengah bentang	1985.526469 kNm	74.632%
Mdukungan		

TEGANGAN PADA TENDON SAAT BEBAN LAYAN

- TENGAH BENTANG

M_T	=	1985.526469 kNm	max beban	1687.7
e	=	527.5 mm	naik	74.632%
f_a	=	2.488567119 Mpa <	$0.5\sqrt{f'_c}$	
f_b	=	-1.811311162 Mpa <	$0.45*f'_c$	

- DUKUNGAN

M_T	=	3971.053 kNm	
e	=	152.5 mm	
f_a	=	-3.0275129 Mpa <	$0.45*f'_c$
f_b	=	0.6026476 Mpa <	$0.5\sqrt{f'_c}$

- TEGANGAN PADA SAAT MOMEN RETAK

M_{cr}	=	227.1650687 kNm	
f_a	=	0.566246012 Mpa <	$0.5\sqrt{f'_c}$
f_b	=	-6.600703747 Mpa <	$0.45*f'_c$

GESER

V_{ci}	=	927.1131663 kN	
V_{cw}	=	1756.918519 kN	> V_{ci}
V_c	=	V_{ci}	= 927.1131663 kN
			272.2344%

Peningkatan kemampuan dukung beban

M_u	=	1800.210665 kNm		
w_u	=	416.7154318 kN/m'	NAIK	31.40%
w_d	=	183.8450434 kN/m'		
w_L	=	735.3801737 kN/m'		

M tdk terfaktor = 1985.526469 kNm tengah bentang 100%
 3971.052938 kNm pada dukungan

tegangan beton pada saat transfer

gaya prategang awal $P_i = 1129.409506$ kNm
 dengan rasio kehilangan gaya prategang $R = 0.85$
 - tegangan serat atas = f_a 2.538573525 MPa
 - tegangan serat bawah = f_b -11.39009133 MPa

kontrol daerah pengankuran

kolom tulangan 4 x 9 D 36
 tulangan kolom 36 jumlah 10 buah pada tiap sisi
 gaya tarik akibat gaya prategang $T = 1374.58431$ kN
 $f_{y \text{ sengkang}} = 400$ MPa
 $f_{s \text{ ijin}} = 170$ MPa

luas perlu 8085.790056 mm² < luas tersedia 10182.9 mm² OK

LAMPIRAN B

**Hasil-hasil Analisis Prapenekanan Luar pada Balok yang ditabelkan
pada tabel 4.7**

HASIL-HASIL ANALISIS

DATA :

b_e	=	2000 mm
b_w	=	400 mm
h	=	800 mm
h_f	=	120 mm
d	=	650.5 mm
		495.9021407 mm
A_s	=	4419.642857 mm ²
A_s'	=	2946.428571 mm ²
L	=	7200 mm

- mutu :	f_c'	=	27.5 MPa
	f_y	=	300 MPa
	E_c	=	24647.008 MPa
	E_s	=	200000 MPa
	A_c	=	512000 mm ²
	$-\beta_1$	=	0.85
----->	9 D		25
----->	6 D		25

ANALISIS KUAT NOMINAL

- a	=	28.36134454 mm
- c	=	32.5992466 mm
- y	=	61.62970128 mm
- M_n	=	797.4447029 kNm
- ϵ_s	=	0.056863347 OK
- ϵ_s'	=	-0.003119773 TDKOK!!
- ϵ_y	=	0.0015

RASITULANGAN

ρ	=	0.016985561	\leq	ρ_{max}
y	=	150.5926 mm		
I_g	=	31169066667 mm ⁴		
M_{cr}	=	216.9030809 kNm		
I_{cr}	=	17131992672 mm ⁴		

GESER

V_c	=	235.9997256 kN
ρ_w	=	0.016985561

tulangan geser tersedia

diameter 12 jarak

V_n tersedia = 1918.272379 kN

V_n perlu = 886.0496699 kN

OK!!!!!!

LENDUTAN

- D	=	1
- L	=	4
- w_u	=	147.67494 kN/m'
- w_d	=	65.150711 kN/m'
- w_l	=	43.433807 kN/m'
- M_a	=	234.54256 kNm
- I_e	=	2.823E+10 mm ⁴
Δ	=	5.617E-08 mm
Δ	=	0.1607964 mm

seketika
jk panjang

70 mm

Analisis momen nominal balok dengan penambahan pratekan luar

d_p	=	495.9021407 mm			
M_n	=	797.4447029 kNm			
A_p perlu	=	960.6145067 mm ²		n_{perlu}	= 18.611943
A_p dipakai	=	9 D	3/8.		
A_{ps}	=	929.0304 mm ²		a	= 25.706451 mm
f_{pe}	=	930 MPa		c	= 30.242883 mm
f_{ps}	=	1293.581542 MPa		L/d_p	= 14.518994

INDEKS PENULANGAN

ω_p	=	0.044062087		
ω	=	0.037059405		
ω	=	0.02470627		
ω_T	=	0.060266321	<	$0.36\beta_1$
$M_{n\text{akhir}}$	=	1378.548259		
		42.153% atau		42.153% dari balok tanpa tendon luar
P_a	=	863.998272 kN		

momen tak terf. Mtengah bentang 1216.366111 kNm 80.718%
Mdukungan

TEGANGAN PADA TENDON SAAT BEBAN LAYAN

- TENGAH BENTANG

M_T	=	1216.366111 kNm	max beban	1033.91	M_T	=	2432.732 kNm
e	=	223.4021407 mm	naik	80.718%	e	=	152.5 mm
f_a	=	-0.039024785 Mpa <	$0.45 \cdot f_c$		f_a	=	-2.7613753 Mpa < $0.45 \cdot f_c =$
f_b	=	-1.648478221 Mpa <	$0.45 \cdot f_c$		f_b	=	0.5423828 Mpa < $0.5 \sqrt{f_c} =$

- DUKUNGAN

- TEGANGAN PADA SAAT MOMEN RETAK

M_{cr}	=	217.1958112 kNm		
f_a	=	-1.898865282 Mpa <	$0.45 \cdot f_c =$	
f_b	=	-1.278333445 Mpa <	$0.45 \cdot f_c =$	

GESER

V_{ci}	=	442.9100486		
V_{cw}	=	889.8928653 kN >	V_{ci}	=
V_c	=	$V_{ci} =$	442.9100486 kN	
			0.876739676	

Peningkatan kemampuan dukung beban

M_u	=	1102.838607 kNm		
w_u	=	255.2867146 kN/m'	NAIK	72.87%
w_d	=	112.6264918 kN/m'		
w_L	=	450.505967 kN/m'		

M tdk terfaktor = 1216.366111 tengah bentang
2432.732222 pada dukungan

tegangan beton pada saat transfer

gaya prategang awal $P_i = 1016.468555$ kNm

dengan rasio kehilangan gaya p 0.85

- tegangan serat atas = $f_{atas} = -0.464095821$ MPa

- tegangan serat bawah = $f_{bawah} = -4.929987419$ MPa

kontrol daerah pengangkuran

kolom tulangan 4 x 9 D 36

tulangan kolom 36 jumlah 10 buah pada tiap sisi

gaya tarik akibat gaya prategang $T = 751.4536489$ kN

$f_{y \text{ sengkang}} = 400$ MPa

$f_{s \text{ ijin}} = 170$ MPa

luas perlu 4420.315582 mm² < luas tersedia 10182.9 mm² OK

HASIL-HASIL ANALISIS

Data struktur balok beton bertulang konvensional

b_e	=	2000 mm	- mutu :	f'_c	=	27.5 MPa
b_w	=	400 mm		f_y	=	300 MPa
h	=	800 mm		E_c	=	24647.008 MPa
h_f	=	120 mm		E_s	=	200000 MPa
d	=	650.5 mm		A_c	=	512000 mm ²
				β_1	=	0.85
A_s	=	4419.642857 mm ²		9 D		25
A_s'	=	2946.428571 mm ²		6 D		25
L	=	7200 mm		jepit-jepit		

ANALISIS KUAT NOMINAL

- a	=	28.36134454 mm
- c	=	32.5992466 mm
- y	=	61.62970128 mm
- M_{tu}	=	797.4447029 kNm
- ϵ_s	=	0.056863347 OK
- ϵ_s'	=	-0.003119773
- ϵ_y	=	0.0015

seketika
jk.panjang

LENDUTAN

- D	=	1
- L	=	4
- W_{ly}	=	147.67494 kN/m'
- W_{lx}	=	65.150711 kN/m'
- W_1	=	43.433807 kN/m'
- M_a	=	234.54256 kNm
- I_e	=	2.823E+10 mm ⁴
Δ	=	5.617E-08 mm
Δ	=	0.1607964 mm

RASIOTULANGAN

ρ	=	0.016985561	\leq	ρ_{max}
y	=	150.5926 mm		
I_g	=	31169066667 mm ⁴		
M_{cr}	=	216.9030809 kNm		
I_{cr}	=	17131992672 mm ⁴		

GESER

V_c	=	235.9997256 kN
ρ_w	=	0.016985561
tulangan geser tersedia		
diameter	=	2 x 12 jarak
V_n tersedia	=	1918.272379 kN
V_n perlu	=	886.0496599 kN
OK!!!!!!		

70 mm

Analisis momen nominal balok dengan penambahan pratekan luar

d_p	=	650.5 mm			
M_n	=	797.4447029 kNm			
A_p perlu	=	732.3148198 mm ²	Jumlah tendon perlu	=	14.188628
A_p dipakai	=	7 D	3/8.in		
A_{ps}	=	722.5792 mm ²	- a	=	23.109181 mm
f_{pe}	=	930 MPa	- c	=	27.187271 mm
f_{ps}	=	1495.136035 MPa	- L/d _p	=	11.068409

INDEKS PENULANGAN

ω_p	=	0.03019647		
ω	=	0.037059405		
ω	=	0.02470627		
ω_T	=	0.042549605 <	0,36 β_1	
M_n akhir	=	1488.892694 kNm		
		46.44042% atau		46.44% dari balok tanpa tendon luar
P_a	=	671.998656 kN		
momen tak terfaktor				
	Mtengah bentang		1313.728848 kNm	82.147%
	Mdukungan			

TEGANGAN PADA TENDON SAAT BEBAN LAYAN

- TENGAH BENTANG

M_T	=	1313.728848 kNm	max beban
e	=	378 mm	naik
f_a	=	0.866120722 Mpa <	0.5sqrt(f _c)
f_b	=	-1.270357289 Mpa <	0.45*f _c

- DUKUNGAN

M_T	=	2627.458
e	=	152.5
f_a	=	-2.1241446 Mpa < 0.45*f _c =
f_b	=	0.4218533 Mpa < 0.5sqrt(f _c) =

- TEGANGAN PADA SAAT MOMEN RETAK

M_{cr}	=	217.2346496
f_a	=	-0.990935628 Mpa < 0.45*f _c =
f_b	=	-1.934970115 Mpa < 0.45*f _c =

GESER

V_{ci}	=	459.1247682	
V_{cw}	=	1112.468354 kN >	V_{ci} =
V_c	=	V_{ci} =	459.1247682 kN
			94.545%

Peningkatan kemampuan dukung beban

$M_u = 1191.114155 \text{ kNm}$
 $W_u = 275.7208693 \text{ kN/m'}$ NAIK 0.86708
 $W_d = 121.64156 \text{ kN/m'}$
 $W_L = 486.5662399 \text{ kN/m'}$
M tdk terfaktor = 1313.728848 tengah bentang
2627.457696 pada dukungan

tegangan beton pada saat transfer

gaya prategang awal $P_i = 790.5866541 \text{ kNm}$
dengan rasio kehilangan gaya prategang $R = 0.85$
- tegangan serat atas = f_a 0.604456184 MPa
- tegangan serat bawah = f_b -5.703274436 MPa

kontrol daerah pengankuran

kolom tulangan 4 x 9 D 36
tulangan kolom 36 jumlah 10 buah pada tiap sisi
gaya tarik akibat gaya prategang $T = 795.6342031 \text{ kN}$

f_y sengkang = 400 MPa

$f_{s \text{ ijin}}$ = 170 MPa

luas perlu 4680.201195 mm² < luas tersedia 10182.9 mm² OK

HASIL-HASIL ANALISIS

DATA :

b_e	=	2000 mm
b_w	=	400 mm
h	=	800 mm
h_f	=	120 mm
d	=	650.5 mm
A_s	=	4419.642857 mm ²
A_s'	=	2946.428571 mm ²
L	=	7200 mm

- mutu :	f_c'	=	27.5 MPa
	f_y	=	300 MPa
	E_c	=	24647.008 MPa
	E_s	=	200000 MPa
	A_c	=	512000 mm ²
	$-\beta_1$	=	0.85
			9 D 25
			6 D 25

ANALISIS KUAT NOMINAL

- a	=	28.36134454 mm
- c	=	32.5992466 mm
- y	=	61.62970128 mm
- M_{nt}	=	797.4447029 kNm
- ϵ_s	=	0.056863347 OK
- ϵ_s'	=	-0.003119773
- ϵ_y	=	0.0015

seketika
jk.panjang

LENDUTAN

- D	=	1
- L	=	4
- w_u	=	147.67494 kN/m'
- w_d	=	65.150711 kN/m'
- w_l	=	43.433807 kN/m'
- M_2	=	234.54256 kNm
- I_e	=	2.823E+10 mm ⁴
Δ	=	5.617E-08 mm
Δ	=	0.1607964 mm

RASIOTULANGAN

ρ	=	0.016985561	\leq	ρ_{max}
y	=	150.5926 mm		
I_g	=	31169066667 mm ⁴		
M_{cr}	=	216.9030809 kNm		
I_{cr}	=	17131992672 mm ⁴		

GESER

V_c	=	235.9997256 kN
ρ_w	=	0.016985561
tulangan geser tersedia		
diameter	=	2 x 12 jarak
V_n tersedia =		1918.272379 kN
V_n perlu =		886.0496699 kN
		OK!!!!!!

70 mm

Analisis momen nominal balok dengan penambahan pratekan luar

d_p	=	800 mm		
M_n	=	797.4447029 kNm		
A_p perlu	=	595.4634878 mm ²	n_{perlu} =	11.537128
A_p dipakai	=	5 D	3/8.	
A_{ps}	=	516.128 mm ²	- a	= 20.451936 mm
f_{pe}	=	930 MPa	- c	= 24.061101 mm
f_{ps}	=	1852.501705 MPa	- L/d _p	= 9

INDEKS PENULANGAN

ω_p	=	0.021730182	
ω	=	0.037059405	
ω'	=	0.02470627	
ω_T	=	0.031774825 <	0,36 β_1
M_n akhir	=	1554.317607 kNm	
		48.695% atau	48.695% dari balok tanpa tendon luar
P_e	=	479.99904 kN	
momen tak terfaktor			
Mtengah bentang		1371.456712 kNm	82.90%
Mdukungan			

TEGANGAN PADA TENDON SAAT BEBAN LAYAN

- TENGAH BENTANG

M_T	=	1371.456712 kNm	max beban	1165.74	M_T	=	2742.913 kNm
e	=	527.5 mm	naik	82.898%	e	=	152.5 mm
f_a	=	1.232133902 Mpa <	$0.5\sqrt{f'_c}$	f_a	=	-1.4894571 Mpa <	$0.45 \cdot f'_c =$
f_b	=	-0.893505924 Mpa <	$0.45 \cdot f'_c$	f_b	=	0.3013238 Mpa <	$0.5\sqrt{f'_c} =$

- DUKUNGAN

- TEGANGAN PADA SAAT MOMEN RETAK

M_{cr}	=	217.2116756 kNm	
f_a	=	-0.622869505 Mpa <	$0.45 \cdot f'_c =$
f_b	=	-1.546549856 Mpa <	$0.45 \cdot f'_c =$

GESER

V_{ci}	=	474.8046487	
V_{cw}	=	1296.851661 kN >	$V_{ci} =$
V_c	=	$V_{ci} =$	474.8046487 kN
			101.189%

Peningkatan kemampuan dukung beban

M_u	=	1243.454085 kNm	
w_u	=	287.8365938 kN/m'	NAIK
w_d	=	126.9867326 kN/m'	94.91%

$wL = 507.9469303 \text{ kN/m}^1$
 $M \text{ tdk terfaktor} = 1371.456712 \text{ kNm}$ tengah bentang
 2742.913424 kNm pada dukungan

tegangan beton pada saat transfer

gaya prategang awal $P_i = 564.7047529 \text{ kNm}$
 dengan rasio kehilangan gaya prategang $R = 0.85$
 - tegangan serat atas = f_a 1.037238852 MPa
 - tegangan serat bawah = f_b -5.245852003 MPa

kontrol daerah pengankuran

kolom tulangan $4 \times 9 \text{ D}$ 36
 tulangan kolom 36 jumlah 10 36 buah pada tiap sisi
 gaya tarik akibat gaya prategang $T = 693.3109241 \text{ kN}$
 f_y sengkang = 400 MPa
 f_s ijin = 170 MPa

luas perlu $4078.299553 \text{ mm}^2 <$ luas tersedia 10182.9 mm^2 OK

LAMPIRAN C

**Hasil-hasil Analisis Prapenekanan Luar pada Balok yang ditabelkan
pada tabel 4.8**

HASIL-HASIL ANALISIS

DATA :

$$\begin{aligned} b_e &= 2000 \text{ mm} \\ b_w &= 400 \text{ mm} \\ h &= 800 \text{ mm} \\ h_f &= 120 \text{ mm} \\ d &= 650.5 \text{ mm} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} A_s &= 4419.642857 \text{ mm}^2 \\ A_s' &= 2946.428571 \text{ mm}^2 \\ L &= 7200 \text{ mm} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} f_c' &= 30 \text{ MPa} \\ f_y &= 400 \text{ MPa} \\ E_c &= 25742.96 \text{ MPa} \\ E_s &= 200000 \text{ MPa} \\ A_c &= 512000 \text{ mm}^2 \\ -\beta_1 &= 0.85 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{-----}> & 9 \text{ D} & 25 \\ \text{-----}> & 6 \text{ D} & 25 \\ \text{jenis dukungan} & \text{jepit-jepit} \end{aligned}$$

ANALISIS KUAT NOMINAL

$$\begin{aligned} - a &= 34.66386555 \text{ mm} \\ - c &= 40.78101829 \text{ mm} \\ - y &= 61.3752952 \text{ mm} \\ - M_n &= 1712.547291 \text{ kNm} \\ - \epsilon_s &= 0.044853145 \text{ OK} \\ - \epsilon_s' &= -0.001891982 \\ - \epsilon_y &= 0.002 \end{aligned}$$

RASIOTULANGAN

$$\begin{aligned} \rho &= 0.016985561 \leq \rho_{\max} \\ y &= 147.8783 \text{ mm} \\ I_g &= 31169066667 \text{ mm}^4 \\ M_{cr} &= 226.5478794 \text{ kNm} \\ I_{cr} &= 16496173596 \text{ mm}^4 \end{aligned}$$

GESER

$$\begin{aligned} V_c &= 244.6674089 \text{ kN} \\ \rho_w &= 0.016985561 \\ \text{tulangan geser tersedia} & \\ \text{diameter} & 2 \times 12 \text{ jarak} \\ V_n \text{ tersedia} &= 1926.940062 \text{ kN} \\ V_n \text{ perlu} &= 1902.830323 \text{ kN} \\ \text{OK!!!!!!} \end{aligned}$$

LENDUTAN

$$\begin{aligned} - D &= 1 \\ - L &= 4 \\ - w_u &= 317.13839 \text{ kN/m}' \\ - w_d &= 139.91399 \text{ kN/m}' \\ - w_l &= 93.275996 \text{ kN/m}' \\ - M_2 &= 503.69038 \text{ kNm} \\ - I_e &= 1.783\text{E}+10 \text{ mm}^4 \\ \text{seketika} & \Delta = 1.829\text{E}-07 \text{ mm} \\ \text{jk.panjang} & \Delta = 0.5235013 \text{ mm} \end{aligned}$$

70 mm

Analisis momen nominal balok dengan penambahan pratekan luar

d_p	=	650.5 mm			
M_n	=	1883.80202 kNm			
A_p perlu	=	1729.945828 mm ²		n_{perlu}	= 33.517767
A_p dipakai	=	16 D	3/8.		
A_{ps}	=	1651.6096 mm ²		- a	= 40.037443 mm
f_{pe}	=	930 MPa		- c	= 47.102874 mm
f_{ps}	=	1236.314926 MPa		- L/d _p	= 11.068409

INDEKS PENULANGAN

ω_p	=	0.052316413	
ω	=	0.045294828	
ω'	=	0.030196552	
ω_T	=	0.067414689 <	0.36 β_1

M_n akhir	=	2347.2051 kNm	
		19.7428% atau	27.0389% dari balok tanpa tendon luar

P_e	=	1535.996928 kN	
momen tak terfaktor			
Mtengah bentang		2071.063323 kNm	75.6796%
Mdukungan			

TEGANGAN PADA TENDON SAAT BEBAN LAYAN - TENGAH BENTANG

M_T	=	2071.063323 kNm	max beban	1760.4	M_T	=	4142.127 kNm	
e	=	378 mm	naik	0.7568	e	=	152.5 mm	
f_a	=	2.009597783 Mpa <	$0.5\sqrt{f'_c}$		f_a	=	-4.9149742 Mpa <	$0.45f'_c$
f_b	=	-2.933567079 Mpa <	$0.45f'_c$		f_b	=	0.9642361 Mpa <	$0.5\sqrt{f'_c}$

- TEGANGAN PADA SAAT MOMEN RETAK

M_{cr}	=	227.3057507	
f_a	=	0.08879103 Mpa <	$0.5\sqrt{f'_c}$
f_b	=	-8.979201718 Mpa <	$0.45f'_c$

GESER

V_{di}	=	910.736534	
V_{cw}	=	1678.825654 kN >	V_{ci} =
V_c	=	V_{ci} =	910.736534 kN
			272.23451%

Peningkatan kemampuan dukung beban

Mu =	1877.76408		
wu =	434.6676111 kN/m'	NAIK	37.059%
wd =	191.7651225 kN/m'		
wL =	767.0604901 kN/m'		
M tdk terfaktor =	2071.063323 kNm	tengah bentang	1
	4142.126647 kNm	pada dukungan	

tegangan beton pada saat transfer

gaya prategang awal P_i =	1807.055209 kNm		
dengan rasio kehilangan gaya prategang R =		0.85	
- tegangan serat atas =	f_a	1.978308761 MPa	
- tegangan serat bawah =	f_b	-14.19112527 MPa	

kontrol daerah pengangkuruan

kolom	tulangan	4 x 9 D			
tulangan kolom dipakai D			36 jumlah	36	10 buah pada tiap sisi
gaya tarik akiba	1803.115629 kN				
f_y sengkang =			400 MPa		
f_s ijin =			170 MPa		

luas perlu	10606.56252 mm ² >	luas tersedia	10182.9 mm ²	tdk ok
------------	-------------------------------	---------------	-------------------------	--------

HASIL-HASIL ANALISIS

DATA :

b_e =	2000 mm	- mutu :	f'_c =	30	
b_w =	400 mm		f_y =	400	
h =	800 mm		E_c =	25742.96	
h_f =	120 mm		E_s =	200000	4252.093
d =	650.5 mm		A_c =	512000	152.5
	650.5		$-\beta_1$ =	0.85	$0.45 \cdot f'_c =$
A_s =	4419.642857 mm ²		9 D	25	$0.5 \sqrt{f'_c} =$
A_s' =	2946.428571 mm ²		6 D	25	
L =	7200 mm				

ANALISIS KUAT NOMINAL

- a =	34.66386555 mm
- c =	40.78101829 mm
- y =	61.3752952 mm
- M_{n1} =	1712.547291 kNm
- ϵ_s =	0.044853145 OK
- ϵ_s' =	-0.001891982
- ϵ_v =	0.002

seketika
jk.panjang

LENDUTAN

- D =	1
- L =	4
- w_u =	317.13839 kN/m'
- w_d =	139.91399 kN/m'
- w_l =	93.275996 kN/m'
- M_a =	503.69038 kNm
- I_e =	1.783E+10 mm ⁴
Δ =	1.829E-07 mm
Δ =	0.5235013 mm

RASIOTULANGAN

ρ =	0.016985561	≤	ρ_{max}
y =	147.8783 mm		
I_g =	31169066667 mm ⁴		
M_{cr} =	226.5478794 kNm		
I_{cr} =	16496173596 mm ⁴		

GESER

V_c =	244.6674089 kN
ρ_w =	0.016985561

tulangan geser tersedia

diameter	2 x 12 jarak	70 mm
V_n tersedia =	1926.940062 kN	
V_n perlu =	1902.830323 kN	

OK!!!!!!



Analisis momen nominal balok dengan penambahan pratekan luar

d_p	=	650.5 mm			
M_n	=	2055.056749 kNm			
A_p perlu	=	1887.21363 mm ²		n_{perlu} =	36.564837
A_p dipakai	=	17 D	3/8.		
A_{ps}	=	1754.8352 mm ²		- a	= 42.061475 mm
f_{pe}	=	930 MPa		- c	= 49.484088 mm
f_{ps}	=	1222.414048 MPa		- L/d _p	= 11.068409

INDEKS PENULANGAN

ω_p	=	0.054961189		
ω	=	0.045294828		
ω'	=	0.030196552		
ω_T	=	0.070059465 <	0,36 β_1	
M_n akhir	=	2409.519631 kNm		
		14.710936% atau		28.926% dari tanpa tendon
P_e	=	1631.996736 kN		
momen tak terfaktor				
Mtengah bentang			2126.046733 kNm	76.309%
Mdukungan				

TEGANGAN PADA TENDON SAAT BEBAN LAYAN

- TENGAH BENTANG

M_T	=	2126.046733 kNm	max beban	1807.14	M_T	=
e	=	378 mm	naik	0.76309	e	=
f_a	=	2.137586488 Mpa <	0.5 $\sqrt{f'_c}$	- f_a	=	-5.2269378 Mpa <
f_b	=	-3.119303865 Mpa <	0.45 $\cdot f'_c$	- f_b	=	1.0245009 Mpa <

- TEGANGAN PADA SAAT MOMEN RETAK

M_{cr}	=	227.3531176		
f_a	=	0.218129661 Mpa <	0.5sqrt(f'_c) =	
f_b	=	-9.780030444 Mpa <	0.45 $\cdot f'_c$ =	

GESER

V_{ci}	=	910.7366939		
V_{cw}	=	1728.593083 kN >	V_{ci}	=
V_c	=	V_{ci} =	910.7366939 kN	
			272.23%	

Peningkatan kemampuan dukung beban

Mu =	1927.615705 kNm		
wu =	446.2073391 kN/m'	NAIK	40.70%
wd =	196.856179 kN/m'		
wL =	787.4247161 kN/m'		
M tdk terfaktor =	2126.046733 kNm	tengah bentang	1
	4252.093467 kNm	pada dukungan	

tegangan beton pada saat transfer

gaya prategang awal P_i =	1919.99616 kNm	
dengan rasio kehilangan gaya prategang R =		0.85
- tegangan serat atas =	f_a	2.130959048 MPa
- tegangan serat bawah =	f_b	-15.13421981 MPa

kontrol daerah pengankuran

kolom	tulangan	4 x 9 D	36
tulangan kolom	36 jumlah		10 buah pada tiap sisi
gaya tarik akibat gaya prategang T =			1915.05801 kN
fy sengkang =		400 MPa	
fs ijin =		170 MPa	

luas perlu	11265.04712 mm ² <	luas tersedia	10182.9 mm ²	tdk ok
------------	-------------------------------	---------------	-------------------------	--------