



DASAR-DASAR DESAIN DAN ANALISA BETON PRATEGANG

Sri Frapanti, S.T., M.T.

Fahrizal Zulkarnain, S.T., M.Sc., Ph.D.

**DASAR-DASAR
DESAIN DAN
ANALISA BETON
PRATEGANG**

DASAR-DASAR DESAIN DAN ANALISA BETON PRATEGANG

Sri Frapanti, S.T., M.T.
Fahrizal Zulkarnain, S.T., M.Sc., Ph.D.

HAK CIPTA DILINDUNGI UNDANG-UNDANG

Dilarang memperbanyak atau memindahkan sebagian isi buku ini dalam bentuk apapun, baik secara elektronik maupun mekanis, termasuk memfotocopy, merekam dan dengan sistem penyimpanan lainnya tanpa izin tertulis dari penulis.



Judul

Dasar-Dasar Desain dan Analisa Beton Prategang

Penulis

Sri Frapanti, S.T., M.T.

Fahrizal Zulkarnain, S.T., M.Sc., P. hD

Editor

Nadra Amalia, M.Pd.

Desain Sampul

Fimanda Arlita, S.Pd.

Cetakan Pertama: November 2021

(xviii + 118 hlm); 15 x 23 cm

ISBN : 978-623-408-007-0

E-ISBN : 978-623-408-008-7 (PDF)

Penerbit



Redaksi

Jalan Kapten Muktar Basri No 3 Medan, 20238

Telepon, 061-6626296, Fax. 061-6638296

Email; umsupress@umsu.ac.id

Website; <http://umsupress.umsu.ac.id/>

Anggota IKAPI Sumut, No: 38/ Anggota Luar Biasa/SUT/2020

Anggota APPTI (Afiliasi Penerbit Perguruan Tinggi Indonesia)

Anggota APPTIMA (Afiliasi Penerbit Perguruan Tinggi

Muhammadiyah Aisyiyah)

DAFTAR ISI

DAFTAR ISI _____	v
PRAKATA _____	ix
DAFTAR GAMBAR _____	x
DAFTAR TABEL _____	xiii
PENDAHULUAN _____	xv
A. Deskripsi Singkat Mata Kuliah _____	xv
B. Capaian Pembelajaran Mata Kuliah _____	xvi
C. Sub Capaian Pembelajaran Mata Kuliah _____	xvi
BAB I _____	1
PRINSIP DASAR BETON PRATEGANG _____	1
A. Tujuan Pembelajaran _____	1
B. Materi Pembelajaran _____	1
1.1 Definisi Beton Prategang _____	1
1.2 Prinsip Dasar Beton Pratekan _____	2
1.3 Jenis Metode Prategang _____	7
1.4 Keuntungan dan Kerugian Beton Prategang _____	10
1.5 Perbedaan utama antara beton bertulang dan beton pratekan _____	12
C. Evaluasi / latihan _____	13
BAB II _____	15
MATERIAL BETON PRATEGANG _____	15
A. Tujuan Pembelajaran _____	15
B. Materi Pembelajaran _____	15

2.1 Beton_____	15	B. Materi Pembelajaran _____	45
2.2 Baja Prategang _____	17	5.1 Kehilangan Akibat Deformasi Elastis Beton_____	45
C. Evaluasi / Latihan _____	21	5.2 Kehilangan Tegangan akibat Penarikan Kabel-kabel yang Melengkung secara Berurutan_____	47
BAB III_____	23	5.3 Kehilangan Akibat Penyusutan Beton ____	48
PERENCANAAN BETON PRATEGANG_____	23	5.4 Kehilangan Akibat Rangkak Beton _____	51
A. Tujuan Pembelajaran_____	23	5.5 Kehilangan Akibat Gesekan _____	53
B. Materi Pembelajaran _____	23	5.6 Kehilangan Akibat Penggelinciran Angkur_____	57
3.1 Jenis Metode Perencanaan Beton Prategang_____	23	C. Evaluasi / Latihan _____	62
3.2 Tegangan Izin pada Beton Prategang ____	28	BAB VI_____	65
3.3. Jenis-jenis Konstruksi Beton Prategang __	31	DESAIN PENAMPANG BETON PRATEGANG _____	65
C. Evaluasi /Latihan _____	32	A. Tujuan Pembelajaran_____	65
BAB IV_____	35	B. Materi Pembelajaran _____	65
ANALISIS PRATEGANG DAN TEGANGAN LENTUR_____	35	6.1 Gaya Prategang_____	65
A. Tujuan Pembelajaran_____	35	6.2 Daerah Batas untuk Gaya Prategang_____	68
B. Materi Pembelajaran _____	35	6.3 Desain Penampang Terhadap Tarikan Aksial _____	71
4.1 Tegangan Resultan Pada Suatu Penampang _____	35	C. Evaluasi / Latihan _____	74
4.2 Konsep Perimbangan Beban (Load Balancing)_____	38	BAB VII_____	77
4.3 Pengaruh Pembebanan terhadap Tegangan Tarik pada Tendon_____	40	DESAIN BATANG LENTUR PRATARIK DAN PASCATARIK _____	77
C. Evaluasi / Latihan _____	43	A. Tujuan Pembelajaran_____	77
BAB V _____	45	B. Materi Pembelajaran _____	77
KEHILANGAN PRATEGANG_____	45	7.1 Desain Balok Pratarik _____	77
A. Tujuan Pembelajaran_____	45		

7.2 Desain Balok Pascatarik_____	86
7.3 Pemeriksaan terhadap kekuatan geser ____	93
7.4 Pemeriksaan terhadap Lendutan pada Batas Kemampulayanan _____	95
C. Evaluasi / Latihan _____	98
BAB VIII _____	101
DESAIN GESER BALOK BETON PRATEGANG_____	101
A. Tujuan Pembelajaran_____	101
B. Materi Pembelajaran _____	101
8.1 Geser Pada Balok Beton Prategang _____	101
8.2. Tegangan Geser Balok Prategang _____	102
8.3 Kuat Geser Pada Beton Prategang_____	103
8.4 Desain Tulangan Geser Balok Prategang_____	108
C. Evaluasi / Latihan _____	111
DAFTAR PUSTAKA _____	113
TENTANG PENULIS _____	115
TENTANG EDITOR _____	117

PRAKATA

Puji syukur penulis panjatkan kehadirat Allah SWT, karena atas rahmat dan karunia-Nya penulis dapat menyelesaikan modul mata kuliah Beton Prategang. Shalawat dan Salam penulis limpahkan kepada Nabi Muhammad SAW.

Beberapa tahun mengajar di Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara, banyak pengalaman yang mendorong penulis untuk menulis sebuah modul yang dapat meningkatkan minat mahasiswa dalam belajar. Disamping karena modul memiliki kejelasan bahasa dan metode yang mudah dipahami. Didalam modul terdapat mater perkuliahan yang akan disampaikan dosen kepada mahasiswa Program Studi Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara, nantinya modul ini digunakan sebagai bahan ajar wajib yang akan dipelajari mahasiswa selama satu semester.

Ilmu Beton Prategang sangat diperlukan bagi mahasiswa Program Studi Teknik Sipil dikarenakan bagian dari Stuktur Beton dalam pembangunan terkini di konstruksi Sipil.

Akhir kata kepada bapak/ibu dosen dan para pembaca, semoga buku ini dapat memberikan wawasan dan keilmuaan bagi semua insan.

Medan, November 2021

Tim Teaching Mata Kuliah

DAFTAR GAMBAR

No. Gambar	Keterangan	Halaman
1.1	Gaya yang bekerja pada beton prategang	3
1.2	Kondisi Perbedaan menahan tarik pada Beton Bertulang dan beton Prategang	5
1.3	Gaya Prategang F melalui kabel prategang dengan lintasan parabola	6
1.4	Prinsip Kerja pada Beton Pratarik	7
1.5	Prinsip Kerja pada Beton Pascatarik	9
1.6	Kondisi Retak pada beton bertulangan dan tidak retak pada beton prategang	11
1.7	Kondisi Penampang pada beton bertulangan dan pada beton prategang yang lebih efektif	11
2.1	Kawat Tunggal (wire)	19
2.2	Baja Prategang	19
2.3	Kawat Batangan (Bar)	20
2.4	Untaian Kawat (Strains)	20
3.1	Jenis-Jenis Kontruksi Beton Prategang pada jembatan	31
3.2	Jenis-Jenis Kontruksi Beton Prategang pada Jalan layang (fly over)	31
3.3	Jenis Konstruksi Beton prategang pada Monorail	31
3.4	Video Tutorial Cara Pembuatan Beton Prategang	32

4.1	Distribusi Tegangan akibat Prategang Eksentris, Beban Mati dan Beban Hidup	36
4.2	Balok Prategang	37
4.3	Analisis Tegangan pada Tengah-tengah Bentang	38
4.4	Pengaruh Gaya Prategang terhadap Rotasi Balok Beton.	41
4.5	Pengaruh Beban Transversal terhadap Rotasi Balok Beton.	41
4.6	Rotasi Balok akibat Aksi Beban.	42
5.1	Penarikan Kabel-kabel Melengkung secara Berurutan.	47
7.1	Penampang I Simetris	80
7.2	Kedudukan Penampang Geser Kritis pada suatu Balok Prategang (Bate dan Bennett).	83
7.3	Susunan tulangan dalam gording	84
7.4	Potongan Melintang Balok Pascatarik	88
7.5	Susunan Kabel	91
7.6	Daerah Batas dan Gaya Prategang.	91
7.7	Susunan Tulangan Longitudinal dan Tulangan Badan	94
7.8	Susunan Gaya-gaya Angkur dan Prisma-prisma ekuivalen.	97
7.9	Susunan Blok-blok Angkur Tulangan	98
8.1	Retak pada Balok untuk retak geser dan retak lentur	102

8.2	Beban yang mengimbangi gaya geser (a) balok prategang (b) geser internal V_p akibat gaya prategang (c) geser intern V akibat beban luar W	103
8.3	perkembangan retak geser lentur (a) pola dan jenis retak (b) geser akibat beban luar, haya geser V_{cr} pada pot.2 (c) Momen lentur dengan retak lentur pertama di pot	105
8.4	Balok beton prategang pada pemasangan sengkang	108

DAFTAR TABEL

No. Tabel	Keterangan	Halaman
2.1	Kuat Tekan beton	16
2.2	Perbandingan kekuatan tekan beton pada berbagai umur beton benda uji	16
2.3	Tipikal Baja Prategang	18
2.4	Common Types from <i>CPCI</i> Metric Design Manua	21
5.1	Jenis Kabel dan Kehilangan Tegangan	57
5.2	Tipe kehilangan Tegangan	60

PENDAHULUAN

A. Deskripsi Singkat Mata Kuliah

Mata kuliah ini merupakan lanjutan mata kuliah Struktur Beton, yang memiliki konsep dasar analisis elemen struktur beton prategang. Adapun konsep dasar pemberian mata kuliah ini dimulai dari pengenalan struktur beton prategang, properti material dan spesifikasinya dalam sistem beton prategang, prinsip dasar analisis (perhitungan gaya) elemen beton prategang, pendekatan dalam desain elemen balok beton prategang (lentur, geser, torsi), kontrol defleksi, perhitungan rinci kehilangan prategang, analisis dan desain sistem beton prategang pada elemen khusus: *composite member, compression member, tensile member, slab*.

Mata kuliah ini membahas tentang (1) Prinsip Dasar Beton Prategang, (2) Material Beton Prategang (3)Perencanaan Beton Prategang, (4) Analisis Prategang dan Tegangan Lentur (5) Kehilangan Prategang (6) Desain Penampang Beton Prategang (7) Desain Batang Lentur Pratarik dan Pascatarik.(8) Desain Geser Balok Beton Prategang.

Untuk mencapai tujuan dan isi materi tersebut digunakan **metode pembelajaran** Tatap muka langsung dan tidak langsung, *problem solving, problem-based learning, discovery learning, small group discussion*, dan simulasi, dengan teknik penyampaian materi pembelajaran menggunakan nilai-nilai Al-Islam dan kemuhammadiyah. **Penilaian** (evaluasi) terdiri dari

tiga komponen yaitu **TTM 30%** (Kehadiran 20%, UTS 40% dan UAS 40%), **TT 30%** (MR 20%, TR 20%, JR 30%, dan MRch 30%), **TM 30%** (MR 60%, dan TR 40%), dan **Attitude 10%**, yang semuanya bersumber dari tiga aspek, yaitu kognitif, afektif dan psikomotorik.

B. Capaian Pembelajaran Mata Kuliah

Mahasiswa mampu melakukan identifikasi, formulasi dan menganalisis sistem energi dalam dibidang ilmu *mekanika fluida* secara konvensional dan *numeric*, mandiri, terukur dan bebas plagiasi dengan benar dan bertanggungjawab berdasarkan nilai-nilai Al-Islam dan kemuhammadiyahahan.

C. Sub Capaian Pembelajaran Mata Kuliah

1. Mahasiswa Mahasiswa/i mampu menganalisis besarnya gaya dalam yang terjadi pada elemen beton prategang serta mengevaluasi apakah besaran gaya-gaya dalam tersebut memenuhi persyaratan yang ditentukan dalam peraturan desain.
2. Mahasiswa mampu merancang elemen balok beton prategang (lentur, geser dan torsi) yang memenuhi persyaratan yang ditentukan dalam peraturan desain.
3. Mahasiswa mampu menghitung besarnya defleksi pada elemen balok beton prategang serta mengevaluasi apakah besaran defleksi tersebut memenuhi persyaratan yang ditentukan dalam peraturan desain
4. Mahasiswa mampu menghitung secara rinci besarnya kehilangan prategang dan menggunakan hasil hitungan untuk mengevaluasi kembali hasil. Mahasiswa mampu menganalisis menghitung nilai kerugian keseluruhan dari aliran fluida didalam pipa.
5. Mahasiswa mampu menerapkan prinsip dasar analisis dan desain prategang pada elemen khusus
6. Mahasiswa mampu mendesain penampang beton.
7. Mahasiswa mampu merancang sebuah penelitian dan menuliskannya ke dalam bentuk sebuah laporan secara mandiri, terukur, dan bebas plagiasi dengan benar serta bertanggung jawab berdasarkan nilai-nilai Al-Islam kemuhammadiyahahan.

BAB I

PRINSIP DASAR BETON PRATEGANG

A. Tujuan Pembelajaran

Adapun tujuan pembelajaran dari mata kuliah ini adalah sebagai berikut :

1. mahasiswa mampu mendefenisikan pengertian dari beton prategang;
2. mahasiswa mampu mendeskripsikan konsep dasar metode prategang;
3. mahasiswa mampu membandingkan perbedaan beton prategang dan beton bertulangan; dan
4. mahasiswa mampu mendeskripsikan prinsip dan metode prategang.

B. Materi Pembelajaran

1.1 Definisi Beton Prategang

Definisi beton prategang menurut beberapa peraturan yakni

a. Menurut PBI - 1971

Beton prategang adalah beton bertulang yang telah menimbulkan tegangan-tegangan intern dengan nilai dan pembagian yang sedemikian rupa hingga tegangan-

tegangan akibat beton-beton dapat dinetralkan sampai suatu taraf yang diinginkan.

b. Menurut Draft Konsensus Pedoman Beton 1998

Beton prategang adalah beton bertulang yang telah diberikan tegangan untuk mengurangi tegangan tarik potensial dalam beton akibat pemberian beban yang bekerja.

c. Menurut ACI

Beton prategang adalah beton yang mengalami tegangan internal dengan besar dan distribusi sedemikian rupa sehingga dapat mengimbangi sampai batas tertentu tegangan yang terjadi akibat beban eksternal.

Dapat ditambahkan bahwa beton prategang dalam arti seluas-luasnya, termasuk keadaan (kasus) diantaranya tegangan-tegangan yang diakibatkan oleh regangan-regangan internal diimbangi sampai batas tertentu, seperti pada konstruksi yang melengkung (busur). Tetapi dalam tulisan ini pembahasannya dibatasi dengan beton prategang yang memakai tulangan baja yang ditarik dan dikenal sebagai tendon.

1.2 Prinsip Dasar Beton Pratekan

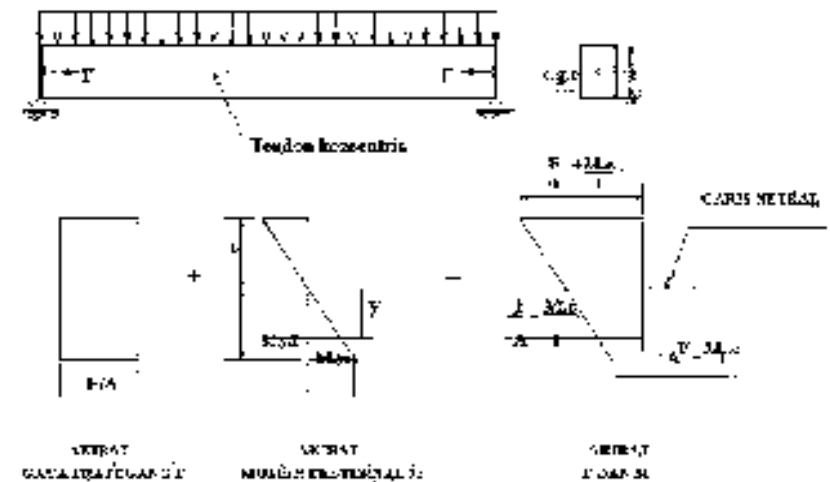
Beton pratekan dapat didefinisikan sebagai beton yang diberikan tegangan tekan internal sedemikian rupa sehingga dapat meng-eliminir tegangan tarik yang terjadi akibat beban eksternal sampai suatu batas tertentu. Ada 3 (tiga) konsep yang dapat digunakan untuk menjelaskan dan menganalisa sifat-sifat dasar dari beton pratekan atau prategang:

Konsep Pertama

Sistem pratekan/prategang untuk mengubah beton yang getas menjadi bahan yang elastis.

Eugene Freyssinet menggambarkan dengan memberikan tekanan terlebih dahulu (pra-tekan) pada bahan beton yang pada dasarnya getas akan menjadi bahan yang elastis. Dengan memberikan tekanan (dengan menarik baja mutu tinggi), beton yang bersifat getas dan kuat memikul tekanan, akibat adanya tekanan internal ini dapat memikul tegangan tarik akibat beban eksternal.

Hal ini dapat dijelaskan dengan gambar dibawah ini:



Gambar 1.1. Gaya yang bekerja pada beton prategang

AAAKIa FFF Gambar 1.1.

Akibat gaya prategang F , akan timbul tegangan tekan merata sebesar :

$$\sigma = \frac{F}{A} \dots\dots\dots (1.1)$$

Jika M adalah momen eksternal pada penampang akibat beban dan berat sendiri balok, maka tegangan pada setiap titik sepanjang penampang akibat M adalah :

$$\sigma = \frac{M v}{I} \dots\dots\dots (1.2)$$

dimana y adalah jarak dari sumbu yang melalui titik berat dan I adalah momen inersia penampang. Jadi distribusi tegangan yang dihasilkan adalah:

$$\sigma = \frac{F}{A} \pm \frac{M v}{I} \dots\dots\dots (1.3)$$

Bila tendon ditempatkan eksentris (sebesar e), maka distribusi tegangannya (lihat *Gambar 1.2*) menjadi :

$$\sigma = \frac{F}{A} + \frac{F e v}{I} + \frac{M v}{I} \dots\dots\dots (1.4)$$

Dimana $\frac{F e v}{I}$ adalah tegangan akibat momen eksentris.

Konsep Kedua

Sistem Prategang untuk Kombinasi Baja Mutu Tinggi dengan Beton Mutu Tinggi.



Gambar 1.2. Kondisi Perbedaan menahan tarik pada Beton Bertulang dan beton Prategang

Konsep ini hampir sama dengan konsep beton bertulang biasa, yaitu beton prategang merupakan kombinasi kerja sama antara baja prategang dan beton, dimana beton menahan beton tekan dan baja prategang menahan beban tarik. Hal ini dapat dijelaskan pada beton prategang. Baja prategang ditarik dengan gaya prategang T yang membentuk suatu kopel momen dengan gaya tekan pada beton C untuk melawan mo-men akibat beban luar.

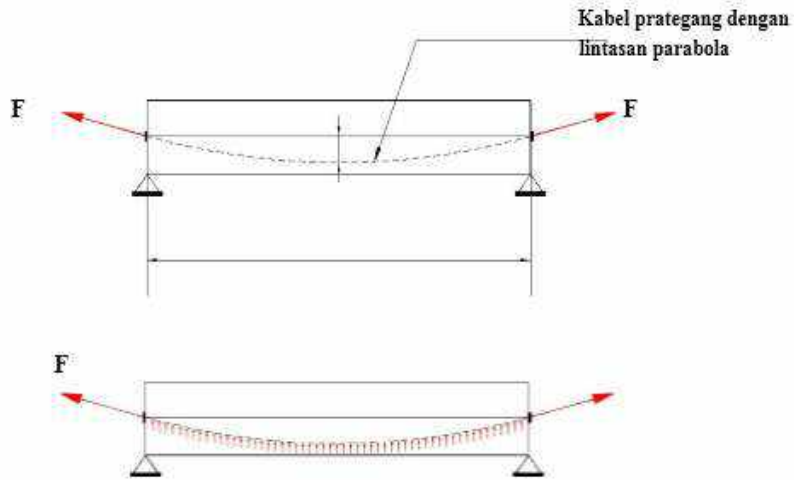
Sedangkan pada beton bertulang biasa, besi penulangan menahan gaya tarik T akibat beban luar, yang juga membentuk kopel momen dengan gaya tekan pada beton C untuk melawan momen luar akibat beban luar.

Konsep Ketiga

Sistem Prategang untuk mencapai keseimbangan beban.

Disini menggunakan prategang sebagai suatu usaha untuk membuat keseimbangan gaya-gaya pada suatu balok. Pada design struktur beton prategang, pengaruh dari pra-tegang dipandang sebagai keseimbangan berat sendiri, sehingga batang yang mengalami lendutan

seperti plat, balok dan gelagar tidak akan mengalami tegangan lentur pada kondisi pembebanan yang terjadi. Hal ini dapat dijelaskan sebagai berikut:



Gambar 1.3. Gaya Prategang F melalui kabel prategang dengan lintasan parabola

Suatu balok beton diatas dua perletakan (*simple beam*) yang diberi gaya prategang F melalui suatu kabel prategang dengan lintasan parabola. Beban akibat gaya prategang yang terdistribusi secara merata kearah atas dinyatakan:

$$W_b = \frac{8.F.h}{L^2}$$

Dimana: W_b = beban merata kearah atas, akibat gaya prategang F

h = tinggi parabola lintasan kabel prategang

L = bentangan balok

F = gaya prategang

Jadi beban merata akibat beban (mengarah kebawah) diimbangi oleh gaya merata akibat prategang w_b yang mengarah keatas.

Inilah tiga konsep dari beton prategang (pratekan), yang nantinya dipergunakan untuk menganalisa suatu struktur beton prategang.

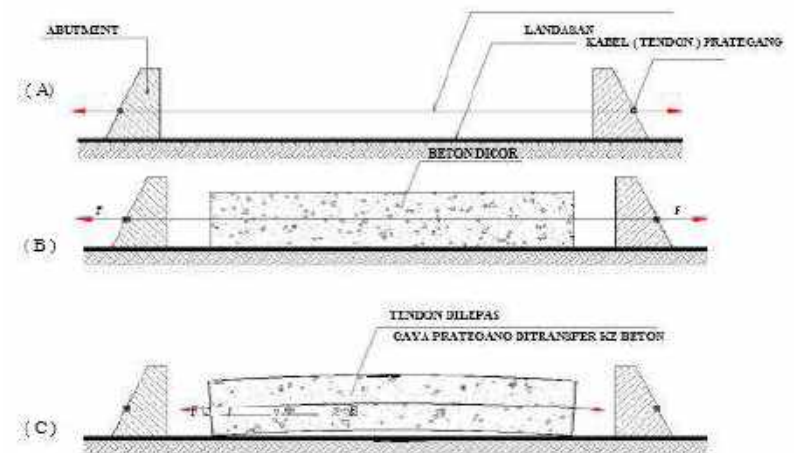
1.3 Jenis Metode Prategang

Pada dasarnya ada 2 macam metode pemberian gaya prategang pada beton, yaitu

1. Pratarik (Pre-Tension Method)

Metode ini baja prategang diberi gaya prategang dulu sebelum beton dicor, oleh karena itu disebut *pretension method*.

Adapun prinsip dari Pratarik ini secara singkat adalah sebagai berikut:



Gambar 1.4. Prinsip Kerja pada Beton Pratarik

Tahap 1: Kabel (Tendon) prategang ditarik atau diberi gaya prategang kemudian diangker pada suatu *abutment* tetap (gambar 4A).

Tahap 2: Beton dicor pada cetakan (formwork) dan landasan yang sudah disediakan sedemikian sehingga melingkupi tendon yang sudah diberi gaya prategang dan dibiarkan mengering (gambar 4B)

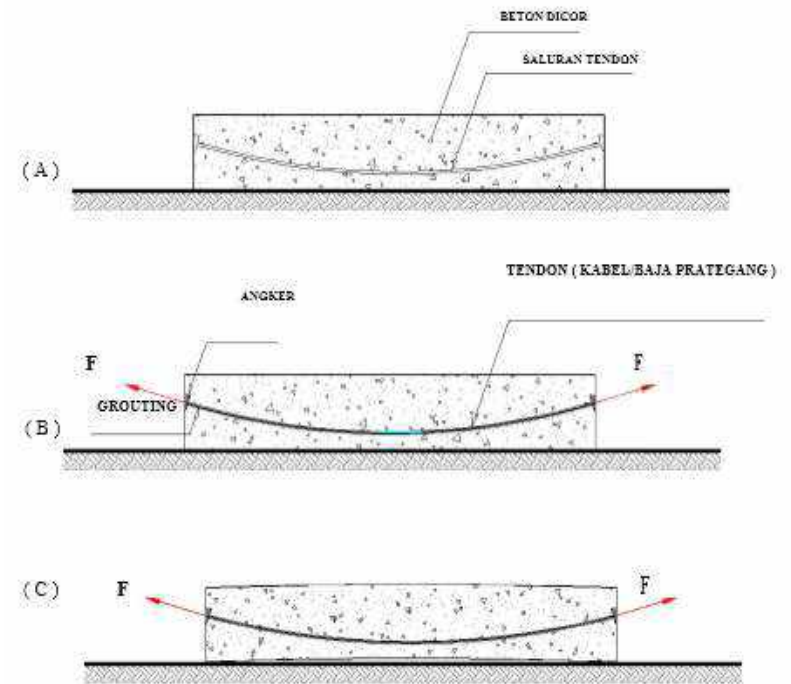
Tahap 3: Setelah beton mengering dan cukup umur kuat untuk menerima gaya prategang, tendon dipotong dan dilepas, sehingga gaya prategang di transfer ke beton (gambar 4C).

Setelah gaya prategang ditransfer ke beton, balok beton tersebut akan melengkung ke atas sebelum menerima beban kerja. Setelah beban kerja bekerja, maka balok beton tersebut akan rata.

2. Pascatarik (Post-Tension Method)

Pada metode Pascatarik, beton dicor lebih dahulu, yang sebelumnya telah disiapkan saluran kabel atau tendon yang disebut *duct*.

Secara singkat metode ini dapat dijelaskan di bawah ini.



Gambar 1.5. Prinsip Kerja pada Beton Pascatarik

Tahap 1: Dengan cetakan (formwork) yang telah disediakan lengkap dengan saluran/selongsong kabel prategang (tendon duct) yang dipasang melengkung sesuai bidang momen balok, beton dicor (gambar 5 A).

Tahap 2: Setelah beton cukup umur dan kuat memikul gaya prategang, tendon atau kabel prategang dimasukkan dalam selongsong (tendon duct), kemudian ditarik untuk mendapatkan gaya prategang. Metode pemberian gaya prategang ini, salah satu ujung kabel diangker, kemudian ujung lainnya ditarik (ditarik dari satu sisi). Ada pula yang ditarik di kedua sisinya dan

diangkat secara bersamaan. Setelah diangkat, ke-mudian saluran di *grouting* melalui lubang yang telah disediakan.

Tahap 3: Setelah diangkat, balok beton menjadi tertekan, jadi gaya prategang telah ditransfer kebeton. Karena tendon dipasang melengkung, maka akibat gaya prategang tendon memberikan beban merata kebalok yang arahnya keatas, akibatnya balok melengkung keatas (gambar 5 C).

Oleh karena itu konstruksi beton prategang harus didesain sedemikian sehingga mempunyai kekuatan yang cukup dan mempunyai kemampuan layan yang sesuai kebutuhan. Disamping itu konstruksi harus awet, tahan terhadap api, tahan terhadap kelelahan (untuk beban yang berulang-ulang dan berubah-ubah), dan memenuhi persyaratan lain yang berhubungan dengan kegunaannya

1.4 Keuntungan dan Kerugian Beton Prategang

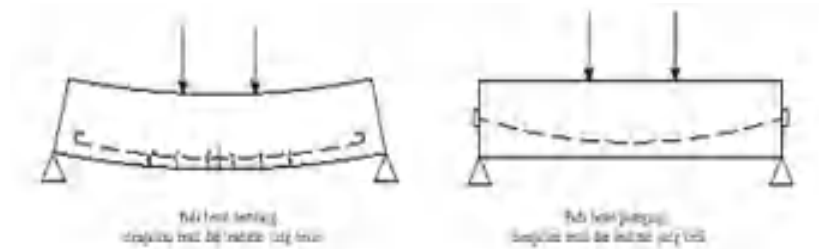
a. Keuntungan

Beton prategang memberikan keuntungan teknis besar dibandingkan dengan konstruksi lainnya (beton bertulang biasa) seperti

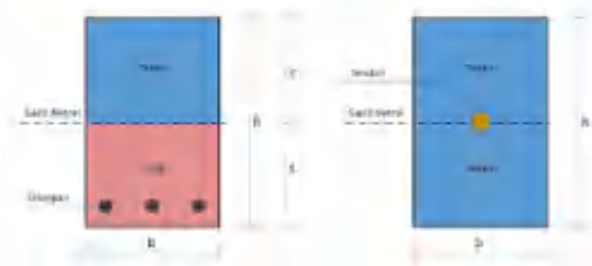
- Terhindarnya retak terbuka di daerah beton tarik, jadi lebih tahan terhadap korosif.

Kondisi perbandingan antara beton bertulang dan beton prategang.

- Penampang struktur lebih kecil/langsing, sebab seluruh penampang dipakai secara efektif.



Gambar 1.6. Kondisi Retak pada beton bertulang dan tidak retak pada beton prategang



Gambar 1.7. Kondisi Penampang pada beton bertulang dan pada beton prategang yang lebih efektif

Terlihat bahwa kekuatan penampang beton pratekan enam kali lebih besar jika dibandingkan dengan beton bertulang.

- Ketahanan geser balok bertambah, yang disebabkan oleh pengaruh pratekan yang mengurangi tegangan tarik utama (akan di bahas lebih lanjut pada tegangan geser beton prategang). Pemakaian kabel yang melengkung, khususnya untuk bentang panjang membantu mengurangi gaya geser yang timbul pada penampang tempat tumpuan.
- Jumlah berat baja prategang jauh lebih kecil dibandingkan dengan berat baja tulangan biasa ($1/5 - 1/3$), sehingga berkurangnya beban mati yang diterima pondasi.

- Biaya pemeliharaan beton prategang lebih kecil, karena tidak adanya retak-retak pada kondisi beban kerja (terhindar dari bahaya korosi).
- Lendutan yang lebih kecil
- Penggunaan bahan yang lebih sedikit karena menggunakan bahan mutu tinggi.

b. Kerugian

- Dituntut kualitas bahan yang lebih tinggi (pemakaian beton dan baja mutu yang lebih tinggi), yang harganya lebih mahal.
- Dituntut keahlian dan ketelitian yang lebih tinggi.
- Diperlukan biaya tambahan untuk pengangkutan

1.5 Perbedaan utama antara beton bertulang dan beton pratekan.

a. Beton bertulang

Cara bekerja beton bertulang adalah mengkombinasikan antara beton dan baja tulangan dengan membiarkan kedua material tersebut bekerja sendiri-sendiri. Beton bekerja memikul tegangan tekan dan baja penulangan memikul tegangan tarik. Jadi, dengan menempatkan penulangan pada tempat yang tepat, beton bertulang dapat sekaligus memikul baik tegangan tekan maupun tegangan tarik.

b. Beton pratekan

Pada beton pratekan, kombinasi antara beton dengan mutu yang tinggi dan baja bermutu tinggi dikombinasikan dengan cara aktif. Sedangkan beton

bertulang kombinasinya secara pasif. Cara aktif ini dapat dicapai dengan cara menarik baja dengan menahannya kebeton, sehingga beton dalam keadaan tertekan. Karena penampang beton sebelum beban bekerja dalam kondisi tertekan, maka bila beban bekerja tegangan tarik yang terjadi dapat dieliminir oleh tegangan tekan yang telah diberikan pada penampang sebelum beban bekerja.

C. Evaluasi / latihan

- I. Tugas dikerjakan sebagai Tugas Materi Report
 1. Jelaskan pengertian beton prategang dan perbedaaan dengan beton bertulang.
 2. Jelaskan mekanisme prinsip dasar kerja beton prategang.
 3. Jelaskan keuntungan dan kerugian dari beton prategang
 4. Sebutkan berapa jenis metode beton prategang, jelaskan

BAB II

MATERIAL BETON PRATEGANG

A. Tujuan Pembelajaran

Adapun tujuan pembelajaran dari mata kuliah ini adalah mahasiswa mampu menjelaskan properti dan spesifikasi material pada sistem prategang.

B. Materi Pembelajaran

2.1 Beton

Seperti telah di ketahui bahwa beton adalah campuran dari Semen, *Agregat* kasar (*split*), *Agregat* halus (*pasir*), Air dan bahan tambahan yang lain. Perbandingan berat campuran beton pada umumnya Semen 18 %, *Agregat* kasar 44 %, *Agregat* halus 31 % dan Air 7 %. Setelah beberapa jam campuran tersebut dituangkan atau dicor pada acuan (*formwork*) yang telah disediakan, bahan-bahan tersebut akan langsung mengeras sesuai bentuk acuan (*formwork*) yang telah dibuat. Kekuatan beton ditentukan oleh kuat tekan karakteristik (f_c') pada usia 28 hari.

Kuat tekan karakteristik adalah tegangan yang melampaui 95 % dari pengukuran kuat tekan *uniaksial* yang diambil dari tes penekanan contoh (*sample*) beton dengan ukuran kubus 150 x 150 mm, atau silinder dengan

diameter 150 mm dan tinggi 300 mm.

Perbandingan kekuatan tekan beton pada berbagai benda uji (sample).

Tabel 2.1. Kuat Tekan beton

Benda Uji	Perbandingan Kekuatan
Kubus 150 x 150 x 150 mm	1.00
Kubus 200 x 200 x 200 mm	0.95
Silinder (Dia. 150) x (H = 300) mm	0.83

Tabel 2.2. Perbandingan kekuatan tekan beton pada berbagai umur beton benda uji

Umur Benda Beton (hari)	3	7	14	21	28	90	365
Perbandingan kekuatan	0.40	0.65	0.88	0.95	1.00	1.20	1.35

Pada konstruksi beton prategang biasanya dipergunakan beton mutu tinggi dengan kuat tekan $f_c' = 30 \sim 40$ MPa. Hal ini diperlukan untuk menahan tegangan tekan pada pengangkuran tendon (baja prategang) agar tidak terjadi keretakan.

Kuat tarik beton mempunyai harga yang jauh lebih rendah dari kuat tekannya. SNI 03 - 2874 - 2002 menetapkan untuk kuat tarik beton $\sigma_{ts} = 0,50 \sqrt{f_c'}$ sedangkan ACI menetapkan $\sigma_{ts} = 0,60 \sqrt{f_c'}$. Modulus elastisitas beton E dalam SNI 03 - 2874 - 2002 ditetapkan:

$$E_c = (w_c)^{1,5} \times 0,043 \sqrt{f_c'}$$

Di mana: E_c : modulus elastisitas beton (MPa)

w_c : berat voluna beton (kg/m^3)

f_c' : tegangan tekan beton (MPa)

Sedangkan untuk beton normal diambil: $E_c = 4700 \sqrt{f_c'}$ MPa

2.2 Baja Prategang

Didalam praktek baja prategang (tendon) yang dipergunakan ada 3 (tiga) macam, yaitu

1. baja prategang,
2. kawat tunggal (wire),
kawat tunggal ini biasanya dipergunakan dalam beton prategang dengan sistem pra-tarik (pretension method),
3. untaian kawat (strand),
untaian kawat ini biasanya dipergunakan dalam beton prategang dengan sistem pasca-tarik (post-tension), dan
4. kawat batangan (bar)
kawat batangan ini biasanya digunakan untuk beton prategang dengan sistem pra-tarik (pretension).

Selain baja prategang diatas, beton prategang masih memerlukan penulangan biasa yang tidak diberi gaya prategang, seperti tulangan memanjang, sengkang, tulangan untuk pengangkuran dan lain-lain.

Tabel 2.3. Tipikal Baja Prategang

Jenis	Diameter (mm)	Luas (mm ²)	Beban Putus (kN)	Tegangan Tarik (MPa)
Baja Prategang				
	3	7.1	13.5	1900
Kawat Tunggal (wire)	4	12.6	22.1	1750
	5	19.6	31.4	1600
	7	38.5	57.8	1500
	8	50.3	70.4	1400
Untaian Kawat (strand)	9.3	54.7	102	1860
	12.7	100	184	1840
	15.2	143	250	1750
	23	415	450	1080
Kawat Batangan (bar)	26	530	570	1080
	29	660	710	1080
	32	804	870	1080
	38	1140	1230	1080

Jenis-jenis lain tendon yang sering digunakan untuk beton prategang pada sitem *pre-tension* adalah *seven-wire strand* dan *single-wire*. Untuk *seven-wire* ini, satu bendel kawat terdiri dari 7 buah kawat, sedangkan *single wire* terdiri dari kawat tunggal.

Sedangkan untuk beton prategang dengan sistem *post-tension* sering digunakan tendon *monostrand*, batang tunggal, *multi-wire* dan *multi-strand*. Untuk jenis *post-tension method* ini tendon dapat bersifat *bonded* (dimana saluran kabel diisi dengan material grouting) dan *unbonded* saluran kabel diisi dengan minyak gemuk atau *grease*. Tujuan utama dari *grouting* ini yakni
 ~ melindungi tendon dari korosi, dan
 ~ mengembangkan lekatan antara baja prategang dan beton sekitarnya.



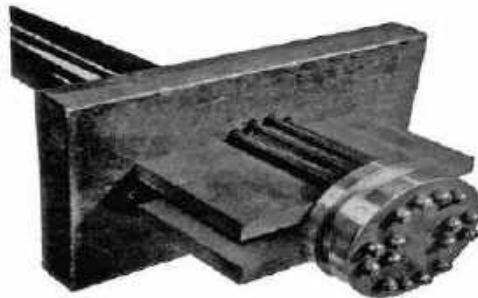
Gambar 2.1. Kawat Tunggal (wire)



Gambar 2.2. Baja Prategang



Gambar 2.3. Kawat Batangan (Bar)



Gambar 2.4. Untaian Kawat (Strains)

Material *grouting* ini biasanya terdiri dari campuran semen dan air dengan *w/c* ratio 0,5 dan *admixe* (*water reducing dan expansive agent*)

Tabel 2.4. *Common Types from CPCI Metric Design Manua*

Tendon Type	f_{pu} MPa	Desig- nation	Diameter (mm)	Area (mm ²)	(kg/m)
Seven - wire Strand	1860	9	9.53	55	0.432
	1860	11	11.13	74	0.582
	1860	13	12.70	99	0.775
	1860	15	15.24	140	1.109
	1760	16	15.47	148	1.173
Prestressing Wire	1550	5	5.00	19.6	0.154
	1720	5	5.00	19.6	0.154
	1620	7	7.00	38.5	0.302
	1760	7	7.00	38.5	0.302
Deformed	1080	15	15.0	177	1.44
	1030	26	26.5	551	4.48
	1100	26	26.5	551	4.48
Prestressing Bar	1030	32	32.0	804	6.53
	1100	32	32.0	804	6.53
	1030	36	36.0	1018	8.27

C. Evaluasi / Latihan

1. Tugas

Membuat Materi Report 2: Properti *prestressing steel* dan spesifikasinya; properti beton dan spesifikasinya; *properti nonprestressing steel constitutive modelling Prestressing steel properties and specifications; concrete properties and specifications; non-prestressing steel properties; constitutive modeling*

2. Evaluasi

Kehadiran, Attitude, Tugas Terstruktur (Materi Repot-1 dan Tugas Repot-1.

BAB III

PERENCANAAN BETON PRATEGANG

A. Tujuan Pembelajaran

1. Mahasiswa mampu menghitung properti penampang (uncracked section) beragam tipe penampang
2. Mahasiswa mampu menghitung tegangan yang terjadi pada elemen balok prategang pada setiap tahap pembebanan

B. Materi Pembelajaran

3.1 Jenis Metode Perencanaan Beton Prategang

Jenis metode perencanaan beton prategang, yaitu

1. *Working stress method* (Metode Beban Kerja)

Prinsip perencanaan disini ialah menghitung tegangan yang terjadi akibat pembebanan (tanpa dikalikan dengan faktor beban) dan membandingkan dengan tegangan yang diijinkan. Tegangan yang diijinkan dikalikan dengan suatu faktor kelebihan tegangan (overstress factor) dan jika tegangan yang terjadi lebih kecil dari tegangan yang diijinkan tersebut, maka struktur dinyatakan aman.

2. *Limit State Method* (Metode Beban Batas)

Prinsip perencanaan disini didasarkan pada batas-batas tertentu yang dapat dilampaui oleh suatu sistim struktur. Batas-batas ini ditetapkan terutama terhadap kekuatan, kemampuan layan, keawetan, ketahanan terhadap beban, api, kelelahan dan persyaratan-persyaratan khusus yang berhubungan dengan penggunaan struktur tersebut.

Dalam menghitung beban rencana maka beban harus dikalikan dengan suatu faktor beban (load factor), sedangkan kapasitas bahan dikalikan dengan suatu faktor reduksi kekuatan (reduction factor).

Tahap batas (limit state) adalah suatu batas tidak diinginkan yang berhubungan dengan kemungkinan kegagalan struktur.

Kombinasi pembebanan untuk Tahap Batas Kekuatan (Strength Limit State) yaitu Berdasarkan SNI 03-2874-2002

$$1. \quad U = 1,4 D \dots\dots\dots (4)$$

$$2. \quad U = 1,2 D + 1,6 L + 0,5 (A \text{ atau } R) \dots\dots\dots (5)$$

$$3. \quad U = 1,2 D + 1,0 L \quad 1,6 W + 0,5 (A \text{ atau } R) \dots\dots (6)$$

$$4. \quad U = 0,9 D \quad 1,6 L \dots\dots\dots (7)$$

$$5. \quad U = 1,2 D + 1,0 L \quad 1,0 E \dots\dots\dots (8)$$

$$6. \quad U = 0,9 D \quad E \dots\dots\dots (9)$$

Dimana: U =	Kuat perlu
D =	Dead Load (Beban Mati)
	Live Load (Beban
L =	Hidup)
A =	Beban Atap
R =	Beban Air Hujan
W =	Beban Angin
E =	Beban Gempa

Catatan:

- a. Jika ketahanan terhadap tekanan tanah H diperhitungkan didalam peren-canaan, maka pada persamaan 5, 7 dan 9 ditambahkan 1,6 H, kecuali bila akibat tekanan tanah H akan mengurangi pengaruh beban W dan E, maka pengaruh tekanan tanah H tidak perlu diperhitungkan.
- b. Jika ketahanan terhadap pembebanan akibat berat dan tekanan fluida F diperhitungkan dalam perencanaan, maka beban fluida 1,4 F harus ditambahkan pada persamaan 4, dan 1,2 F pada persamaan 5.
- c. Untuk kombinasi beban ini selanjutnya dapat dipelajari dalam buku code beton SNI 03 - 2874 - 2002

Perhitungan tegangan pada beton prategang harus memperhitungkan hal-hal sebagai berikut:

1. kondisi pada saat transfer gaya prategang awal dengan beban terbatas (dead load dan beban konstruksi);
2. kehilangan gaya prategang. Untuk perhitungan awal kehilangan gaya prategang ini biasanya ditentukan 25 % untuk sistem pratarik (pre-tension) dan 20 % untuk sistem pascatarik (post-tension);
3. pada kondisi servis dengan gaya prategang efektif (sudah diperhitungkan kehilangan gaya prategangnya) dan beban maksimum (beban mati, beban hidup dan penga-ruh-pengaruh lain); dan
4. perlu diperhitungkan pengaruh-pengaruh lain yang mempengaruhi struktur beton prategang seperti adanya pengaruh sekunder pada struktur statis tak tentu, pengaruh P delta pada gedung bertingkat tinggi, serta perilaku struktur dari awal sampai waktu yang ditentukan.

3.2 Tegangan Izin pada Beton Prategang

Tegangan-tegangan yang di-ijinkan beton untuk struktur lentur SNI 03 - 2874 - 2002

- A. Tegangan sesaat setelah penyaluran gaya prategang dan sebelum terjadinya kehilangan gaya prategang sebagai fungsi waktu, tidak boleh melampaui di bawah ini.

1. Tegangan tekan serat terluar	: 0,60 fci'
2. Tegangan tarik serat terluar (kecuali item 1 dan 3)	: 0,25 / fci'
3. Tegangan tarik serat terluar diujung struktur diatas tumpuan	: 0,50 / fci'

Apabila tegangan melampaui nilai-nilai tersebut diatas, maka harus dipasang tulang-an extra (non prategang atau prategang) untuk memikul gaya tarik total beton yang dihitung berdasarkan asumsi penampang penuh sebelum r.

- B. Tegangan pada saat kondisi beban layan (sesudah memperhitungkan semua kehi-langan gaya prategang yang mungkin terjadi), tidak boleh melampaui di bawah ini.

1. Tegangan tekan serat terluar akibat gaya prategang, beban mati dan beban hidup tetap	: 0,45 fc'
2. Tegangan tekan serat terluar akibat gaya prategang, beban mati dan beban hidup total	: 0,60 fc'
3. Tegangan tarik serat terluar dalam daerah tarik yang pada awalnya mengalami tekanan	: 0,50

Jari uraian-uraian diatas, pada prinsipnya konsep beton prategang dan beton bertulang biasa adalah sama, yaitu sama-sama dipasangnya tulangan pada daerah-daerah dimana akan terjadi tegangan tarik. Bedanya pada beton bertulang biasa, tulangan akan memikul tegangan tarik akibat beban, sedangkan pada beton prategang tulangan yang berupa kabel prategang (tendon) ditarik lebih dahulu sebelum bekerjanya beban luar. Penarikan kabel ini menyebabkan tertekannya beton, sehingga beton menjadi mampu menahan beban yang lebih tinggi sebelum retak.

Pada dasarnya elemen struktur beton prategang akan mengalami keretakan pada beban yang lebih tinggi dari beban yang dibutuhkan untuk meretakan elemen struktur dari beton bertulang biasa. Demikian pula dengan lendutan, untuk beton prategang lendutannya relatif lebih kecil dibandingkan dengan beton bertulang biasa. Oleh karena itu, konstruksi beton prategang itu banyak dipergunakan untuk bentangan-bentangan yang panjang.

3.3. Jenis-jenis Konstruksi Beton Prategang



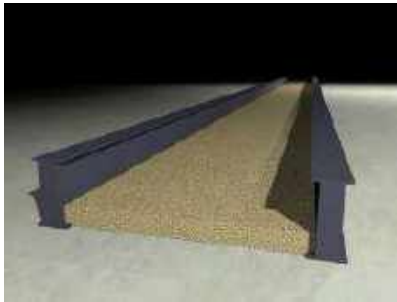
Gambar 3.1. Jenis-Jenis Kontruksi Beton Prategang pada jembatan



Gambar 3.2. Jenis-Jenis Kontruksi Beton Prategang pada Jalan layang (fly over)



Gambar 3.3. Jenis Konstruksi Beton prategang pada Monorail



Gambar 3.4. Video Tutorial Cara Pembuatan Beton Prategang

C. Evaluasi/Latihan

Contoh Soal 1

Sebuah balok beton prategang pratarik dengan penampang bentuk I terletak diatas 2 perletakan bebas dengan bentang $L = 20$ m. Selain berat sendiri, balok menerima beban mati tambahan w_{SD} dan beban hidup w_L yang jumlahnya ($w_{SD} + w_L$) 6 kN/m. Cover untuk tendon = 100 mm. Mutu beton $f_c' = 40$ MPa, mutu baja prategang $f_{pu} = 1860$ MPa. $f_{ci}' = 0.8 f_c'$, $f_{pi} = 0.70 f_{pu}$. Dipasang 10 bh tendon seven-wire strand dengan luas tiap strand $A = 98.71$ mm². Kehilangan gaya prategang 20%.

Data Penampang

$$A_c = 196875 \text{ mm}^2; \quad I_c = 1.514 \times 10^{10} \text{ mm}^4;$$

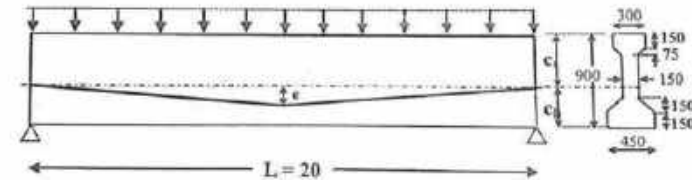
$$W_{bs} = 4.725 \text{ kN/m.}$$

$$c_t = 503 \text{ mm}; \quad c_b = 397 \text{ mm}; \quad S_t = 30099403.58 \text{ mm}^3$$

$$S_b = 38136020.15 \text{ mm}^3$$

Hitung tegangan serat tepi atas dan tepi bawah di tengah bentang pada

1. kondisi awal = prategang penuh + berat sendiri balok, dan
2. kondisi beban kerja setelah kehilangan gaya prategang.



Penyelesaian:

1. Kondisi Awal

$$A_{ps} = 10 \times 98.71 = 987.1 \text{ mm}^2$$

$$f_{pi} = 0.70 f_{pu} = 0.70 \times 1860 = 1302 \text{ MPa}$$

$$P_i = A_{ps} f_{pi} = 987.1 \times 1302 = 1285204.2 \text{ N}$$

Kehilangan gaya prategang 20% ($\eta = 1 - 0.2 = 0.8$)

$$P_e = \eta P_i = 0.8 \times 1285204.2 = 1028163.36 \text{ N}$$

$$\text{Akibat berat sendiri balok} = M_{\min} = \frac{1}{8} w_{bs} L^2 = \frac{1}{8} \times 4.725 \times 20^2$$

$$= 236.25 \text{ kNm}$$

$$r^2 = \frac{I_c}{A_c} = \frac{1.514 \times 10^{10}}{196875} = 76901.5873 \text{ mm}^2$$

$$\text{Eksentrisitas kabel ditengah bentang: } e = c_b - 100 = 397 - 100 = 297 \text{ mm}$$

Tegangan di tengah bentang:

$$f_t = \frac{P_i}{A_c} - \frac{P_i e}{S_t} + \frac{M_{\min}}{S_t} = \frac{1285204.2}{196875} - \frac{1285204.2 \times 297}{30099403.58} + \frac{236.25 \times 10^6}{30099403.58}$$

$$= 6.528 - 12.6815 + 7.849 = 1.6955 \text{ MPa} > f_{ti} = -0.25 \sqrt{f_{ci}'}$$

$$= -0.25 \sqrt{(0.8 \times 40)} = -1.414 \text{ MPa} \dots \text{ oke}$$

$$f_b = \frac{P_i}{A_c} - \frac{P_i e}{S_b} + \frac{M_{\min}}{S_b} = \frac{1285204.2}{196875} - \frac{1285204.2 \times 297}{38136020.15} + \frac{236.25 \times 10^6}{38136020.15}$$

$$= 6.528 + 10.009 - 6.195 = 10.342 \text{ MPa} < f_{ci} = 0.6 (0.8 \times 40) = 19.2 \text{ MPa}$$

Jadi tegangan awal di serat tepi atas dan tepi bawah memenuhi syarat.

2. Kondisi Beban Kerja

$$W_{TOTAL} = W_{bs} + W_{SD} + W_L = 4.725 + 6 = 10.725 \text{ kN/m}$$

$$M_{max} = \frac{1}{8} W_{TOTAL} L^2 = \frac{1}{8} \times 10.725 \times 20^2 = 536.25 \text{ kNm}$$

Tegangan di tengah bentang:

$$\begin{aligned} f^t &= \frac{P_i}{A_c} - \frac{P_i e}{S^t} + \frac{M_{max}}{S^t} = \frac{1028163.36}{196875} - \frac{1028163.36 \times 297}{30099403.58} + \frac{536.25 \times 10^6}{30099403.58} \\ &= 5.2224 - 10.1452 + 17.816 = 12.8932 \text{ MPa} < f_{cs} = 0.45 f'_c \\ &= 0.45 \times 40 = 18 \text{ MPa} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} f^b &= \frac{P_i}{A_c} - \frac{P_i e}{S_b} + \frac{M_{max}}{S_b} = \frac{1028163.36}{196875} - \frac{1028163.36 \times 297}{38136020.15} + \frac{536.25 \times 10^6}{38136020.15} \\ &= 5.2224 + 8.007 - 14.0615 = -0.8321 \text{ MPa} > f_{ts} \\ &= -0.5 \sqrt{f'_c} = -0.5 \sqrt{40} = -3.1623 \text{ MPa} \end{aligned}$$

Jadi tegangan beban kerja di serat tepi atas dan tepi bawah memenuhi syarat.

BAB IV

ANALISIS PRATEGANG DAN TEGANGAN LENTUR

A. Tujuan Pembelajaran

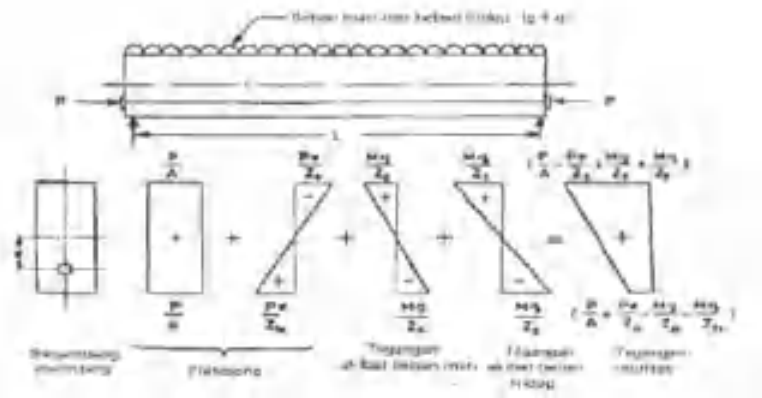
1. Mahasiswa mampu menjelaskan tentang Analisis Prategang
2. Mahasiswa mampu menjelaskan tentang Tegangan lentur
3. Mahasiswa mampu menyelesaikan soal tentang Analisis Prategang

B. Materi Pembelajaran

4.1 Tegangan Resultan Pada Suatu Penampang

Balok beton, yang diperlihatkan dalam Gambar 4.1, memikul beban-beban hidup dan mati yang terbagi rata dengan intensitas q dan g . Balok diprategangkan dengan suatu tendon lurus yang membawa suatu gaya prategang P dengan eksentrisitas e . Tegangan resultan pada beton pada sesuatu penampang diperoleh dengan superposisi pengaruh prategang dan tegangan-tegangan lentur yang ditimbulkan oleh beban tersebut. Kalau M_q dan M_g merupakan momen akibat beban hidup dan beban mati pada penampang tengah bentang,

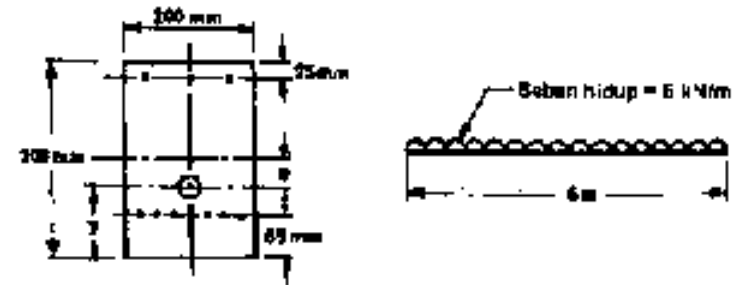
$$M_q = \left(\frac{qL^2}{8} \right) \quad M_g = \left(\frac{gL^2}{8} \right)$$



Gambar 4.1. Distribusi Tegangan akibat Prategang Eksentris, Beban Mati dan Beban Hidup

Contoh 4.1

Suatu penampang balok beton persegi panjang dengan tinggi 30 cm dan lebar 20 cm diberi prategang dengan 15 kawat berdiameter 5 mm yang lokasinya 6.5 cm dari tepi bawah balok dan 3 kawat dengan diameter 5 mm, 2.5 cm dari tepi atas. Dengan menganggap bahwa besarnya prategang pada kawat baja adalah 840 N/mm², Hitunglah tegangan-tegangan pada serat paling luar dari potongan tengah-tengah bentang apabila balok tersebut memikul beratnya sendiri sepanjang bentang 6 m. Kalau suatu beban hidup terbagi rata sebesar 6 KN/m diberikan, hitungan tegangan kerja maksimum pada beton. Kerapatan beton adalah 24 kN/m³.



Gambar 4.2. Balok Prategang

Dari Gambar 4.2,

Jarak titik berat gaya prategang terhadap dasar, y

$$= \left[\frac{(15 \times 65) + (3 \times 275)}{18} \right] = 100 \text{ mm}$$

Eksentrisitas $e = (150 - 100) = 50 \text{ m}$

Gaya Prategang $P = (840 \times 18 \times 19.7) = 3 \times 10^5 \text{ N}$

Luas Penampang Melintang $A = (300 \times 200) = 6 \times 10^4 \text{ mm}^2$

Momen Inersia $I = \left(\frac{200 \times 300^3}{12} \right) = 45 \times 10^7 \text{ mm}^4$

[[Modulus Penampang (Z)]_t dan Z_b] = $\left(\frac{45 \times 10^7}{150} \right) = 3 \times 10^6 \text{ mm}^3$

Berat balok sendiri = $(0.3 \times 0.2 \times 24) = 1.44 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$

Moment akibat berat sendiri $M_g = \left(\frac{1.44 \times 6^2}{8} \right) = 6.48 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$

Moment akibat beban hidup $M_q = \left(\frac{1.44 \times 6^2}{8} \right) = 27 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$

Tegangan langsung akibat prategang $\left(\frac{P}{A} \right) = \left(\frac{3 \times 10^5}{6 \times 10^4} \right) = 5 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$

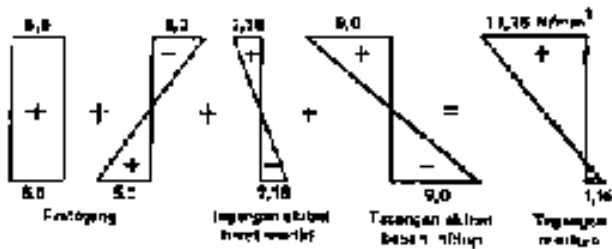
Tegangan lentur akibat prategang $\left(\frac{Pe}{Z} \right) = \left(\frac{3 \times 10^5 \times 50}{6 \times 10^6} \right) = 5 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$

Tegangan akibat berat sendiri $\frac{M_g}{Z} = \left(\frac{6.48 \times 10^6}{3 \times 10^6} \right) = 2.16 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$

Tegangan akibat beban hidup $\frac{M_q}{Z} = \left(\frac{27 \times 10^6}{3 \times 10^6} \right) = 9 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$

Tegangan resultan yang disebabkan oleh (berat sendiri + prategang + beban hidup) ditunjukkan dalam gambar 4.x.

Tegangan kerja maksimum pada beton = 11,16 N/mm² (tekan).



Gambar 4.3. Analisis Tegangan pada Tengah-tengah Bentang

4.2 Konsep Perimbangan Beban (Load Balancing)

Adalah mungkin untuk memilih prom kabel pada batang beton prategang sedemikian rupa sehingga komponen transversal gaya kabel mengimbangi jenis beban luar tertentu. Ini dapat dilukiskan secara langsung dengan meninjau benda bebas beton dengan tendon yang diganti oleh gaya-gaya yang bekerja pada balok beton. Berbagai tipe reaksi kabel terhadap suatu batang beton tergantung pada bentuk profil kabel. Bagian kabel yang lurus tidak menimbulkan reaksi apa pun kecuali pada ujung-ujungnya, sedangkan kabel yang melengkung menimbulkan beban terbagi rata.

Sudut tajam pada suatu kabel menimbulkan beban terpusat. Konsep perimbangan beban berguna dalam pemilihan prom tendon yang dapat memberikan sistem gaya yang paling disukai pada beton. Pada umumnya persyaratan ini akan dipenuhi kalau prom kabel pada suatu batang beton prategang sesuai dengan bentuk diagram momen lentur yang dihasilkan oleh beban luar. Jadi, kalau balok tersebut memikul dua beban terpusat,

kabelnya harus mengikuti profil berbentuk trapesium. Kalau *balck* tadi memikul beban terbagi rata, tendon yang bersesuaian harus mengikuti profil parabolis. Prinsip perimbangan beban diperjelas lebih lanjut dengan contoh-contoh berikut.

Contoh 4.2

Sebuah balok prategang persegi panjang dengan lebar 150 mm dan tinggi 300 mm digunakan di atas bentang efektif sepanjang 10m. Kabel, yang mempunyai eksentrisitas nol di atas tumpuan-tumpuannya serta berubah-ubah sampai mencapai 50 mm di tengah-tengah, membawa suatu gaya prategang efektif sebesar 500 kN. Carilah besarnya beban terpusat *Q* yang berkedudukan di tengah-tengah bentang untuk ko nd isi-kondisi berikut ini pada penarnpang di tengah:

- bila beban melawan pengaruh lenturan dari gaya prategang (dengan mengabaikan berat sendiri balok).
- bila garis tekanan melalui kern atas penampang pada aksi beban luar, berat sendiri, dan prategang.

$$A = (150 \times 300) = 45 \times 10^3 \text{ mm}^2$$

$$Z = \frac{(150 \times 300^2)}{6} = 225 \times 10^4 \text{ mm}^3$$

$$\text{Berat sendiri balok, } g = (0.15 \times 0.3 \times 24) = 1.08 \text{ kN/m}$$

$$P = 500 \text{ kN} \quad e = 50 \text{ mm}$$

Kalau kemiringan kabel terhadap sum bu horisontal adalah 8, dan *Q* = beban terpusat di tengah-tengah bentang, maka untuk perimbangan beban.

- (a) $Q = 2 P \sin \theta = \frac{(2 \times 500 \times 50)}{5 \times 1000} = 10 \text{ kN}$
 (b) Momen akibat beban sendiri = $(0.125 \times 1.08 \times 10^2) = 13.5 \text{ kNm}$

Tegangan akibat beban sendiri = $\frac{13.5 \times 10^6}{225 \times 10^4} = + 6 \text{ N/mm}^2$

Tegangan akibat prategang = $(P/A + Pe/Z)$
 $= \left[\frac{500 \times 10^3}{45 \times 10^3} \right] + \left[\frac{500 \times 10^3 \times 50}{225 \times 10^4} \right]$

Tegangan pada serat paling bawah = 22.22 N/mm^2

Kalau $Q =$ Beban terpusat di tengah-tengah bentang, maka momen di tengah-tengah bentang = $(Q \times 10)/4 = 2.5 Q$

Tegangan Lentur = $\frac{(2.5Q) \times 10^6}{225 \times 10^4}$

Kalau garis tekanan melalui kern atas penampang tersebut, maka tegangan pada serat paling bawah = 0

$\left[\frac{2.5Q \times 10^6}{225 \times 10^4} \right] + 6 = 22.22$

$Q = 14.60 \text{ kN}$

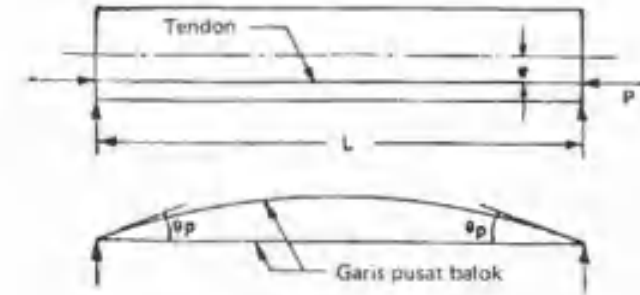
4.3 Pengaruh Pembebanan terhadap Tegangan Tarik pada Tendon

Sebuah batang prategang mengalami deformasi yang disebabkan oleh aksi gaya prategang dan beban-beban transversal yang bekerja pada batang tersebut. Sebagai akibatnya, kelengkungan kabel berubah yang menyebabkan sedikit perubahan tegangan pada tendon. Dengan memperhatikan Gambar 4.15 di mana sebuah balok beton dengan bentang L diberi prategang oleh suatu kabel yang membawa gaya efektif P dengan eksentrisitas e , maka rotasi θ_p pada tumpuan yang

disebabkan oleh pencembungan balok diperoleh dengan menerapkan teori Mohr sebagai,

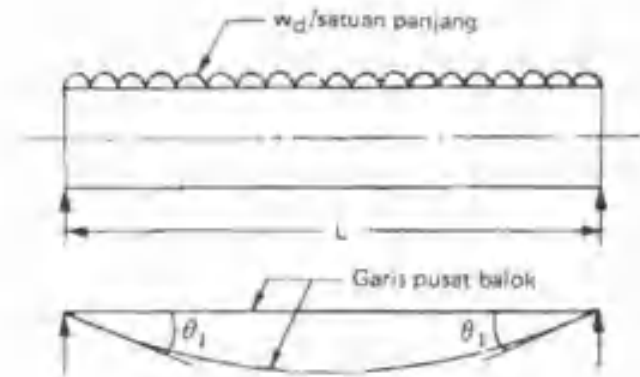
$\theta_p = \frac{\text{Luas diagram moment lentur}}{\text{Ketegaran lentur}}$

Dimana $EI =$ ketegaran lentur (flexural rigidity) balok



Gambar 4.4. Pengaruh Gaya Prategang terhadap Rotasi Balok Beton.

Kalau balok tersebut memikul beban terbagi rata total sebesar W d per satuan panjang, maka rotasi θ_1 pada tumpuan akibat pelengkungan balok.



Gambar 4.5. Pengaruh Beban Transversal terhadap Rotasi Balok Beton.

$\theta_1 = \left(\frac{\frac{1}{2} \times \frac{2}{3} \times L \times w_d L^2 / 8}{EI} \right) = \left(\frac{w_d L^3}{24EI} \right)$

Bila rotasi akibat beban lebih besar daripada yang disebabkan oleh gaya prategang, maka rotasi bersih 0 ditentukan oleh,

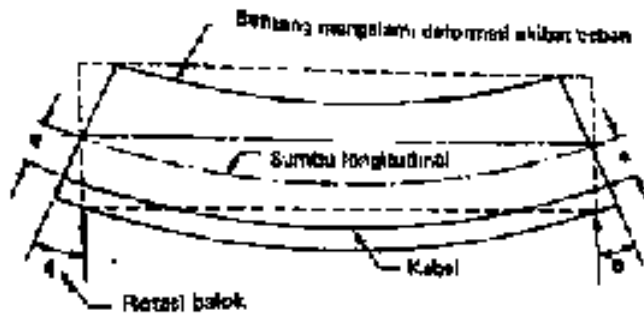
$$\theta = (\theta_1 - \theta_2)$$

Dengan memperhatikan Gambar 4.4

Perpanjangan kabel total = $2e\theta$

Regangan pada kabel = $(2e\theta/L)$

Kenaikan tegangan akibat pembebanan = $\frac{E_s 2e\theta}{L}$



Gambar 4.6. Rotasi Balok akibat Aksi Beban.

Pada umumnya, di dalam daerah elastis, sesuatu penambahan pembebanan pada suatu batang prategang tidak mengakibatkan perubahan yang berarti dalam tegangan baja. Dengan kata lain, tegangan pada baja lebih kurang konstan di dalam daerah elastis suatu batang prategang. Pengamatan yang penting ini dilukiskan dengan contoh berikut.

Contoh 4.12

Potongan melintang sebuah balok beton prategang yang digunakan sepanjang bentang 6 m mempunyai lebar 100 mm dan tinggi 300 mm. Tegangan awal pada tendon yang terletak pada suatu eksentrisitas konstan sebagai 50 mm sama dengan 1000 N/mm². Luas penampang

tendon sama dengan 100 mm². Carilah peningkatan persentase tegangan pada kawat apabila balok tersebut memikul beban hidup sebesar 4 kN/m. Kerapatan beton sama dengan 24 kN/m³.

Modulus elastisitas beton = 36 kN/m²

Modulus elastisitas baja = 210 kN/m²

Momen Inersia $I = \frac{100 \times 300^3}{12} = 225 \times 10^6 \text{ mm}^4$

Gaya Prategang $P = 1000 \times 100 = 10^5 \text{ N} = 100 \text{ kN}$

Rotasi akibat prategang (perlengkungan),

$$\theta_p = \frac{PeL}{2EI} = \left(\frac{100 \times 50 \times 6 \times 10^3}{2 \times 36 \times 225 \times 10^6} \right)$$

= 0.00525 radian

Rotasi bersih = (0.00525 - 0.00185) = 0.0034 radian

Perpanjangan kabel = $2 \times 50 \times 0.0034 = 0.34$

Kenaikan tegangan akibat pembebanan = $\frac{0.34 \times 210 \times 10^3}{6000} =$

12 N/mm²

Tegangan awal pada kabel = 1000 N/mm²

Persentase kenaikan tegangan = $\left(\frac{12 \times 100}{1000} \right) = 1.2 \%$

C. Evaluasi/Latihan

LATIHAN

1. Sebuah balok beton persegi panjang, lebar 100 mm dan tinggi 250 mm, dengan bentang 8 m diberi prategang oleh kabel lurus yang membawa suatu gaya prategang efektif sebesar 250 kN yang diberikan dengan eksentrisitas 40 mm. Balok tersebut memikul beban hidup sebesar 1,2 kN/m.

- (a) Hitunglah distribusi tegangan resultan untuk potongan melintang tengah-tengah balok. Kerapatan beton sama dengan 24 kN/m^3 .
- (b) Carilah besarnya gaya prategang dengan eksentrisitas 40 mm yang dapat mengimbangi tegangan-tegangan yang disebabkan oleh beban-beban mati dan hidup pada serat paling bawah dari penampang tengah-tengah balok.
2. Sebuah balok beton prategang, lebar 120 mm dan tinggi 300 mm , diberi prategang oleh suatu kabel yang mempunyai eksentrisitas 100 mm pada penampang tengah-tengah bentang. Bentang balok tersebut adalah 6 m . Kalau balok tersebut memikul dua beban terpusat masing-masing 10 kN pada titik-titik sepertiga bentang, tentukan besarnya gaya prategang pada kabel untuk perimbangan beban pada hal-hal berikut:
- (a) dengan mempertimbangkan beban hidup tetapi mengabaikan berat sendiri balok; dan
- (b) dengan mempertimbangkan baik berat sendiri balok maupun beban hidup ($D_c = 24 \text{ kN/m}^3$).

BAB V

KEHILANGAN PRATEGANG

A. Tujuan Pembelajaran

1. Mahasiswa mampu menjelaskan tentang kehilangan prategang
2. Mahasiswa mampu menyelesaikan soal tentang kehilangan prategang

B. Materi Pembelajaran

5.1 Kehilangan Akibat Deformasi Elastis Beton

Kehilangan prategang akibat deformasi elastis beton tergantung pada *rasio modulus* serta tegangan rata-rata pada beton pada ketinggian baja.

Kalau,

F_c = prategang pada beton pada ketinggian baja

E_s = modulus elastisitas baja

E_c = modulus elastisitas beton

$\alpha_e = \frac{E_s}{E_c} = \text{rasio modulus}$

Regangan pada beton pada ketinggian baja = (f_c/E_c)

Tegangan pada baja yang bersesuaian dengan regangan ini = $(f_c/E_c) E_s$

Jadi kehilangan tegangan pada baja = $\alpha_e f_c$

Kalau tegangan awal pada baja diketahui, persentase kehilangan tegangan pada baja akibat deformasi elastis beton dapat dihitung.

Contoh 5.1

Sebuah balok beton pratarik, lebar 100 mm dan tinggi 300 mm, diberi prategang oleh kawat-kawat lurus yang membawa suatu gaya awal sebesar 150 kN dengan eksentrisitas 50mm. Modulus elastisitas baja dan beton berturut-turut adalah 210 dan 35 kN/mm². Hitunglah persentase kehilangan tegangan pada baja akibat deformasi elastis beton kalau luas kawat-kawat baja sama dengan 188 mm².

$$P = 150 \text{ kN}$$

$$e = d/6 = 300/6$$

$$A = (100 \times 300) = 3 \times 10^4 \text{ mm}^2$$

$$I = 225 \times 10^6 \text{ mm}^4$$

$$\alpha_e = (E_s/E_c) = 6$$

$$\text{Tegangan awal pada baja} = \frac{150 \times 10^3}{188} = 800 \text{ N/mm}^2$$

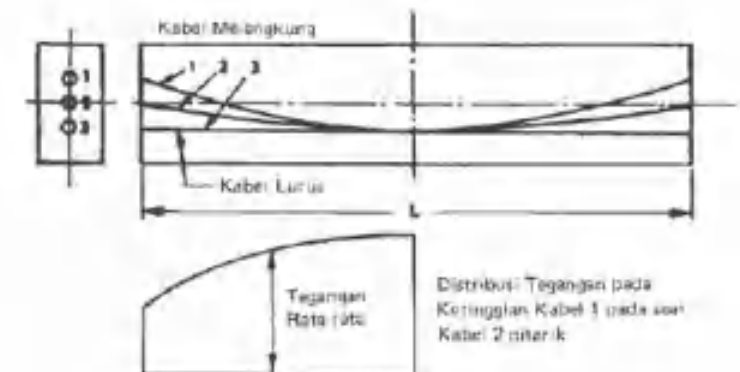
$$\begin{aligned} \text{Tegangan pada beton, } f_c &= \left(\frac{150 \times 10^3}{3 \times 10^4} \right) + \left(\frac{150 \times 10^3 \times 50 \times 50}{225 \times 10^6} \right) \\ &= 6.66 \text{ N/mm}^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Kehilangan tegangan akibat deformasi elastis beton} &= \alpha_e f_c \\ &= (6 \times 6.6) = 40 \text{ N/mm}^2 \end{aligned}$$

$$\text{Persentase kehilangan tegangan pada baja} = \left(\frac{40 \times 100}{800} \right) = 5\%$$

5.2 Kehilangan Tegangan akibat Penarikan Kabel-kabel yang Melengkung secara Berurutan

Di dalam hampir semua gelagar jembatan, kabel-kabel dibuat melengkung dengan eksentrisitas maksimum pada tengah-tengah bentang. Hal demikian, kehilangan tegangan akibat deformasi elastis beton diperhitungkan dengan memperhitungkan tegangan rata-rata pada beton pada ketinggian baja. Tinjaulah sebuah balok yang ditunjukkan dalam Gambar 5.1, yang diberi pratarik oleh 3 kabel parabolis, Distribusi tegangan pada beton pada ketinggian kabel 1 juga ditunjukkan dalam gambar tersebut pada saat kabel 2 ditarik. Untuk perhitungan kehilangan tegangan, maka tegangan rata-rata (diperlihatkan dalam gambar).



Gambar 5.1. Penarikan Kabel-kabel Melengkung secara Berurutan.

Contoh 5.2

Sebuah balok beton di atas tumpuan sederhana dengan penampang seragam diberi pascatarik oleh dua kabel, keduanya mempunyai eksentrisitas 100 mm di bawah titik berat penampang di tengah bentang. Kabel pertama parabolis dan diangkur pada eksentrisitas 100 mm di atas

titik berat penampang pada masing-masing ujungnya. Kabel kedua lurus dan sejajar dengan garis yang menghubungkan tumpuan-tumpuannya. Kalau luas potongan melintang masing-masing kabel sama dengan 100 mm², dan balok beton tersebut mempunyai luas penampang 2 X] 04 mm² dan jari-jari girasi 120 mm, hitunglah kehilangan tegangan pada kabel pertama pada saat kabel kedua ditarik sampai mencapai tegangan 1200 N/mm². Ambil rasio modulus sama dengan 6 dan gesekan diabaikan.

Luas penampang beton, $A = 2 \times 10^4 \text{ mm}^2$

Jari-jari girasi $i = 120 \text{ mm}$

Momen inersia, $I = (2 \times 10^4 \times 12^2) = 288 \times 10^6 \text{ mm}^4$

Gaya prategang $P = (1200 \times 100) = 12 \times 10^4 \text{ N}$

Pada saat kabel 2 ditarik dan diangkur, tegangan pada ketinggian kabel 1 ditentukan oleh,

$$\begin{aligned} \text{Tegangan pada beton} &= \left(\frac{12 \times 10^4}{2 \times 10^4} \right) \pm \left(\frac{12 \times 10^4 \times 100 \times 100}{288 \times 10^6} \right) = (6 + 4.2) \\ &= 10.2 \text{ N/mm}^2 \text{ pada penampang tengah} \\ &= 1.8 \text{ N/mm}^2 \text{ pada penampang ujung} \end{aligned}$$

$$\text{Kehilangan rata-rata pada beton} = [1.8 + (2/3) \times 8.4] = 7.4 \text{ N/mm}^2$$

$$\text{Kehilangan rata-rata pada kabel 1} = (6 \times 7.4) = 44.4 \text{ N/mm}^2$$

5.3 Kehilangan Akibat Penyusutan Beton

Susut beton pada batang prategang mengakibatkan perpendekan kawat-kawat yang ditarik. Dengan demikian ikut menyebabkan kehilangan tegangan. Susut beton dipengaruhi oleh tipe semen dan agregat serta metode perawatan yang dipakai. Pemakaian beton berkekuatan tinggi dengan rasio air/semen rendah

menghasilkan berkurangnya susut beton dan dengan demikian juga kehilangan prategangnya. Penyebab utama dari susut pengeringan adalah hilangnya air yang berlanjut pada beton. Susut pada permukaan batang adalah lebih tinggi. Perbedaan susut antara bagian dalam dan permukaan batang yang besar dapat mengakibatkan "gradien regangan" (strain gradient) yang mengarah kepada retak permukaan. Oleh karena itu, perawatan beton yang tepat sangat penting untuk mencegah terjadinya retak akibat susut pada batang prategang.

Dalam hal batang pratarik, umumnya perawatan dengan pembasahan dilakukan untuk membatasi susut sampai pada saat transfer. Akibatnya, jumlah regangan susut sisa setelah transfer prategang pada batang pratarik akan lebih besar dibandingkan dengan pada batang pascatarik, di mana suatu bagian susut akan telah terjadi pada waktu transfer tegangan. Segi ini telah dipertimbangkan dalam rekomendasi yang dibuat oleh peraturan standar India (IS: 1343) untuk kehilangan prategang akibat susut beton dan dirinci di bawah ini.

ϵ_{cs} = jumlah regangan susut sisa yang mempunyai nilai sebesar 300×10^{-6} untuk pratarik dan $\left[\frac{200 \times 10^{-6}}{\log_{10}(t+2)} \right]$ untuk pascatarik.

Di mana, t = umur beton pada saat transfer dalam hari. Nilai ini dapat ditingkatkan dengan 50 persen dalam kondisi udara kering, sampai suatu nilai maksimum sebesar 300×10^{-6} satuan.

Kehilangan tegangan pada baja akibat susut beton diperhitungkan sebagai, Kehilangan tegangan = $C_{cs} \times E_s$

di mana E_s = modulus elastisitas baja.

Rekomendasi peraturan Inggris untuk susut mencakup kelembaban lingkungan sebagai suatu faktor. Regangan susut sisa yang disarankan adalah 300×10^{-6} untuk kondisi normal dan 100×10^{-6} untuk kondisi lembab pada pratarik dan 200×10^{-6} untuk kondisi normal serta 70×10^{-6} untuk kondisi lembab pada pascatarik. Suatu kelembaban relatif sebesar 70 persen dianggap normal, sedangkan suatu kelembaban relatif sebesar 90 persen dianggap lembab.

Contoh 5.6

Sebuah balok beton diberi prategang dengan suatu kabel yang membawa gaya prategang awal 300 kN. Luas potongan melintang kawat-kawat pada kabel adalah 300 mm². Hitunglah persentase kehilangan tegangan pada kabel tersebut but hanya akibat susut beton dengan menggunakan rekomendasi IS: 1343 dengan anggapan bahwa balok tersebut adalah: (a) pratarik dan (b) pascatarik. Dimisalkan $E_s = 210 \text{ kN/mm}^2$ dan umur beton pada saat transfer = 8 hari.

Tegangan awal pada kawat $\left(\frac{300 \times 10^3}{300}\right) = 1000 \text{ N/mm}^2$

(a) Kalau balok tersebut pratarik, regangan susut sisa total = 300×10^{-6} satuan.

Jadi, kehilangan tegangan = $(300 \times 10^{-6}) (210 \times 10^3) = 63 \text{ N/mm}^2$

Jadi, persentase kehilangan tegangan = $\left(\frac{63}{1000} \times 100\right) = 6.3\%$

(b) Kalau balok susut pascatarik, regangan susut sisa total

$$= \left[\frac{200 \times 10^{-6}}{\log_{10}(8+2)} \right] = 200 \times 10^{-6} \text{ satuan}$$

Jadi, kehilangan tegangan = $(20 \times 10^{-6}) (210 \times 10^3) = 42 \text{ N/mm}^2$

Persentase kehilangan tegangan = $\left(\frac{42}{1000} \times 100\right) = 4.2\%$

5.4 Kehilangan Akibat Rangkak Beton

Prategang yang terus-menerus pada beton suatu batang prategang mengakibatkan rangkak pada beton yang secara efektif mengurangi tegangan pada baja bermutu tinggi. Faktor-faktor yang mempengaruhi rangkak beton telah dibahas dalam Bagian 2.1.5. Kehilangan tegangan pada baja akibat rangkak beton dapat diperhitungkan kalau besarnya regangan rangkak ultimit atau koefisien rangkak diketahui.

a. Metode Regangan Rangkak Ultimit

Kalau ϵ_{cc} = regangan rangkak ultimit untuk suatu tegangan satuan yang terus menerus

f_c = tegangan tekan pada beton pada ketinggian baja

E_s = modulus elastisitas baja

b. Metode Koefisien Rangkak

Kalau, ϕ = koefisien rangkak

ϵ_c = regangan rangkak

ϵ_s = regangan elastis

α_e = rasio modulus

f_c = tegangan pada beton

E_c = modulus elastisitas beton

E_s = modulus elastisitas baja

Koefisien rangkak = $\frac{\text{regangan rangkak}}{\text{regangan elastis}}$. Jadi $\phi = \frac{\epsilon_c}{\epsilon_s}$

Jadi, $\epsilon_c = \phi \epsilon_s = \phi (f_c / E_c)$

Maka, kehilangan tegangan pada baja = $\epsilon_c E_s = \phi \left(\frac{f_c}{E_c}\right) E_s$

Besarnya koefisien rangkai, ϕ berubah-ubah tergantung pada kelembaban, kualitas beton, lamanya pembebanan dan umur beton pada saat dibebani. Nilai-nilai yang umum yang direkomendasikan untuk koefisien rangkai bervariasi dari 1,5 pada situasi berair sampai 4,0 untuk kondisi kering dengan kelembaban relatif 35 persen. Peraturan Inggris untuk beton struktural menyarankan nilai rencana regangan rangkai ultimit sebesar 48×10^{-6} untuk pratarik dan 36×10^{-6} untuk pascatarik. Nilai-nilai ini perlu dinaikkan dalam perbandingan terbalik kalau kekuatan tekan beton pada saat transfer kurang dari 40 N/mm^2 .

Contoh 5.3

Sebuah balok beton dengan penampang persegi panjang, lebar 100 mm dan tinggi 300 mm, diberi prategang oleh 5 kawat dengan diameter 7 mm yang terletak pada eksentrisitas 50 mm, tegangan awal pada kawat sarna dengan 1200 N/mm^2 . Hitunglah kehilangan tegangan pada baja akibat rangkai beton dengan memakai metode regangan rangkai ultimit menjadi koefisien rangkai (IS: 1343 -1980). Pakailah data-data berikut:

E_s	= 210 kN/mm^2	I	= $225 \times 10^6 \text{ mm}^4$
E_c	= 35 kN/mm^2	Regangan rangkai ultimit	
A	= $3 \times 10^4 \text{ mm}^2$	ϵ_{cc}	= $41 \times 10^{-6} \text{ mm/mm per}$
	N/mm^2		
P	= $(5 \times 38.5 \times 1200)$		
	= $23 \times 10^4 \text{ N}$		
α_e	= $(E_s/E_c) = 6$		
Koefisien rangkai (ϕ)	= 1.6		

Tegangan pada beton pada ketinggian baja adalah

$$f_c = \frac{23 \times 10^4}{3 \times 10^4} + \left[\frac{(23 \times 10^4 \times 50) 50}{225 \times 10^6} \right] = 10.2 \text{ N/mm}^2$$

a. Metode Regangan Rangkai ultimit

$$\text{Kehilangan tegangan pada baja} = \epsilon_{cc} f_c E_s = (41 \times 10^{-6})(10.2)(210 \times 10^3) = 88 \text{ N/mm}^2$$

b. Metode Koefisien Rangkai

$$\text{Kehilangan tegangan pada baja} = \phi f_c \alpha_e = (1.6 \times 10.2 \times 6) = 97.92 \text{ N/mm}^2$$

5.5 Kehilangan Akibat Gesekan

Pada kasus batang pascatarik, apabila kabel-kabel lurus atau agak melengkung ditarik, maka gesekan terhadap dinding saluran atau kisi-kisi penyekat akan mengakibatkan kehilangan tegangan yang makin bertambah menu rut jaraknya dari dongkrak. Selain itu, akan terdapat kehilangan tegangan akibat gesekan antara kabel dan gerak menggelombang dalam saluran yang disebut sebagai "goyangan" atau "gelombang" yang merupakan penyimpangan kecil saluran dari kedudukan yang ditetapkan.

$$P_x = P_0 e^{-(\mu\alpha + Kx)}$$

Dimana:

P_0	= gaya prategang pada ujung dongkrak
μ	= koefisien gerakan antara kabel dan saluran
α	= sudut kumulatif dalam radian melalui mana garis-garis singgung terhadap profil kabel telah berputar antara dua titik sembarang yang ditinjau.
K	= koefisien gesekan untuk pengaruh gelombang
e	= 2.7183

Peraturan standar India menyarankan nilai-nilai berikut untuk μ dan K :

Nilai-nilai untuk koefisien gesekan μ

- 0,55 untuk baja yang bergerak pada beton yang licin
- 0,35 untuk baja yang bergerak pada baja yang dijepit di salurau
- 0,25 untuk baja yang bergerak pada baja yang dijepit di beton
- 0,25 untuk baja yang bergerak pada timah
- 0,18-0,30 untuk kabel tali kawat berlapis-banyak di dalam selongsong baja persegi panjang yang tegar
- 0,15-0,25 untuk kabel tali kawat berlapis-banyak dengan pelat-pelat pengatur jarak ke arah lateral

Saran-saran ini didasarkan atas pekerjaan eksperimental yang dilakukan oleh Guyon dan Cooley

Nilai-nilai untuk koefisien gesekan untuk pengaruh gelombang K

- 0,15 per 100 m untuk kondisi normal
- 1,5 per 100 m untuk saluran berdinding-tipis dan di mana dijumpai getaran-getaran hebat dan dalam kondisi-kondisi yang merugikan lainnya.

Koefisien terse but dapat dikurangi sampai nol bila ruang antara saluran dan kabel cukup besar untuk menghilangkan pengaruh "gelombang". Selongsong dibuat dari pipa baja berukuran berat dengan sambungan yang rapat air, di mana deformasi prom saluran dicegah selama penggetaran beton.

Koefisien gesekan dapat sangat dikurangi dengan memakai suatu macam pelumas, khususnya lemak pelumas (grease), minyak, campuran minyak dan grafit, serta prafin, Penyelidikan-penyelidikan oleh Leonhardt,

Foppli, dan Morsch menunjukkan bahwa pemakaian parafin sejauh ini memberikan koefisien gesekan yang paling rendah, khususnya dengan tekanan kontak yang tinggi. Juga telah diamati bahwa lapisan parafin tetap efektif meskipun menerima gerakan berulang ulang pada tekanan kontak sebesar 60 N/mm^2 .

Pada tekanan ini, besarnya koefisien gesekan berkurang sampai suatu nilai serendah 0,004. Pada tekanan antara 20 dan 5 N/mm^2 . Koefisien gesekan berkisar antara 0,03 sampai 0,02. Selain itu, parafin didapati tidak merugikan terhadap beton dan adukan semen. Suatu pelumas lain-Teflon, yang diproduksi oleh Dupon, ternyata mampu memberikan hasil yang lebih menguntungkan. Nilai-nilai eksperimental koefisien gesekan telah dilaporkan oleh Morice dan Cooley untuk bermacam-macam tipe saluran dan sistem pascatarik.

Contoh 5.4

Sebuah balok beton dengan bentangan 10 m, lebar 100 mm dan tinggi 300 mm, diberi prategang oleh 3 kabel. Luas penampang masing-masing kabel sarna dengan 200 m^2 dan tegangan awal pada kabel sarna dengan 1200 N/mm^2 . Kabel 1 parabolis dengan eksentrisitas 50 mm di atas titik berat pada tumpuan-tumpuan dan 50 mm di bawah titik berat pada tengah-tengah bentang. Kabel 2 juga parabolis dengan eksentrisitas nol pada tumpuan-tumpuan dan 50 mm di bawah titik berat pada tengah-tengah bentang. Kabel 3 lurus dengan eksentrisitas seragam 50 mm di bawah titik berat. Kalau kabel-kabel tersebut ditarik dari satu ujung. Hitunglah persentase

kehilangan tegangan pada masing-masing. Kabel akibat pengaruh gesekan. Misalkan $\mu = 0,35$ dan $K = 0,0015$ per m. Persamaan parabola ditentukan oleh:

$$y = \left(\frac{4e}{L^2}\right) \times (L - x)$$

Kemiringan pada ujung-ujung (pada $x=0$) = $dx/dy = \left(\frac{4e}{L^2}\right)(L - 2x) = (4e/L)$

Untuk kabel 1

$$\text{Kemiringan pada ujung} = \frac{4 \times 10}{10 \times 100} = 0.04$$

Jadi sudut kumulatif antara garis-garis singgung, $\alpha = (2 \times 0.04) = 0.08$ radian

Untuk kabel 2

$$\text{Kemiringan pada ujung} = \frac{4 \times 5}{10 \times 100} = 0.02$$

Jadi, sudut kumulatif antara garis-garis singgung, $\alpha = (2 \times 0.02) = 0.04$ radian

Gaya prategang awal pada masing-masing kabel, $P_0 = 200 \times 1200 = 2400000$ N. Kalau P_x = gaya prategang (tegangan) pada kabel pada ujung yang paling jauh.

$$P_x = P_0 e^{-(\mu\alpha + Kx)}$$

Untuk nilai-nilai $(\mu\alpha + Kx)$, kita dapat menulis

$$P_x = P_0 [1 - (\mu\alpha + Kx)]$$

Jadi, Kehilangan prategang = $P_0(0.35 \times 0.08 + 0.0015 \times 10) = 0.0043P_0$

$$\text{Kabel 1} = P_0(0.35 \times 0.04 + 0.0015 \times 10) = 0.029 P_0$$

$$\text{Kabel 3} = P_0(0 + 0.0015 \times 10) = 0.015 P_0$$

Kalau P_0 = Tegangan awal = 1200 N/mm²

Tabel 5.1. Jenis Kabel dan Kehilangan Tegangan

Kabel No.	Kehilangan Tegangan N/mm ²	Persentase Kehilangan
1	51.6	4.3
2	34.8	2.9
3	18.0	1.5

5.6 Kehilangan Akibat Penggelinciran Angkur

Di dalam hampir sarna sistem pascatarik, apabila kabel ditarik dan dongkrak dilepaskan untuk mentransfer prategang beton, pasak-pasak gesekan yang dipasang untuk rmemegang kawat-kawat dapat menggelincir pada jarak yang pendek sebelum kawat-kawat tersebut menempatkan diri secara kokoh di antara pasak-pasak tadi. Besarnya penggelinciran tergantung pada tipe pasak dan tegangan pada kawat. Di dalam sistem di mana tendon dilingkarkan ke sekeliling blok angkur beton, seperti dalam sistem Leonhardt-Baur, kehilangan tegangan dapat terjadi karena kawat-kawat menusuk ke dalam angkur. Kalau digunakan pelat-pelat angkur, mungkin perlu untuk rmemperhitungkan penurunan kecil pelat tersebut ke dalam ujung batang beton.

Kehilangan selama pengangkuran, yang terjadi pada pegangan tipe pasak biasanya di lapangan diperhitungkan dengan memberikan perpanjangan berlebih pada tendon dalam operasi pemrategangan sebesar yang tertarik masuk sebelum pengangkuran. Namun, metode ini memuaskan asalkan tegangan berlebih sesaat tidak melebihi batas-batas yang ditetapkan sebesar 80-85 persen kekuatan tarik ultimit kawat. Besarnya kehilangan tegangan akibat penggelinciran di angkur dihitung sebagai berikut:

Kalau Δ = penggelinciran angkur, mm
 L = panjang kabel, mm
 A = luas penampang melintang kabel, mm²
 E_s = modulus elastisitas baja, N/mm²
 P = gaya prategang pada kabel, N

Maka,

$$\frac{PL}{AE_s} = \Delta$$

Kehilangan tegangan akibat penggelinciran angkur = $(P/A) = E_s \Delta / L$

Oleh karena kehilangan tegangan disebabkan oleh suatu jumlah perpendekan total tertentu, maka persentase kehilangannya lebih tinggi untuk batang pendek daripada untuk batang yang lebih panjang. Pada sistem pratarik rangkaian panjang, penggelinciran pada angkur biasanya sangat kecil dibandingkan dengan panjangnya kawat penarik dan dengan demikian pada umumnya diabaikan. Pada pelaksanaan prategang suatu batang pendek, perhatian sepenuhnya harus diberikan untuk memperhitungkan kehilangan tegangan akibat penggelinciran angkur yang merupakan bagian besar dari kehilangan total.

Contoh 5.5

Suatu kabel yang memberikan pascatarik pada balok sepanjang 10m pada awalnya ditarik sampai mencapai tegangan 1000 N/mm² pada satu ujung. Kalau tendon melengkung sedemikian rupa sehingga kemiringannya pada masing-masing ujung sama dengan 1 banding 24 pada masing-masing ujung, dengan luas penampang 600 mm², hitunglah kehilangan prategang akibat gesekan yang ditentukan dengan data-data berikut. Koefisien gesekan antara saluran dan kabel = 0.55; koefisien gesekan untuk pengaruh "gelombang" = 0,0015 per m. Selama pengangkutan, kalau terdapat penggelinciran sebesar 3 mm pada ujung yang didongkrak, hitunglah

gaya akhir pada kabel dan persentase kehilangan tegangan akibat gesekan dan penggelinciran. $E_s = 210$ kN/mm².

Perubahan kemiringan total dari ujung ke ujung, $\alpha = (2 \times 1/24) = (1/12)$

$$\mu\alpha = (0.55 \times 1/12) = 0.046$$

$$K_x = (0.0015 \times 10) = 0.015$$

Kalau P_0 = prategang pada ujung yang ditarik atau ujung yang didongkrak, kehilangan tegangan akibat gesekan = $P_0 (\mu\alpha + K_x)$

$$= 1000 (0.046 + 0.015) = 61 \text{ N/mm}^2$$

Pengelinciran pada ujung yang didongkrak = $3 = (PL/AE)$

$$\text{Jadi } P = \frac{3 \times 210 \times 10^3 \times 600}{10 \times 1000} = 37800 \text{ N} = 37.8 \text{ kN}$$

Kehilangan gaya akibat gesekan = $(600 \times 61) = 36600 \text{ N} = 36.6 \text{ kN}$

Kehilangan gaya total akibat gesekan dari penggelinciran = $(36.6 + 37.8) = 74.4 \text{ kN}$

Gaya akhir pada kabel = $(600 - 74.4) = 525.6 \text{ kN}$

Persentase kehilangan prategang = $\frac{74.4}{600} \times 100 = 12.4 \%$

1. Kehilangan Total yang diizinkan untuk Desain

Di dalam desain batang beton prategang sudah menjadi kebiasaan untuk mengasumsikan kehilangan tegangan total sebagai persentase dari tegangan awal serta memasukkannya dalam perhitungan desain. Oleh karena kehilangan prategang tergantung dari beberapa faktor, seperti misalnya sifat-sifat beton dan baja, metode perawatan, tingkat prategang, serta metode pemberian prategang, adalah sulit untuk menyamaratakan jumlah kehilangan prategang total yang pasti. Namun, nilai-nilai yang khas dari kehilangan tegangan total yang dapat

dijumpai dalam kondisi-kondisi kerja normal sebagai yang dianjurkan oleh Lin dilukiskan di bawah ini.

Tabel 5.2. Tipe kehilangan Tegangan

Tipe Kehilangan	Persentase kehilangan tegangan	
	Pratarik	Pascatarik
Perpendekan elastis dan lenturan beton	3	1
Rengkak beton	6	5
Susut beton	7	6
Rengkak pada baja	2	3
Jumlah	18	15

Dalam rekomendasi ini dianggap bahwa telah dilakukan pemberian tegangan berlebihan secara sementara untuk mengurangi relaksasi, dan untuk mengimbangi kehilangan-kehilangan gesekan dan ankur.

Kalau f_{pe} = tegangan efektif pada tendon setelah kehilangan

f_{pi} = tegangan pada tendon pada saat transfer

η = faktor reduksi untuk kehilangan prategang

$$\eta = \left(\frac{f_{pe}}{f_{pi}} \right)$$

Nilai-nilai η pada umumnya diambil sarna dengan 0,85 untuk batang pratarik dan 0,80 untuk pascatarik.

Suatu cara penanganan yang melelahkan atas kehilangan prategang akibat rangkak, susut, dan relaksasi telah disajikan oleh Neville" dengan meninjau berbagai parameter yang mempengaruhi, seperti rasio

modulus, koefisien rangkak pada waktu yang tak-terbatas, susut ultimit, koefisien relaksasi, tegangan awal pada beton pada ketinggian tendon, dan tegangan relaksasi yang hakiki. Penelitian-penelitian lapangan jangka panjang atas kehilangan prategang pada gelagar jembatan beton pascatarik telah dilakukan oleh Marks dan Keifer di mana kehilangan pada gelagar akibat rangkak dan susut yang diukur telah didapati maksimum pada ketinggian tendon.

Contoh 5.6

Sebuah balok pratarik, lebar 200 mm dan tinggi 300 mm, diberi prategang oleh 10 kawat dengan diameter 7 mm yang diberi tegangan awal sampai 1200 N/mm² dengan pusat-pusatnya terletak 100 mm dari sofitnya. Carilah tegangan maksimum pada beton segera setelah transfer dengan hanya memperhitungkan perpendekan elastis beton. Kalau beton tersebut merigalami perpendekan lebih lanjut akibat rangkak serta susut sedangkan terdapat suatu relaksasi sebesar 5 persen pada tegangan baja, perkirakan persentase kehilangan tegangan akhir pada kawat dengan memakai peraturan standar India (IS: 1343), dengan memakai data berikut:

$$E_s = 210 \text{ kN/mm}^2$$

$$E_c = 5700 (f_{cu})^{1/2}$$

$$\text{Koefisien rangkak } (\phi) = 1.6$$

$$\text{Regangan susut sisa total} = 3 \times 10^{-4}$$

Penyelesaian:

$$A_c = 6 \times 10^4 \text{ mm}^2 \quad E_c = 5700 (42)^{1/2} = 36900 \text{ N/mm}^2$$

$$I = 45 \times 10^7 \text{ mm}^4$$

$$\alpha_e = (E_s/E_c) = 5.7$$

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

$$P = (1200) (10 \times 38.5) = 462 \times 10^3 \text{ N} = 462 \text{ kN}$$

Tegangan pada beton pada ketinggian baja =

$$f_c = \left[\frac{462 \times 10^3}{6 \times 10^4} + \frac{(462 \times 10^3 \times 50) 50}{45 \times 10^7} \right] = 10.3 \text{ N/mm}^2$$

Kehilangan tegangan akibat deformasi elastis beton =

$$= (5.7 \times 10.3) = 58.8 \text{ N/mm}^2$$

Gaya pada kawat-kawat segera setelah transfer =

$$= (1200 - 58.8) 38.5 = 440000 \text{ N} = 440 \text{ kN}$$

Tegangan pada beton pada ketinggian baja =

$$f_c = \left[\frac{440 \times 10^3}{6 \times 10^4} + \frac{(440 \times 10^3 \times 50) 50}{45 \times 10^7} \right] = 9.55 \text{ N/mm}^2$$

Tipe kehilangan prategang

1. Deformasi elastis = 58.8 N/mm²
2. Rangkak beton = (1.6 x 9.55 x 5.7) = 87.1 N/mm²
3. Susut beton = (3 x 10⁻⁴) (2.1 x 10⁵) = 63.0 N/mm²
4. Relaksasi tegangan baja = (5/100 x 1200) = 60.0 N/mm²

Kehilangan Total = 268.9 N/mm²

Tegangan akhir pada kawat-kawat = (1200 - 268.9) = 931.1 N/mm²

Persentase kehilangan tegangan = $\frac{268.9}{1200} \times 100 = 22.4 \%$

C. Evaluasi / Latihan

1. Sebuah tiang pancang beton prategang dengan potongan melintang 250 mm x 250 mm, mengandung 60 kawat pratarik yang masing-masing mempunyai diameter 2 mm, terbagi rata

seluas penampang. Kawat-kawat ini diberi tegangan awal pada alas tempat pemberian prategang dengan suatu gaya total sebesar 300 kN. Kalau $E_s = 210 \text{ kN/mm}^2$ dan $E_c = 32 \text{ kN/mm}^2$ hitunglah tegangan-tegangan yang bersangkutan pada baja dan beton segera setelah transfer prategang dengan anggapan bahwa sampai dengan batas ini, kehilangan tegangan hanya disebabkan oleh perpendekan elastis. Kalau beton tersebut mengalami perpendekan lebih lanjut akibat rangkak sebesar 30×10^{-6} per N/mm² tegangan serta susut sebesar 200×10^{-6} per satu satuan panjang, sementara terdapat suatu relaksasi sebesar 5 persen dari tegangan baja akibat rangkak baja, carilah tegangan tarik terbesar yang dapat terjadi pada suatu tiang yang panjangnya 20 m apabila diangkat pada dua titik 4 m dari masing-masing ujung.

2. Di dalam sebuah balok pascatarik yang panjangnya 12m, sebuah kabel dipasang secara simetris, dengan bagian tengahnya sepanjang 6 m arah horisontal dan dua bagian ujung lurus miring ke atas membuat sudut dengan bidang horisontal yang mempunyai tangen sarna dengan 0,075. Kabel terse but ditarik dengan mendongkrak pada satu ujung dan angkur pada ujung lainnya dari balok. Pada ujung yang did onkrak, tegangan yang iukur adalah 1040 N/mm². Koefisien "goyangan" K dapat dianggap sarna dengan 0,004/m. Hitunglah tegangan pada kabel pada ujung y ang jauh (angkur) dan pada kedua titik di mana arah kabel berubah. Dimisalkan koefisien

gesekan antara kabel dan saluran sarna dengan 0,40. Berapakah persentase kehilangan prategang antara ujung yang didongkrak dan ujung yang diangkur.

BAB VI

DESAIN PENAMPANG BETON PRATEGANG

A. Tujuan Pembelajaran

1. Mahasiswa mampu menjelaskan tentang cara mendesain Penampang Beton Prategang
2. Mahasiswa mampu menyelesaikan soal tentang mendesain Penampang Beton Prategang

B. Materi Pembelajaran

6.1 Gaya Prategang

Setiap nilai prategang dalam batas-batas ini dapat dipakai secara aman tanpa melewati tegangan yang diperkenankan pada serat-serat paling luar. Namun, gaya prategang minimum yang diperlukan akan diperoleh dengan memilih prategang tarik maksimum pada serat paling atas dan prategang tekan, yang bersesuaian dengan serat paling bawah. Dengan menyusun kembali persamaan-persamaan ini,

$$f_{sup} > \left(f_{tt} - \frac{M_g}{Z_t} \right)$$

$$f_{inf} > \left[\frac{f_{tw}}{\eta} + \frac{M_g + M}{\eta Z_b} \right]$$

Dalam persamaan-persamaan ini Z_t dan Z_b bersesuaian dengan nilai-nilai sebenarnya dari penampang yang dipilih.

Dengan menghilangkan dari persamaan-persamaan tersebut,

$$f_{sup} = (P/A - Pe/Z_t) \text{ dan } f_{inf} = (P/A + Pe/Z_b)$$

Kita mempunyai persamaan untuk gaya prategang minimum sebagai.

$$P = \frac{A(f_{inf} Z_b + f_{sup} Z_t)}{(Z_t + Z_b)}$$

Begitu pula, dengan menghilangkan P dari persamaan-persamaan tersebut, eksentrisitas maksimum yang bersesuaian ditentukan oleh:

$$e = \frac{Z_t Z_b (f_{inf} - f_{sup})}{A (f_{sup} Z_t + f_{inf} Z_b)}$$

Di dalam metode Magnel, keempat syarat tegangan dikombinasikan dengan persamaan-persamaan prategang, menghasilkan empat hubungan linear apabila diplot pada suatu grafik dengan l/P sebagai ordinat dan e sebagai absis. Kombinasi-kombinasi yang mungkin dari gaya prategang dan eksentrisitas ditunjukkan oleh titik-titik yang terletak di dalam segi empat yang dibentuk oleh keempat garis tersebut. Di dalam metode grafik sederhana yang disarankan oleh Bennett, diagram distribusi tegangan diperoleh dengan penggambaran secara grafis yang menyangkut pemakaian tegangan langsung dan jari-jari girasi. Penggambaran secara grafis

juga memungkinkan suatu pengujian cepat atas batas-batas kedudukan dan nilai gaya prategang yang mungkin.

Contoh 6.1

Sebuah balok prategang pascatarik berpenampang persegi panjang dengan lebar 250 mm harus didesain untuk suatu beban terpasang sebesar 12 kN/m², yang terbagi rata sepanjang bentang 12 m. Tegangan pada beton tidak boleh melebihi 17 N/mm² dalam tekanan atau 1,4 N/mm² dalam tarikan pada setiap saat dan kehilangan prategang dianggap 15 persen.

(a) Hitunglah tinggi minimum yang mungkin dari balok; dan

(b) Untuk penampang yang tersedia, hitunglah gaya prategang minimum dan eksentrisitas yang bersesuaian.

Beban terpasang,	$q = 12 \text{ kN/m}$,	$\eta = 0.85$
Lebar penampang	$b = 250 \text{ mm}$	$f_{ct} = f_{ct} = 17 \text{ N/mm}^2$
Tinggi penampang total	$= h \text{ mm}$	$f_{tt} = f_{tw} = -1.4 \text{ N/mm}^2$

$$\text{Momen akibat beban hidup, } M_q = \frac{12 \times 12^2}{8} = 216 \text{ kN m}$$

$$\text{Momen akibat beban mati, } M_q = \left[\frac{(bh) \times 24 \times 12^2}{10^6 \times 8} \right] = \frac{432 bh}{10^6} \text{ kN m}$$

$$= 432 bh \text{ N mm}$$

Batas-batas tegangan pada serat paling bawah,

$$f_{bt} = \eta f_{ct} - f_{tw} = [0.85 \times 17 - (-1.4)]$$

$$= 15.85 \text{ N/mm}^2$$

(a) Momen tahan minimum ditentukan oleh

$$Z_b = \frac{M_q + (1 + \eta)M_g}{f_{br}}$$

$$\text{Jadi, } \frac{bh^2}{6} = \frac{(216 \times 10^6) + (1 - 0.85)432 bh}{15.85}$$

Substitusikan $b = 250$ mm dan disederhanakan, $h^2 - 24.5 h - 325000 = 0$

$$h = 580 \text{ mm}$$

(b) Untuk penampang yang tersedia ($b = 250$ mm dan $h = 580$ mm)

Luas penampang, $A = 145 \times 10^3 \text{ mm}^2$

$$Z_b = Z_t = 14 \times 10^5 \text{ N mm}$$

Momen akibat berat sendiri, $M_g = 625 \times 10^5 \text{ N mm}$

$$(M_q + M_g) = 2785 \times 10^5 \text{ N mm}$$

$$f_{sup} = f_{tt} - \frac{M_g}{Z_t} = \left[-1.4 - \frac{625 \times 10^5}{0.85 \times 14 \times 10^6} \right] = -5.9 \text{ N/mm}^2$$

$$f_{inf} = \left[\frac{f_{tw}}{\eta} + \frac{(M_q + M_g)}{\eta Z_b} \right] = \frac{-1.4}{0.85} + \frac{2785 \times 10^5}{0.85 \times 14 \times 10^6}$$

Gaya prategang minimum ditentukan oleh

$$P = \left[\frac{A(f_{inf} Z_b + f_{sup} Z_t)}{Z_b + Z_t} \right] = \left[\frac{1.45 \times 10^3 ((22 - 5.9) 14 \times 10^6)}{28 \times 10^6} \right]$$

$$= 1170000 \text{ N} = 1170 \text{ kN}$$

Eksentrisitas yang bersesuaian ditentukan oleh

$$e = \left[\frac{Z_t Z_b (f_{inf} - f_{sup})}{A_c (f_{sup} Z_t + f_{inf} Z_b)} \right] = \left[\frac{(14 \times 10^6)^2 \times \{22 - (-5.0)\}}{145 \times 10^3 (22 - 5.9) 14 \times 10^6} \right]$$

$$= 167.5 \text{ mm}$$

6.2 Daerah Batas untuk Gaya Prategang

Prategang sepanjang balok pada umumnya disesuaikan dengan mengubah eksentrisitas gaya prategangnya. Praktek ini umumnya dipakai dalam balok paseatarik dengan memakai kabel-kabel melengkung. Dalam hal batang pratarik, tendon dapat dibengkokkan dengan memakai peralatan yang dipasang pada cetakan sebelum beton dior. Setelah besarnya gaya prategang untuk penampang kritis ditentukan, daerah batas untuk gaya

yang terikat oleh batas-batas atas dan bawah dapat ditetapkan yang dinyatakan sebagai fungsi dari momen-momen minimum dan maksimum, sifat-sifat penampang, gaya prategang, dan tegangan-tegangan yang diperkenankan pada beton pada saat transfer dan beban-beban kerja.

$$f_{sup} = (P/A - Pe/Z_t)$$

$$f_{inf} = (P/A + Pe/Z_b)$$

Contoh 6.2

Sebuah balok prategang mempunyai penampang-I tidak simetris dengan tinggi total 1840 mm. Lebar flens atas dan flens bawah berturut-turut sarna dengan 1800 dan 820 mm. Tebal flens atas berubah dari 180 mm pada ujung-ujungnya sampai 430 mm pada pertemuan dengan badan, yang tebalnya 180 mm. Tebal flens bawah berubah dari 180 mm pada ujung-ujungnya sampai 450 mm pada pertemuan dengan badan. Balok terse but didesain untuk suatu bentangan 40 m yang ditumpu secara sederhana. Tegangan tekan yang diperkenankan pada saat transfer dan beban kerja dibatasi sampai 16 N/mm^2 , sedangkan tegangan tarik pada saat transfer dan beban kerja dibatasi masing-masing sampai nol dan 1.4 N/mm^2 . Perbandingan kehilangan sarna dengan 0,80.

(a) Hitunglah beban terpasang terbagi rata yang diperkenankan,

(b) Carilah besarnya gaya prategang kalau pada penampang di tengah bentang gaya tersebut terletak 130 mm dari tepi bawah, dan

(c) Hitunglah batas-batas vertikal di dalam mana kabel harus diletakkan pada penampang di tengah ben tang dan di atas tumpuan.

Sifat-sifat penampang I

$$\begin{aligned} A &= 1016500 \text{ mm}^2 & y_t &= 700 \text{ mm} \\ I &= 4442 \times 10^8 \text{ mm}^4 & y_b &= 1140 \text{ mm} \\ Z_b &= 39 \times 10^7 \text{ mm}^3 & Z_t &= 63 \times 10^7 \text{ mm}^3 \\ e &= (1140 - 130) = 1010 \text{ mm} \end{aligned}$$

Berat sendiri,

$$\begin{aligned} g &= (1.0165 \times 1 \times 24) = 24.10 \text{ kN/m} \\ M_g &= (24.1 \times 40^2)/8 = 4820 \text{ kN m} \end{aligned}$$

(a) Kalau M_q = momen akibat beban hidup, momen tahanan minimum yang diperlukan ditentukan oleh,

$$\begin{aligned} Z_b &= \frac{M_q + (1-\eta)M_g}{f_{br}} \\ f_{br} &= (\eta f_{ct} - f_{tw}) = [(0.8 \times 16) - (-1.4)] = 14.2 \text{ N/mm}^2 \end{aligned}$$

Jadi,

$$39 \times 10^7 = \frac{M_q + (1-0.8)4820 \times 10^6}{14.2}$$

Diselesaikan,

$$\begin{aligned} M_q &= (qL^2/8) \times 10^6 = 4574 \times 10^6 \text{ N mm} \\ q &= 22.87 \text{ kN/m} \end{aligned}$$

(b) Gaya prategang minimum diperoleh dengan syarat-syarat tegangan batas.

$$\begin{aligned} \frac{P}{A} \left(1 + \frac{ey_b}{i^2} \right) - \frac{M_g}{Z_b} &= 16.0 \\ \frac{P}{A} \left(1 + \frac{ey_b}{i^2} \right) - \left(\frac{M_g + M_q}{Z_b} \right) & \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Juga, } e &= 1010 \text{ m} \\ i^2 &= (I/A) = 437000 \text{ dan } y_b = 1140 \text{ mm} \end{aligned}$$

$$\text{Hasilnya, } P = 7900 \text{ kN}$$

(c) Dengan mensubstitusikan nilai-nilai tegangan batas, $f_{tt} = 0$, $f_{tw} = -1.4$

$$f_{ct} = f_{cw} = 16.0 \text{ N/mm}^2$$

Ditengah bentang

$$\begin{aligned} e &< \left[\frac{Z_b f_{ct}}{P} - \frac{Z_b}{A} + \frac{M_{min}}{P} \right] \\ &< \left[\frac{39 \times 10^7 \times (-14)}{7900 \times 10^3} - \frac{39 \times 10^7}{1.0165 \times 10^6} + \frac{4820 \times 10^6}{7900 \times 10^3} \right] < 1015 \text{ mm} \end{aligned}$$

$$\text{dan } e > \left[\frac{Z_b f_{ct}}{P} - \frac{Z_b}{A} + \frac{M_w}{P} \right]$$

$$> \left[\frac{39 \times 10^7 \times (-14)}{0.8 \times 7900 \times 10^3} - \frac{39 \times 10^7}{1.0165 \times 10^6} + \frac{9394 \times 10^6}{0.8 \times 7900 \times 10^3} \right] > 784 \text{ mm}$$

Pada penampang diatas tumpuan

$$e < (790 - 385) < 405 \text{ mm}$$

$$\text{dan, } e > (-86 - 810) > -696 \text{ mm}$$

6.3 Desain Penampang Terhadap Tarikan Aksial

Oleh karena adanya prakompresi, beton prategang secara ideal adalah baik untuk desain batang yang menerima tarikan aksial. Contoh-contoh yang patut dicatat tentang batang- batang di mana tarikan aksial merupakan gaya primer adalah balok tepi bawah konstruksi rangka, dinding tangki silindris, silo, dan pipa yang menerima tekanan internal. Desainnya pada hakikatnya terdiri dari penentuan luas potongan melintang batang dan gaya prate gang yang diperlukan untuk secara aman memikul beban tarik aksial yang sesuai dengan keadaan batas kemampu layanan, yaitu tahap-tahap retak dan runtuh.

Pada keadaan batas kernampulayanan, tegangan tarik tidak diperkenankan untuk batang Kelas 1. Namun pada batang Kelas 2, tegangan tarik sampai dengan 0,36 (feu) $1/2 \text{ N/mm}^2$ diperbolehkan untuk batang pascatarik sesuai dengan peraturan Inggris. Menurut peraturan Standar India, tegangan tarik dibatasi sampai dengan 3,0

N/mm². Batang tipe Kelas 3 umumnya tidak dianjurkan untuk menahan tarikan langsung. Luas potongan melintang beton ditentukan dari syarat-syarat tegangan pada saat transfer dan beban kerja seperti dirinci di bawah ini:

Kalau

N_d = beban tarik rencana

N_{min} = beban tarik minimum (umumnya nol)

f_c = prategang tekan pada beton

f_{ct} = tegangan tekan yang diperkenankan pada beton saat transfer prategang.

f_{tw} = tegangan tarik yang diperkenankan pada beton akibat beban kerja

η = perbandingan kehilangan prategang

A = luas ekivalen beton

Pada tahap transfer,

$$[f_c - N_{min} / A] < f_{ct}$$

Pada tahap beban kerja

$$(\eta f_c - N_d / A) > f_{tw}$$

Dari kedua syarat tegangan tersebut, luas penampang ditentukan dengan

$$A > \left(\frac{N_d - \eta M_{min}}{f_{ct} - f_{cw}} \right)$$

Kalau beban minimum dan tegangan tarik yang diperkenankan sarna dengan nol, luas potongan melintang diperoleh dari persamaan:

$$A > (N_d / \eta f_{ct})$$

Luas potongan melintang yang ditentukan dengan persamaan-persamaan ini kadang-kadang tidak praktis,

khususnya dalam hal tangki air yang bundar. Dalam kasus demikian, tebal yang diperlukan telah ditetapkan, berdasarkan pertimbangan - pertimbangan praktis tentang pemberian tempat kabel-kabel vertikal serta pemadatan beton yang cukup pada dinding tangki. Pada umumnya suatu tebal minimum sebesar 100 mm disarankan untuk tangki yang tidak mempunyai kabel vertikal, sedangkan tebal sampai dengan 150 mm mungkin diperlukan untuk tangki dengan dinding tinggi, yang diberi prategang dengan kabel-kabel vertikal.

Contoh 6.2

Desainlah suatu penampang yang cukup untuk batang tepi bawah suatu konstruksi rangka untuk memikul suatu gaya tarik rencana maksimum sebesar 500 kN. Tegangan tekan yang diperkenankan pada beton pada saat transfer adalah 15 N/mm² dan tidak diperkenankan adanya tarikan akibat beban kerja, Perbandingan kehilangan sarna dengan 0,8. Dapat dipakai kawat-kawat berdiameter 7 mm dengan kekuatan tarik ultimit 1700 N/mm² dan dengan tegangan awal sebesar 950 N/mm². Kekuatan tarik beton langsung sarna dengan 3 N/mm². Diperlukan suatu faktor beban sebesar 2 pada keadaan batas runtuh dan sebesar 1,25 terhadap retak.

Beban tarik rencana, $N_d = 500 \text{ kN}$

$f_{ct} = 15 \text{ N/mm}^2$; $f_{tw} = 0$; $\eta = 0.80$

Luas penampang beton = $(N_d / \eta f_{ct})$

$$= \frac{500 \times 10^3}{0.8 \times 15} = 41500 \text{ mm}^2$$

Diambil penampang 180 x 250 mm (luas = 45000 mm²)

$$\text{Prategang tekan} = \left(\frac{500 \times 10^3}{0,8 \times 45000} \right) = 14 \text{ N/mm}^2$$

$$\text{Gaya prategang, P} = [(14 \times 45000)/1000] = 630 \text{ kN}$$

$$\text{Banyaknya kawat 7 mm} = \left(\frac{630 \times 10^3}{38,5 \times 950} \right) = 18$$

$$\text{Kekuatan tarik ultimit batang} = \frac{18 \times 38,5 \times 0,87 \times 1700}{1000} \\ = 1020 \text{ kN}$$

$$\text{Faktor beban terhadap runtuh} = \left(\frac{1020}{500} \right) = 2,04$$

$$\text{Beban retak} = \frac{45000 (0,8 \times 14 + 3)}{1000} = 640 \text{ kN}$$

$$\text{Faktor beban terhadap retak} = \left(\frac{640}{500} \right) = 1,28$$

C. Evaluasi / Latihan

1. Sebuah balok pascatarik dengan bentangan 15 m dan tinggi total 900 mm mempunyai suatu potongan melintang simetris merata dengan luas 2 X 105 mm² dan momen inersia 212 x 10⁸ mm⁴ satuan. Prategang diberikan dengan suatu kabel yang ditarik sampai suatu gaya sebesar 1450 kN pada saat transfer. Kalau balok tersebut akan memikul suatu beban hidup terbagi rata sebesar 21 kN/m dan beban minimumnya adalah yang disebabkan oleh berat sendiri, hitunglah batas-batas vertikal di dalam mana, kabel tersebut harus terletak sepanjang balok. Tegangan-tegangan tekan yang diperkenankan pada saat transfer dan beban kerja masing-masing adalah 14 dan 16,8 N/mm². Tegangan-tegangan tarik pada saat transfer dan beban kerja masing-masing adalah nol dan 17,5 N/mm²
Dc = 24 kN/m³. Kehilangan prategang 20 persen.

2. Desainlah gaya prategang yang diperlukan untuk batang tepi bawah dari konstruksi rangka beton bertulang. Tarikan akibat beban layan pada batang tepi bawah sarna dengan 360 kN dan tebal batang adalah tetap ISO mm. Tegangan tekan yang diperkenankan pada beton pada saat transfer sarna dengan 15 N/mm² dan tidak diperbolehkan ada tarikan pada beban kerja. Perbandingan kehilangan sarna dengan 0,8. Tersedia untuk dipakai kawat-kawat bermutu tinggi berdiameter 7 mm yang ditarik sampai dengan tegangan 1000 N/mm² dan mempunyai fpu == 1500 N/mm². Kekuatan tarik beton sarna dengan 2,5 N/mm². Di dalam desain harus diberikan suatu faktor beban sebesar 1,7 pada keadaan batas runtuh dan 1,2 terhadap retak.

BAB VII

DESAIN BATANG LENTUR PRATARIK DAN PASCATARIK

A. Tujuan Pembelajaran

1. Mahasiswa mampu menjelaskan tentang Desain Batang Lentur Pratarik
2. Mahasiswa mampu menjelaskan tentang Desain Batang Lentur Pascatarik
3. Mahasiswa mampu menyelesaikan soal tentang Desain Batang Lentur Pratarik dan Pascatarik

B. Materi Pembelajaran

7.1 Desain Balok Pratarik

Dalam desain balok prategang untuk menghitung momen ultimit diperlukan pengetahuan tentang berat sendiri balok

Contoh 7.1

Desainlah suatu gording atap pratarik agar sesuai dengan data yang ditentukan di bawah ini.

Bentang efektif = 6 m

Bentang terpasang = 5 kN/m

Faktor-faktor beban,

Untuk beban mati = 1.4

Untuk beban hidup = 1.6

Kekuatan kubus beton, $f_{cu} = 50 \text{ N/mm}^2$ -
 Kekuatan kubus pada saat transfer, $f_{ci} = 30 \text{ N/mm}^2$
 Kekuatan tarik beton, $f_t = 1.7 \text{ N/mm}^2$
 Modulus elastisitas beton, $E_c = 34 \text{ kN/mm}^2$
 Rangkak beton spesifik (specific creep) = 40×10^{-6}
 mm/mm per N/mm^2
 Perbandingan kehilangan, $\eta = 0.8$

Tegangan-tegangan yang diperkenankan:

Pada saat transfer - tegangan tekan, $f_{ct} = 15 \text{ N/mm}^2$
 tegangan tarik, $f_{tt} = -1 \text{ N/mm}^2$
 Pada beban kerja - tegangan tekan, $f_{cw} = 17 \text{ N/mm}^2$
 tegangan tarik $f_{tw} = 0$

Tersedia untuk dipakai kawat-kawat 7 mm bermutu tinggi yang mempunyai kekuatan tarik ultimit, $f_{pu} = 1600 \text{ N/mm}^2$.

Perhitungan-perhitungan Desain

1. Momen dan Geser Ultimit.

$$\left(\frac{w_{min}}{w_{ud}}\right) = \left[\frac{75 \times 2400 \times 9.81 \times 0.125 \times 25 \times 6}{50 \times 10^6 \times 0.85^2}\right] = 0.094$$

$$w_{ud} = \left[\frac{1.6 \times 5}{1 - 1.4(0.094)}\right] = 9.25 \text{ kN/m}$$

Jadi,

$$W_{min} = (0.094) (9.25) = 0.86 \text{ kN/m}$$

$$M_u = (0.125 \times 9.25 \times 6^2) = 42 \text{ kN/m}$$

$$V_u = (0.5 \times 9.25 \times 6) = 27.75 \text{ kN}$$

$$M_g = (0.125 \times 0.86 \times 6^2) = 3.86 \text{ kN m}$$

$$M_q = (0.125 \times 5 \times 6^2) = 22.50 \text{ kN m}$$

7.1.1 Dimensi potongan melintang

Untuk penampang dengan flens,

$$M_u = 0.10 f_{cu} b d^2 \text{ dan jika } b = 0.5 d$$

$$\text{Jadi, } d = \left(\frac{42 \times 10^6 \times 2}{0.10 \times 50}\right)^{1/3} = 270 \text{ mm}$$

$$d/h = 0.85$$

Maka,

$$h = 315 \text{ mm}$$

$$\text{Ditetapkan tinggi efektif, } d = 275 \text{ mm}$$

$$\text{Dan tinggi total} = 320 \text{ mm}$$

$$\text{Lebar flens} = 160 \text{ mm}$$

$$\text{Tebal flens} = (0.2 \times 275) = 55 \text{ mm}$$

Oleh karena itu dipakai flens dengan kemiringan, tebal flens ditambah dengan 20 persen. Maka tebal rata-rata flens = 70 mm

Tebal badan perkiraan

$$= \left(\frac{0.85 V_u}{f_t h}\right) = \left(\frac{0.85 \times 27.75 \times 10^3}{1.7 \times 320}\right) = 43 \text{ mm}$$

Ditetpkan tebal badan = 50 mm

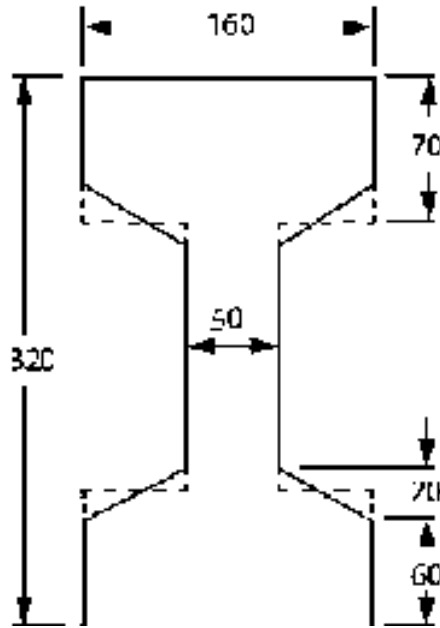
Penampang 1 simetris yang dipilih ditunjukkan pada gambar 7.2. Sifat-sifat penampang adalah

$$\text{Luas } A = 31400 \text{ mm}^2$$

$$I = 3700 \times 10^5 \text{ mm}^4$$

$$Z_{inf} = Z_{sup} = Z = 230 \times 10^4 \text{ mm}^4$$

Berat sendiri, $g = 0,76 \text{ kN/m}$ yang kurang dari nilai 0,86 kN/m yang diperkirakan.



Gambar 7.1. Penampang I Simetris

7.1.2 Momen Tahan Minimum

Batas-batas tegangan, $f_{br} = (\eta f_{ct} - f_{tw}) = (0.8 \times 15 - 0) = 12$ N/mm²

$f_{tr} = (f_{cw} - \eta f_{tt}) = [17 - 0.8 \times (-1)] = 17.8$ N/mm²

Momen tahan minimum ditentukan oleh,

$$Z_b > \left[\frac{M_q + (1-\eta)M_g}{f_{br}} \right] > \left[\frac{(22.50 \times 10^6) + (1-0.8)3.86 \times 10^6}{12} \right] > 182 \times 10^4 \text{ mm}^3$$

Penampang I yang dipilih memenuhi syarat-syarat mengenai momen akibat berat sendiri dan momen tahan.

2. Gaya Prategang dan Eksentrisitas

$$P = \left[\frac{A(f_{inf}Z_b + f_{sup}Z_t)}{Z_t + Z_b} \right]$$

$$\begin{aligned} f_{inf} &= [(ftw/\eta) + (M_q + M_g) / \eta Z_b] \\ &= [(0) + (26.36 \times 10^6) / (0.8 \times 230 \times 10^4)] \\ &= 14.3 \text{ N/mm}^2 \end{aligned}$$

$$\text{Jadi, } P = \left[\frac{31400 \times 230 \times 10^4 (14.3 - 2.68)}{2 \times 230 \times 10^4} \right] = 182000 \text{ N} = 182 \text{ kN}$$

Banyaknya kawat 7 mm yang diberi tegangan awal sampai 1200 N/mm² ditentukan oleh, = (182000) / (38.5 x 1200) = 3.95

$$\begin{aligned} \text{Eksentrisitas, } e &= [Z_t Z_b (f_{inf} - f_{sup}) / A (f_{sup} Z_t + f_{inf} Z_b)] \\ &= [230 \times 10^4 (14.3 + 2.68) / 31400 (14.3 - 2.68)] \\ &= 105 \text{ mm} \end{aligned}$$

7.1.3 Pemeriksaan untuk kekuatan lentur ultimit

$$A_{ps} = (38.5 \times 4) = 154 \text{ mm}^2$$

$$f_{pu} = 1600 \text{ N/mm}, f_{cu} = 50 \text{ N/mm}^2$$

$$b = 160 \text{ mm} \quad d = 265$$

Jadi,

$$\left(\frac{A_{ps} f_{pu}}{b d f_{cu}} \right) = \left(\frac{154 \times 1600}{160 \times 265 \times 50} \right) = 0.116$$

Dari Tabel 7.1, $f_{pb} / f_{pu} = 1.0$ dan $x/d = 0.237$

$$\text{Jadi, } x = 64 \text{ mm}$$

$$\begin{aligned} \text{Jadi, } M_u &= f_{pu} A_{ps} (d - 0.5x) \\ &= [1600 \times 154 (265 - 0.5 \times 64)] \\ &= 57 \times 10^6 \text{ N mm} = 57 \text{ kN m} \end{aligned}$$

Tulangan tak-ditarik tersendiri tidak diperlukan karena kekuatan lentur sesungguhnya melebihi momen ultimit rencana sebesar 42 kN m.

7.1.4 Pemeriksaan untuk kekuatan geser ultimit

(a) Penampang pada tumpuan (tidak ada retak akibat lentur)

Geser ultimit, $V_u = 27.75 \text{ kN}$

Prategang efektif pada titik berat,

$$f_{cp} = \left(\frac{\eta P}{A}\right) = \left(\frac{0.8 \times 182000}{31400}\right) = 4.65 \text{ N/mm}^2$$

$$\begin{aligned} V_{cw} &= 0.67 b h (ft^2 + 0.8 f_{cp} f_t)^{1/2} \\ &= [0.67 \times 50 \times 320 (1.7^2 + 0.8 \times 4.65 \times 1.7)]^{1/2} \\ &= 33.2 \text{ kN} \end{aligned}$$

Jadi, $V_{cw} > V_u$

Maka penampang terse but aman terhadap kerusakan akibat geser.

(b) Penampang retak akibat lentur dengan geser maksimum Pada penampang sembarang dengan jarak x dad tumpuan ujung,

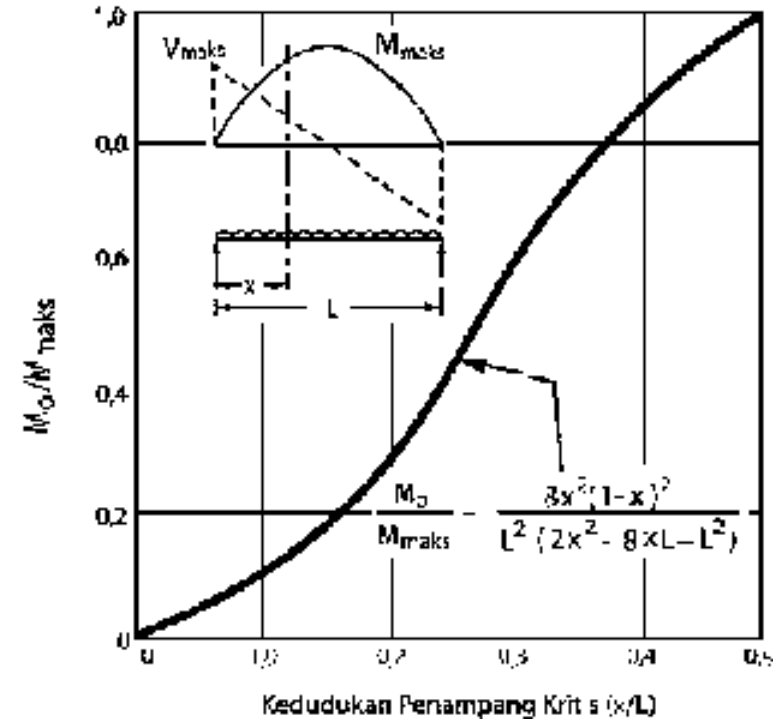
$$f_{ep} = \left[\frac{0.8 \times 182 \times 10^3}{31400} + \frac{0.8 \times 182 \times 10^3 \times 105}{230 \times 10^4}\right] = 11.30 \text{ N/mm}^2$$

$$M_o = \left(\frac{0.8 f_{ep} l}{y_b}\right) = \left(\frac{0.8 \times 11.3 \times 3700 \times 10^5}{160 \times 10^6}\right) = 21 \text{ kN m}$$

Jadi $(M_o / M_{maks}) = 21/42 = 0.5$

Dari Gambar 13.3, kedudukan penampang kritis diperoleh sebagai

$$x/L = 0.26$$



Gambar 7.2. Kedudukan Penampang Geser Kritis pada suatu Balok Prategang (Bate dan Bennett).

Dengan demikian, $x = (0.26 \times 6) = 1.56$ dari tumpuan kiri Pada penampang ini

$$M = 0.5 \times 9.25 \times 1.56 (6 - 1.56) = 32 \text{ kN m}$$

$$\begin{aligned} V &= V_{maks} [1 - 2(x/L)] \\ &= 27.75 (1 - 2 \times 1.56 / 6) \\ &= 13.4 \text{ kN} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} f_{pe} &= (0.8 \times 1200) \\ &= 960 \text{ N/mm}^2 > 0.6 f_{pu} \end{aligned}$$

$$\left(\frac{100 A_{ps}}{b_w d}\right) = \left(\frac{100 \times 154}{50 \times 265}\right) = 1.17 \%$$

Dari Tabel 8.2, tahanan geser rata-rata ultirnit dari beton, $T_c = 0.80 \text{ N/mm}^2$

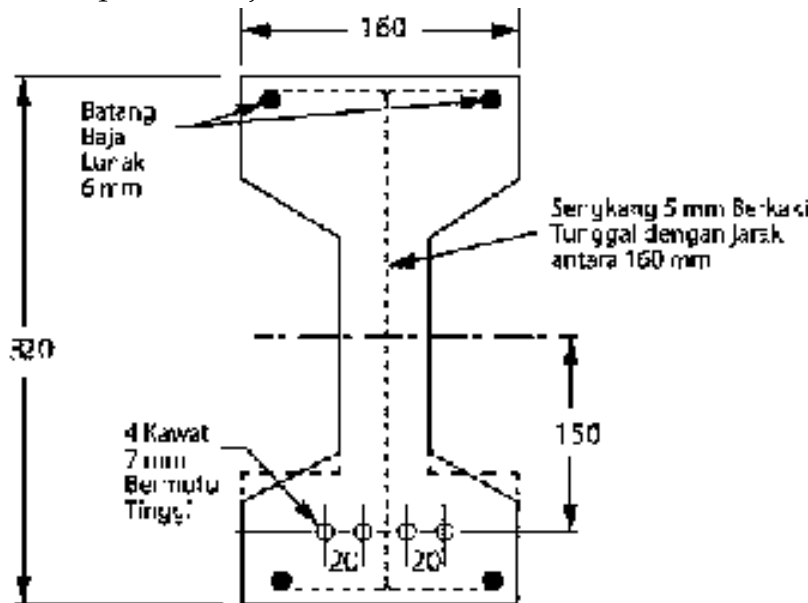
Jadi,

$$\begin{aligned}
 V_{cf} &= [(1 - 0.55 f_{pc}/f_{pu}) T_c b_w d + M_o (V/M)] \\
 &= \left[\frac{(1 - 0.55 \times \frac{690}{1600}) 0.8 \times 50 \times 265 \times + 21 \times (\frac{13.4}{32})}{1000} \right] \\
 &= 15.95 \text{ kN}
 \end{aligned}$$

Karena $V_{cf} > V_u > 0.5 V_{cf}$, tulangan geser minimum harus diberikan,

$$\frac{A_{sv}}{S_v} = \left(\frac{0.4 b_w}{0.87 f_{yv}} \right) = \left(\frac{0.4 \times 50}{0.87 \times 260} \right) = 0.09 \text{ mm}^2/\text{mm}$$

Disediakan sengkang baja lunak 5 mm dengan jarak 160 mm seperti ditunjukkan dalam Gambar 13.4.



Gambar 7.3. Susunan tulangan dalam gording

7.1.5 Pemeriksaan untuk keadaan batas lendutan

$$\begin{aligned}
 \text{Lendutan akibat gaya prategang} &= \left(\frac{P_e L^2}{8 E_c I} \right) \\
 &= \left\{ \frac{182 \times 10^3 \times 105 \times 6^2 \times 1000^2}{8 \times 34 \times 10^3 \times 3700 \times 10^5} \right\} = 6.8 \text{ mm (keatas)}
 \end{aligned}$$

Lendutan akibat beban sendiri,

$$= \left(\frac{5 g L^4}{384 E_c I} \right) = \left\{ \frac{5 \times 5 \times 6^4 \times 1000^4}{384 \times 34 \times 10^3 \times 3700 \times 10^5} \right\} = 1.02 \text{ mm}$$

Lendutan akibat beban hidup,

$$= \left(\frac{5 g L^4}{384 E_c I} \right) = \left\{ \frac{5 \times 5 \times 6^4 \times 1000^4}{384 \times 34 \times 10^3 \times 3700 \times 10^5} \right\} = 6.7 \text{ mm}$$

Menurut peraturan Inggris CP 110, modulus elastisitas beton jangka panjang,

$$E_{ce} = E_c / (1 + K_c E_c)$$

Dimana,

K_c = rangkai spesifik atau regangan rangkai ultimit yang dapat dihitung dengan persamaan yang direkomendasikan dalam IS: 1343 atau dari CP 110.

$$\begin{aligned}
 \text{Jadi,} \quad E_{ce} &= [(34 \times 10^3) / (1 + 40 \times 10^{-6} \times 34 \times 10^3)] \\
 &= 14.4 \text{ kN/mm}^2
 \end{aligned}$$

Dengan memakai modulus jangka panjang untuk beban mati dan modulus jangka pendek untuk beban hidup, lendutan resultan dihitung menjadi:

$$\begin{aligned}
 &= [(2.36 \times 1.02) + 6.7 - 0.8 \times 6.8] \\
 &= 3.5 \text{ mm}
 \end{aligned}$$

Lendutannya benar dalam batas yang diperkenankan maksimum sebesar $(\text{bentang}/250) = 24 \text{ mm}$.

7.2 Desain Balok Pascatarik

Contoh 7.2

Desainlah sebuah gording atap pascatarik agar sesuai dengan data berikut:

Bentangan efektif	= 30 m
Beban hidup	= 9 kN/m
Beban mati (dari luar berat sendiri)	= 2 kN/m
Fakto-faktor beban	
Untuk beban mati	= 1.4
Untuk beban hidup	= 1.6
Kekuatan kubus beton, f_{cu}	= 50 N/mm ²
Kekuatan kubus pada saat transfer, f_{ci}	= 35 N/mm ²
Kekuatan tarik beton, f_t	= 1.7 N/mm ²
Modulus elastisitas beton, E_c	= 34 kN/mm ²
Perbandingan kehilangan, η	= 0.85

Tersedia untuk dipakai kawat-kawat bermutu tinggi berdiameter 8 mm yang mempunyai kekuatan tarik karakteristik $f_{pu} = 1500$ N/mm². Modulus elastisitas kawat bermutu tinggi adalah 200 kN/mm². Desainlah balok terse but sebagai struktur Kelas 1 sesuai dengan ketentuan-ketentuan peraturan Inggris CP 110.

Perhitungan-perhitungan Desain

7.2.1 Momen dan Geser Ultimit

$$\left(\frac{w_{min}}{w_{ud}}\right) = \left[\frac{5 \times 2400 \times 9.81 \times 0.125 \times 25 \times 30}{50 \times 10^6 \times 0.85^2}\right] = 0.31$$

Beban ultimit, diluar berat sendiri terfaktor

$$= (1.4 \times 2) + (1.6 \times 9) = 17.2$$

$$W_{ud} = 17.2 / (1 - 1.4 \times 0.31) = 30 \text{ kN/m}$$

$$\text{Jadi } W_{min} = (0.31 \times 30) = 9.3 \text{ kNm}$$

$$\text{Momen ultimit, } M_u = (0.125 \times 30 \times 30^2) = 3400 \text{ kN m}$$

$$\text{Geser ultimit } V_u = (0.5 \times 30 \times 30) \text{ kN}$$

7.2.2 Dimensi potongan melintang

Dari bagan pendahuluan (lihat Gambar 7.4) untuk perbandingan-perbandingan $h_f/d = 0.23$ dan $b_w/b = 0.25$ dan menganggap $b = 0.5 d$,

$$M_u = 0.10 f_{cu} b d^2$$

$$\text{Jadi } d = \left(\frac{3400 \times 10^6}{0.10 \times 50 \times 0.5}\right)^{1/3} = 1130 \text{ mm}$$

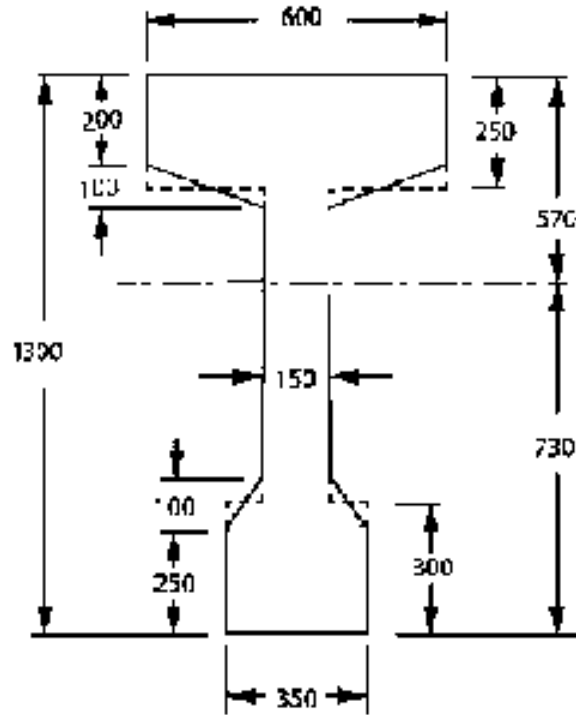
$$\text{Maka } h = (1130/0.85) = 1300$$

$$B = 600 \text{ mm, } h_f = (0.2 \times 1130) = 250 \text{ mm}$$

Ditetapkan suatu tinggi efektif, $d = 1150$ mm

$$\text{Tebal badan, } b_w = \left(\frac{0.6 V_u}{f_1 h}\right) = \left(\frac{0.6 \times 450 \times 10^3}{1.7 \times 1300}\right) = 120 \text{ mm}$$

Oleh karena kabel-kabel berdiameter 50 mm harus melewati badan, tebal badan minimum dengan pertimbangan-pertimbangan praktis (dengan tebal beton pelindung bersih 50 mm) = $(50 + 2 \times 50) = 150$ mm. Dimensi-dimensi flens bawah harus sedemikian rupa sehingga dapat menempatkan kabel-kabel maupun angkur pada ujung-ujung batang dengan syarat-syarat beton pelindung minimum yang cukup. Potongan melintang balok ditunjukkan dalam Gambar 7.4.



Gambar 7.4. Potongan Melintang Balok Pascatarik

7.2.3 Sifat Penampang

Luas potongan melintang, $A = 367.500 \text{ mm}^2$

Jarak titik berat dari tepi atas = 570 mm

Momen inersia, $I = (72490 \times 10^6) \text{ mm}^4$

Momen tahan (modulus penampang)

$Z_t = (127 \times 10^6) \text{ mm}^3$

$Z_b = (99 \times 10^6) \text{ mm}^4$

1. Momen dan Gaya Geser Rencana

Berat sendiri gelagar sesungguhnya = $(0,3675 \times 24) = 8,8 \text{ kN/m}$

Momen minimum, $M_{\min} = (0,125 \times 8,8 \times 302) = 990 \text{ kNm}$

Beban kerja rencana = $(2 + 8,8 + 9) = 19,8 \text{ kN/m}$

Momen kerja, $M_d = (0,125 \times 19,8 \times 302) = 2230 \text{ kN m}$

2. Tegangan-tegangan yang Diperkenankan dan Batas-batas Tegangan

Untuk $f_{cu} = 50 \text{ N/mm}^2$ dan $f_{ci} = 35 \text{ N/mm}^2$, sesuai dengan rekomendasi CP 110.

$f_{et} = 0,5f_{ci} = 17,5 \text{ N/mm}^2$

Untuk struktur Kelas 1, $f_{tt} = f_{tw} = 0$

Jadi $f_{br} = (\eta f_{ct} - f_{tw}) = (0,85 \times 17,5) = 15 \text{ N/mm}^2$

dan $f_{cw} = 0,33 f_{cu} = (0,33 \times 50) = 16,5 \text{ N/mm}^2$

Jadi $f_{tr} = (f_{cw} - \eta f_{ct}) = 16,5 \text{ N/mm}^2$

3. Pemeriksaan terhadap Momen Tahan Minimum

$Z_b > (M_d - \eta M_{\min}) / f_{br}$

$> (2230 \times 10^6 - 0,85 \times 990 \times 10^6) / 15]$

$> (93 \times 10^6) \text{ mm}^3$

Oleh karena $f_{tr} > f_{br}$, momen tahan Z_t akan kurang dari nilai di atas. Momen tahan dari penampang tidak simetris yang didesain melebihi nilai minimum.

4. Pemeriksaan terhadap Eksentrisitas dan Gaya Prategang

$$\begin{aligned} f_{sup} &= (f_{tt} - M_{\min} / Z_t) \\ &= [0 - (990 \times 10^6) / (127 \times 10^6)] \\ &= -7.8 \text{ N/mm}^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} f_{inf} &= (f_{tw} / \eta) + (M_d / \eta Z_b) \\ &= [0 + (2230 \times 10^6) / (0.85 \times 99 \times 10^6)] \\ &= 26.5 \text{ N/mm}^2 \end{aligned}$$

Maka,

$$e = \frac{Z_t Z_b (f_{inf} - f_{sup})}{A (f_{inf} Z_b + f_{sup} Z_t)}$$

$$= \frac{127 \times 99 \times 10^{12} (26.5 + 7.8)}{367500 \times 10^6 \times (26.5 \times 99 + 7.8 \times 127)}$$

$$= 730 \text{ mm}$$

Nilai eksentrisitas teoretis yang ditentukan di atas tidak praktis karena jatuh pada batas tepi bawah penampang. Maka, dengan memberikan beton pelindung yang cukup untuk kabel, eksentrisitas maksimum yang dimungkinkan,

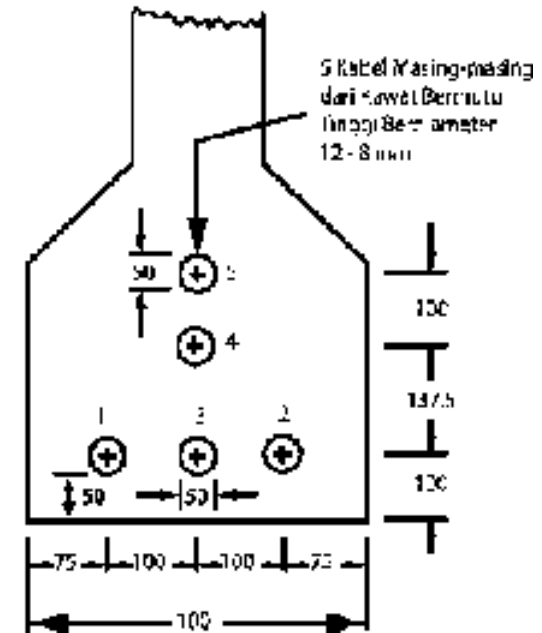
$$e = (1300 - 570 - 150) = 580 \text{ mm}$$

Gaya prategang yang bersesuaian dengan eksentrisitas ini diperoleh dari Persamaan 12.14 sebagai

$$P = \frac{A f_{inf} Z_b}{Z_b + A e} = \frac{367500 \times 26.5 \times 99 \times 10^6}{(99 \times 10^6) + (367500 \times 580)}$$

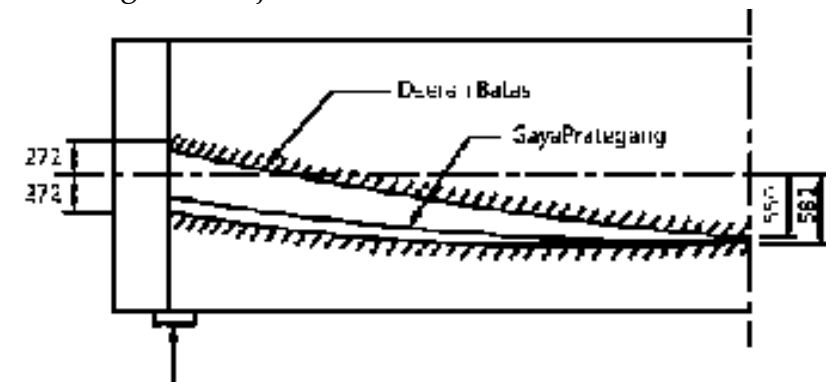
$$= 3200 \times 10^3 \text{ N} = 3200 \text{ kN}$$

Dengan memakai kabel Freyssinet, berdiameter 12-8 mm dan diberi tegangan sampai 1100 N/mm², gaya pada masing-masing kabel = (12 x 50 x 1100)/(1000) = 660 kN. Jadi, banyaknya kabel = (3200/660) = 5. Kabel-kabel disusun pada penampang di tengah bentang seperti dirinci dalam Gambar 7.5.



Gambar 7.5. Susunan Kabel

Gaya prategang harus terletak di dalam batas-batas yang ditetapkan di atas. Kabel-kabel dilengkungkan mengikuti suatu bentuk parabola menuju ke penampang di atas tumpuan. Profil gaya prategang resultan sepanjang bentangan ditunjukkan dalam Gambar 7.6.



Gambar 7.6. Daerah Batas dan Gaya Prategang.

5. Daerah Tendon yang Diperkenankan

Daerah tendon yang diperkenankan di tengah bentang pada penampang di atas tumpuan dihitung dengan memakai Persamaan,

$$e < [(Z_b \text{ fct} / P) - (Z_b / A) + (M_{\text{min}} / P)] \\ < [(99 \times 10^6 / 3200 \times 10^6) - (99 \times 10^6 / 367500) + (99 \times 10^6 / 3200 \times 10^6)] \\ < 582 \text{ mm}$$

$$e > [(Z_b \text{ fw} / \eta P) - (Z_b / A) + (M_d / \eta P)] \\ > [0 - (99 \times 10^6 / 367500) + (2230 \times 10^6 / 0.85 \times 10^3)] \\ > 550 \text{ m}$$

Begitu pula, pada penampang di atas tumpuan,
 $-272 \text{ mm} < e < 272 \text{ mm}$

6. Pemeriksaan terhadap Kekuatan Lentur Ultimit

Pada penampang di tengah bentang,

$$\begin{aligned} A_{ps} &= 3000 \text{ mm}^2 & d &= 1150 \text{ mm} \\ f_{cu} &= 50 \text{ N/mm}^2 & b_w &= 150 \text{ mm} \\ f_{pu} &= 1500 \text{ N/mm}^2 & b &= 600 \text{ mm} \\ hf &= 250 \text{ mm} \end{aligned}$$

Beban ultimit rencana, $M_{ud} = 3400 \text{ kN m}$

Menurut rekomendasi CP 110, kalau $x =$ tinggi blok tegangan,

$$M_{ud} = 0.4 f_{cu} [(b - b_w) hf (d - 0.5 hf) + b_w x (d - 0.5 x)]$$

Jadi

$$(x/d) = 1 - (1 - 5 M_{wu} / d_{cu} b_w d^2)^{1/2}$$

Tetapi momen ultimit yang ditahan oleh badan saja adalah

$$\begin{aligned} M_{wu} &= M_{ud} - 0.2 f_{cu} (b - b_w) hf (2d - hf) \\ &= [3400 - 0.2 \times 50 (600 - 150) 250 (2300 - 250) / 1000] \\ &= 1050 \text{ kN} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} (x/d) &= 1 - (1 - 5 \times 1050 / 50 \times 150 \times 1150^2)^{1/2} \\ &= 0.31 \end{aligned}$$

Untuk perbandingan ini.

$$f_{pb} / f_{pu} = 1.0$$

Tekanan maksimum yang timbul pada beton adalah,

$$\begin{aligned} N_{cu} &= 0.4 f_{cu} [(b - b_w) hf + b_w x] \\ &= 0.4 \times 50 [450 \times 250 + (150 \times 355)] / 1000 = 3340 \text{ kN} \end{aligned}$$

Oleh karena tendon-tendon mengembangkan tegangan runtuhnya, tahanan tarik ditentukan oleh:

$$\begin{aligned} N_{pb} &= [(3000 \times 1 \times 0.87 \times 1500) / 1000] \\ &= 3950 \text{ kN} \end{aligned}$$

Kapasitas momen adalah cukup. Dengan demikian tidak perlu tulangan tambahan. Namun tulangan longitudinal sebanyak tidak kurang dari 0,2 persen luas penampang harus diberikan untuk mengamankan terhadap retak susut. Tulangan baja lunak 16 mm atau batang-batang berulir diberikan seperti ditunjukkan dalam Gambar 7.6.

7.3 Pemeriksaan terhadap kekuatan geser

7.3.1 Penamoang pada tumpuan (tidak ada retak akibat lentur)

Geser ultimit, $V_u = 450 \text{ kN}$

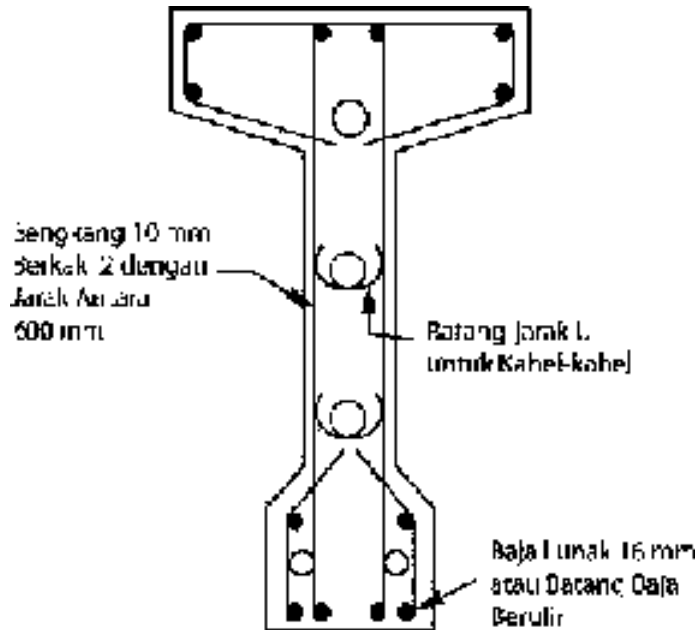
Prategang efektif pada titik berat,

$$f_{cp} = \left(\frac{\eta P}{A} \right) = \left(\frac{0.8 \times 3200 \times 10^3}{367500} \right) = 7.4 \text{ N/mm}^2$$

$$\text{Kemiringan kabel} = (4e/L) = (4 \times 410) / (30 \times 1000) = 0.0547$$

$$\begin{aligned} V_{cw} &= 0.67 b h (f_t^2 + 0.8 f_{cp} f_t)^{1/2} \\ &= [0.67 \times 150 \times 1300 (1.7^2 + 0.8 \times 7.4 \times 1.7)^{1/2} / 1000] \\ &= 617 \text{ kN} \end{aligned}$$

Ini lebih besar dari V_u Dengan demikian, penampang di atas tumpuan aman terhadap keruntuhan akibat geser.



Gambar 7.7. Susunan Tulangan Longitudinal dan Tulangan Badan

7.3.2 Penampang retak akibat lentur dengan geser maksimum Pada penampang sembarang dengan jarak x dad tumpuan ujung,

$$f_{ep} = \left[\frac{0.8 \times 3200 \times 10^3}{367500} + \frac{0.85 \times 3200 \times 10^3 \times 580}{99 \times 10^6} \right] = 23.4 \text{ N/mm}^2$$

$$M_o = (0.8 f_{ep} Z_b) = (0.8 \times 23.4 \times (99 \times 10^6) / 1000) = 1850 \text{ kN m}$$

$$\text{Jadi } (M_o / M_{maks}) = 0.545$$

Dari Gambar 7.7, kedudukan penampang kritis diperoleh sebagai $x/L = 0.275$

$$\text{Dengan demikian, } x = (0.275 \times 30) = 8.25 \text{ m}$$

Pada penampang ini

$$M = 0.5 \times 30 \times 8.25 (30 - 8.25) = 2680 \text{ kN m}$$

$$\begin{aligned} V &= V_{maks} [1 - 2(x/L)] \\ &= 450 (1 - 2 \times 8.25 / 30) \\ &= 203 \text{ kN} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} f_{pe} &= (0.85 \times 1100) \\ &= 935 \text{ N/mm}^2 > 0.6 f_{pu} = 900 \text{ N/mm}^2 \end{aligned}$$

$$\left(\frac{100 A_{ps}}{b_w d} \right) = \left(\frac{100 \times 3000}{150 \times 1150} \right) = 1.74 \%$$

Dari Tabel 8.2, tahanan geser rata-rata ultirmit dari beton,

$$T_c = 0.90 \text{ N/mm}^2$$

Jadi,

$$\begin{aligned} V_{cf} &= [(1 - 0.55 f_{pc}/f_{pu}) T_c b_w d + M_o (V/M)] \\ &= \left[\frac{(1 - 0.55 \times \frac{900}{1500}) 0.9 \times 150 \times 1150 \times (\frac{13.4}{32})}{1000} \right] \\ &= 246 \text{ kN} \end{aligned}$$

Karena $V_{cf} > V_u > 0.5 V_{cf}$, tulangan geser minimum harus diberikan,

$$\frac{A_{sv}}{S_v} = \left(\frac{0.4 b_w}{0.87 f_{yv}} \right) = \left(\frac{0.4 \times 150}{0.87 \times 260} \right) = 0.265 \text{ mm}^2/\text{mm}$$

Jarak-antara maksimum sengkang-sengkang dibatasi sampai $0.75 d$ atau $4 b_w$. Dengan kelonggaran untuk beton pelindung 30 mm , $d_1 = 1270 \text{ mm}$. Jadi, jarak-antara tidak melebihi $(0.75 \times 1270) = 950 \text{ mm}$ atau $(4 \times 150) = 600 \text{ mm}$.

Dengan memakai sengkang 10 mm berkaki dua ($A_{sv} = 158 \text{ mm}^2$)

7.4 Pemeriksaan terhadap Lendutan pada Batas Kemampuan

Eksentrisitas gaya prategang pada tengah-terengah bentang, $e_1 = 580 \text{ mm}$. Pada penampang di atas tumpuan, $e_2 = 170 \text{ mm}$.

$$\begin{aligned} a_g &= \frac{PL^2}{48 E_c I} (5 e_1 + e_2) \\ &= \left(\frac{3200 \times 10^3 \times 30^2 \times 10^6}{48 \times 34 \times 10^3 \times 72490 \times 10^6} \right) (5 \times 580 + 170) \\ &= 63 \text{ mm keatas} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} a_g &= \left(\frac{5 g L^4}{384 E_c I} \right) = \left\{ \frac{5 \times 10.8 \times (30 \times 1000)^4}{384 \times 34 \times 10^3 \times 72490 \times 10^6} \right\} \\ &= 46 \text{ mm} \end{aligned}$$

$$a_g = \left(\frac{5 g L^4}{384 E_c I} \right) = \left\{ \frac{5 \times 9.8 \times (30 \times 1000)^4}{384 \times 34 \times 10^3 \times 72490 \times 10^5} \right\}$$

$$= 42 \text{ mm}$$

Kalau rangkai beton spesifik dianggap $40 \times 10^{-6} \text{ mm/mm}$ per N/mm^2 , modulus elastisitas jangka panjang,

$$E_{ce} = [(34 \times 10^3) / (1 + 40 \times 10^{-6} \times 34 \times 10^3)] = 14.4 \text{ kN/mm}^2$$

$$\text{Jadi, } E_c / E_{ce} = (44 / 14.4) = 2.36$$

Maka resultan lendutan jangka panjang maksimum

$$= [(2.36 \times 46) + 42 - 23] = 87 \text{ mm}$$

Lendutan jangka panjang berada dalam batas peraturan sebesar $bentang / 250 = 120 \text{ mm}$.

7.4.1 Tulangan Daerah Angkur

Prisma ekuivalen terhadap mana gaya-gaya angkur dipandang efektif dirinci dalam Gambar 7.9.

Untuk kabel 1 dan 2

$$2 y_{po} = 150 \text{ mm}; \quad 2 y_o = 200 \text{ mm}$$

$$\text{Maka } (y_{po} / y_o) = (75 / 100) = 0.75$$

Untuk kabel 3, 4, dan 5.

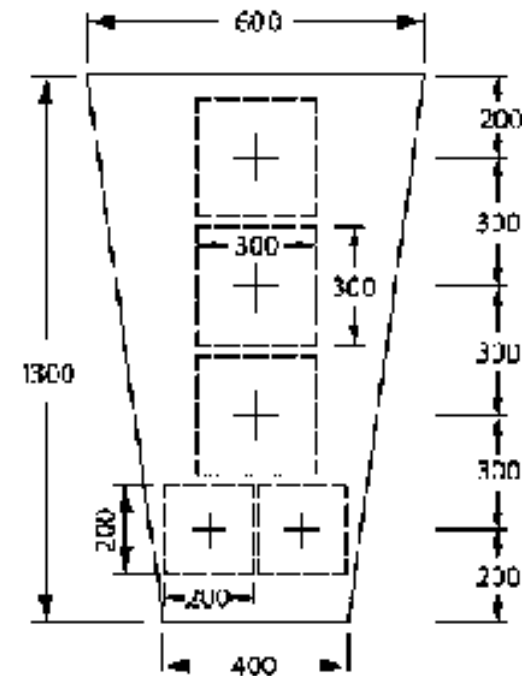
$$2 y_{po} = 150 \text{ mm}; \quad 2 y_o = 300 \text{ mm}$$

$$\text{Maka } (y_{po} / y_o) = (75 / 150) = 0.50$$

Gaya dongkrak awal pada masing-masing kabel = 640 kN

Dengan meninjau gaya-gaya kabel 1 dan 2 bersama-sama, dari Gambar 7.8,

$$\text{Tarikan memecah (bursting tension), } F_{bst} = (0.11 \times 2 \times 640) = 140 \text{ kN}$$



Gambar 7.8. Susunan Gaya-gaya Angkur dan Prisma-prisma ekuivalen.

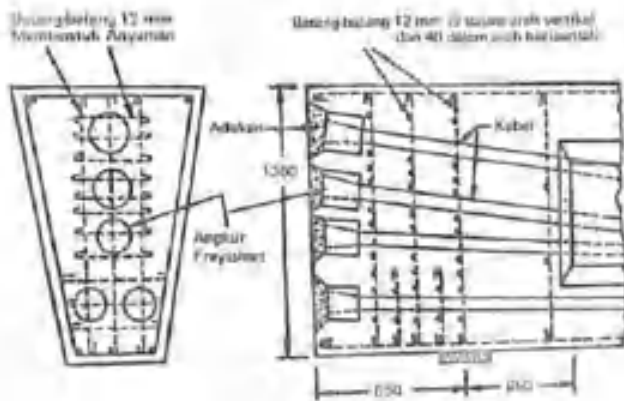
Untuk masing-masing kabel 3, 4, dan 5.

$$\text{Tarikan memecah (bursting tension), } F_{bst} = (0.17 \times 640) = 109 \text{ kN}$$

Dengan memakai kait dari baja lunak dan mempertimbangkan tarikan memecah yang lebih besar,

$$A_{st} = \left(\frac{140 \times 10^3}{0.87 \times 260} \right) = 620 \text{ mm}^2$$

Susunan tulangan yang dimungkinkan, dengan memakai sengkang-sengkang berdiameter 12 mm dalam arah vertikal dan horisontal, ditunjukkan dalam Gambar 7.9.



Gambar 7.9. Susunan Blok-blok Angkur Tulangan

C. Evaluasi / Latihan

Desainlah suatu balok I simetris pratarik untuk suatu bentangan efektif 7 m untuk memikul suatu beban terpasang di atasnya sebesar 6 kN/m. Balok tersebut harus dibuat pracetak di dalam pabrik dan harus didesain untuk penanganan di setiap titik sepanjang balok selama pengangkutan dan pemasangan. Faktor-faktor beban terhadap kerusakan oleh lenturan atau geseran:

Untuk beban mati = 1,5

Untuk beban hidup = 2,5

Tegangan-tegangan yang diperkenankan:

Pada saat transfer

Tegangan tekan = 14 N/mm²

Tegangan Tarik = 1.4 N/mm²

Pada beban kerja

Tegangan tekan = 16 N/mm²

Tegangan Tarik = 1.4 N/mm²

Kekuatan kubus beton 28 hari yang ditentukan adalah 50 N/mm². Gaya prategang diberikan dengan kawat

bermutu tinggi berdiameter 5 mm yang mempunyai kekuatan tarik ultimit sebesar 1600 N/mm². Perbandingan kehilangan sama dengan 0,8. Desainlah balok tersebut dangambarkan potongan melintang yang menunjukkan susunan kawat-kawat. Periksa keamanan balok untuk keadaan-keadaan batas retak lendutan dan runtuh.

BAB VIII

DESAIN GESER BALOK BETON PRATEGANG

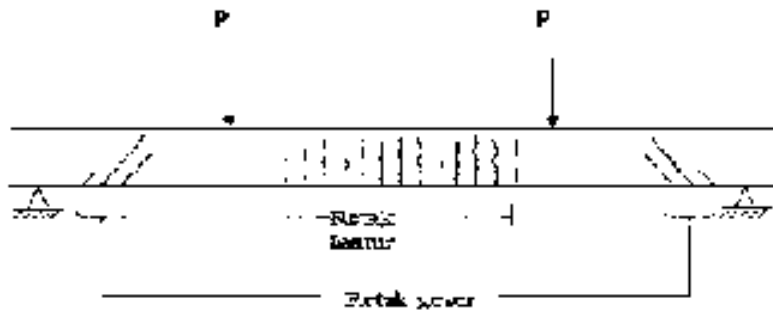
A. Tujuan Pembelajaran

1. Mahasiswa mampu menjelaskan tentang Desain Geser Balok Beton Prategang
2. Mahasiswa mampu menjelaskan tentang Kuat Geser pada Beton Prategang
3. Mahasiswa mampu menyelesaikan soal tentang Desain Geser Balok Beton Prategang

B. Materi Pembelajaran

8.1 Geser Pada Balok Beton Prategang

Pada daerah yang mengalami lentur yang besar, retak selalu berkembang tegak lurus sumbu balok. Pada daerah yang mengalami geser yang besar akibat tarik diagonal, retak miring berkembang sebagai kelanjutan retak lentur dan disebut retak geser lentur. Gambar 8.1 memperlihatkan tipe retak yang terjadi pada balok-balok beton bertulang, dengan atau tanpa penulangan tarik diagonal.



Gambar 8.1. Retak pada Balok untuk retak geser dan retak lentur

Gambar 8.1. Retak pada Balok untuk retak geser dan retak lentur

Retak di lapangan dan tumpuan yang tegak lurus sumbu balok adalah retak lentur. Sedangkan retak yang miring yang merupakan kelanjutan dari retak lentur, disebut retak geser lentur.

Pada balok beton prategang, biasanya penampang dalam keadaan tertekan pada beban kerja. Tegangan utama pada daerah diatas garis netral menjadi:

Tegangan tarik utama :

$$f_{t(max)} = -\frac{1}{2} f_{cs} + \sqrt{\frac{1}{2} (f_{cs})^2 + V^2}$$

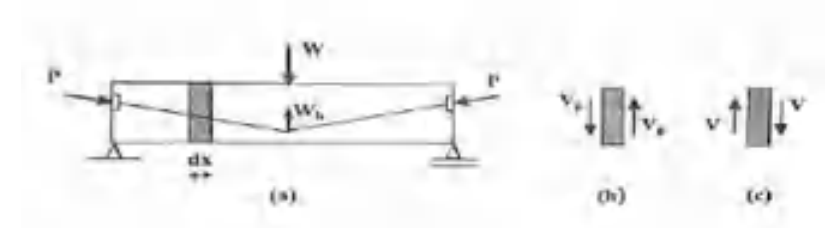
Tegangan tekan utama :

$$f_{t(max)} = -\frac{1}{2} f_{cs} - \sqrt{\frac{1}{2} (f_{cs})^2 + V^2}$$

8.2. Tegangan Geser Balok Prategang

Geser Lentur pada balok beton prategang meliputi efek dari gaya prategang yang tidak terdapat pada balok beton bertulang. Komponen vertikal dari gaya prategang pada tendon akan mengurangi geser vertikal akibat beban transversal. Selain itu, gaya tekan dari prategang juga mengurangi efek tarik dari lentur, sehingga sangat

mengurangi retak akibat lentur. Sebagai hasil akhir didapat tegangan geser dan tegangan utama yang lebih rendah daripada balok balok beton bertulang dengan beban yang sama. Gambar 8.2 memperlihatkan kontribusi komponen vertikal dari gaya tendon yang mengimbangi gaya geser akibat beban transversal.



Gambar 8.2. Beban yang mengimbangi gaya geser (a) balok prategang (b) geser internal V_p akibat gaya prategang (c) geser intern V akibat beban luar W

Gaya geser netto sebagai kontribusi beton adalah :

$$V_c = V - V_p$$

8.3 Kuat Geser Pada Beton Prategang

Untuk balok dengan gaya prategang efektif tidak kurang dari 40 % kuat tarik tulangan lentur, dan bila tidak dipakai metode desain yang teliti, maka berlaku .

$$V_c = \left[\frac{\sqrt{f_c}}{20} + 5 \frac{V_u d}{M_u} \right] b_w d \geq \frac{1}{6} \sqrt{f'_c} b_w d$$

$$\leq 0,4 \sqrt{f'_c} b_w d$$

$$\text{Dengan } \frac{V_u d}{M_u} \leq 1,0$$

M_u = Momen terfaktor yang secara simultan terjadi dengan V_u pada penampang yang ditinjau

d = jarak dari serat tepi tertekan ke pusat tendon

Rumus diatas berlaku untuk balok beton prategang penuh atau parsial.

Pada balok diatas 2 perletakan bebas dengan beban merata, maka :

$$\frac{Vu d}{Mu} = \frac{d (\ell - 2x)}{x (\ell - x)}$$

dimana ℓ = panjang bentang

x = jarak dari penampang yang ditinjau ke sumbu perletakan.

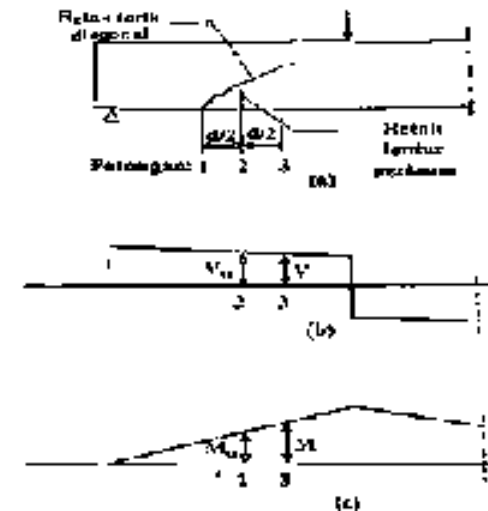
Dua jenis retak miring terjadi pada balok beton yaitu :

1. Retak geser- lentur (flexural-shear)
2. Retak geser-badan (web-shear)

Retak geser-lentur tegak lurus sumbu balok dan retak geser badan miring. Berikut

8.3.1 Kuat Geser Lentur (V_{ci})

Untuk mendesain gesr, perlu ditentukan dulu apakah geser lentur atau geser pada web yang mennetukan kuat geser beton V_c



Gambar 8.3. perkembangan retak geser lentur (a) pola dan jenis retak (b) geser akibat beban luar, haya geser V_{cr} pada pot.2 (c) Momen lentur dengan retak lentur pertama di pot

Retak miring pada jarak $d/2$ dari retak lentur berkembang pada retak pertama dari beban geser lentur seperti gambar 8.3. Bila d_p adalah tinggi efektif dan tepi tertekan ke garis tendon, maka perubahan momen diantar potongan 2 dan 3 adalah

$$M - M_{cr} = \frac{V d_p}{2} \quad \text{atau} \quad V = \frac{M_{cr}}{\frac{M}{V} - d_p/2}$$

Dimana V = gaya geser pada potongan yng ditinjau. Dari banyak penelitian didapatkan bahwa diperlukn tambahan geya geser sebesar $1/20 \sqrt{f'_c}$ bw d_p Untuk perkembangan retak miring secara penuh. Gaya geser vertikal total pada potongan 2 adalah sebagai berikut :

$$V_{ci} = 1/20 \sqrt{f'_c} \text{ bw dp} + V_d + \frac{V_i M_{cr}}{M_{maks}} \geq 1/7 \sqrt{f'_c} \text{ bw dp} \\ \leq 0,4 \sqrt{f'_c} \text{ bw dp}$$

Dimana :

V_d = gaya geser tak terfaktor pada potongan akibat berat sendiri saja di penampang kritis ($d/2$ dari muka perletakan)

V_{ci} = kuat geser nominal dari beton akibat geser vertikal dan momen

V_i = gaya geser tak terfaktor pada potongan akibat berat mati tambahan (W_{SDL}) dan beban hidup (W_{LL}) seperti beban untu menghitung M_{max} di penampang kritis ($d/2$)

M_{cr} = momen yang menyebabkan terjadinya retak lentur akibat W_{SDL} dan W_{LL}

$$f_{pe} = \frac{P_e}{A_c} \left[1 + \frac{e c_b}{r^2} \right]$$

Diman f_{pe} = tegangan tekan beton akibat gaya prategang efektif pada serat tepi penampang, dimana tegangan tarik disebabkan oleh beban luar di penampang kritis ($d/2$ dari muka perletakan)

$$f_{pe} = \frac{P_e}{A_c} \left[1 + \frac{e c_b}{r^2} \right]$$

f_d = tegangan akibat beban serat sendiri tak terfaktor pada serat tepi penampang, dimana tegangan tarik disebabkan oleh beban luar.

$$f_d = \frac{M_d}{I_c} c_b$$

8.3.2 Kuat Geser Badan (V_{cw})

V_{cw} dihitung dengan rumus:

$$V_{cw} = 0,3 (\sqrt{f'_c} + f_{pc}) \text{ bw dp} + V_p$$

Dimana f_{pc} = tegangan tekan beton digaris berat beton (cgc)

$$f_{pc} = \frac{P_c}{A_c}$$

V_p = komponen vertikal dari gaya prategang efektif di penampang

$$V_p = P_c \text{ tg } \theta$$

dp = jarak dari tepi tertekan ke cgs atau $0,8 h$, pilih yang terbesar

Sebagai alternatif, V_{cw} dapat dihitung sebagai gaya geser akibat beban mati dan beban hidup yang memberikan tegangan $\sqrt{f'_c} / 3$ pada pusat batang atau pada pertemuan flens dan badan bila sumbu pusat berada di flens.

Kemudian V_c dipilih yang terkecil dari V_{ci} dan V_{cw}

8.3.3 Jarak dan Luas Sengkang

Jarak sengkang maksimum adalah $3/4 h$ atau 600 mm bila dipasang tegak lurus sumbu balok. Jarak sengkang minimum adalah 75 mm.

Seperti pada beton bertulang, maka:

$$V_n = V_u / \phi$$

$$V_n = V_c + V_s \text{ atau } V_s = V_n - V_c = V_u / \phi - V_c$$

$$\text{Bila } V_s > 1/3 \sqrt{f'_c} \text{ bw dp, } S_{max} = 3/8 h$$

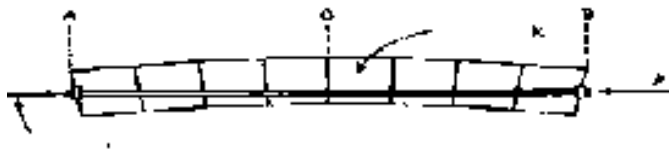
Bila $V_s > 2/3 \sqrt{f'_c} \text{ bw dp}$, penampang harus diperbesar

Bila $V_u = \phi V_n > 1/2 \phi V_c$, pakai tulangan geser minimum

$$A_s = \frac{b_w s}{3f_{yv}}$$

Luas sengkang minimum untuk balok beton prategang dengan gaya prategang efektif kurang dari 40 % kuat tarik tulangan lentur adalah sebagai berikut:

$$A_v = \frac{A_{ps} f_{pu} s}{80 f_{yv} d_p} \sqrt{\frac{d_p}{b_w}}$$



Gambar 8.4. Balok beton prategang pada pemasangan sengkang

8.4 Desain Tulangan Geser Balok Prategang

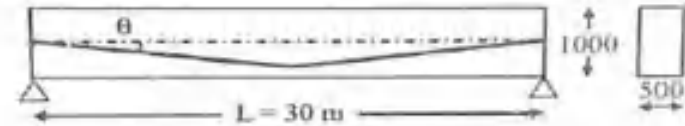
Soal:

Balok beton prategang diatas 2 perletakan dengan bentang $L = 30$ m dan gaya prategang awal $P_i = 1800$ kN, dipasang 20 tendon 7-wire low-relaxation strand bonded $\phi \frac{1}{2}$ " ($A = 98,7$ mm²) $d_p = h - 150$ mm kehilangan gaya prategang 20%.

$f'_c = 40$ Mpa, $f_{pu} = 1860$ Mpa, $f_{yv} = 400$ Mpa, $f_{pi} = 0,7 f_{pu}$, $f_{py} = 0,9 f_{pu}$

Balok menerima beban berat sendiri, beban mati tambahan $W_{SD} = 10$ kN/m, beban hidup $W_{LL} = 20$ kN/m, $\gamma_{beton} = 25$ kN/m³

Tentukan metode untuk menghitung tulangan geser, kemudian hitung tulangan geser yang diperlukan:



Solusi:

$$0,4 f_{pu} = 0,4 \cdot 1860 = 744 \text{ Mpa} > f_{pe} = \frac{P_e}{A_{ps}} = \frac{\eta P_i}{20.98,7} = \frac{0,8 \cdot 1800 \cdot 10^3}{1974}$$

$$= 729,483 \text{ Mpa}$$

Pakai metode Desain Teliti

$$P_e = 0,8 \cdot 1800 = 1440 \text{ kN}$$

$$\text{Penampang kritis di } x = \frac{1}{2} d_p = \frac{1}{2} (1000 - 150) = \frac{1}{2} \cdot 850 = 425 \text{ mm} = 0,425 \text{ m.}$$

Perhitungan V_{ci} :

$$W_D = W_{sw} = 0,5 \cdot 10 \cdot 2,5 = 12,5 \text{ kN/m.}$$

$$V_D = W_D (\frac{1}{2} L = \frac{1}{2} d_p) = \frac{1}{2} \cdot (1000 - 150) = \frac{1}{2} \cdot 850 = 425 \text{ mm} = 0,425 \text{ m}$$

$$W_u = 1,2 \cdot W_{SD} + 1,6 \cdot W_{LL} = 1,2 \cdot 10 + 1,6 \cdot 20 = 44 \text{ kN/m}$$

$$V_u = \frac{1}{2} w_0 L = \frac{1}{2} \times 44 \times 30 = 660 \text{ kN}$$

$$V_i = V_u - w_u \cdot \frac{1}{2} d_p = 660 - 44 \cdot 0,425 = 641,3 \text{ kN}$$

$$e = \frac{1}{2} 1000 - 150 = 500 - 150 = 350 \text{ mm}$$

$$I_c = \frac{1}{12} 500 \cdot 1000^3 = 4.1667 \cdot 10^{10} \text{ mm}^4$$

$$A_c = 500 \cdot 1000 = 5 \cdot 10^5 \text{ mm}^2$$

$$r^2 = \frac{I_c}{A_c} = \frac{4.1667 \cdot 10^{10}}{5 \cdot 10^5} = 83333,333 \text{ mm}^2$$

Dengan $c_t = c_b = 500$ mm

$$f_{pe} = \frac{P_e}{A_e} \left(1 + \frac{e c_b}{r^2} \right) = \frac{1400 \cdot 10^3}{5 \cdot 10^5} \left(1 + \frac{350 \cdot 500}{83333,333} \right) = 8,928 \text{ MPa}$$

$$M_{\frac{1}{2}d_p} = \frac{1}{2} w_D L x - \frac{1}{2} w_D x^2 = \frac{1}{2} 12,5 \cdot 30 \cdot 0,425 - \frac{1}{2} 12,5 (0,425)^2 = 78,5586 \text{ kNm}$$

$$f_d = \frac{M_d c_b}{I_c} = \frac{78,5586 \cdot 10^6 \cdot 500}{4.1667 \cdot 10^{10}} = 0,9427 \text{ MPa}$$

$$M_{cr} = \frac{I_c}{c_t} \left(\frac{1}{2} \sqrt{f'_c} + f_{pe} - f_d \right)$$

$$= \frac{4.1667 \cdot 10^6}{500} \left(\frac{1}{2} \sqrt{40} + 8.928 - 0.9247 \right) = 928964805 \text{ Nmm}$$

$$M_{\max} = V_u \left(\frac{1}{2} d_p \right) - w_u \frac{1}{2} \left(\frac{1}{2} d_p \right)^2 = 660 \cdot (0.425) - 44 \cdot \frac{1}{2} (0.425)^2 = 276.52625 \text{ kNm}$$

$$V_{ci} = \frac{1}{20} \sqrt{f_c'} b_w d_p + V_d + \frac{V_i M_{cr}}{M_{\max}} = \frac{1}{20} \sqrt{40} 500 \cdot 850 + 182187.5 + \frac{641300 \cdot 928.964805}{276.52625}$$

$$V_{ci} = 2470.973 \text{ kN} > V_{ci, \min} = \frac{1}{7} \sqrt{f_c'} b_w d_p = \frac{1}{7} \sqrt{40} 500 \cdot 850 = 383990.86 \text{ N} = \text{oke}$$

$$> V_{ci, \max} = 0.4 \sqrt{f_c'} b_w d_p = 0.4 \sqrt{40} \cdot 500 \cdot 850 = 1075174.4 \text{ N} = 1075.1744 \text{ kN}$$

Ambil nilai yang terkecil dan V_d dan $V_{ci, \max} = V_{ci} = 1075174.4 \text{ N}$

Perhitungan V_{cw} :

$$f_{pe} = \frac{P_e}{A_e} = \frac{1440 \cdot 10^3}{5.10^5} = 2.88 \text{ MPa}$$

$$V_p = P_e \tan \theta = P_e \frac{e}{\frac{1}{2} L} = 1440 \cdot 10^3 \frac{0.35}{15} = 33600 \text{ N}$$

$$V_{cw} = 0.3 (\sqrt{f_c'} + f_{pc}) b_w d_p + V_p = 0.3 (\sqrt{f_c'} + f_{pc}) b_w d_p + V_p = 1207180.803 \text{ N} > V_{ci} = 1075174.4 \text{ N}$$

Jadi ambil $V_c = V_{ci} = 1075174.4 \text{ N}$

$$w_{u, \text{total}} = w_{sw, u} + w_u = 1.2 \cdot 12.5 + 44 = 59 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$V_{u, \text{total}} = \frac{1}{2} w_{u, \text{total}} - w_u \frac{1}{2} d_p = 885 - 59 \cdot 0.425 = 859.925 \text{ kN}$$

$$\phi V_c = 0.75 \cdot 1075174.4 = 806380.8 \text{ N} < V_{u, kr} = 859925 \text{ N}$$

$$V_g = \frac{V_{u, kr}}{\phi} - V_c = \frac{859925}{0.75} - 1075174.4 = 71392.27 \text{ N} < \frac{2}{3} \sqrt{f_c'} b_w d_p = \frac{2}{3} \sqrt{40} \cdot 500 \cdot 850 = 1791957.34 \text{ N} = \text{oke}$$

$$< 1/3 \sqrt{f_c'} b_w d_p = 1/3 \sqrt{40} \cdot 500 \cdot 850 = 895978,67 \text{ N}$$

$$\rightarrow S_{\max} = 3/4 h = 750 \text{ mm atau } 600 \text{ mm}$$

Pakai $A_v = 2 \text{ D10} = 157 \text{ mm}^2$

$$S = \frac{A_v \cdot f_{wy} \cdot d_p}{V_s} = \frac{157 \cdot 400 \cdot 850}{71392,2667} = 747,7 \text{ mm} > 600 \text{ mm}$$

$$< S_{\max} = 750 \text{ mm}$$

\rightarrow Pakai Sengkang 2 D10 - 600

C. Evaluasi / Latihan

Soal:

- Balok beton prategang penampang persegi dengan perletakan sendi jepit bentang 20 m, menerima beban berat sendiri, beban mati tambahan merata $W_{SD} = 10 \text{ kN /m}$. Dan beban terpusat di tengah bentang $P_L = 36 \text{ kN}$.

Tentukan metode untuk menghitung tegangan geser, kemudian hitung tulangan geser yang diperlukan?

DAFTAR PUSTAKA

- Nawy, G, Edward, Bambang Suryaatmono. (2001). *Beton Prategang suatu Pendekatan Mendasar*. Jakarta: Penerbit Erlangga.
- Sutarman, E. (2013). *Konsep & Aplikasi Pengantar Teknik Sipil*,. Yogyakarta: Penerbit Andi.
- Sutawidyana , I. PutuLaintrawan, I Nyoman. (2015). *Buku Ajar Beton Prategang*, Denpasar: Univ. Hindu.
- Raju, N. Krishna. (1989). *"Prestressed Concrete"*, *Beton Prategang*. Bandung: Penerbit Erlangga.
- Soetoyo. (2018). *Beton Prategang*. Jakarta.
- Sunggoro, V. (1984). *Buku Teknik Sipil*. Bandung: Penerbit Nova.
- Winarni, Hadipratomo, (2008). *Analisis Dan Desain Struktur Beton Prategang*. Bandung: PT. Danamartha Sejahtera Utama.

TENTANG PENULIS



Penulis bernama Si Frapanti, ST, MT, Tempat lahir Pangkalan Susu, 23 Juni 1971. Anak pertama dari Sembilan bersaudara. Alumni D3 Fakultas Teknik Sipil Politeknik USU dan S1 Fakultas Teknik Sipil USU. Penulis merupakan alumnus S2 Fakultas Teknik Magister Teknik Sipil. Pernah mengajar di SMA Gajah Mada dan Fakultas Teknik Al-Azhar, dan sekarang mengabdikan di Fakultas Teknik Sipil UMSU sejak tahun 2016. Penulis juga pengelola Open Journal System (OJS) di Program Studi Teknik Sipil Fakultas Teknik UMSU. Buku ini merupakan karya perdana penulis.



Fahrizal Zulkarnain, lahir di Medan, 27 April 1975. Meraih gelar Sarjana Teknik dari Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara (UMSU). Gelar Master of Science (M. Sc) dan Doktor of Philosophy (Ph. D) dari Universiti Sains Malaysia (USM). Bidang difokuskan pada Teknologi

Beton, Material Beton, Beton Ringan dan Struktur Beton pada bangunan. Aktif sebagai Dosen di Program Studi Teknik Sipil dan Program Pasca Sarjana Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara (UMSU), selanjutnya sebagai Peneliti, Reviewer Internal UMSU, Reviewer Nasional, Anggota Tim PPAK L2Dikti Sumut, Asesor BKD untuk Sertifikasi Dosen, dan Reviewer RisetMu. HP: 081361271975.

E-mail: fahrizalzulkarnain@umsu.ac.id.

TENTANG EDITOR



Nadra Amalia, S.Pd., M.Pd. Dilahirkan di Jalan Pelajar Tumur, Medan, Kecamatan Medan Denai Sumatera Utara pada hari Sabtu 7 Maret 1987 dari pasangan Bapak Harunsyah, Lc dan Ibu Ismah Nasution, Ss.Pd. Editor adalah anak pertama dari tiga bersaudara.

Editor menempuh pendidikan di SD Muhammadiyah 30 Perumnas Mandala, kemudian melanjutkan di Madrasah Tsanawiyah Negri 2 Medan (MTsN 2 Medan) tamat pada tahun 2002, setelah itu editor melanjutkan di SMA Negeri 14 Medan tamat pada tahun 2005). Kemudian pada tahun 2006, editor melanjutkan pendidikan di Universitas Negeri Medan pada Fakultas Bahasa dan Seni jurusan Pendidikan Bahasa dan Sastra Indonesia tamat pada tahun 2010. Ediotor melanjutkan pendidikan pada tahun 2012, di Program Pasca Sarjana UMN Al-Washliyah jurusan Pendidikan Bahasa Indonesia dan tamat pada tahun 2015.

Editor mulai menjadi staf pendidik sejak tahun 2009 di SMP Miftahussalam jalan Darussalam, kemudian pada tahun 2010-2016, menjadi staf mengajar di Perguruan As-syafi'iyah Internasional di unit SMP sebagai guru Pendidikan Bahasa Indonesia. Kemudian pada tahun 2016. Editor menjadi Dosen Bahasa Indonesia di STKIP Pelita Bangsa. Adapun matakuliah yang pernah penulis asuh adalah mata kuliah Keterampilan Menyimak,

Strategi Pembelajaran Bahasa dan Sastra Indonesia. Selain itu 2018 hingga sekarang hijrah ke Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara (UMSU) di FKIP Program Studi Pendidikan Bahasa Indonesia dengan mengampu mata kuliah Pengelolaan Perpustakaan Sekolah, Bahasa Indonesia Penutur Asing, Penyuntingan Naskah, dan Strategi Pembelajaran Bahasa dan Sastra Indonesia. Editor juga menulis buku ajar, Manajemen Perpustakaan Sekolah (2019) penerbit Format Publishing.

DASAR-DASAR DESAIN DAN ANALISA BETON PRATEGANG

Beberapa tahun mengajar di Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara, banyak pengalaman yang mendorong penulis untuk menulis sebuah modul yang dapat meningkatkan minat mahasiswa dalam belajar. Disamping karena modul memiliki kejelasan bahasa dan metode yang mudah dipahami. Didalam modul terdapat mater perkuliahan yang akan disampaikan dosen kepada mahasiswa Program Studi Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara, nantinya modul ini digunakan sebagai bahan ajar wajib yang akan dipelajari mahasiswa selama satu semester.

Ilmu Beton Prategang sangat diperlukan bagi mahasiswa Program Studi Teknik Sipil dikarenakan bagian dari Stuktur Beton dalam pembangunan terkini di konstruksi Sipil.



Jl. Kapteih Mukhtar Basri No. 3
Medan, Sumatera Utara
Website: <http://umsupress.umsu.ac.id/>
Email: umsupress@umsu.ac.id

