

BAB II. TINJAUAN PUSTAKA

A. Definifisi Beton Prategang

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. (ACI)

Dalam definisi lain, beton prategang merupakan beton bertulang yang telah diberikan tegangan tekan dalam untuk mengurangi tegangan tarik potensial dalam akibat beban kerja. (SNI 03-2847-2002)

Beton prategang juga dapat didefinisikan sebagai beton dimana tegangan tariknya pada kondisi pembebanan tertentu dihilangkan atau dikurangi sampai batas aman dengan pemberian gaya tekan permanen, dan baja prategang yang digunakan untuk keperluan ini ditarik sebelum beton mengeras (pratarik) atau setelah beton mengeras (pascatarik).

B. Konsep Beton Prategang

1. Konsep Dasar

Perbedaan utama antara beton bertulang dan beton prategang pada kenyataannya adalah beton bertulang mengkombinasikan beton dan tulangan baja dengan cara menyatukan dan membiarkan keduanya bekerja bersama-sama sesuai dengan

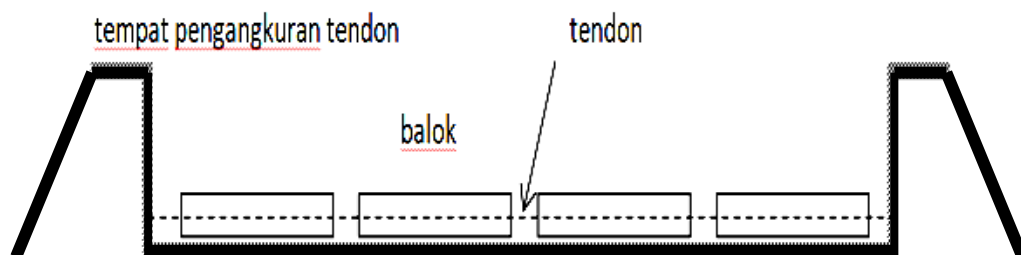
keinginannya, sedangkan beton prategang mengkombinasikan beton berkekuatan tinggi dan baja mutu tinggi dengan cara-cara “aktif”. Hal ini dicapai dengan cara menarik baja tersebut dan menahannya ke beton, jadi membuat beton dalam keadaan tertekan. Kombinasi aktif ini menghasilkan perilaku yang lebih baik dari kedua bahan tersebut. Baja adalah bahan yang liat dan dibuat untuk bekerja dengan kekuatan tarik yang tinggi oleh prategang. Beton adalah bahan yang getas dan kemampuannya menahan tarikan diperbaiki dengan memberikan tekanan, sementara kemampuannya menahan tekanan tidak dikurangi. Jadi beton prategang merupakan kombinasi yang ideal dari dua buah bahan modern berkekuatan tinggi.

2. Sistem Pemberian Prategang

Ada 2 jenis metode pemberian gaya prategang pada beton, yaitu :

a. Pemberian Pratarik (*Pretension*)

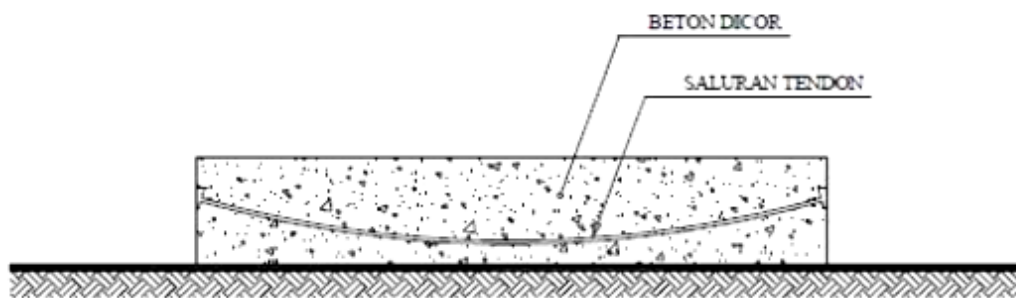
Pada metode pratarik, tendon ditarik sebelum beton dicor. Setelah beton cukup keras tendon dipotong dan gaya prategang akan tersalur ke beton melalui lekatan. Metode ini sangat cocok bagi produksi massal. Baja prategang diberi pratarik terhadap pengangkeran independen sebelum pengecoran beton di sekitarnya. Sebutan pratarik berarti pemberian pratarik pada baja prategang, bukan pada baloknya. Pemberian pratarik biasanya dilakukan di lokasi pembuatan beton pracetak. Penggambaran sistem pemberian pratarik dapat dilihat pada Gambar 2.1.



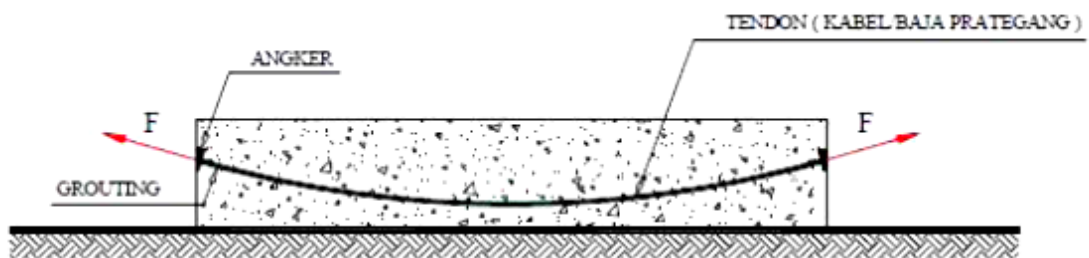
Gambar 2.1 Metode pemberian prategang pratarik

b. Pemberian Pascatarik (*Post Tension*)

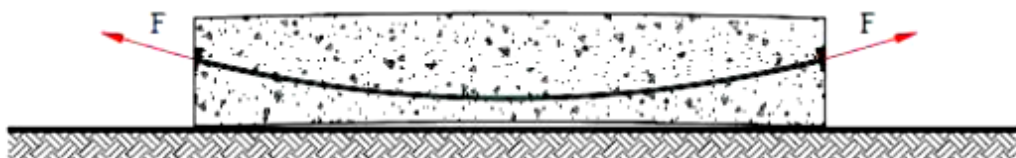
Pada metode pascatarik, tendon ditarik setelah beton dicor. Sebelum pengecoran dilakukan terlebih dahulu dipasang selongsong untuk alur dari tendon. Setelah beton jadi, tendon dimasukkan ke dalam beton melalui selubung tendon yang sebelumnya sudah dipasang ketika pengecoran. Penarikan dilakukan setelah beton mencapai kekuatan yang diinginkan sesuai dengan perhitungan. Setelah penarikan dilakukan maka selongsong diisi dengan bahan *grouting*. Proses pemberian prategang metode pascatarik dapat dilihat pada Gambar 2.2.



(a) Pengecoran dan pemasangan selubung tendon



(b) Proses stressing tendon sekaligus *grouting*



(c) Balok dalam keadaan prategang

Gambar 2.2 Metode pemberian prategang pascatarik

C. Keuntungan dan Kekurangan Beton Prategang

Keuntungan beton prategang, sebagai berikut:

1. Seluruh penampang beton prategang menjadi efektif, sedangkan pada beton bertulang biasa hanya diatas garis netral saja yang efektif.
2. Struktur beton prategang lebih ramping.
3. Struktur beton prategang tidak retak akibat beban kerja.
4. Lendutan yang lebih kecil.
5. Daya tahan terhadap karat lebih baik.
6. Penggunaan bahan yang lebih sedikit karena menggunakan bahan mutu tinggi.

Kekurangan beton prategang, sebagai berikut :

1. Diperlukan kontrol yang lebih ketat dalam proses pembuatan.
2. Kehilangan tegangan pada pemberian gaya prategang awal.
3. Diperlukan biaya tambahan untuk pengangkutan.

D. Material Beton Prategang

1. Beton

Beton yang dipakai pada beton prategang umumnya mempunyai kuat tekan 28-55 MPa pada umur 28 hari (benda uji silinder). Nilai slump berkisar 50-100 mm dengan faktor air semen $\leq 0,45$.

2. Baja Prategang

Baja yang digunakan sebagai pemberi prategang pada beton merupakan baja dengan mutu sangat tinggi hingga 1862 MPa atau lebih tinggi lagi. Baja bermutu tinggi seperti itu dapat mengimbangi kehilangan prategang dan mempunyai taraf

tegangan sisa yang dapat menahan gaya prategang yang dibutuhkan. Kehilangan prategang normal dapat diperkirakan di dalam selang 241 sampai 414 MPa. Karena itu, prategang awal harus sangat tinggi, sekitar 1241 sampai 1517 MPa.

Baja prategang dapat berbentuk kawat-kawat tunggal, *strand* yang terdiri dari atas beberapa kawat yang dipuntir membentuk elemen tunggal dan batang-batang bermutu tinggi.

Tabel 2.1 Kawat-kawat untuk beton prategang (Nawy,2001)

Diameter nominal (in.)	Kuat tarik minimum (psi)		Tegangan minimum pada ekstensi 1 % (psi)	
	Tipe BA	Tipe WA	Tipe BA	Tipe WA
0,192		250.000		212.500
0,196	240.000	250.000	204.000	212.500
0,25	240.000	240.000	204.000	204.000
0,276	235.000	235.000	199.750	199.750

Sumber : *Post-Tensioning Institute*

Tabel 2.2 *Strand* standar 7 kawat untuk beton prategang (Nawy,2001)

Diameter nominal <i>strand</i> (in.)	Kuat patah <i>strand</i> (min. lb)	Luas baja nominal <i>strand</i> (in.2)	Berat nominal <i>strand</i> (lb/1000 ft)*	Beban minimum pada ekstensi 1 % (lb)
Mutu 250				
1/4(0,250)	9.000	0,036	122	7.650
5/16(0,313)	14.500	0,058	197	12.300
3/8(0,375)	20.000	0,08	272	17.000
7/16(0,438)	27.000	0,108	367	23.000
1/2(0,500)	36.000	0,144	490	30.600
3/5(0,600)	54.000	0,216	737	45.900
Mutu 270				
3/8(0,375)	23.000	0,058	290	19.550
7/16(0,438)	31.000	0,115	390	26.350
1/2(0,500)	41.300	0,153	520	35.100
3/5(0,600)	58.600	0,217	740	49.800

*100.000 psi = 689,5 MPa

1000 lb = 4448 N

Sumber : *Post-Tensioning Institute*

Baja (tendon) yang dipakai untuk beton prategang dalam prakteknya ada tiga macam, yaitu :

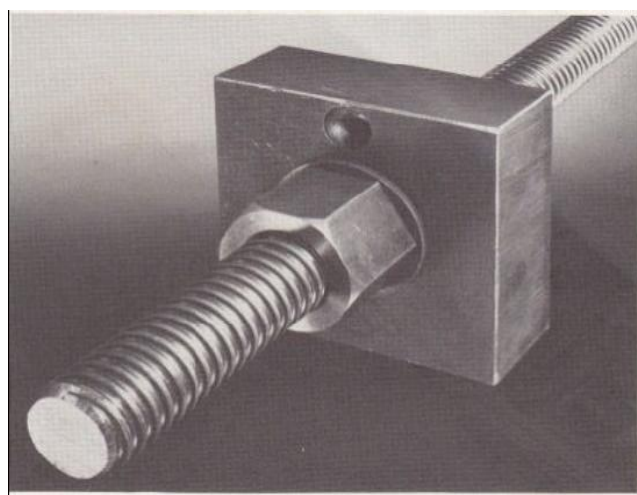
- 1) Kawat tunggal (*wire*) (Gambar 2.3 (a)), biasanya digunakan untuk baja prategang pada beton prategang dengan sistem pratarik (*pretension*).
- 2) Kawat untaian (*strand*) (Gambar 2.3 (b)), biasanya digunakan untuk baja prategang pada beton prategang dengan sistem pascatarik (*post tension*).
- 3) Kawat batangan (*bar*) (Gambar 2.3 (c)), biasanya digunakan untuk baja prategang pada beton prategang dengan sistem pratarik (*pretension*).



(a) Kawat tunggal (*wire*)



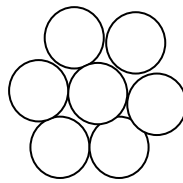
(b) Untaian kawat (*strand*)



(c) Baja batangan (*bar*)

Gambar 2.3 Jenis-jenis baja yang dipakai untuk beton prategang

Kawat tunggal yang dipakai untuk beton prategang adalah yang sesuai dengan spesifikasi seperti ASTM A 421. Untaian kawat (*strand*) banyak digunakan untuk beton prategang dengan sistem pasca tarik. Untaian kawat yang dipakai harus memenuhi syarat seperti yang terdapat ASTM A 416. Untaian kawat yang banyak digunakan adalah untaian tujuh kawat. Gambar penampang *strand* 7 kawat dapat dilihat pada Gambar 2.4.



Gambar 2.4 *Strand* 7 kawat

Tabel 2.3 Spesifikasi *strand* 7 kawat

Ø Nominal (mm)	Luas Nominal mm ²	Kuat Putus (kN)
6,35	23,22	40
7,94	37,42	64,5
9,53	51,61	89
11,11	69,68	120,1
12,70	92,9	160,1
15,24	139,35	240,2

3. *Grouting*

Grouting dibutuhkan sebagai bahan pengisi selubung baja prategang (*tendon*) untuk metode pasca tarik. Untuk metode pratarik tidak dibutuhkan selubung sehingga tidak dibutuhkan *grouting*. Selubung terbuat dari logam yang digalvanisir. Bahan *grouting* berupa pasta semen.

4. *Temporary Tendon*

Temporary tendon atau tendon sementara hanya digunakan pada *girder* jembatan dengan sistem pelaksanaan pemasangan *balanced cantilever*. *Temporary tendon* berfungsi sebagai penghubung antar segmen *girder* yang bersifat sementara

sampai seluruh segmen *girder* terpasang. Kemudian baru dimasukkannya tendon permanen untuk pelaksanaan *stressing*. Penggunaan *temporary* tendon pada *girder* jembatan dapat dilihat pada Gambar 2.5.



Gambar 2.5 *Temporary* tendon

E. *Concrete Girder*

1. *PC Voided Slab*

Precast Concrete Voided slab merupakan *girder* jembatan yang menggabungkan fungsi *girder* sekaligus *slab*. *Girder* jenis ini biasanya digunakan pada jembatan berbentang pendek. Gambar *PC Voided slab* dapat dilihat pada Gambar 2.6.



Gambar 2.6 *PC Voided slab*

2. *Box Girder*

Box girder merupakan bentuk girder yang paling baik untuk pekerjaan jembatan, karena *box girder* memiliki keuntungan unik tersendiri dari bentuk *girder* lainnya. *Box girder* dalam spesifikasi produksi tidak memiliki batasan panjang bentang. Dalam proses tahapan pekerjaan, *box girder* terlebih dahulu mengalami proses *erection*, dan diangkat per-segmental. Bentuk *box girder* cukup memenuhi nilai estetika pada bangunan jembatan sehingga penggunaannya mampu menambah keindahan kota. Gambar *box girder* dapat dilihat pada Gambar 2.7, hal 13.



Gambar 2.7 *Box girder*

3. *PCI Girder*

Precast Concrete I girder merupakan bentuk yang paling banyak digunakan untuk pekerjaan balok jembatan. Profil *PCI girder* berbentuk penampang I dengan penampang bagian tengah lebih langsing dari bagian pinggirnya. *PCI girder* memiliki penampang yang kecil dibandingkan jenis *girder* lainnya, sehingga biasanya dari hasil analisa merupakan penampang yang ekonomis. *PCI girder* juga memiliki berat sendiri yang relatif lebih ringan per unitnya. Gambar *PCI girder* dapat dilihat pada Gambar 2.8, hal 13.



Gambar 2.8 *PCI girder*

4. *PCU Girder*

Precast Concrete U girder merupakan bentuk / konsep baru yang mulai dipopulerkan belakangan ini. *PCU girder* merupakan bentuk *box girder* dalam bentuk dan ukuran yang lebih kecil. Tidak seperti *PCI girder* yang langsing, *PCU girder* memiliki bentuk badan yang lebih lebar namun pada bagian tengah bentang penampangnya cukup langsing. Bentuk *PCU girder* yang mirip dengan *box girder* cukup memenuhi nilai estetika jika dibandingkan dengan *PCI girder* yang kaku dan terlalu tegas. Gambar *PCU girder* dapat dilihat pada Gambar 2.9.



Gambar 2.9 *PCU girder*

F. Sistem Pelaksanaan Pemasangan *Girder* Jembatan

Terdapat beberapa sistem yang digunakan dalam pelaksanaan pemasangan (*erection*) balok jembatan. Dua diantaranya yaitu sistem *full span* dan sistem *balanced cantilever*.

1. Sistem *Full Span*

Yang dimaksud dengan sistem *full span* yaitu dimana pemasangan balok jembatan pada tumpuan langsung satu bentang. Pada metode ini segmen yang diangkat adalah satu segmen penuh untuk satu bentang. Karena itu metode ini hanya cocok untuk jembatan dimana jarak antar tumpuannya tidaklah besar. Hal ini mengantisipasi berat sendiri balok jembatan yang besar jika untuk bentang yang panjang, sehingga kapasitas alat berat tidak mampu mengangkat balok jembatan.

Berdasarkan jenis alat berat yang digunakan, terdapat beberapa jenis metode dalam sistem *full span* sebagai berikut :

a. *Portal hoise*

Metode *erection* ini menggunakan alat berat berupa *portal hoise* dengan alat angkut berupa mesin *gantry*. Penggunaan alat ini memiliki keuntungan yaitu penggunaan ruang yang sesuai atau optimal dengan kondisi lapangan yang ada. Selain itu kemudahan dalam pengaturan posisi *girder* dalam pelaksanaan pekerjaan *erection* merupakan keunggulan dalam memakai alat tersebut. Manuver halus yang dihasilkan dapat memperkecil resiko bahaya. Namun alat ini memiliki kelemahan berupa tidak bebas bergerak karena hanya dapat bergerak satu arah saja. Metode *erection girder* jembatan menggunakan *portal hoise* dapat dilihat pada Gambar 2.10, hal 15.



Gambar 2.10 *Portal hoise*

b. *Mobile Crane*

Metode *erection* dengan *mobile crane* yang menggunakan alat utama *mobile crane* baik *wheel* atau *crawler crane* dua (unit). Dengan pemakaian dua *mobile crane* maka diperlukan koordinasi sempurna antar operator dan keahlian yang tinggi untuk menghasilkan manuver yang tepat. Penggunaan *mobile crane* untuk *erection* girder ini akan efektif bila kondisi ruang besar/luas dengan pekerjaan yang kontinyu tanpa *idle* karena sistem sewa perjam yang tinggi. Metode *erection girder* menggunakan *mobile crane* dapat dilihat pada Gambar 2.11.



Gambar 2.11 *Mobile crane*

c. *Launcher truss*

Metode *erection* ini menggunakan alat berat berupa alat *launcher* / rangkaian *truss* baja dan alat angkat berupa mesin *gantry crane*. Alat ini memiliki kesamaan dengan *portal hoise* yaitu penggunaan ruang yang optimal sehingga efektif juga untuk dilaksanakan. Namun menjadi tidak efisien karena dibutuhkan biaya yang besar untuk pembuatan tumpuannya baik berupa kolom sementara ataupun tumpuan tiang di atas *pier head*. Penggunaan ruang yang sesuai tidak akan mengganggu aktivitas proyek maupun lingkungan apabila alat tersebut diletakkan diatas *pier head*. Tetapi pembuatan tumpuan diatas *pier head* akan merubah kondisi *pier head* rencana. Alat tersebut tidak bergerak bebas dan pemindahannya pun beresiko tinggi serta memakan waktu yang lama. Metode *erection girder* menggunakan *launcerr truss* dapat dilihat pada Gambar 2.12.



Gambar 2.12 *Launcher truss*

2. Sistem *Balanced Cantilever*

Metode yang kedua yaitu sistem *balanced cantilever*, yaitu pemasangan balok jembatan dilakukan per segmen dan dilakukan langsung di atas atau di tumpuan

balok. Sehingga pemberian prategang juga dilakukan di atas. Sistem ini disebut kantilever karena selama proses pemasangan balok atau *girder* jembatan berfungsi sebagai kantilever. Sistem ini dilakukan biasanya pada *girder* jembatan berpenampang besar seperti *box girder*. Sehingga berat sendiri balok yang besar dimungkinkan untuk alat berat tidak mampu mengangkat balok secara keseluruhan satu bentang.

Pada sistem ini diperlukan kabel *prestress* khusus yaitu *temporary tendon* untuk pemasangan tiap segmen. Kabel *prestress* ini hanya berfungsi pada saat *erection* saja, sedangkan untuk menahan beban permanen diperlukan kabel *prestress* tersendiri.

Kelebihan dan kelemahan sistem *balanced cantilever*

a. Kelebihan sistem *balanced cantilever*

Pertama, gelagar jembatan dapat dibangun tanpa adanya kontak dengan tanah, dan memungkinkan untuk membangun jembatan di atas sungai dengan masalah utama arus yang deras. Metode ini juga memungkinkan untuk membangun jembatan pada jurang yang sangat dalam. Metode *balanced cantilever* dikembangkan untuk meminimalkan acuan perancah atau scaffolding yang diperlukan untuk pelaksanaan pengecoran secara *in-situ* atau langsung pada pelaksanaan. Penggunaan tumpuan sementara (*temporary shoring*) terlalu mahal khususnya untuk kasus jembatan berelevasi tinggi dan penggunaan perancah yang melintasi sungai sangat beresiko, sehingga di atas jalan air yang padat, lalu lintas jalan atau jalan kereta api, penggunaan perancah sudah tidak ekonomis lagi. Sistem pelaksanaan pemasangan

secara *balanced cantilever* diterapkan untuk menghilangkan kesulitan-kesulitan seperti ini.

b. Kelemahan sistem *balanced cantilever*

Sistem ini membutuhkan perletakan yang lebih besar dibandingkan dengan struktur komposit. Karena itu metode *balanced cantilever* kurang menarik khususnya saat pondasi cuma berkualitas sedang saja atau karena lapangan pekerjaan berada pada daerah gempa. Kelemahan lain proses pengerjaan jembatan yang lebih rumit, karena membutuhkan banyak peralatan berteknologi tinggi. Dan kebanyakan peralatan yang digunakan mempunyai ukuran yang sangat besar, karena itu untuk membawanya ke lokasi pekerjaan agaklah susah.

Terdapat beberapa jenis metode konstruksi untuk sistem *balanced cantilever* ini, diantaranya :

a. Metode *balanced cantilever* dengan *launching gantry*

Pada metode ini digunakan satu buah *gantry* atau lebih yang digunakan sebagai peluncur segmen *girder* yang ada. Metode *balanced cantilever* menggunakan *launching gantry* dapat dilihat pada Gambar 2.13.



Gambar 2.13 *Launching gantry*

b. Metode *balanced cantilever* dengan rangka pengangkat (*lifting frame*)

Pada dasarnya metode ini hampir sama dengan metode *launching gantry*. Perbedaannya cuma pada jenis alat yang digunakan untuk mengangkat segmen *girder* jembatannya. Gambar *lifting frame* dapat dilihat pada Gambar 2.14.



Gambar 2.14 *Lifting frame*

c. Metode *balanced cantilever* dengan *crane*

Pada sistem ini digunakan *crane* untuk mengangkat tiap segmen *girder* jembatan. Metode *balanced cantilever* menggunakan *crane* dapat dilihat pada Gambar 2.15.



Gambar 2.15 *Crane*

d. Metode *balanced cantilever* dengan *form traveler*

Metode ini digunakan untuk pengecoran beton di tempat (*insitu*). Pada metode ini digunakan *form traveler* yang digunakan sebagai alat untuk membentuk segmen segmen jembatan sesuai kebutuhan. Metode *balanced cantilever* menggunakan *form traveler* dapat dilihat pada Gambar 2.16.



Gambar 2.16 *Form traveler*

G. Tahap Pembebanan

Tidak seperti pada perencanaan beton bertulang biasa, pada perencanaan beton prategang ada dua tahap pembebanan yang harus dianalisa. Pada setiap tahap pembebanan harus selalu diadakan pengecekan atas kondisi pada bagian yang tertekan maupun bagian yang tertarik untuk setiap penampang. Dua tahap pembebanan pada beton prategang yaitu tahap transfer dan tahap layan (*service*).

1. Tahap Transfer

Untuk metode pratarik, tahap transfer ini terjadi pada saat angker dilepas dan gaya prategang ditransfer ke beton. Untuk metode pascatarik, tahap transfer ini terjadi

pada saat beton sudah cukup umur dan dilakukan penarikan kabel prategang. Pada saat ini beban yang bekerja hanya berat sendiri struktur, beban pekerja dan peralatan, sedangkan beban hidup belum bekerja sepenuhnya, jadi beban yang bekerja sangat minimum. Sementara gaya prategang yang bekerja adalah maksimum karena belum ada kehilangan gaya prategang.

2. Tahap Layan

Setelah beton prategang digunakan atau difungsikan sebagai komponen struktur, maka mulailah masuk ke tahap *service* atau tahap layan dari beton prategang tersebut. Pada tahap ini beban luar seperti *live load*, angin, gempa, dan lain-lain mulai harus bekerja, dan pada tahap ini semua kehilangan gaya prategang sudah harus dipertimbangkan di dalam analisa strukturnya.

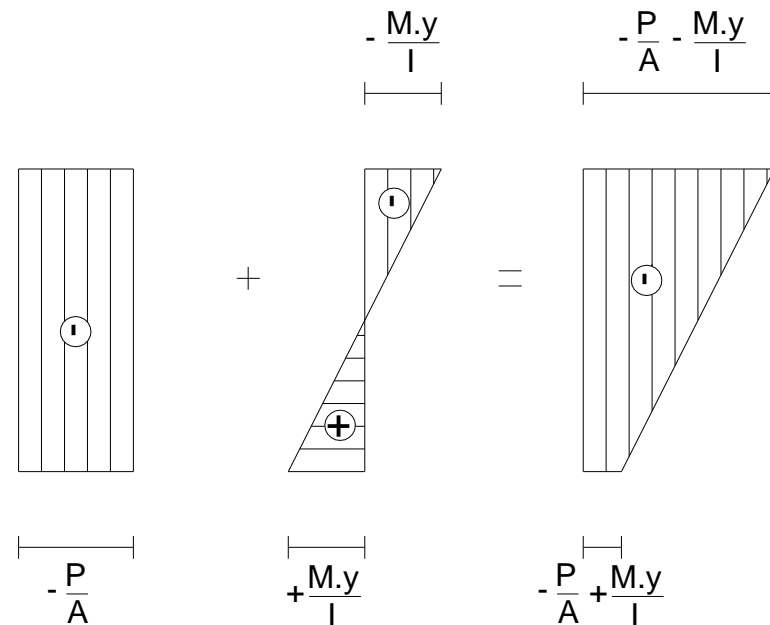
H. Perhitungan Struktur Beton Prategang

1. Tegangan Pada Penampang Beton Prategang

Prinsip dasar beton prategang dimaksudkan memaksimalkan sifat beton yang kuat dalam menerima gaya tekan. Pada kasus sederhana untuk balok beton berpenampang persegi dengan perletakan sendi-rol. Tegangan pada penampang beton akibat berat sendiri, untuk serat atas mengalami tekan dan untuk serat bawah mengalami tarik. Kehadiran pemberian prategang pada beton bertujuan untuk menghilangkan serat tarik pada penampang bahkan menjadikannya serat tekan.

Konsep pemberian prategang pada beton merupakan penemuan Freyssinet, dimana pada konsep ini tidak ada tegangan tarik pada beton, beton mengalami dua sistim pembebanan yaitu gaya internal prategang dan beban eksternal.

Gambar distribusi tegangan pada penampang balok dengan diberikannya gaya prategang sebesar P pada pusat penampang (konsentris) dapat dilihat pada Gambar 2.17.



Gambar 2.17 Distribusi tegangan pada penampang

Misalnya gaya prategang sebesar P dengan eksentrisitas e diberikan pada beton sehingga menimbulkan tegangan sebesar :

$$\sigma = -\frac{P}{A} \pm \frac{P \cdot e \cdot y}{I}$$

Dengan :

- σ = Tegangan (MPa)
- P = Gaya prategang (N)
- A = Penampang beton (mm^2)
- e = Jarak titik pusat tendon dengan sumbu netral penampang beton (mm)
- y = Jarak sumbu netral penampang beton dengan serat terluar (mm)
- I = Inersia penampang beton (mm^4)

Dan jika momen yang diakibatkan baik akibat sendiri maupun beban lain sebesar M , maka timbul tegangan pada penampang beton sebesar :

$$\sigma = \pm \frac{M \cdot y}{I}$$

Dengan :

σ = Tegangan (MPa)

M = Momen (Nmm)

I = Inersia penampang beton (mm^4)

Sehingga tegangan maksimum pada serat penampang dapat dihitung dengan rumus :

$$\sigma = -\frac{P}{A} \pm \frac{P \cdot e \cdot y}{I} \pm \frac{M \cdot y}{I}$$

2. Tegangan Izin pada Beton Prategang (SNI 03-2847-2002)

Tegangan beton sesaat sesudah penyaluran gaya prategang (sebelum terjadinya kehilangan tegangan sebagai fungsi waktu) tidak boleh melampaui nilai berikut:

- a. Tegangan serat tekan terluar $0,60f_{ci}$
- b. Tegangan serat tarik terluar $(1/4)\sqrt{f'_{ci}}$
- c. Tegangan serat tarik terluar pada ujung-ujung komponen struktur di atasperletakan sederhana $(1/2)\sqrt{f'_{ci}}$

Bila tegangan tarik terhitung melampaui nilai tersebut di atas, maka harus dipasang tulangan tambahan (non-prategang atau prategang) dalam daerah tarik untuk memikul gaya tarik total dalam beton, yang dihitung berdasarkan asumsi suatu penampang utuh yang belum retak.

Tegangan beton pada kondisi beban layan (sesudah memperhitungkan semua kehilangan prategang yang mungkin terjadi) tidak boleh melampaui nilai berikut:

- a. Tegangan serat tekan terluar akibat pengaruh prategang, beban mati dan beban hidup tetap $0,45f'_c$
- b. Tegangan serat tekan terluar akibat pengaruh prategang, beban mati dan beban hidup total $0,6f'_c$

- c. Tegangan serat tarik terluar dalam daerah tarik yang pada awalnya mengalami tekan $(1/2) \sqrt{f'c}$
- d. Tegangan serat tarik terluar dalam daerah tarik yang pada awalnya mengalami tekan dari komponen-komponen struktur (kecuali pada sistem pelatdua-arah), dimana analisis yang didasarkan pada penampang retak transformasi dan hubungan momen-lendutan bilinear menunjukkan bahwa lendutan seketika dan lendutan jangka panjang memenuhi persyaratan, dan dimana persyaratan selimut beton memenuhi $\sqrt{f'c}$

Tegangan tarik pada tendon prategang tidak boleh melampaui nilai berikut:

- a. Akibat gaya pengangkuran tendon 0,94 *fpy*, tetapi tidak lebih besar dari nilai terkecil dari 0,80 *fpu* dan nilai maksimum yang direkomendasikan oleh pabrik pembuat tendon prategang atau perangkat angkur.
- b. Sesaat setelah penyaluran gaya prategang 0,82 *fpy*, tetapi tidak lebih besar dari 0,74 *fpu*.
- c. Tendon pasca tarik, pada daerah angkur dan sambungan, segera setelah penyaluran gaya 0,70 *fpu*.

3. Kehilangan Prategang

Besarnya gaya prategang sebenarnya yang ada dalam suatu balok beton prategang tidak dapat diukur dengan mudah. Gaya total pada tendon pada saat penarikan dapat ditentukan dengan *pressure gage* pada dongkrak. Berbagai macam kehilangan gaya prategang akan menurunkan gaya prategang menjadi harga yang lebih rendah, sehingga beban yang dipikul balok prategang menjadi lebih rendah pula. Selisih antara gaya prategang akhir dengan gaya prategang awal dinamakan “kehilangan prategang”.

Gaya prategang awal yang diberikan ke elemen beton akan mengalami proses reduksi yang progresif selama kurun waktu tertentu. Dengan demikian, tahapan gaya prategang perlu ditentukan pada setiap tahap pembebanan, dari tahap transfer gaya prategang ke beton, sampai berbagai tahap prategang yang terjadi pada kondisi beban kerja, hingga mencapai ultimit.

Berikut jenis-jenis kehilangan prategang yang perlu diperhitungkan :

a. Perpendekan elastis beton

Ketika gaya prategang disalurkan ke beton, maka beton akan menerima tekanan dan memendek sehingga terjadi pengenduran pada beton. Beton memendek pada saat gaya prategang bekerja padanya. Karena tendon yang melekat pada beton di sekitarnya secara simultan juga memendek, maka tendon tersebut akan kehilangan sebagian dari gaya prategang yang dipikulnya.

Regangan tekan pada beton akibat prategang harus sama dengan pengurangan regangan pada baja, sehingga dapat dirumuskan sebagai berikut :

$$\varepsilon_c = \Delta\varepsilon_s$$

$$\frac{f_c}{E_c} = \frac{\Delta f_s}{E_s}$$

$$\Delta f_s = \frac{E_s f_c}{E_c} = n f_c$$

Dengan :

f_c = tegangan pada beton setelah penyaluran tegangan dari tendon berlangsung.

Δf_s merupakan tegangan tendon awal f_{si} dikurangi dengan tegangan tendon setelah penyaluran f_s , dapat dilihat pada rumus berikut :

$$\Delta f_s = f_{si} - f_s = n f_c$$

Apabila P_o adalah gaya awal tendon dan P_f adalah gaya sesudahnya maka :

$$P_o - P_f = n \frac{P_f}{A_c} A_{ps}$$

$$P_o = n \frac{P_f}{A_c} A_{ps} + P_f$$

$$P_o = P_f \left(\frac{n A_{ps}}{A_c} + 1 \right) = \frac{P_f}{A_c} (n A_{ps} + A_c)$$

$$P_o = f_c (n A_{ps} + A_c)$$

$$f_c = \frac{P_o}{A_c + n A_{ps}} \text{ diperkirakan sama dengan } \frac{P_o}{A_g}$$

Sehingga:

$$\Delta f_s = n f_c = \frac{n P_o}{A_g}$$

$$\text{Untuk beban eksentris, } f_c = \frac{P_o}{A_g} \pm \frac{P_o \cdot e \cdot y}{I} \pm \frac{M \cdot y}{I}$$

Dengan :

M = momen akibat berat sendiri

Berhubung yang dihitung adalah tegangan pada pusat tendon maka nilai $y = e$.

b. Rangkak dalam beton

Rangkak merupakan deformasi yang terjadi pada beton dalam keadaan tertekan akibat beban mati permanen. Deformasi atau regangan yang berasal dari perilaku yang bergantung pada waktu ini merupakan fungsi dari besarnya beban yang bekerja, lamanya, serta sifat beton yang meliputi proporsi campurannya, kondisi perawatannya, umur elemen pada saat dibebani pertama kali, dan kondisi lingkungan. Kehilangan tegangan pada tendon akibat rangkakan pada beton sebesar

$$\Delta f_s = C_t n f_c$$

Dengan :

$C_t = 2$ untuk struktur pre tension

$C_t = 1,6$ untuk struktur post tension

f_c = tegangan pada beton yang melekat pada titik berat tendon akibat gaya prategang awal.

c. Susut dalam beton

Susut merupakan perubahan volume pada beton. Faktor-faktor yang mempengaruhi terjadinya susut dalam beton meliputi proporsi campuran, tipe agregat, tipe semen, waktu perawatan, waktu antara akhir perawatan eksternal dan pemberian prategang, ukuran komponen struktur dan kondisi lingkungan.

Kehilangan tegangan pada tendon dapat dihitung menggunakan rumus berikut :

$$\varepsilon_{sh} = 8,2 \cdot 10^{-6} \left(1 - 0,06 \frac{V}{S}\right) (100 - RH)$$

Dengan :

- ε_{sh} = regangan susut dalam beton
- V = volume beton (dalam inch)
- S = luas permukaan beton
- RH = kelembaban relatif udara
- Δf_s = $K_{sh} \varepsilon_{sh} E_s$
- K_{sh} = factor susut yang tergantung waktu
- K_{sh} = 1 untuk prategang pretension

Tabel 2.4 Nilai K_{sh} untuk komponen struktur post tension

Selisih waktu antara pengecoran dengan prategangan(hari)	1	3	5	7	10	20	30	60
K_{sh}	0,92	0,85	0,80	0,77	0,73	0,64	0,58	0,45

d. Relaksasi dari tegangan baja

Relaksasi diartikan sebagai kehilangan dari tegangan tendon secara perlahan seiring dengan waktu dan besarnya gaya prategang yang diberikan dibawah regangan yang hampir konstan. Tendon mengalami kehilangan pada gaya prategang sebagai akibat dari perpanjangan konstan terhadap waktu.

Besarnya kehilangan tegangan pada baja akibat relaksasi baja prategang dapat dihitung dengan rumus:

$$\Delta f_{re} = [K_{re} - J(\Delta f_{SH} + \Delta f_{CR} + \Delta f_{ES})]C$$

Dengan :

Δf_{re} = kehilangan tegangan akibat relaksasi baja prategang

K_{re} = Koefisien relaksasi

J = Faktor waktu

C = Faktor relaksasi yang besarnya tergantung pada jenis tendon

Δf_{SH} = Kehilangan tegangan akibat susut

Δf_C = Kehilangan tegangan akibat rangkai

Δf_E = Kehilangan tegangan akibat perpendekan elastis beton

Tabel 2.5 Nilai Kre dan J (Nawy, 2001)

Jenis tendon	KRE	J
Kawat atau <i>stress-relieved strand</i> mutu 270	20.000	0,15
Kawat atau <i>stress-relieved strand</i> mutu 250	18.500	0,14
Kawat <i>stress-relieved</i> mutu 240 atau 235	17.600	0,13
<i>Strand</i> relaksasi rendah mutu 270	5000	0,04
Kawat relaksasi rendah mutu 250	4630	0,037
Kawat relaksasi rendah mutu 240 atau 235	4400	0,035
Batang <i>stress-relieved</i> mutu 145 atau 160	6000	0,05

Tabel 2.6 Nilai C (Nawy, 2001)

fsi/fpu	Kawat atau <i>strand stress-relieved</i>	Kawat atau <i>strand</i> relaksasi rendah atau batang <i>stress relieved</i>
0,8		1,28
0,79		1,22
0,78		1,16
0,77		1,11
0,76		1,05
0,75	1,45	1
0,74	1,36	0,95
0,73	1,27	0,9
0,72	1,18	0,85
0,71	1,09	0,8
0,7	1	0,75
0,69	0,94	0,7
0,68	0,89	0,66
0,67	0,83	0,61
0,66	0,78	0,57
0,65	0,73	0,53
0,64	0,68	0,49

Tabel 2.6 Nilai C (Nawy, 2001) (lanjutan)

0,63	0,63	0,45
0,62	0,58	0,41
0,61	0,53	0,37
0,6	0,49	0,33

e. Gesekan (*Post tension*)

Kehilangan ini terjadi akibat gesekan antara tendon dengan bahan sekitarnya (selubung tendon). Kehilangan ini langsung dapat diatasi dari penarikan tendon pada jack. Kehilangan prategang terjadi pada komponen struktur pascatarik (*post tension*) yang dipengaruhi oleh besarnya sudut kelengkungan tendon.

Kehilangan prategang akibat gesekan dapat dihitung dengan rumus berikut :

$$P_s = P_o e^{-\mu(\alpha+KL)}$$

Dengan :

K = koefisien *wobble*

P_o = Prategang awal

μ = koefisien kelengkungan

α = sudut kelengkungan tendon

Tabel 2.7 Koefisien *wobble* dan kelengkungan (Nawy,2001)

Jenis Tendon	Koefisien <i>wobble</i> , K perfoot	Koefisien kelengkungan, μ
Tendon di selubung metal fleksibel		
Tendon kawat	0,0010-0,0015	0,15-0,25
<i>Strand</i> 7 kawat	0,0005-0,0020	0,15-0,25
Batang mutu tinggi	0,0001-0,0006	0,08-0,3
Tendo di saluran metal yang rigid		
<i>Strand</i> 7 kawat	0,0002	0,15-0,25
Tendon yang dilapisi <i>mastic</i>		
Tendon kawat dan <i>Strand</i> 7 kawat	0,0010-0,0020	0,05-0,15
Tendon yang dilumasi dahulu		
Tendon kawat dan <i>Strand</i> 7 kawat	0,0003-0,0020	0,05-0,15

f. Slip ankur

Kehilangan akibat slip ankur terjadi pada struktur pascatarik yang diakibatkan adanya blok-blok pada ankur pada saat gaya pendongkrak ditransfer ke ankur. Sehingga tendon dapat tergelincir sedikit. Besarnya slip sekitar 2,5 mm.

Kehilangan prategang akibat slip ankur dapat dihitung dengan rumus berikut :

$$\varepsilon_s = \frac{\Delta l}{L}$$

$$\Delta f_s = \varepsilon_s E_s$$

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

Dengan :

Δl = Slip rata-rata (2,5 mm)

L = Panjang tendon (m)

E_s = Modulus elastisitas tendon (MPa)

4. Tata Letak Tendon Prategang

Tegangan tarik pada serat beton yang terluar dari garis netral akibat beban layan tidak boleh melampaui nilai maksimum yang diizinkan oleh peraturan yang ada seperti pada SNI 03-2847-2002. Oleh karena itu perlu ditentukan daerah batas pada penampang beton dimana pada daerah tersebut gaya prategang dapat diterapkan pada penampang tanpa menyebabkan terjadi tegangan tarik pada serat beton.

Tegangan pada serat beton paling atas :

$$f_{ca} = -\frac{P}{A_c} + \frac{P \cdot e \cdot y_a}{I}$$

Dengan :

f_{ca} = tegangan pada serat atas

e = eksentrisitas tendon prategang

A_c = luas penampang beton

I = momen inersia penampang beton

P = gaya prategang

$$r = \sqrt{\frac{I}{A_c}}, \quad r = \text{jari-jari inersia}$$

$$I = r^2 \cdot A_c$$

$$f_{ca} = -\frac{P}{A_c} + \frac{P \cdot e \cdot y_a}{I} = -\frac{P}{A_c} + \frac{P \cdot e \cdot y_a}{r^2 A_c} = \frac{P}{A_c} \left(-1 + \frac{e \cdot y_a}{r^2} \right)$$

Agar tidak terjadi tegangan tarik pada serat atas maka $f_{ca} = 0$

$$\left(-1 + \frac{e \cdot y_a}{r^2} \right) = 0$$

$$r^2 = e \cdot y_a$$

$$e = \frac{r^2}{y_a}$$

Jadi agar tidak terjadi tegangan tarik pada serat atas maka batas bawah tendon prategang sebesar :

$$k_b = \frac{r^2}{y_a}$$

Tegangan pada serat beton paling bawah

$$f_{cb} = -\frac{P}{A_c} - \frac{P \cdot e \cdot y_b}{I} = -\frac{P}{A_c} - \frac{P \cdot e \cdot y_b}{r^2 A_c} = \frac{P}{A_c} \left(-1 - \frac{e \cdot y_b}{r^2} \right)$$

Tegangan pada serat beton paling bawah = 0

$$\left(-1 - \frac{e \cdot y_b}{r^2} \right) = 0$$

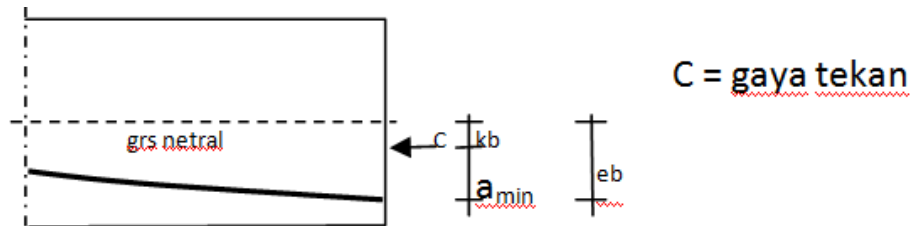
$$-e = \frac{r^2}{y_b} \text{ (tanda negatif berarti } e \text{ di atas garis netral)}$$

Jadi agar tidak terjadi tegangan tarik pada serat bawah maka batas atas tendon prategang sebesar :

$$k_a = \frac{r^2}{y_b}$$

Apabila M_D adalah momen akibat beban mati dan M_T adalah momen akibat beban mati dan beban hidup dan P_o merupakan besar gaya prategang awal dan P_{eff} merupakan besar gaya prategang efektif, maka :

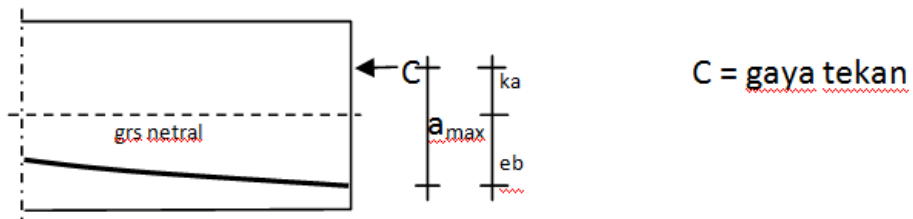
$$a_{min} = \frac{M_D}{P_o}, \text{ terjadi pada saat transfer}$$



Gambar 2.18 Daerah batas tendon pada saat transfer

$$e_b = a_{\min} + k_b$$

$$a_{\max} = \frac{M_T}{P_o}, \text{ terjadi pada saat beban layan (service load)}$$



Gambar 2.19 Daerah batas tendon pada saat beban layan

$$e_b = a_{\max} - k_a$$