

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Beton Prategang

Pengertian beton prategang menurut beberapa peraturan adalah sebagai berikut:

1. Menurut PBI – 1971

Beton prategang adalah beton bertulang dimana telah ditimbulkan tegangan-tegangan intern dengan nilai dan pembagian yang sedemikian rupa hingga tegangan-tegangan akibat beton-beton dapat dinetralkan sampai suatu taraf yang diinginkan;

2. Menurut Draft Konsensus Pedoman Beton 1998

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

3. 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.

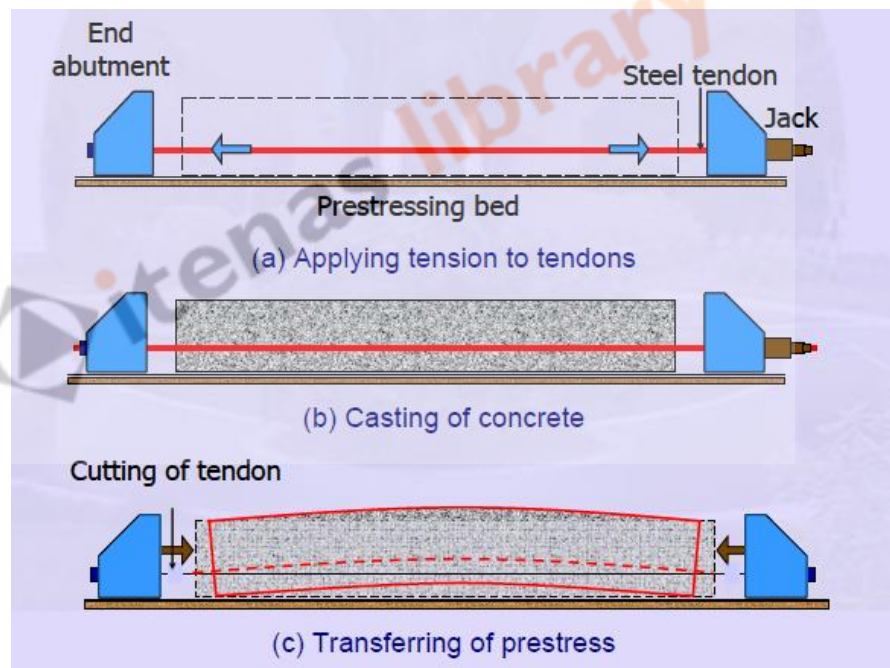
Beton prategang merupakan struktur komposit dari material beton dan baja dengan mutu tinggi. Baja yang digunakan disebut tendon, yaitu beberapa baja yang dikelompokkan dan membentuk kabel. Prinsip kerja dari beton prategang yaitu tendon ditegangkan diawal dengan cara ditarik untuk memberikan tegangan tekan pada penampang beton sebelum adanya beban yang bekerja pada struktur. Besarnya gaya tarik yang diberikan pada tendon untuk mendapatkan gaya prategang yang cukup harus disesuaikan dengan beban batas sedemikian rupa sehingga penampang beton tidak mengalami tegangan tarik saat beban bekerja. Penegangan kabel dan faktor lainnya menimbulkan kehilangan gaya prategang pada beton prategang. Gaya prategang yang tersisa disebut gaya prategang efektif (Yolanda D, 2017).

2.1.1 Metode Penegangan

Terdapat dua cara dalam penegangan kabel, yaitu prategang pra-tarik (*pre-tensioned prestressed concrete*) dan prategang pasca tarik (*post tensioned prestressed concrete*) (Yolanda D, 2017).

1. Prategang pra-tarik (*pre-tensioned prestressed concrete*)

Biasa dilakukan di pabrik (bukan di lapangan atau di lokasi proyek). Kabel dipasang pada bekisting tanpa selongsong, kemudian kabel ditarik dengan gaya prategang sesuai yang dibutuhkan berdasarkan perhitungan dan ditahan. Setelah kabel selesai ditarik dan ditahan, beton dicor. Pada umur 28 hari kabel diputus/dilepaskan dari penahannya. Transfer gaya prategang dilakukan melalui mekanisme lekatan antara beton dan permukaan kabel. Proses penegangan pra-tarik dapat dilihat pada Gambar 2.1.



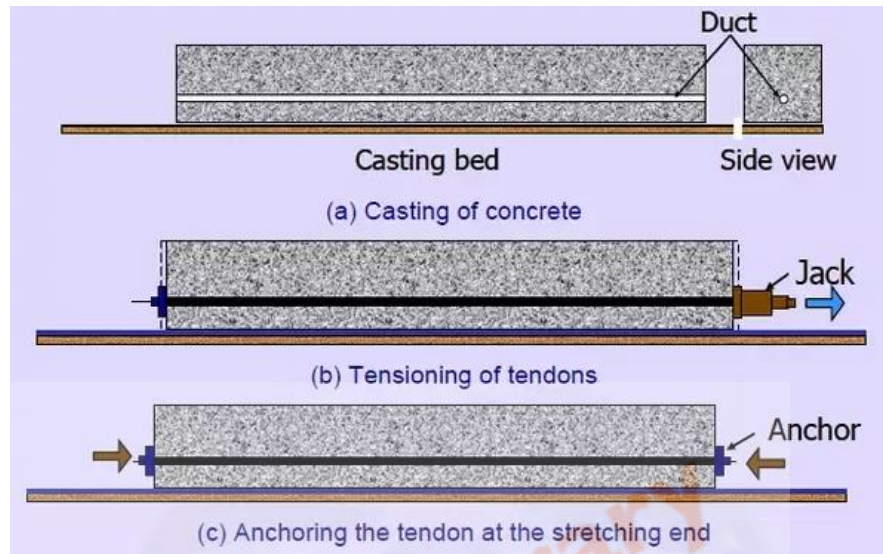
sumber: <https://civilsnapshot.com>, 2018

Gambar 2.1 Proses penegangan pra-tarik

2. Prategang pasca tarik (*post tensioned prestressed concrete*)

Pada *post tensioning* selongsong dipasang pada bekisting, lalu kabel prategang dipasang di dalam selongsong. Setelah dicor, pada umur beton

28 hari kabel ditarik dengan gaya prategang dan ditahan pada ujung-ujung balok dengan angker. Proses penegangan pasca tarik dapat dilihat pada Gambar 2.2.



sumber: <https://civilsnapshot.com>, 2018

Gambar 2.2 Proses penegangan pasca tarik

2.1.2 Material Beton Prategang

Terdapat 2 material yang digunakan dalam pembuatan struktur beton prategang, yaitu baja prategang dan beton dengan mutu tinggi (Yolanda D, 2017).

1. Baja prategang

Baja prategang/tendon yang dipakai pada beton prategang berupa baja mutu tinggi yang dibuat dalam beberapa bentuk. Terdapat beberapa bentuk tendon yaitu:

- a. batang (*bar*), yaitu tendon berbentuk batangan dengan penampang padat;
- b. kabel (*wire*), yaitu tendon dengan penampang padat;
- c. untaian kabel (*strand*), yaitu sekelompok kabel/kawat yang diuntai membentuk *helical* mengelilingi sumbu.



sumber: VSL Filed Manual

Gambar 2.3 Block anchor pada multistrand tendon

2. Beton

Beton pada struktur prategang menggunakan mutu yang lebih tinggi dibandingkan dengan beton bertulang disebabkan oleh adanya gaya tekan awal yang cukup besar pada penampang. Sifat beton yang ada kaitannya dengan beton prategang dan penting untuk diketahui yaitu:

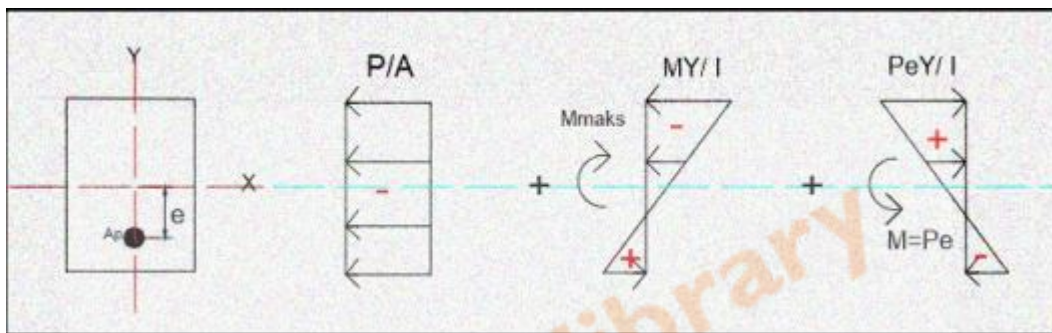
- a. susut (*shrinkage*), volume dari adukan akan berkurang semakin meningkatnya usia beton, disebabkan oleh proses kimia dan hidrasi serta penguapan air adukan yang tidak terikat oleh semen;
- b. rangkak (*creep*), perubahan bentuk (*irreversible*) atau tidak dapat kembali ke bentuk semula, disebabkan oleh perubahan bentuk plastis dari adukan beton yang merupakan fungsi dari waktu.

2.2 Analisis Penampang Balok Prategang Penuh Terlentur (*Full Prestressed*)

Analisis penampang balok prategang terlentur dilakukan berdasarkan perhitungan tegangan pada penampang saat kondisi elastis, yaitu pada kondisi beban kerja (*service load*). Pembebanan pada penampang balok prategang terdiri dari beberapa kondisi, yaitu:

1. saat pembangunan, dimana pada saat ini beban yang dipikul balok adalah berat sendiri balok;
2. saat selesai pembangunan dan bangunan dalam keadaan tak digunakan, dimana beban yang dipikul balok ada berat sendiri balok dan beban mati lainnya;
3. saat bangunan digunakan, dimana beban yang bekerja adalah berat sendiri balok, beban mati lainnya, dan beban hidup.

Besar tegangan yang terjadi pada balok beton prategang penuh dapat dilihat pada Gambar 2.4.



sumber: Tugas Akhir Yolanda D., 2017

Gambar 2.4 Kondisi tegangan pada penampang beton prategang penuh

Tegangan yang terjadi pada penampang balok prategang penuh pada serat atas dan bawah adalah:

$$\sigma_a = -\frac{My_a}{I} - \frac{P}{A} + \frac{Pe y_a}{I} \dots\dots\dots(2.1)$$

$$\sigma_b = \frac{My_b}{I} - \frac{P}{A} + \frac{Pe y_b}{I} \dots\dots\dots(2.2)$$

Keterangan:

- σ_a = tegangan di serat atas, (kg/cm^2);
 σ_b = tegangan di serat bawah, (kg/cm^2);
 M = momen yang dipikul tiap kondisi, (kgm);
 I = momen inersia, (cm^4);
 e = eksentrisitas kabel, (cm);
 P = gaya prategang, (kg);
 y_a = jarak serat atas dari titik berat, (cm);

y_b = jarak serat bawah dari titik berat, (cm).

Perjanjian tanda:

tegangan tekan (-);

tegangan tarik (+).

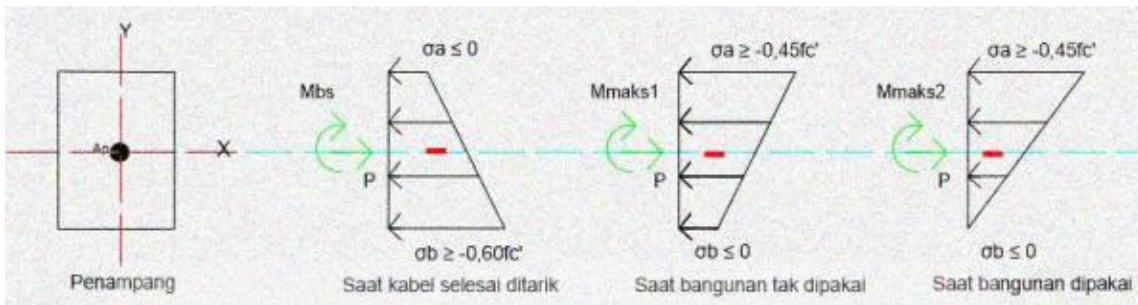
Adapun besarnya tegangan beton yang diizinkan pada penampang beton prategang diatur dalam SNI 03-2847-2002.

1. Tegangan beton sesaat sesudah penyaluran gaya prategang (sebelum terjadinya kehilangan tegangan sebagai fungsi waktu) tidak boleh melampaui nilai berikut:
 - a. tegangan serat tekan terluar $0,60 f_{ci}'$;
 - b. tegangan serat tarik terluar kecuali seperti yang diizinkan $0,25 \sqrt{f_{ci}'}$;
 - c. tegangan serat tarik terluar pada ujung-ujung komponen struktur di atas perletakan sederhana $0,5 \sqrt{f_{ci}'}$.
2. 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 $0,45 f_{ci}'$;
 - b. tegangan serat tekan terluar akibat pengaruh prategang, beban mati dan beban hidup total $0,60 f_{ci}'$;
 - c. tegangan serat tarik terluar dalam daerah tarik yang pada awalnya mengalami tekan $0,5 \sqrt{f_{ci}'}$.

Besarnya tegangan tendon prategang yang diizinkan juga diatur dalam SNI 03-2847-2002.

1. Akibat gaya pengangkutan, tegangan tendon tidak lebih dari $0,94 f_{py}$ dan tidak lebih besar dari nilai terkecil dari $0,80 f_{pu}$ dan nilai maksimum yang direkomendasikan oleh pabrik pembuat tendon prategang atau perangkat angkut;

2. Sesaat setelah penyaluran gaya prategang, tegangan tendon tidak lebih dari $0,82 f_{py}$ dan tidak lebih besar dari $0,74 f_{pu}$;
3. Tendon pasca tarik, pada daerah ankur dan sambungan, segera setelah penyaluran gaya, tegangan tendon tidak lebih dari $0,70 f_{pu}$.



sumber: Tugas Akhir Yolanda D.,2017

Gambar 2.5 Tegangan pada penampang dan besar tegangan izin pada beton berdasarkan kondisi penampang

Besar momen untuk penampang balok statis tertentu yang memikul beban merata berdasarkan masing-masing kondisi pembebanan, sebagai berikut:

1. Besar momen pada kondisi pembangunan

$$M_{bs} = \frac{1}{8} (A_{bs} * BJ_c) \times L^2 \dots\dots\dots(2.3)$$

2. Besar momen pada kondisi selesai pembangunan (belum terpakai)

$$M_{maks1} = \frac{1}{8} (A_{bs} \times BJ_c + A_s \times BJ_c) \times L^2 \dots\dots\dots(2.4)$$

3. Besar momen pada kondisi bangunan dipakai

$$M_{maks2} = \frac{1}{8} (A_{bs} \times BJ_c + A_s \times BJ_c + LL) \times L^2 \dots\dots\dots(2.5)$$

Keterangan:

- A_{bs} = luas penampang balok sendiri, (m^2);
- A_{slab} = luas pelat, (m^2);
- BJ_c = berat jenis beton, (kg/m^3);
- LL = beban hidup, (kg/m);
- L = panjang bentang penampang, (m).

Berdasarkan kondisi pembebanan maka formulasi tegangan penampang balok prategang terlentur menjadi:

1. Kondisi saat pembangunan

$$\sigma_a = -\frac{My_a}{I} - \frac{P}{A} + \frac{Pe_y a}{I} \leq 0 \quad \dots\dots\dots(2.6)$$

$$\sigma_b = \frac{My_b}{I} - \frac{P}{A} - \frac{Pe_y b}{I} \geq -0,60 f_c' \quad \dots\dots\dots(2.7)$$

2. Kondisi saat selesai pembangunan (belum terpakai)

$$\sigma_a = -\frac{My_a}{I} - \frac{P}{A} + \frac{Pe_y a}{I} \geq -0,45 f_c' \quad \dots\dots\dots(2.8)$$

$$\sigma_b = \frac{My_b}{I} - \frac{P}{A} - \frac{Pe_y b}{I} \leq 0 \quad \dots\dots\dots(2.9)$$

3. Kondisi saat bangunan dipakai

$$\sigma_a = -\frac{My_a}{I} - \frac{P}{A} + \frac{Pe_y a}{I} \geq -0,45 f_c' \quad \dots\dots\dots(2.10)$$

$$\sigma_b = -\frac{My_b}{I} - \frac{P}{A} + \frac{Pe_y b}{I} \leq 0 \quad \dots\dots\dots(2.11)$$

Keterangan:

f_c' = kuat tekan beton, (MPa).

Perhitungan luas tendon (kabel prategang) yang diperlukan pada penampang dapat dihitung dengan rumus berikut.

$$A_p = \frac{P}{f_{pa}} \quad \dots\dots\dots(2.12)$$

$$A_p = \frac{P}{0,82 f_{py}} \quad \dots\dots\dots(2.13)$$

Keterangan:

A_p = luas tendon, (mm^2);

f_{pa} = tegangan tarik tendon yang diizinkan, (MPa);

f_{py} = tegangan leleh tendon, (MPa).

2.3 Beton Prategang Parsial

Beton prategang parsial merupakan kombinasi dari beton bertulang dan beton prategang penuh. Penggunaan desain beton prategang parsial pada penampang balok akan menghemat jumlah tendon yang dipakai, tetapi agar kekuatan penampang tetap sama maka digunakan sejumlah baja tulangan. Penampang beton prategang parsial tidak dapat memikul beban lebih (*overload*) dari beban kerja yang direncanakan, maka penampang diharuskan menggunakan beton prategang penuh.

Beton prategang parsial memiliki kelebihan dan kekurangan dibandingkan beton prategang penuh. Kelebihan beton prategang parsial adalah, sebagai berikut:

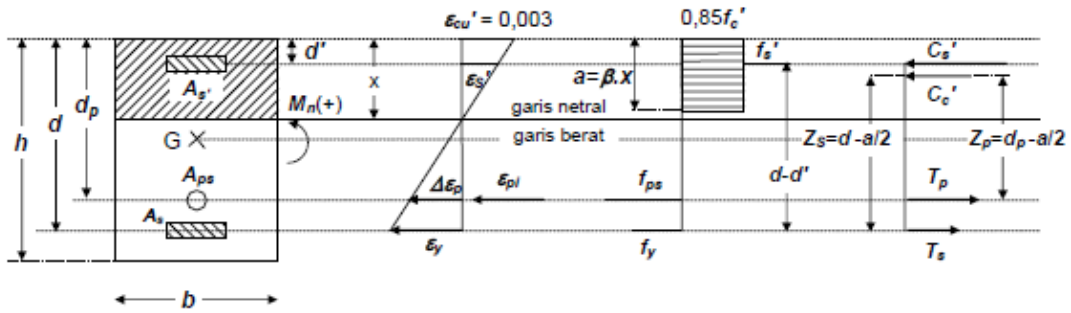
1. beton prategang parsial memerlukan jumlah tendon yang lebih sedikit dibandingkan dengan beton prategang penuh, sehingga beton prategang parsial lebih ekonomis;
2. tidak akan menimbulkan lendutan ke atas (*camber*) akibat besarnya gaya pratekan;
3. memiliki daktilitas lebih baik, terutama pada saat terjadi beban siklus (*cyclic loading*).

Kekurangan beton prategang parsial dibandingkan beton prategang penuh adalah, sebagai berikut:

1. penampang sudah dalam keadaan retak pada saat kondisi beban kerja (*service load*);
2. lendutan yang terjadi akan lebih besar.

2.4 Analisa Penampang Balok Prategang Parsial pada Kondisi Beban Runtuh

Analisa penampang balok prategang parsial pada kondisi beban runtuh telah ditetapkan di dalam SNI 03-2847-2002. Analisis penampang beton prategang parsial dapat dilihat pada Gambar 2.6.



sumber: SNI 03-2847-2002

Gambar 2.6 Skema penampang beton prategang parsial pada kondisi beban runtuh

Keterangan :

- a = tinggi balok tekan, (mm);
- C_s' = gaya tekan pada tulangan, (kg);
- C_c' = gaya tekan pada beton, (kg);
- \mathcal{E}_{pi} = regangan awal kabel prategang;
- T_p = gaya tarik pada tendon, (kg);
- T_s = gaya tarik pada tulangan, (kg);
- X = jarak garis netral dari serat tekan terluar, (mm);
- $\Delta \mathcal{E}_p$ = regangan kabel prategang akibat lentur.

Pada skema penampang beton prategang parsial pada kondisi beban runtuh didapatkan persamaan sebagai berikut.

$$C_s' + C_c' = T_p + T_s \quad \dots\dots\dots(2.14)$$

Dimana :

$$C_s' = A_s' x f_{sa} \quad \dots\dots\dots(2.15)$$

$$C_c' = 0,85 x f_c' x b x a \quad \dots\dots\dots(2.16)$$

$$T_p = A_p x f_{ps} \quad \dots\dots\dots(2.17)$$

$$T_s = A_s x f_y \quad \dots\dots\dots(2.18)$$

Keterangan :

- A_s = luas tulangan, (mm^2);
 b = lebar penampang beton prategang parsial, (mm);
 f_{sa} = tegangan ijin tekan tulangan, (MPa);
 f_{ps} = tegangan ijin tekan tendon, (MPa);
 f_y = tegangan ijin tarik tulangan, (MPa).

Sehingga didapat rumus perhitungan momen:

$$M_n = C_c' \left(\frac{h}{2} - \frac{a}{2} \right) + C_s' \left(\frac{h}{2} - d' \right) + T_s \left(d' - \frac{h}{2} \right) + T_p \left(d_p - \frac{h}{2} \right) \dots\dots\dots(2.19)$$

Keterangan:

- M_n = kapasitas momen runtuh penampang prategang parsial, (kg.m);
 d' = tebal selimut beton, (mm);
 d_p = jarak tendon dari serat tekan terluar beton, (mm);
 h = tinggi penampang beton prategang parsial, (mm).

Lebar retak dapat dihitung dengan menggunakan rumus Gergely-Lutz dibawah ini.

$$w_{maks} = k_1 f_s \sqrt[3]{d' A} \dots\dots\dots(2.20)$$

Keterangan:

- w_{maks} = lebar retak maksimum, (mm);
 k_1 = koefisien yang tergantung kepada tipe tulang prategang dan non-prategang;
 f_s = tegangan pada tulangan tarik, (kg/cm^2);
 A = luas daerah tarik beton efektif di sekeliling tulangan utama dibagi dengan jumlah, (mm^2).

Pada rumus Gergely-Lutz lebar retak maksimum yang diizinkan pada balok interior sebesar 0,25 mm, sedangkan pada balok eksterior sebesar 0,3 mm. Nilai k_1 yang diambil untuk Persamaan 2.20 pada perhitungan lebar retak maksimum adalah berbeda-beda tergantung tipe tulangan prategang dan non-prategang yang digunakan. Nilai k_1 dapat dilihat pada Tabel 2.1.

TABEL 2.1 Nilai k_1 untuk rumus Gergely-Lutz

Kategori	Tipe Baja	K_1 (dalam 10^{-6})
1	<i>Deformed Bar – Strand</i>	13,7
2	<i>Deformed Bar – Wire</i>	20,3
3	<i>Strand Only</i>	22,5
4	<i>Wires Only</i>	37,2
5	<i>Unbonded Tendon</i>	25,0

Sumber: Dilger, W.H., & Suri, K.M., dalam Kusuma, G. H., Tjio, V. S., & Pudjisuryadi, P., 2000

2.5 Analisis Penampang Balok Prategang Parsial pada Kondisi Beban Kerja

Analisis penampang balok prategang parsial dapat dilakukan dengan menggunakan pendekatan beban kerja, namun perhitungannya akan lebih rumit dan kompleks dibandingkan dengan pendekatan beban runtuh karena penampang telah retak. Perhitungan beban yang bekerja menggunakan kombinasi yang ditetapkan dalam SNI, sebagai berikut.

$$PL = DL + LL \quad \dots\dots\dots(2.21)$$

Keterangan:

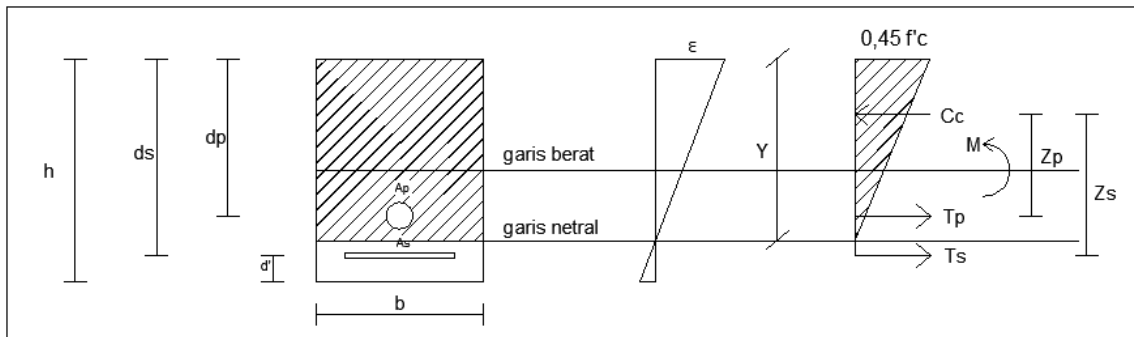
PL = total beban yang bekerja pada penampang, (kg).

Sehingga besar momen yang dipikul oleh penampang balok prategang parsial jika beban yang bekerja adalah beban merata, sebagai berikut.

$$M = \frac{1}{8} \times PL \times L^2 \quad \dots\dots\dots(2.22)$$

Jika beban yang bekerja adalah beban terpusat ditengah bentang penampang maka rumus perhitungan besar momen, sebagai berikut.

$$M = \frac{1}{4} \times PL \times L \quad \dots\dots\dots(2.23)$$



Gambar 2.7 Skema penampang beton prategang parsial pada beban kerja

Keterangan:

d_s = jarak tulangan dari serat tekan terluar beton, (mm);

d' = tebal selimut beton, (mm);

Y = tinggi tegangan tekan penampang beton prategang parsial, (mm);

Z_p = jarak gaya tarik pada tendon dari resultan gaya tekan pada beton, (mm);

Z_s = jarak gaya tarik pada tulangan dari resultan gaya tekan pada beton, (mm).

Analisis penampang beton prategang parsial terhadap beban kerja dilakukan dengan mengasumsikan tegangan tarik pada beton diabaikan dan dipikul penuh oleh tulangan. Selain itu tegangan tekan pada serat terbawah yang terjadi dianggap jatuh diantara tendon dan tulangan sehingga garis netral berada diantara tendon dan tulangan, agar penampang beton tetap berperilaku sebagai beton prategang.

Analisis perhitungan momen penampang beton prategang parsial terhadap beban kerja dapat menggunakan persamaan, sebagai berikut.

$$M = T_p \times Z_p + T_s \times Z_s \quad \dots\dots\dots(2.24)$$

Analisis perhitungan tegangan tekan pada beton dapat menggunakan persamaan, sebagai berikut.

$$C_c = T_p + T_s \quad \dots\dots\dots(2.25)$$

Besar momen yang dipikul oleh kabel prategang harus lebih besar dari tulangan biasa agar penampang beton tetap berperilaku sebagai beton prategang. Besarnya persentase prategang dapat dihitung dengan rumus, sebagai berikut.

$$p = \frac{T_p(d_p - \frac{x}{3})}{T_p(d_p - \frac{x}{3}) + T_s(d_s - \frac{x}{3})} \times 100 \% \quad \dots\dots\dots(2.26)$$

Keterangan:

$(d_p - \frac{x}{3})$ = jarak gaya tarik pada tendon dari resultan gaya tekan pada beton, (mm);

$(d_s - \frac{x}{3})$ = jarak gaya tarik pada tulangan dari resultan gaya tekan pada beton,
(mm);

p = persentase prategang, (%).

Perhitungan luas kabel prategang dan luas tulangan yang dibutuhkan pada penampang beton prategang parsial dapat dihitung dengan rumus, sebagai berikut:

$$A_p = \frac{T_p}{f_{pa}} \quad \dots\dots\dots(2.27)$$

$$A_s = \frac{T_s}{f_s} \quad \dots\dots\dots(2.28)$$

Keterangan:

f_{pa} = tegangan Tarik kabel yang diizinkan, (MPa);

f_{py} = tegangan leleh kabel, (MPa).