

BAB II

LANDASAN TEORI

2.1 Tinjauan Umum Struktur Beton Komposit

Seperti diketahui bahwa balok merupakan bagian dari struktur yang berfungsi sebagai penerus beban dari pelat ke tumpuan. Balok pratekan komposit dipakai bila dikehendaki suatu bentang yang panjang atau bila beban yang diterima balok cukup besar sehingga digunakan suatu balok yang kuat tetapi efisien.

Istilah konstruksi komposit pada struktur beton pratekan adalah konstruksi gabungan dari beton pracetak prategang (balok) dengan beton cor ditempat (pelat).

2.1.1 Metode Konstruksi Struktur Komposit Tanpa Dukungan Sementara

Pada metode ini unit pracetak tidak menggunakan dukungan sementara sewaktu pelaksanaan pengecoran beton pelat, sehingga tegangan-tegangan yang terjadi pada unit pracetak karena beban berat sendiri gelagar dan beban mati dari beton cetak ditempat. Pada struktur beton pratekan komposit terjadi dua keadaan, yaitu sebelum struktur menjadi komposit dan setelah struktur menjadi komposit.

Tegangan-tegangan yang terjadi adalah sebagai berikut ini :

1. Tegangan yang terjadi sebelum balok menjadi komposit

a. Saat Transfer

$$f_t = -\frac{P_o}{A_p} \left(1 - \frac{e \max Ctp}{rp^2}\right) - \frac{MG}{Stp} \dots\dots\dots (2.1)$$

$$f_b = -\frac{P_o}{A_p} \left(1 + \frac{e \max Cbp}{rp^2}\right) + \frac{MG}{Sbp} \dots\dots\dots (2.2)$$

b. Saat Layan

$$f_t = -\frac{Pe}{A_p} \left(1 - \frac{e \max Ctp}{rp^2}\right) - \frac{MG + MS}{Stp} \dots\dots\dots (2.3)$$

$$f_b = -\frac{Pe}{A_p} \left(1 + \frac{e \max Cbp}{rp^2}\right) + \frac{MG + MS}{Stp} \dots\dots\dots (2.4)$$

2. Tegangan yang terjadi setelah balok menjadi komposit

$$f_t = -\frac{Pe}{A_p} \left(1 - \frac{e \max Ctp}{rp^2}\right) - \frac{MG + MS}{Stp} - \frac{MD + ML}{Stc} \dots\dots\dots (2.5)$$

$$f_b = -\frac{Pe}{A_p} \left(1 + \frac{e \max Cbp}{rp^2}\right) + \frac{MG + MS}{Stp} + \frac{MD + ML}{Sbc} \dots\dots\dots (2.6)$$

jika pada saat transfer sebagian beban mati telah bekerja, maka :

$$M_o = MG + (\lambda * MD) \quad \text{dengan} \quad \lambda \leq 1$$

dan jika beban mati belum bekerja pada saat transfer, maka $M_o = MG$ seperti persamaan 2.1 dan 2.2 diatas.

2.2 Konsep Dasar Beton Pratekan

Konsep dasar beton pratekan adalah memberikan tegangan awal (*initial loading*) yang bersifat permanen pada beton yang bersifat kuat menahan tekan

tetapi lemah menahan tarikan. Pemberian tegangan tekan permanen pada beton tersebut akan meningkatkan kekuatan tarik struktur tersebut secara nyata, karena tegangan tarik akibat beban luar harus meniadakan pratekannya terlebih dahulu. Dengan kata lain gaya pratekan akan memberikan tegangan awal yang berlawanan dengan tegangan tarik yang ditimbulkan oleh beban kerja sehingga diharapkan tegangan tarik total akan berkurang atau hilang sama sekali.

Konsep ini merupakan ide dari Eugene Freyssinet, yang mengatakan akibat dari penarikan tendon, beton yang semula tidak mampu menahan tegangan tarik menjadi mampu menahan tegangan tarik. Sehingga dapat juga disimpulkan jika tidak ada tegangan tarik pada beton tidak akan terjadi retak pada beton tersebut. Dengan demikian beton yang semula adalah bahan getas berubah menjadi bahan elastis.

Berdasarkan pemikiran tersebut beton dianggap sebagai benda yang mengalami dua sistem pembebanan, yaitu pembebanan gaya internal pratekan dan pembebanan eksternal dengan tegangan tarik akibat gaya eksternal dilawan oleh tegangan tekan akibat gaya pratekan. Retak yang terjadi pada beton dapat dicegah atau dapat dikurangi oleh gaya pratekan yang dihasilkan dari penarikan tendon. Gaya yang diakibatkan karena penarikan tendon akan menghasilkan gaya tekan pada beton dan dapat dilakukan secara konsentris maupun eksentris terhadap titik berat penampang beton pracetak, dalam konsep ini pemberian gaya pratekan dipandang sebagai suatu usaha membuat seimbang gaya-gaya sehingga komponen struktur yang mengalami lentur tidak akan mengalami tegangan lentur pada kondisi pembebanan tertentu. Bila tendon dengan profil parabola ditarik, maka

untuk dapat tetap mempertahankan posisinya diperlukan gaya vertikal kebawah, jika tendon terbungkus beton maka akan timbul gaya keatas menekan beton yang berlawanan arah dengan gaya untuk mempertahankan posisi tendon.

1. Tendon secara konsentris

Gaya pratekan (P) pada penarikan tendon diletakkan pada titik berat penampang atau garis netral penampang seperti terlihat pada gambar 2.1.

Akibat gaya pratekan P , timbul tegangan tekan merata sebesar :

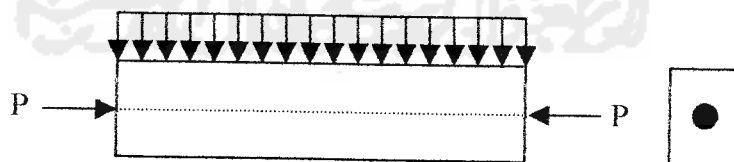
$$f = \frac{P}{A} \dots \dots \dots (2.7)$$

sedangkan momen eksternal (M) pada penampang akibat beban dan berat sendiri balok timbul tegangan sebesar :

$$f = \frac{M.y}{I} \dots \dots \dots (2.8)$$

tegangan akhir yang terjadi akibat gaya pratekan dan momen eksternal adalah sebagai berikut :

$$f = \frac{P}{A} \pm \frac{M.y}{I} \dots \dots \dots (2.9)$$

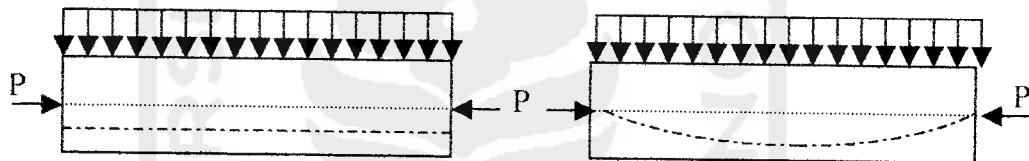


Gambar 2.1 Balok dengan tendon konsentris

2. Tendon secara eksentris

Pada cara ini tendon ditempatkan secara eksentris terhadap titik berat penampang beton pracetak. Eksentrisitas dapat berupa garis parabola maupun sejajar dengan garis netral, seperti pada gambar 2.2. Resultan gaya tekan P pada beton bekerja dititik berat tendon yang berjarak e dari garis netral beton. Akibat gaya prategang yang eksentris beton dibebani oleh momen dan beban langsung sehingga akibat gaya prategang tersebut maka tegangan akhir yang terjadi adalah sebagai berikut :

$$f = -\frac{P}{A} \pm \frac{P.e.C}{I} \pm \frac{M.C}{I} \dots \dots \dots (2.10)$$



Gambar 2.2 Balok dengan tendon eksentris tetap dan parabola

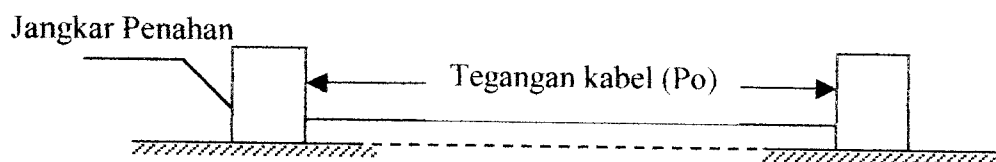
2.3 Metode Penegangan

Dalam menerapkan gaya pratekan terdapat dua metode sistem penegangan, yaitu sistem pratatik dan sistem pascatarik.

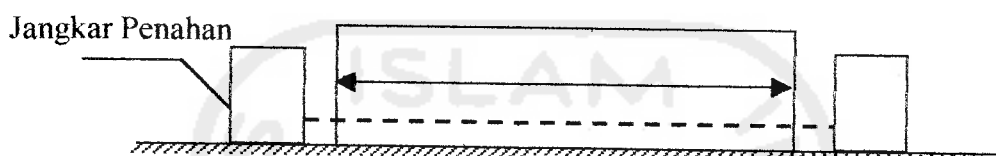
2.3.1 Sistem penarikan pratarik (*pretension*)

Pada sistem ini sebelum dilakukan pengecoran dalam perangkat cetakan yang disiapkan, kabel atau tendon pratekan ditarik terlebih dahulu. Setelah beton cukup keras kemudian penjangkaran dilepas, maka terjadi pelimpahan tegangan tarik baja menjadi tegangan tekan pada beton. Pada sistem penarikan pratarik, transfer tegangan melalui lekatan ditimbulkan oleh kawat tendon dengan dinding

disekeliling kawat sepanjang bentang. Langkah penegangan pada sistem pratarik dapat dilihat pada gambar 2.3a ^{s/d} 2.3c berikut ini.



(a) Kabel ditarik diantara dua jangkar penahan



(b) acuan dipasang dan beton di cor di dalamnya



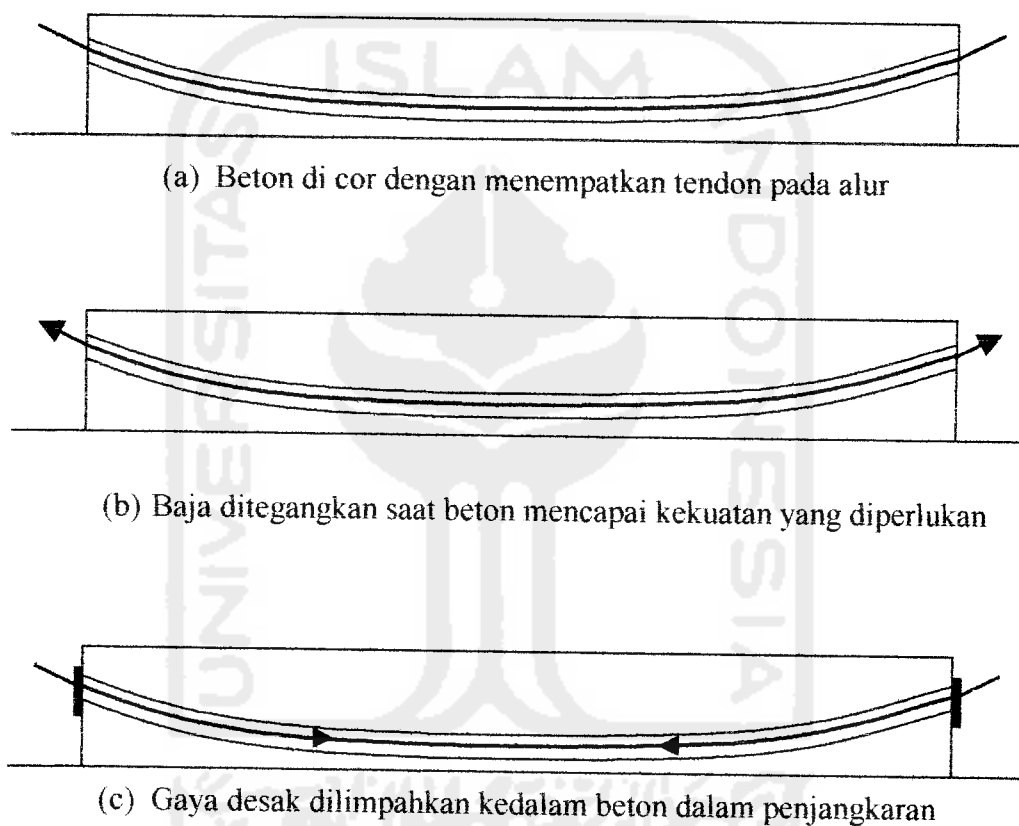
(c) gaya desak dilimpahkan kedalam beton

Gambar 2.3 Penegangan sistem pratarik

Untuk produksi massal komponen struktur pratarik, perluasan dari cara diatas seringkali dikenal dengan system Hoyer yang umum digunakan. Sistem ini terjadi dari penarikan kabel (*strand*) diantara dua dinding penahan yang terpisah beberapa ratus kaki. Dengan proses Hoyer ini, beberapa komponen struktur dapat diproduksi sepanjang satu baris, dengan memberi tutup antara komponen struktur. Metode ini juga dikenal dengan metode “berbaris panjang”, dan digunakan hampir di semua pabrik pratarik di Amerika Serikat karena lebih ekonomis.

2.3.2 Sistem penarikan pascatarik (*posttension*)

Pada metode ini beton terlebih dahulu dicetak dengan disiapkan saluran selongsong atau alur didalamnya untuk penempatan tendon. Apabila beton sudah cukup kuat, maka kawat bermutu tinggi atau tendon tadi ditarik lalu ujung-ujungnya diangkurkan, seperti terlihat pada gambar 2.4a s/d 2.4c berikut ini.



Gambar 2.4 Penegangan sistem pascatarik

Gaya pratekan disalurkan dengan jangkar-jangkar yang berada pada ujung batang, jika selongsong tendon diisi dengan pasta (*grouting*) maka gaya prategang disalurkan pada ikatan kawat dengan beton sepanjang beton tersebut.

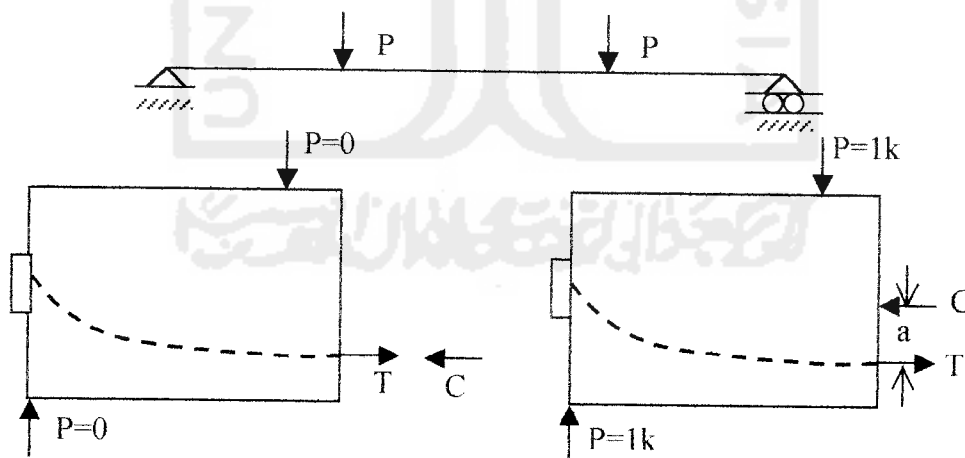
Cara penegangan pasca tarik cocok untuk pekerjaan yang dilaksanakan ditempat, dengan bentang menengah sampai bentang yang panjang. Pada sistem ini memungkinkan pemakaian kabel-kabel lengkung atau eksentrisitas yang bervariasi yang membantu perencana untuk merubah distribusi tegangan tampang sehingga dapat menahan beban luar secara efisien.

2.4 Konsep Umum Desain Elastis

Menurut statika, momen menahan / momen yang dibentuk oleh kopel C dan T suatu penampang, harus sama dengan atau lebih besar dari momen eksternal yang bekerja pada penampang tersebut.

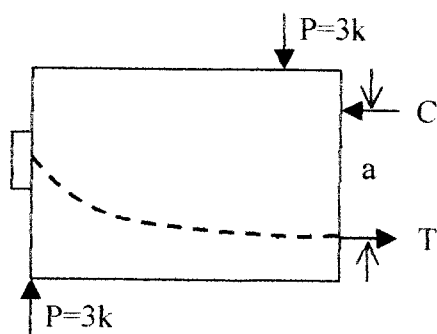
$$M_{\text{internal}} = M_{\text{eksternal}}$$

Pada pemampang balok pratekan, $T = P$ (gaya pratekan) dan letaknya tetap, sedang letak C akan berubah sesuai dengan perubahan besar momen lentur. Lihat gambar 2.5 (A. A. Kadir, Struktur Beton Prategang) berikut ini :



(a) Momen eksternal = 0 (a = 0)

(b) Momen eksternal = kecil (a kecil)



(c) Momen eksternal = besar ($a = \text{besar}$)

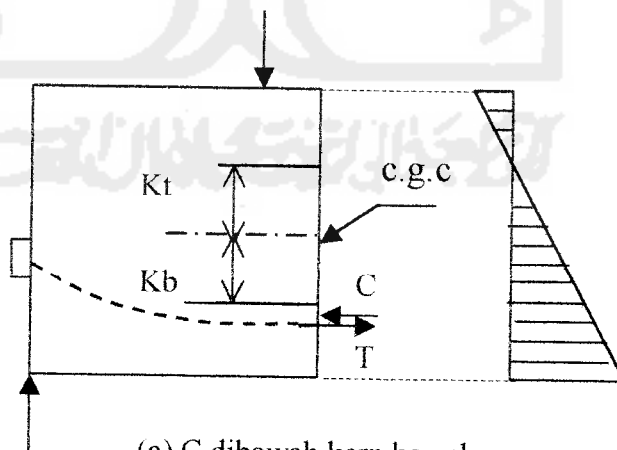
Gambar 2.5 Nilai a yang bervariasi pada balok beton pratekan (Lin, 2000)

Pada penampang pratekan, karena letak T tetap, letak C akan berubah-ubah sesuai dengan perubahan momen lentur. Untuk momen lentur yang diketahui, maka :

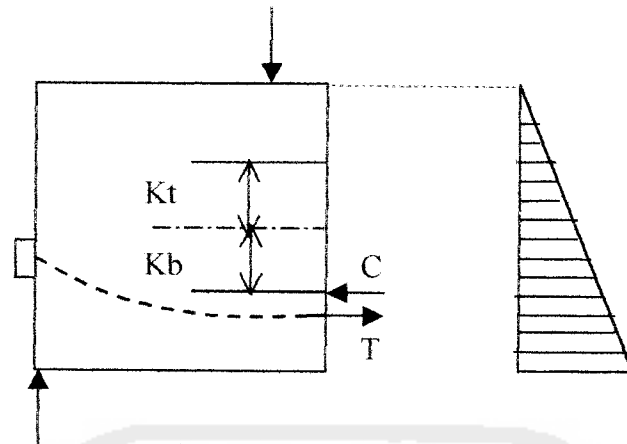
$$Ca = Ta = M$$

$$a = \frac{M}{C} = \frac{M}{T}$$

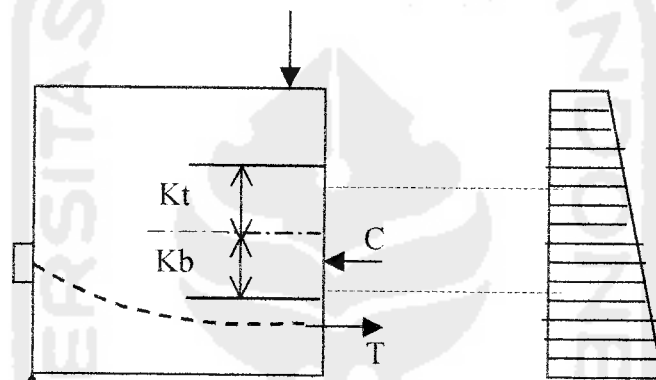
Pada gambar 2.6 berikut ini dijelaskan hubungan antara distribusi tegangan dan letak C :



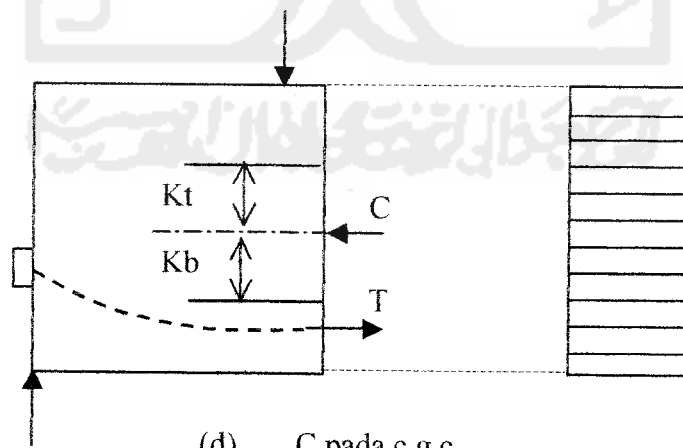
(a) C dibawah kern bawah



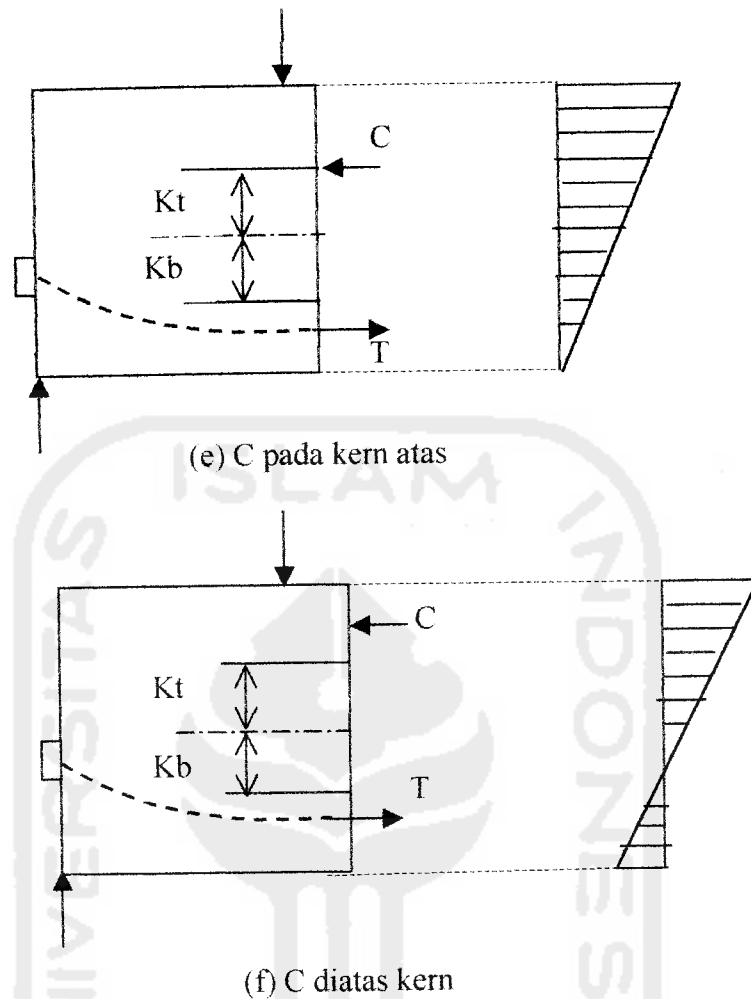
(b) C pada kern bawah



(c) C didalam kern



(d) C pada c.g.c



Gambar 2.6 Distribusi tegangan pada beton berdasarkan teori elastik (Lin, 2000)

2.5 Analisis Tampang Komposit

Analisis pada tampang komposit yang dimaksud merupakan analisis balok pratekan pracetak dengan pelat cetak di tempat. Analisis balok pratekan komposit disederhanakan menjadi analisis balok non komposit dengan memperhatikan perbedaan antara keduanya, yaitu sebagai berikut :

- a. Tahap pembebanan sebagai balok komposit.
- b. Transformasi lebar sayap.

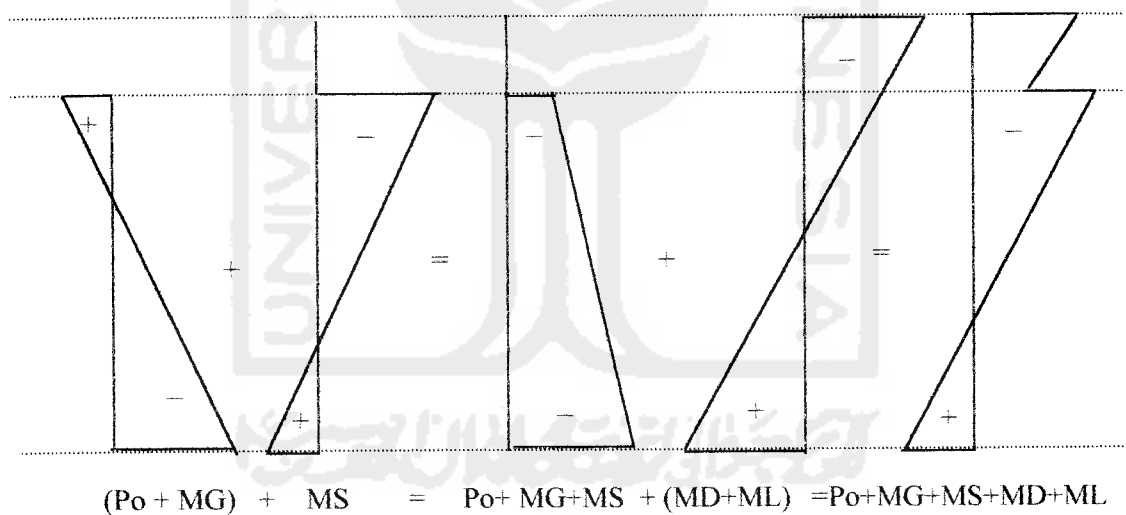
- c. Geser horisontal di antara pelat cor setempat dengan balok pratekan pracetak.

Penyederhanaan analisis balok komposit sebagai balok non komposit dapat diuraikan sebagai berikut :

a. Tahap pembebanan sebagai balok komposit

Berdasarkan penampang yang menahan beban, pembebanan pada balok komposit dapat dibedakan menjadi dua, yaitu melibatkan balok pratekan pracetak dan melibatkan balok komposit.

Gambar 2.7 memperlihatkan distribusi tegangan dan beban yang bekerja untuk berbagai tahap pembebanan balok komposit tanpa dukungan sementara.



Gambar 2.7 Distribusi tegangan dan beban yang bekerja

Pada balok komposit tanpa dukungan sementara

Beban yang bekerja pada masing-masing tahap pembebanan adalah sebagai berikut :

Tahap pembebanan awal : $P_o + MG$

Tahap pengecoran pelat : $(P_o + MG) + MS$

Tahap layanan : $(P_o + MG + MS) + (MD + ML)$

dengan :

MG : momen akibat berat sendiri balok pratekan pracetak

MS : momen akibat berat sendiri pelat cetak ditempat

MF : momen akibat beban mati selain akibat berat sendiri balok pratekan pracetak dan berat sendiri pelat cetak ditempat (momen *finishing*)

ML : momen akibat beban hidup

Setelah pelat mengeras dan mencapai kekuatan yang direncanakan maka garis netral akan bergeser ke atas sesuai dengan tampang komposit yang terjadi. Momen dari garis netral baru termasuk akibat beban mati setelah beton mengeras, seperti aspal dan trotoar, serta beban hidup yang bekerja pada saat perlakuan komposit telah terjadi.

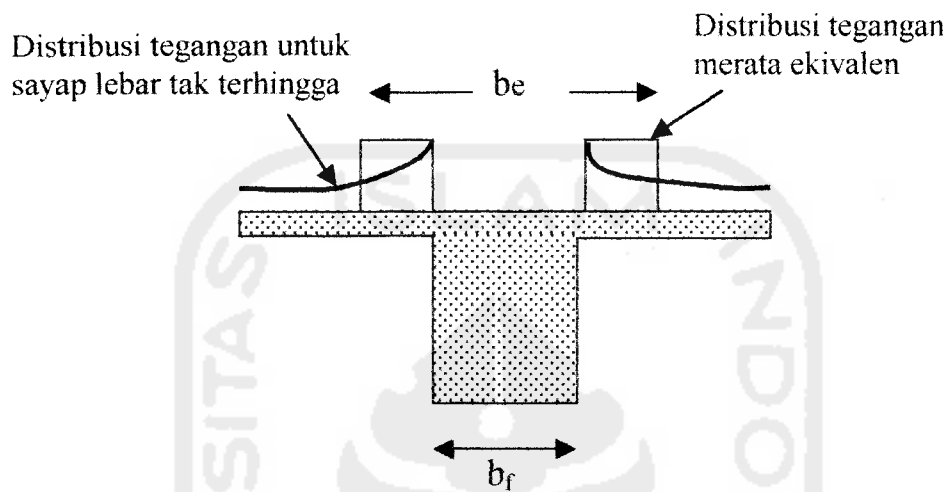
b. Transformasi lebar efektif

1. Lebar efektif

Untuk menghitung sifat penampang komposit secara praktis, dapat digunakan konsep lebar efektif. Distribusi tegangan tekan pada sayap untuk penampang komposit dengan lebar pelat tak terhingga, seperti yang terlihat pada Gambar 2.8. Distribusi tegangan tekan pada sayap mencapai maksimum di atas web dan berkurang secara tidak linier bila jarak ke balok penyanggah membesar.

Untuk praktisnya, sayap dianggap mempunyai lebar efektif b_e yang tegangannya dianggap merata.

AASHTO menentukan lebar efektif yang diijinkan adalah nilai terendah yang dihitung dengan persamaan sebagai berikut ini.



Gambar 2.8 Distribusi Tegangan

Pelat di satu sisi (balok tepi) :

$$b_e \leq b_f + 6 h_f$$

$$b_e \leq (b_f + S) / 2$$

$$b_e \leq (b_f + L) / 12$$

Pelat di dua sisi (balok tengah) :

$$b_e \leq b_f + 12 h_f$$

$$b_e \leq S$$

$$b_e \leq L / 4$$

2. Transformasi Luas

Balok pratekan komposit dianggap elastis pada beban kerja, sehingga distribusi regangannya linier sepanjang penampang akibat momen lentur. Modulus elastis dari dua bahan yang berbeda pada sistem komposit disatukan

sehingga akan mengakibatkan perbedaan tegangan pada regangan yang sama. Cara mengatasinya adalah dengan mentransformasikan salah satu elemen ke dalam elemen fiktif yang mempunyai nilai modulus elastis yang sama dengan memakai faktor n .

Metode transformasi luas ini digunakan untuk menghitung sifat-sifat penampang komposit, sehingga luas beton direduksi dengan menggunakan lebar pelat yang sama dengan $b_e \times n$. Nilai n merupakan rasio antara modulus elastisitas pelat dengan modulus elastisitas balok pratekan pracetak. Tinggi t_s dan lebar b_e pada pelat kemudian ditransformasikan menjadi tampang ekuivalen dengan tinggi tetap dan lebar transformasi b_{tr} . Rumus yang dipakai adalah :

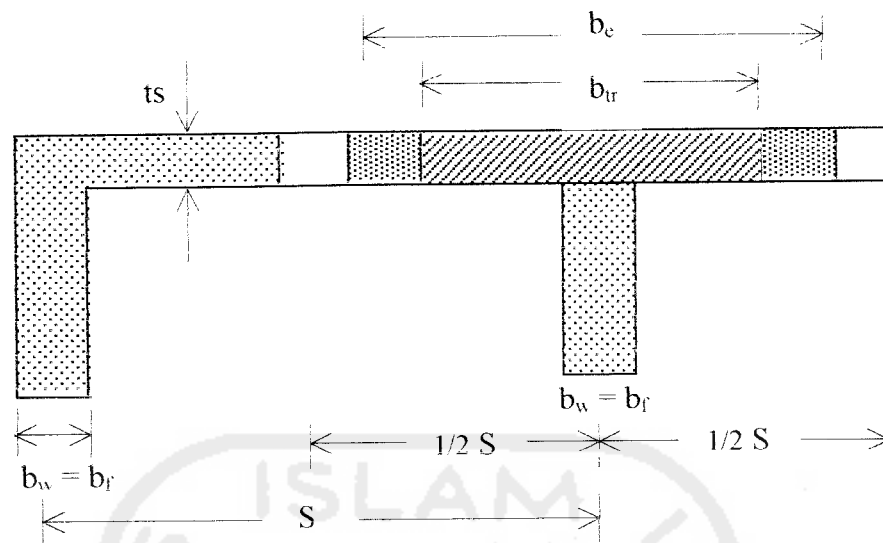
$$b_{tr} = b_e \frac{E_{pelat}}{E_{balok}} = b_e n \dots \dots \dots (2.11)$$

E_{pelat} : modulus elastisitas pelat cor di tempat (*cast in plac*)
 $= 4730 \cdot \sqrt{f'c_{plt}}$,

E_{balok} : modulus elastisitas balok pratekan pracetak saat layan
 $= 4730 \cdot \sqrt{f'c_{blk}}$,

n : rasio modulus elastisitas

Akibat lentur, gaya tekan total pada pelat aktual dengan lebar b_e akan sama dengan gaya pada pelat transformasi dengan lebar b_{tr} yang mempunyai modulus elastis yang sama pada seluruh penampang balok.



Gambar 2.9 Lebar sayap efektif dan transformasi pada balok komposit

3. Luas Tampang Komposit

Pelat mempunyai kekuatan dan modulus elastisitas seperti halnya pada balok pratekan pracetak. Tampang komposit dapat ditransformasikan menjadi sebuah tampang monolit ekuivalen (non komposit) yang mempunyai kekuatan dan modulus elastisitas yang sama dengan balok pratekan pracetak. Tampang geometrinya secara langsung dapat digunakan dalam perencanaan lentur dengan cara yang sama menggunakan tampang non komposit. Luas tampang komposit menjadi :

$$A_c = A_p + A_{\text{pelat}} = A_p + (t_s \cdot b_e \cdot n).$$

Untuk sistem penarikan pratarik luas tampang komposit yang dipakai adalah luas tampang bruto, untuk sistem penarikan pascatarik dengan menggunakan tendon grouting luas tampang komposit yang dipakai adalah luas tampang transformasi yaitu :

$$A_c = A_p + A_{\text{pelat}} + A_t = A_p + (t_s \cdot b_e \cdot n) + ((nt-1) \cdot A_{ps})$$

Sedang untuk sistem penarikan pascatarik dengan menggunakan tendon ungrouting luasampang komposit yang dipakai adalah luasampang transformasi yaitu :

$$A_c = A_p + A_{pelat} + A_n + A_p + (ts \cdot b_e \cdot n) + (1 + n) \cdot D_s^2$$

dimana :

A_c = luas balok komposit

A_p = luas balok pracetak

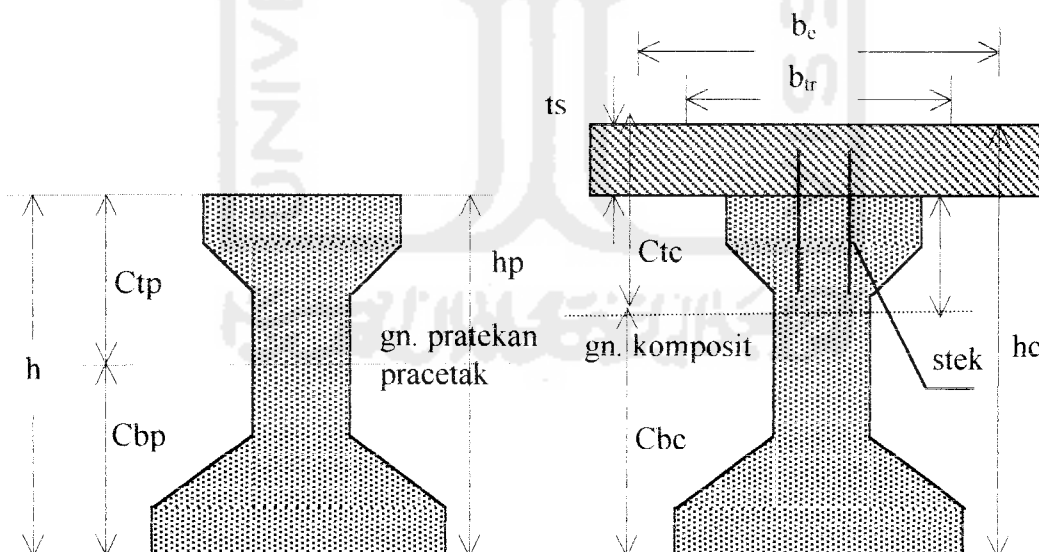
A_{pelat} = luasampang pelat

A_n = luas selubung tendon

D_s = diameter selubung tendon

A_t = luas tendon padaampang transformasi

n = perbandingan modulus elastisitas baja dengan beton = E_s / E_c blk pracetak



Gambar 2.10 Tampang balok pratekan pracetak dan komposit

d. Geser Horizontal

Pada tulisan ini, pengaruh geser horizontal tidak dibahas dan aksi komposit yang ditimbulkan oleh ketahanan geser diantara pelat dengan balok pratekan pracetak dianggap telah cukup.

2.6 Pembebanan

2.6.1 Macam-macam Beban

Pada umumnya beban yang diterima atau ditahan oleh suatu elemen struktur adalah sebagai berikut ini.

1. Beban mati

Beban mati adalah beban yang terus menerus membebani elemen struktur atau beban yang tetap membebani elemen struktur. Berat sendiri dari elemen struktur adalah beban mati yang harus diperhitungkan tersendiri karena merupakan beban yang selalu terjadi, juga beban-beban mati lainnya yang direncanakan untuk membebani elemen struktur secara tetap dan terus menerus juga diperhitungkan sebagai beban mati tetap.

2. Beban hidup

Beban hidup merupakan beban utama yang diterima elemen struktur, baik pada bangunan gedung atau bangunan jembatan. Beban-beban ini bersifat sementara tetapi didalam perencanaan dimasukkan sebagai beban tetap.

2.6.2 Tahap-tahap Pembebanan Balok Pracetak

Tahap-tahap pembebanan balok pracetak terdiri dari tiga tahap, yaitu tahap awal, tahap antara dan tahap akhir.

1. Tahap awal

Pada tahap awal sebelum diberi tegangan beton cukup lemah memikul beban sehingga harus dicegah kehancuran pada perletakan. Jika diijinkan untuk memperkecil atau menghilangkan retak-retak pada beton prategang, pemeliharaan yang seksama sebelum terjadi peralihan gaya prategang sangat penting, pengeringan secara mendadak juga harus dihindarkan. Pada saat diberi gaya prategang kadang-kadang kabel bisa putus disebabkan oleh cacat sewaktu pembuatan, seringkali tegangan maksimal kabel pada saat penarikan mencapai 0,85 fpu. Pada saat penarikan kekuatan beton harus mencapai maksimal untuk menghindari retak pada beton, dan pada saat peralihan gaya prategang pada sistem pascatarik dilakukan secara bertahap sehingga pada keadaan tersebut tidak ada gaya eksternal pada komponen struktur kecuali berat sendiri.

2. Tahap antara

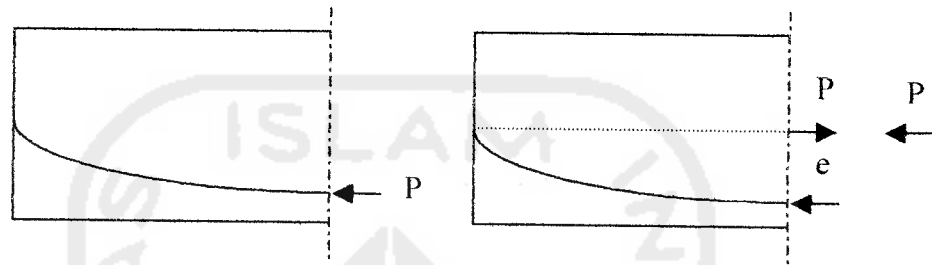
Tahap ini merupakan tahapan selama pengangkutan pracetak. Hal ini terjadi bila komponen struktur pracetak yang diangkut ke lapangan untuk dipasang pada tempatnya.

2. Tahap akhir

Pada tahap ini beban kerja yang sesungguhnya telah bekerja, beban-beban tersebut adalah beban lateral, seperti beban angin dan gaya gempa. Selain itu dihasilkan pula beban akibat penurunan pada tumpuan dan pengaruh temperatur lingkungan.

2.7 Analisa Tegangan Pada Struktur Beton Pratekan

Pada analisa tegangan lentur struktur beton komposit gaya pratekan P bekerja dengan eksentrisitas sebesar e , maka dimungkinkan untuk memecah gaya konsentris P yang melalui titik berat dan momen $P \cdot e$ seperti pada gambar 2.11 berikut ini.



Gambar 2.11 Gaya pratekan pada balok

Dengan teori elastis, tegangan serat pada setiap titik akibat P didapat dari persamaan berikut.

$$f = \frac{M.y}{I} = \frac{P.e.y}{I} \dots \dots \dots (2.12)$$

Resultan tegangan akibat gaya pratekan eksentris didapat dari persamaan berikut.

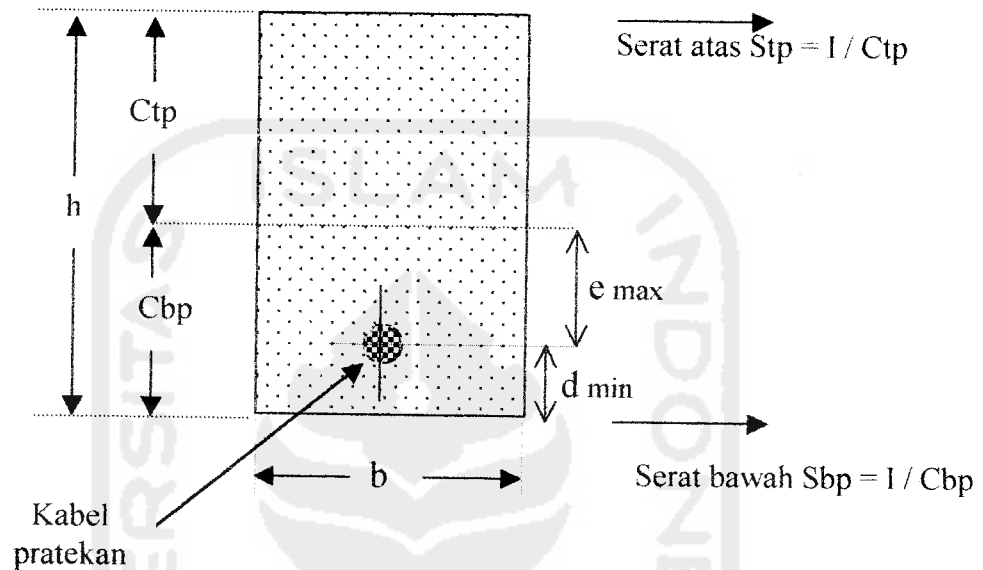
$$f = \frac{P}{Ap} \pm \frac{P.e.y}{I} \dots \dots \dots (2.13)$$

2.7.1 Pola Tegangan Beton Pratekan

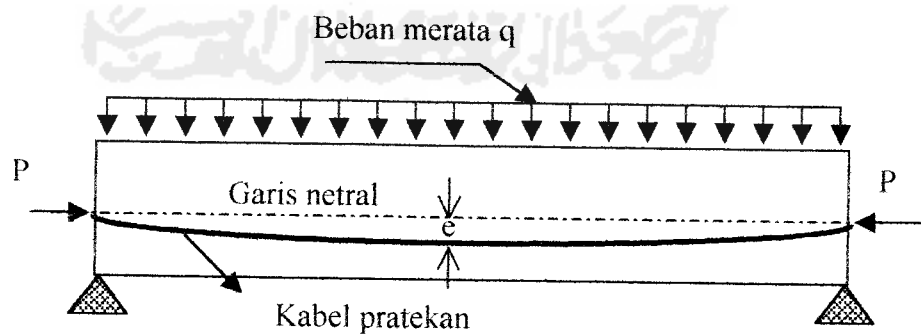
Kelebihan beton pratekan adalah pada tingkat beban kerja dan besar tegangan yang biasanya ditentukan dengan tegangan ijin, maka bagian utama perencanaan dan analisis menggunakan beban kerja dan tegangan ijinnya (elastis).

Pola tegangan yang terjadi pada sistem pratekan pratarik maupun pascatarik ditinjau pada dua kondisi yaitu pada saat awal dan saat layan.

Gambar 2.12 menunjukkan tampang balok pratekan pracetak dengan bentuk penampang persegi.



Gambar 2.12.a Penampang melintang balok pratekan



Gambar 2.12.b Penampang memanjang balok pratekan

Dari gambar juga diperoleh hasil :

$$rp^2 = \frac{Ip}{Ap}$$

$$Kt = \frac{rp^2}{Cbp}$$

$$Kb = \frac{rp^2}{Ctp}$$

Pola tegangan ditinjau pada dua saat yang berbeda yaitu saat awal (*transfer*) dan saat layan (*service*). Pada saat awal beban-beban yang diperhitungkan adalah gaya prategang awal sebelum terjadi kehilangan tegangan, beban mati berat sendiri dan pada sistem pascatarik mungkin sebagian beban mati telah bekerja, untuk perhitungan mencari pusat berat dan inersia penampang yang digunakan pada sistem pratarik adalah penampang bruto, sedang pada sistem pascatarik adalah penampang transformasi atau netto. Pada saat layan telah terjadi seluruh kehilangan tegangan (kehilangan gaya pretekan) yang disebabkan oleh :

1. Kehilangan sesaat

- perpendekan elastis beton (pratarik)
- gesekan (pascatrik)
- *draw-in* / penggelinciran angkur (pascatarik)

2. Kehilangan tergantung waktu

- rangkai beton
- susut beton
- relaksasi baja

Pada saat layan ini beban-beban yang bekerja atau yang diperhitungkan adalah gaya pratekan efektif (setelah terjadi seluruh kehilangan tegangan), dan seluruh beban-beban eksternal bekerja yaitu :

- beban berat sendiri balok / gelagar = MG
- beban palat = MS
- beban mati = MD
- beban hidup = ML
- beban eksternal total adalah $MT = MG + MS + MD + ML$

Telah diketahui bahwa makin mendekati tumpuan pada ujung komponen, nilai momen makin kecil, maka pola tegangan dengan sendirinya akan berubah menyesuaikan.

Menurut SK-SNI, tegangan ijin beton untuk struktur lentur adalah sebagai berikut :

1. Saat Transfer

- serat terluar mengalami tegangan tekan $- 0,60 \cdot f_{ci}$
- serat terluar mengalami tegangan tarik $0,25 \sqrt{f'_{ci}}$

2. Saat Layan

- serat terluar mengalami tegangan tekan $- 0,45 \cdot f_c$
- serat terluar mengalami tegangan tarik $0,25 \sqrt{f'_c}$

2.7.2 Kehilangan Gaya Pratekan

Kehilangan gaya pratekan yang diijinkan untuk sistem pratarik sebesar $\pm 25\%$ dan untuk sistem pascatarik sebesar $\pm 20\%$. Gaya pratekan efektif

merupakan gaya pratekan awal dikalikan dengan rasio kehilangan gaya pratekan, sedangkan rasio gaya pratekan itu sendiri merupakan pengurangan dari besarnya kehilangan gaya pratekan. Untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada persamaan berikut.

$$P_e = R.P_o$$

$$R = 1 - LOF$$

dengan : P_o : Gaya pratekan awal

P_e : Gaya pratekan efektif

R : Rasio kehilangan gaya pratekan

LOF : kehilangan gaya pratekan

LOF untuk Pratarik : $\pm 25\%$; LOF untuk Pascatarik : $\pm 20\%$

2.8 Karakteristik Bahan

2.8.1 Beton

Beton yang merupakan unsur utama dari struktur beton komposit adalah beton pratekan dan pelat beton cor ditempat. Kekuatan masing-masing beton tersebut berbeda satu sama lain. Untuk beton pratekan dibutuhkan mutu beton yang tinggi, biasanya $f'_c \geq 30$ Mpa dan harus melebihi mutu beton pada beton pelat cetak ditempat. Berat jenis beton nilainya bervariasi antara 15 %_d 25 KN/m³.

2.8.2 Baja

Sebagai salah satu unsur dari beton pratekan selain digunakan mutu beton tinggi juga diperlukan baja dengan mutu tinggi untuk menghasilkan gaya pratekan

dan gaya tarik pada beton pratekan tersebut, biasanya $f_{pu} \geq 1700$ Mpa. Baja mutu tinggi pada sistem pratekan menggunakan kawat (*wire*), untai kawat (*strand*) dan batang (*bar*). Pada beton komposit tegangan geser yang terjadi pada permukaan antara dua beton (pracetak dan pelat cor ditempat) akan ditahan oleh kekasaran unit pracetak dan *dowel stud connector* yang terbuat dari baja.

2.8.3 Bahan Pelengkap

Bahan pelengkap yang diperlukan beton pracetak pratekan untuk mengisi selubung tendon adalah berupa adukan semen, air dan pasir halus atau kombinasinya. Pada sistem pratarik tidak diperlukan selubung tendon, sementara pada sistem pascatarik ada dua macam tendon yaitu tendon terkat dan tendon tak terkat.

Selubung yang digunakan biasanya terbuat dari logam yang telah digalvanasi atau jalur dari baja yang disambung memanjang dengan sambungan yang fleksibel atau semi kaku. Bila digunakan sistem pratekan pascatarik tanpa rekatan dan sistem pratarik maka biasanya digunakan plastik atau kertas tebal yang telah diberi minyak sebagai pembungkus dan digunakan tendon untuk mempermudah penarikan dan mencegah terjadinya karat. Sedangkan bila menggunakan sistem pascatarik dengan rekatan maka untuk merekatkan tendon pada beton setelah penarikan, semen untuk *grout* disuntikkan. Jika tidak menggunakan adukan semen, air dan pasir sebagai bahan *grouting* bisa pula digunakan *fly-ash* dan *pozzolan* yang juga biasa digunakan sebagai bahan pengisi.

2.9 Kapasitas Lentur Struktur Balok Komposit

Pada metode elastis karena perbedaan modulus elastisitas antara beton pracetak dan pelat beton, maka dalam perhitungannya digunakan lebar modifikasi sayap (btr). Akibat dari momen tampang non komposit dapat diabaikan tanpa kesalahan yang fatal pada saat tahap pembebanan berlebih. Perbedaan kuat desak beton saat pemberian tegangan pada kedua material akan mengakibatkan tegangan tidak menerus pada permukaan singgung.

Momen tahan dipengaruhi oleh baja bukan beton, dan pada kebanyakan kasus yang terjadi kekuatan didasarkan pada bagian yang terlemah dari penampang komposit yaitu pada pelat beton cor ditempat.

Menurut teori kekuatan batas, penampang mencapai keseimbangan regangan bila pada serat tekan terluar beton mencapai regangan hancur $\epsilon = 0,003$ dan pada saat yang bersamaan baja mencapai regangan leleh. Baja pratekan tidak memperlihatkan titik luluh secara jelas, maka konsep menggunakan fps sebagai pengganti fy. SK-SNI memberikan batasan rasio tulangan pratekan :

$$\omega = \frac{\rho p \cdot fps}{f'c} \leq 0,36 \cdot \beta 1 \dots \dots \dots (2.14)$$

$\beta 1$ = konstata yang tergantung pada mutu beton, untuk beton pracetak pratekan digunakan nilai $\beta 1$ sebagai berikut :

$$\beta 1 = 0,85 - 0,008(f'c - 30) \geq 0,65 \dots \dots \dots (2.15)$$

dengan nilai rasio tulangan pratekan :

$$\rho p = \frac{Aps}{be \cdot dp} \dots \dots \dots (2.16)$$

Batasan rasio tulangan pratekan pada dasarnya untuk menjamin terjadinya penampang bertulang liat / daktail, serta memberi batas maksimum letak garis netral sebesar 0,423 dp dari serat tekan pada saat M_n dicapai. Keseimbangan gaya-gaya dalam :

$$C = T$$

$$\text{Gaya tekan : } C = 0,85 \cdot f'_c \cdot S \cdot a$$

$$\text{Gaya tarik : } T = A_{ps} \cdot f_{ps}$$

Maka tegangan lentur / momen nominal tersedia persamaannya sebagai berikut :

$$M_n = T \left(d_p - \frac{a}{2} \right) \dots \dots \dots (2.17)$$

momen nominal yang diperlukan persamaannya sebagai berikut :

$$M_{n\text{perlu}} = \frac{M_u}{\phi} = \frac{1,2 \cdot (M_G + M_S + M_D) + 1,6 \cdot M_L}{0,85} \dots \dots \dots (2.18)$$

dimana M_n perlu harus $\leq M_n$ tersedia

sedang nilai f_{ps} menurut SK-SNI dihitung dengan persamaan :

a. tendon terekat (pratarik dan pascatarik dengan *grouting*)

$$f_{ps} = f_{pu} \left(1 - \frac{\gamma_p \cdot \rho_p \cdot f_{pu}}{\beta_1 \cdot f'_c} \right) \dots \dots \dots (2.19)$$

dengan nilai $\gamma_p = 0,40$ karena pada beton pratekan menggunakan kabel dengan relaksasi rendah.

b. tendon tak terkat

- Bila perbandingan antara bentang terhadap tinggi komponen ≤ 35 maka :

$$f_{ps} = f_{se} + 70 + \frac{f'c}{100 \cdot \rho_p} \dots \dots \dots (2.20)$$

dimana $f_{ps} \leq f_{py}$ dan $f_{ps} \leq f_{se} + 400$

- Bila perbandingan antara bentang terhadap tinggi komponen > 35 maka :

$$f_{ps} = f_{se} + 70 + \frac{f'c}{300 \cdot \rho_p} \dots \dots \dots (2.21)$$

dimana $f_{ps} \leq f_{py}$ dan $f_{ps} \leq f_{se} + 200$

jika nilai $f_{ps} > f_{py}$, maka diambil nilai f_{ps} adalah f_{py}

$$f_{se} \geq 0,50 \cdot f_{pu} \quad ; \quad f_{se} = \frac{P_e}{A_{ps}} \dots \dots \dots (2.22)$$

Keterangan :

f_{se} = tegangan efektif tulangan pratekan

f_{ps} = tegangan dalam tulangan pratekan pada saat M_n dicapai

M_n = momen nominal / kapasitas momen lentur penampang

d_p = jarak serat tekan terluar ketitik berat tulangan pratekan

f_{pu} = kuat tarik yang disyaratkan untuk tendaon

A_{ps} = luas tendon

2.10 Tata Letak Tendon

Penampang suatu balok pratekan diatas dua tumpuan ditentukan oleh tampang dimana terjadi momen maksimum dan tampang diujung balok.

- Penampang dimana terjadi momen maksimum yang umumnya terjadi ditengah bentang, ditentukan oleh dua keadaan yaitu :

- saat transfer, dengan momen M_O
- saat layan, dengan momen $M_T = M_G + M_S + M_D + M_L$

pada daerah ini tendon (ekivalen cgs) diletakkan sedekat mungkin pada sisi bawah balok, agar diperoleh lengan momen akibat gaya dalam maksimum, tetapi harus memperhatikan besar M_G agar pada saat transfer tidak terjadi tegangan tarik $> f_{ti}$, dan juga harus memperhatikan jarak minimum dari selimut serat tekan beton terluar kepusat tendon.

- Pada ujung balok, perencanaan dengan melihat luas yang diperlukan untuk perlawanan terhadap geser, letak pelat bantalan, jarak angkur dan jarak bersih dongkrak. Pada ujung balok karena $M = 0$, maka tendon sebaiknya diletakkan didalam kern agar tidak terjadi tegangan tarik, atau tendon diletakkan sedemikian agar cgs berimpit dengan cgc yang memberikan tegangan merata, dengan demikian letak tendon (cgs) dipengaruhi oleh besar momen pada setiap titik, dimana besar eksentrisitas berubah sesuai dengan perubahan momen.

1. Batas bawah letak aman tendon

$$a_{\min} = \frac{MG}{P_o} \quad \text{diukur dari garis kern bawah}$$

$$eb = a_{\min} + Kb \quad \text{diukur dari garis netral / cgc}$$

2. Batas atas letak aman tendon

$$a_{\max} = \frac{Ml'}{Pe} \quad \text{diukur dari garis kern atas}$$

$$et = a_{\max} - Kt \quad \text{diukur dari garis netral / cgc}$$

Apabila pada struktur diperbolehkan terjadi tegangan tarik sampai batas tertentu (tegangan tarik ijin) baik pada saat transfer maupun layan, daerah tendon diperlebar sedikit dari batas sebelumnya, batas bawah bertambah eb' dan batas atas bertambah et' . Saat transfer bila diperkenankan terjadi tegangan tarik sebesar tegangan tarik ijin (f_{ti}) pada serat atas, maka :

$$eb' = \frac{f_{ti} \cdot A_p \cdot Kb}{P_o}$$

$$et' = \frac{f_{ts} \cdot A_p \cdot Kt}{Pe}$$

untuk penarikan sistem pascatarik luas penampang yang digunakan adalah $A_p + A_t$ untuk tampang transformasi dan $A_p - A_n$ untuk tampang netto.

Perencanaan tata letak tendon dilakukan dengan peninjauan pada tengah bentang, seperempat bentang dan ujung balok. Dengan momen masing-masing sebesar :

Tengah bentang :
$$M = \frac{1}{8} W \cdot L^2$$

Seperempat bentang :
$$M = \left(\frac{1}{2} W \cdot L\right) \cdot \frac{L}{4} - \left(W \cdot \frac{L}{4} \cdot \frac{L}{8}\right) = \frac{3}{32} W \cdot L^2$$

Tumpuan / Ujung balok : $M = 0$