

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Pengertian Struktur Beton Komposit

2.1.1 Tinjauan Umum Struktur Komposit

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

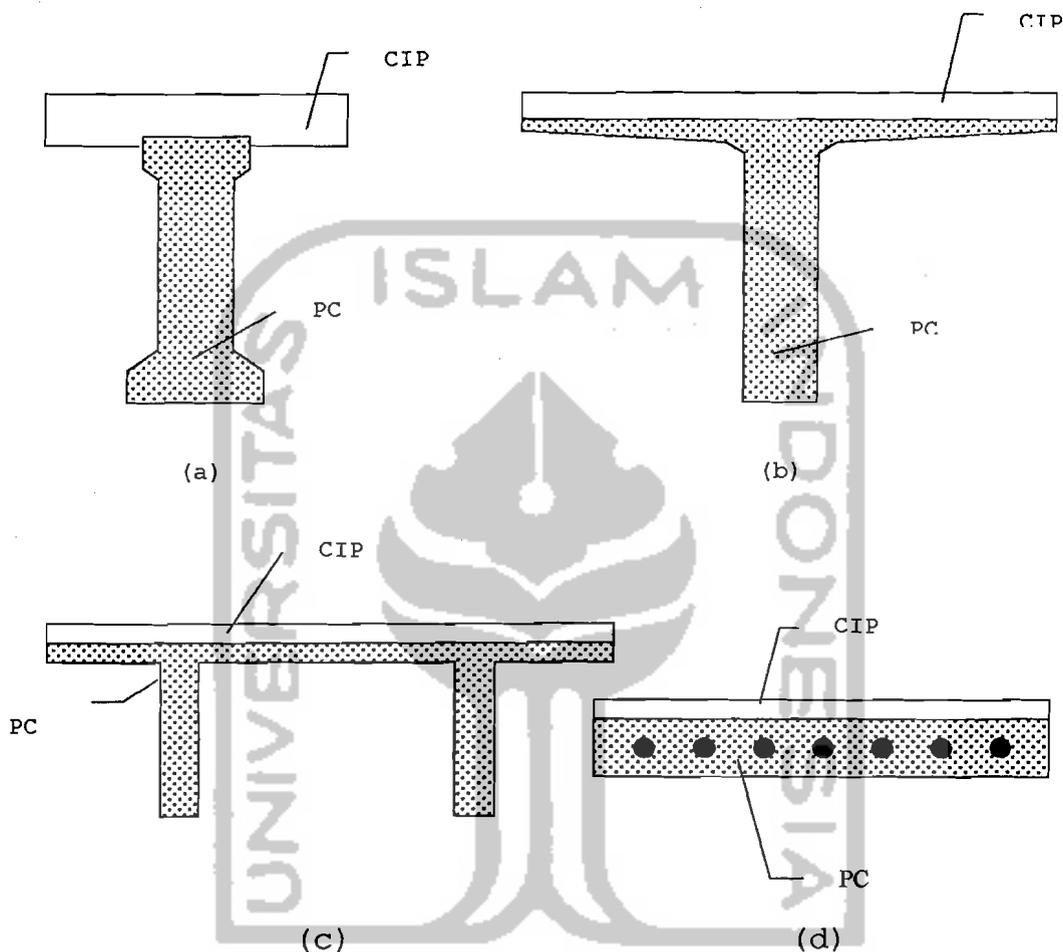
Istilah konstruksi komposit pada struktur beton prategang adalah konstruksi gabungan dari beton pracetak prategang (balok) dengan beton cor ditempat (pelat). Bentuk elemen-elemen pracetak prategang antara lain balok T tunggal, T ganda dan I serta pelat berongga. Pada pelaksanaan konstruksi komposit biasanya pelat beton cor ditempat digunakan sebagai penutup (topping) dan biasanya tanpa tulangan. Selain itu terdapat juga struktur komposit menggunakan balok I

pracetak prategang yang dikombinasikan dengan pelat beton bertulang (cor langsung ditempat) sehingga kemudian perilaku balok berubah menjadi balok T (struktur balok hibrid). Jika balok tersebut ditegangkan setelah pelat penutup mengeras maka analisa perilaku balok adalah balok T komposit. Sedangkan jika balok I ditegangkan sebelum pengecoran pelat maka analisa dilakukan pada balok sebelum komposit (tampang I) dan sesudah menjadi komposit (tampang T).

Bentuk dari struktur komposit yang umum digunakan dapat dilihat seperti pada gambar 2.1. Bagian elemen pracetak (PC) berarsir dan bagian elemen pelat cor ditempat (CIP) tidak berarsir.

Tampang balok pada gambar 2.1a sering digunakan pada struktur jembatan jalan raya dengan bentang pendek atau menengah. Sedangkan tampang balok T tunggal seperti pada gambar 2.1b sering digunakan pada struktur dengan bentang menengah sampai yang panjang. Balok ini sering digunakan untuk struktur pelat atap atau sistem pelat lantai seperti areal parkir bertingkat. Kemudian untuk tampang struktur komposit yang menggunakan balok tampang T ganda, gambar 2.1c, sering digunakan sebagai balok untuk bentang pendek atau menengah. Dan pelat

berongga (*Hollowcore*), gambar 2.1d, digunakan pada struktur lantai.



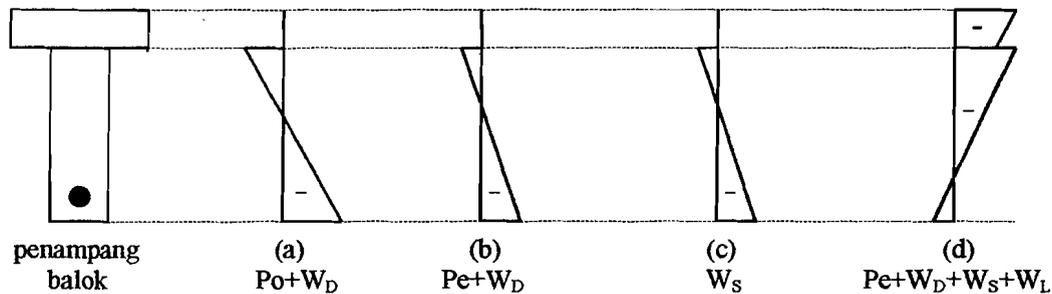
Gambar 2.1: Tipe-tipe tampang struktur komposit, (a) balok I, (b) balok T tunggal, (c) balok T ganda, (d) pelat berongga (*hollowcore*).

Perencanaan pelat beton penutup (*topping*) biasanya dengan ketebalan 2 atau 3 inci untuk pelat lantai bangunan jika direncanakan sebagai elemen non struktural, sedangkan apabila dianggap sebagai elemen

struktural atau digunakan untuk pelat pada struktur jembatan ketebalannya direncanakan lebih dari 3 inci.

Beberapa hal penting yang harus diperhatikan dalam merencanakan balok komposit, antara lain kapasitas momen, kapasitas geser, mekanisme gaya-gaya yang bekerja dan perilaku balok setelah menerima beban kerja.

Pada Tugas Akhir ini akan diuraikan mengenai struktur beton komposit antara balok pracetak prategang dengan pelat beton cor langsung di tempat (cast in-place). Gambar 2.2 menunjukkan distribusi tegangan penampang balok komposit ditengah-tengah bentang, balok tampang T, dimana pada pelaksanaanya balok pracetak prategang diberi gaya prategang terlebih dahulu sebelum pengecoran pelat. Pada pelaksanaan struktur ini balok menggunakan perancah sehingga beban pelat belum bekerja pada saat belum menjadi komposit dan kemudian perancah dilepas setelah struktur menjadi komposit.



Gambar 2.2: Tegangan penampang komposit

Pada gambar 2.2 diperlihatkan distribusi tegangan untuk berbagai tahap pembebanan.

1. Karena gaya prategang awal dan berat sendiri balok, pada serat bawah akan terjadi desak dan tarik pada serat atas. Gaya tarik T pada baja dan gaya tekan C pada beton membentuk kopel penahan dengan lengan momen yang kecil.
2. Setelah terjadi kehilangan gaya prategang, gaya prategang efektif dan berat balok akan menghasilkan tegangan yang lebih rendah pada serat bawah dan tarikan atau tegangan yang kecil pada serat atas. Kopel $C-T$ akan bekerja dengan lengan momen yang lebih besar.
3. Pelat yang dicor ditempat diatas balok pracetak beratnya akan dipikul oleh perancah, sehingga tidak akan menimbulkan tambahan tegangan.
4. Setelah tumpang menjadi komposit perancah dilepas dan semua beban akan bekerja, yaitu beban sendiri,

beban akibat pelat, beban hidup dan beban mati yang lain. Akibat beban-beban tersebut akan menghasilkan distribusi tegangan seperti pada gambar (d), dengan sedikit tarikan atau tekanan pada serat bawah, tetapi dengan tegangan tekan yang tinggi pada serat atas balok dan pelat. Kopel T-C sekarang bekerja dengan lengan momen yang cukup besar.

Untuk mencegah terjadinya kehancuran akibat gaya horisontal, balok pracetak prategang dibuat menyatu dengan pelat cor beton ditempat sedemikian sehingga menjadi kesatuan yang monolit. Kerja beton komposit antara dua komponen akan tercapai bila terdapat tahanan geser antara kedua komponen tersebut. Tahanan Geser akan terjadi dengan membuat kasar permukaan komponen beton pracetak atau dengan memberi "stud connector" yang biasanya berupa dowel. Kasus diatas adalah kasus yang sederhana dari kerja komposit, ada beberapa kasus lain seperti beton pracetak dan bagian yang dicor ditempat diletakkan pada begesting yang ditumpu dibawahnya dan dapat dibongkar setelah pelat beton mengeras. Hal ini memungkinkan seluruh penampang komposit untuk menahan momen yang dihasilkan oleh berat pelat, jadi balok pracetak praktis tidak memikul berat sendiri.

Pada unit pratekan yang berkekuatan tinggi tendon baja digunakan untuk menahan beban pada daerah tarik, sedangkan beban pada daerah tekan ditahan oleh beton cor langsung ditempat yang memiliki kekuatan relatif rendah.

2.1.2 Macam Konstruksi Komposit

Ditinjau dari pelaksanaan pengerjaannya konstruksi beton komposit dapat dibagi menjadi dua metode pelaksanaan.

1. Metode Konstruksi dengan Perancah (Fully Shored Construction)

Pada metode Konstruksi ini tegangan-tegangan beban mati yang timbul pada unit-unit pratekan pracetak dapat diminimalisasi dengan memberikan perancah sewaktu pengecoran pelat (Cast in place) dilaksanakan.

Pada struktur beton prategang komposit terjadi dua keadaan, yaitu sebelum struktur menjadi komposit dan setelah struktur menjadi komposit. Nilai tegangan-tegangan yang terjadi adalah sebagai berikut ini.

a. Tegangan sebelum terjadi komposit

$$f_t = -\frac{P_e}{A_{cp}} \left(1 - \frac{e_p C_{tp}}{r_p^2} \right) - \frac{M_D}{S_{tp}} \quad (2.1)$$

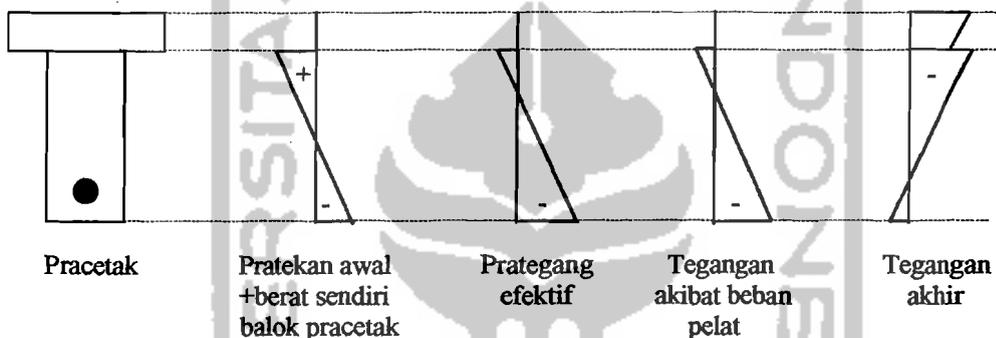
$$f_b = -\frac{P_e}{A_{cp}} \left(1 + \frac{e_p C_{bp}}{r_p^2} \right) + \frac{M_D}{S_{bp}} \quad (2.2)$$

b. Tegangan setelah terjadi komposit

$$f_t = -\frac{P_e}{A_{cp}} \left(1 + \frac{e_p C_{tp}}{r_p^2} \right) - \frac{M_D}{S_{tp}} - \frac{M_{SD} + M_{CSD} + M_L}{S_{tc}} \quad (2.3)$$

$$f_b = -\frac{P_e}{A_{cp}} \left(1 + \frac{e_p C_{bp}}{r_p^2} \right) + \frac{M_D}{S_{bp}} + \frac{M_{SD} + M_{CSD} + M_L}{S_{bc}} \quad (2.4)$$

Distribusi tegangan pada metode ini dapat dilihat pada gambar 2.3.



Gambar 2.3: *Distribusi tegangan konstruksi komposit dengan perancah*

2. Metode Konstruksi Tanpa Perancah (Unshored Construction)

Pada metode ini unit pracetak tidak diberi perancah sewaktu pelaksanaan pengecoran beton pelat (cast in place) dilaksanakan. Tegangan-tegangan yang timbul pada unit pracetak karena beban berat sendiri gelagar dan beban mati dari beton cetak diletakkan.

Pada struktur beton prategang komposit terjadi dua keadaan, yaitu sebelum struktur menjadi komposit dan

setelah struktur menjadi komposit. Tegangan-tegangan yang terjadi adalah sebagai berikut ini.

a. Tegangan sebelum terjadi komposit

$$f_t = -\frac{P_e}{A_{cp}} \left(1 - \frac{e_p C_{tp}}{r_p^2} \right) - \frac{M_D + M_{SD}}{S_{tp}} \quad (2.5)$$

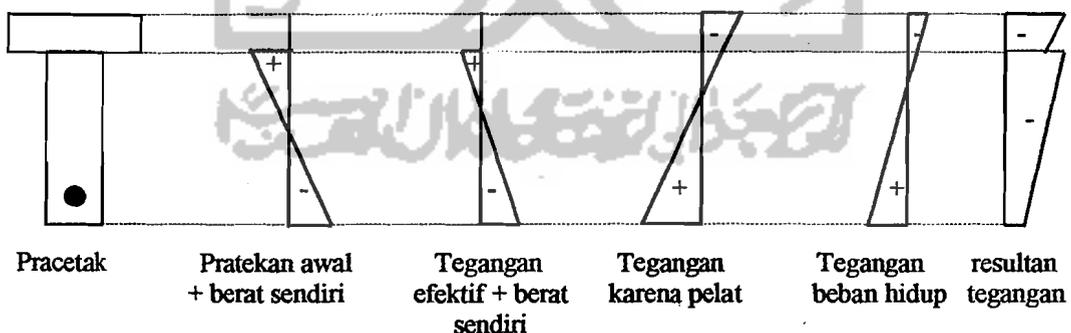
$$f_b = -\frac{P_e}{A_{cp}} \left(1 + \frac{e_p C_{bp}}{r_p^2} \right) + \frac{M_D + M_{SD}}{S_{bp}} \quad (2.6)$$

b. Tegangan setelah terjadi komposit

$$f_t = -\frac{P_e}{A_{cp}} \left(1 - \frac{e_p C_{tp}}{r_p^2} \right) - \frac{M_D + M_{SD}}{S_{tp}} - \frac{M_{CSD} + M_L}{S_{tc}} \quad (2.7)$$

$$f_b = -\frac{P_e}{A_{cp}} \left(1 + \frac{e_p C_{tp}}{r_p^2} \right) + \frac{M_D + M_{SD}}{S_{tp}} + \frac{M_{CSD} + M_L}{S_{tc}} \quad (2.8)$$

Distribusi tegangan pada metode ini dapat dilihat pada gambar 2.4.



Gambar 2.4: Distribusi tegangan konstruksi komposit tanpa perancah

2.2 Konsep Dasar Beton Prategang

Karena struktur beton komposit merupakan struktur gabungan dari beton pracetak prategang dengan beton

cetak ditempat, maka perlu dijelaskan mengenai beton prategang sebagai salah satu unsur dari struktur beton komposit.

Beton prategang merupakan salah satu dari hasil perkembangan teknologi didunia konstruksi. Beton prategang merupakan kombinasi aktif dari beton berkekuatan tinggi dan baja mutu tinggi. Hal ini dapat dicapai dengan menarik baja (tendon) dan menahannya ke beton, sehingga akan mengakibatkan beton pada keadaan tertekan. Atau beton prategang adalah beton yang mengalami tegangan internal yang besar dan distribusi tegangan sedemikian rupa sehingga dapat mengimbangi beban eksternal sampai batas tertentu, tegangan akhir yang terjadi adalah akibat beban eksternal.

Ada tiga macam konsep yang berbeda yang dapat digunakan untuk menganalisa sifat dasar beton prategang.

2.2.1 Sistem Prategang untuk Mengubah Beton Menjadi

Bahan yang Elastis

Pada sistem ini beton ditransformasikan dari bahan yang bersifat getas menjadi bahan yang bersifat elastis dengan cara memberikan tekanan atau tegangan terlebih dahulu (penarikan tendon/gaya prategang) P_0 . Pada waktu gaya prategang dialihkan, $T=P_0$. Setelah kehilangan gaya

prategang $T=P_e$. Meskipun nilai T berubah pada waktu balok melentur akibat pembebanan, perubahan tersebut sangat kecil dan pada perencanaan dapat diabaikan.

Konsep ini merupakan ide dari Eugene Freyssinet, yang akibat dari penarikan tendon, beton yang semula tidak mampu menahan tarik menjadi mampu menahan tegangan tarik. Sehingga dapat dikatakan tidak ada tegangan tarik pada beton dan dapat diambil kesimpulan 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 prategang dan pembebanan eksternal dengan tegangan tarik akibat gaya eksternal dilawan oleh tegangan tekan akibat gaya prategang. Retak yang terjadi pada beton dapat dicegah atau dikurangi oleh gaya prategang 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.

1. Tendon secara konsentris

Gaya prategang (P) pada penarikan tendon diletakkan pada titik berat penampang atau garis netral penampang seperti terlihat pada gambar 2.5. Gambar 2.6 adalah distribusi tegangan yang terjadi pada balok dengan tendon konsentris. Akibat gaya prategang P , timbul tegangan tekan merata sebesar :

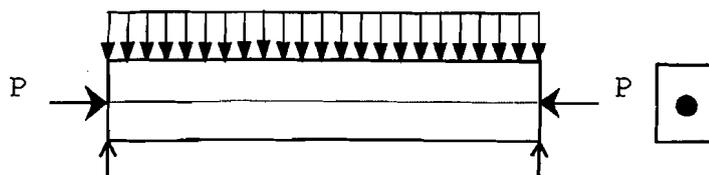
$$f = \frac{P}{A} \quad (2.9)$$

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

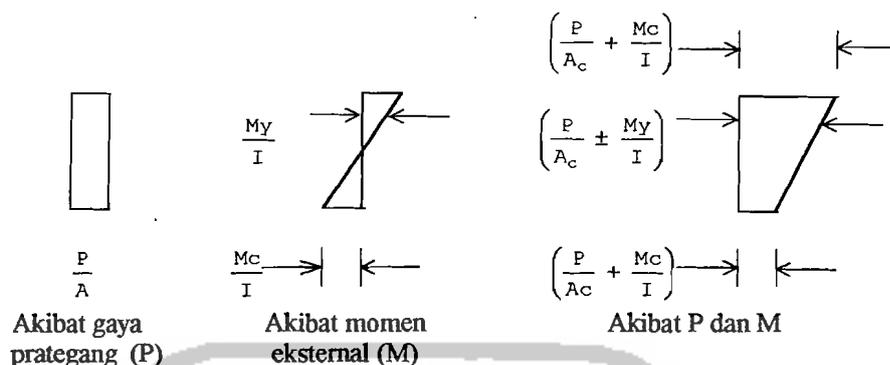
$$f = \frac{M \cdot y}{I} \quad (2.10)$$

Tegangan akhir yang terjadi akibat gaya prategang dan momen eksternal adalah sebagai berikut :

$$f = \frac{P}{A} \pm \frac{M \cdot y}{I} \quad (2.11)$$



Gambar 2.5: Penampang beton dengan tendon konsentris

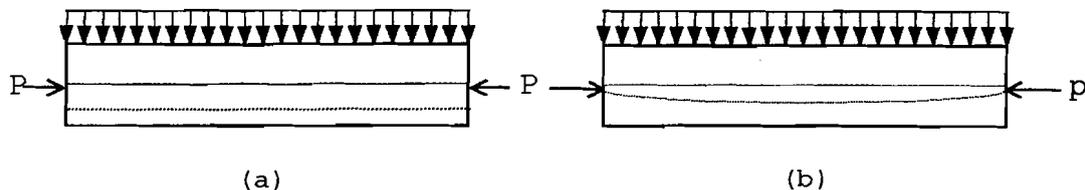


Gambar 2.6: Distribusi tegangan sepanjang penampang beton tendon konsentris

2. Tendon Secara Eksentris

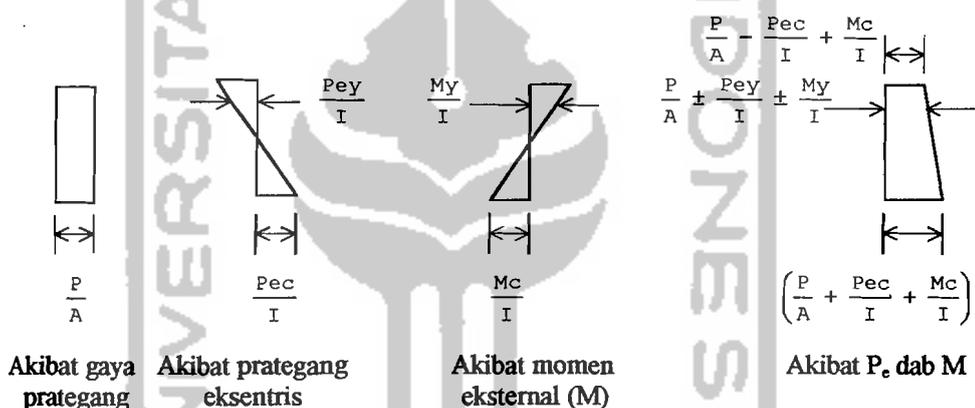
Pada cara ini tendon ditempatkan secara eksentris terhadap titik berat penampang beton pracetak. Eksentrisitas dapat berupa garis parabola maupun sejajar dengan garis netral, seperti pada gambar 2.7. Pada resultan gaya tekan P pada beton bekerja pada titik berat tendon yang berjarak e dari garis netral beton. Akibat gaya prategang yang eksentris beton dibebani oleh momen dan beban langsung sehingga akibat gaya prategang tersebut dan momen yang dihasilkan oleh sistem prategang tersebut maka tegangan akhir yang terjadi adalah sebagai berikut :

$$f = -\frac{P}{A} \pm \frac{P \cdot e \cdot c}{I} \pm \frac{M \cdot c}{I} \quad (2.12)$$



Gambar 2.7: Balok dengan tendon eksentrisitas tetap dan parabola

Distribusi tegangan pada balok prategang dengan eksentrisitas e adalah seperti pada gambar 2.8.

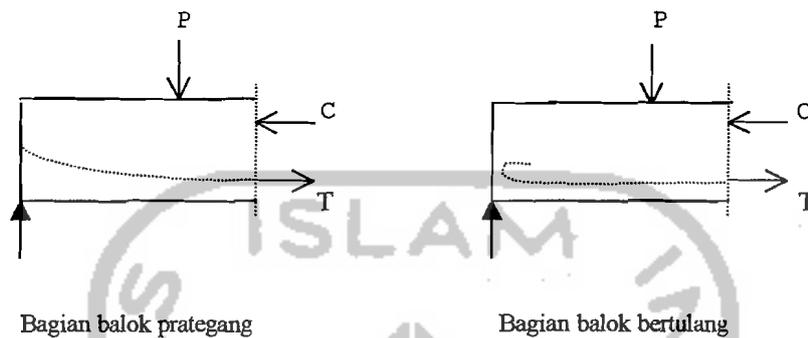


Gambar 2.8: Distribusi tegangan sepanjang penampang beton tendon eksentris

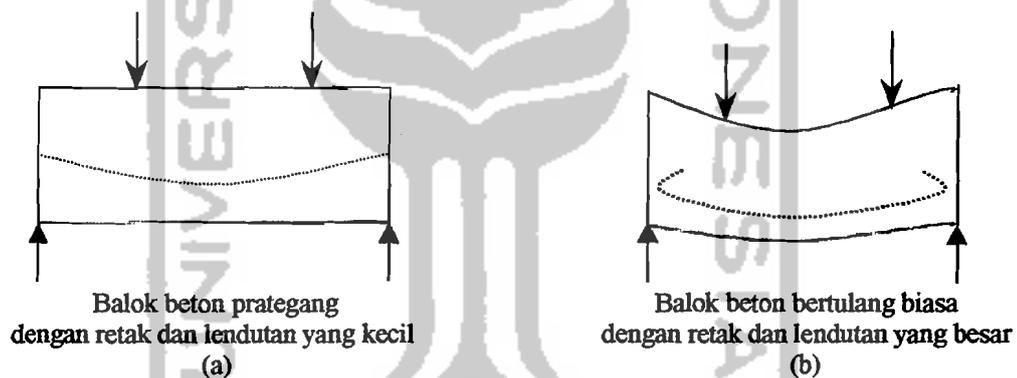
2.2.2 Sistem Prategang Sebagai Kombinasi Baja Mutu Tinggi dengan Beton

Pada konsep ini dianggap beton prategang sebagai kombinasi dari baja dan beton, seperti pada beton bertulang, dimana baja menahan gaya tarik dan beton menahan gaya desak, dengan demikian kedua bahan membentuk kopel penahan untuk melawan kopel eksternal (gambar 2.9). Konsep ini merupakan konsep yang mudah

bagi perencana yang terbiasa dengan beton bertulang biasa.



Gambar 2.9: Momen penahan internal pada balok beton prategang dan beton bertulang



Gambar 2.10: Balok beton menggunakan baja mutu tinggi

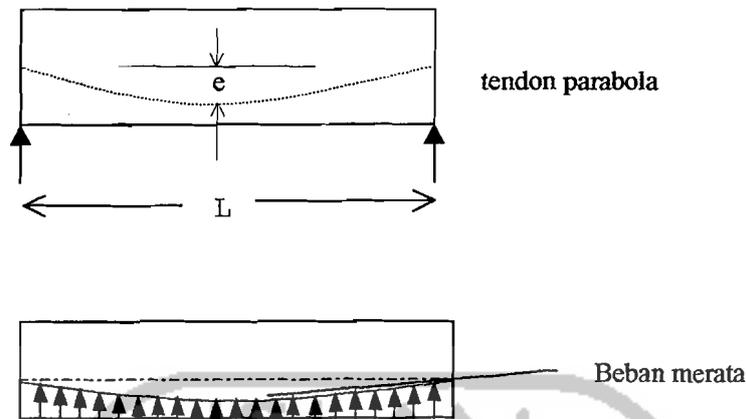
Jika baja mutu tinggi digunakan sebagai tulangan pada beton bertulang maka akan terjadi retak-retak pada bagian tarik sebelum seluruh kekuatan baja bekerja (gambar 2.10b). Pada beton prategang dengan memanfaatkan baja mutu tinggi, baja ditarik terlebih dahulu atau sesudah beton mengeras dan menjangkarkannya ke beton. Gambar 2.10a pada saat beban luar bekerja

penuh bagian tarik mencapai tegangan ijin dan tegangan pada baja juga telah mencapai tegangan ijin sehingga terjadi lendutan yang kecil.

2.2.3 Sistem Prategang untuk Mencapai Keseimbangan Beban

Pada sistem ini pemberian gaya prategang dianggap sebagai suatu usaha untuk membuat kondisi yang seimbang, sehingga komponen struktur yang mengalami lentur tidak mengalami tegangan lentur pada kondisi pembebanan tertentu.

Bila tendon terbungkus beton, maka akan timbul gaya ke atas yang merata menekan beton, yang berlawanan arah dengan gaya untuk mempertahankan posisi tendon. Akibat gaya prategang tendon akan memberikan beban aksial tekan dan beban terbagi rata keatas. Akibat eksentrisitas tendon pada komponen prategang tersebut mengakibatkan adanya momen negatif yang akan mengimbangi momen-momen eksternal, hal ini dapat dilihat pada gambar 2.11.



Gambar 2.11: Balok dengan tendon parabola

Besarnya perimbangan gaya yang dihasilkan oleh tendon dengan gaya-gaya yang terdistribusi secara merata keatas adalah sebagai berikut:

$$W_{\text{imbang}} = \frac{8 \cdot P \cdot e}{L^2} \quad (2.13)$$

$$W_{\text{netto}} = W_{\text{tot kebawah}} - W_{\text{imbang}} \quad (2.14)$$

$$M_{\text{netto}} = \frac{1}{8} \cdot W_{\text{netto}} \cdot L^2 \quad (2.15)$$

Sehingga tegangan-tegangan yang terjadi pada serat penampang adalah

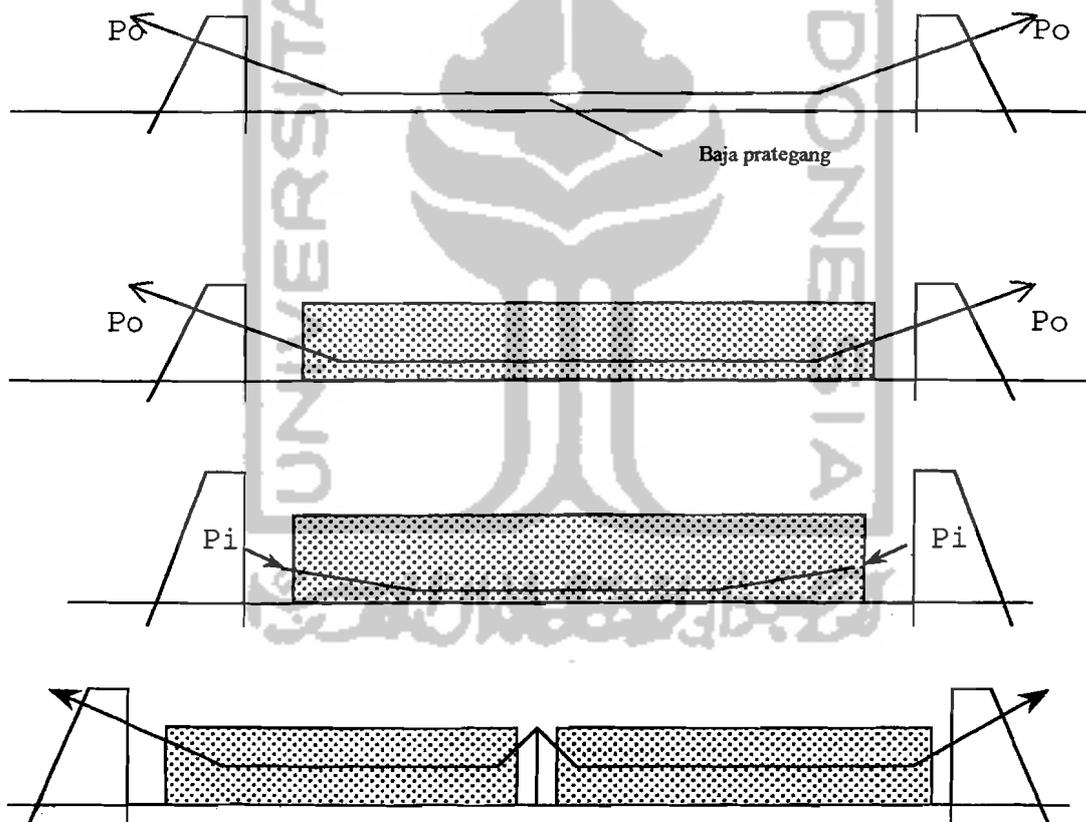
$$f = -\frac{P}{A_c} \pm \frac{M_{\text{netto}} \cdot C}{I_{cp}} \quad (2.16)$$

2.3 Sistem-Sistem Prategang

2.3.1 Beton Prategang Sistem Pratarik (Pretensioning)

Pada sistem prategang pratarik, tendon baja ditegangkan terlebih dahulu diantara blok-blok angkur yang dicetak di atas tanah atau pada perangkat cetakan

pratarik. Dinding tersebut harus dapat menahan gaya tarik tendon dan untuk menahan gaya tersebut dinding diangkurkan ke tanah. Penarikan tendon menggunakan dongkrak hidrolis atau sekrup yang besar. Setelah mencapai umur atau kekuatan tertentu, baja dipotong pada bagian ujung komponen sehingga akan menekan komponen tersebut.



Sistem Hoyer

Gambar 2.12: Sistem prategangan secara pratarik

Pada sistem prategang pratarik, transfer tegangan melalui lekatan yang ditimbulkan antara kawat tendon

dengan dinding disekeliling kawat sepanjang bentang. Untuk produksi massal komponen struktur pratarik, perluasan cara penegangan digunakan beberapa cara, seperti sistem Hoyer yang menggunakan penjepit Dorland di Amerika Serikat dan penjepit Weinberg di Perancis seperti pada gambar 2.12 dan sistem Shorer, sistem Chalos serta sistem-sistem yang lain.

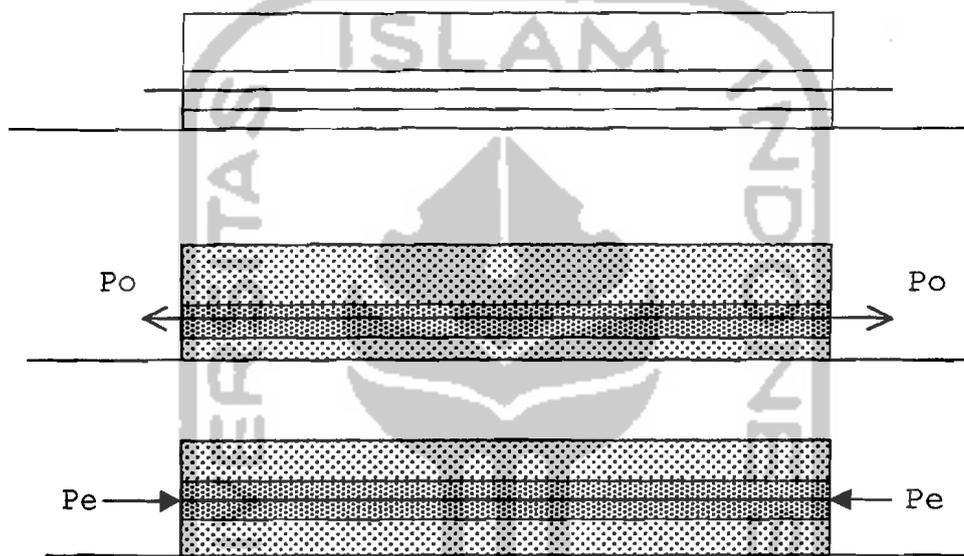
2.3.2 Beton prategang Sistem Pasca tarik (Post-tensioning)

Pada sistem pasca tarik unit-unit beton dicetak terlebih dahulu dengan menempatkan selongsong tendon sesuai koordinat yang direncanakan di dalam beton pracetak. Apabila beton pracetak telah mencapai kekuatan yang disyaratkan maka tendon ditegangkan. Gaya prategang disalurkan dengan angkur-angkur yang berada pada ujung batang. Jika selongsong tendon diisi dengan pasta (grouting) maka gaya prategang disalurkan pada lekatan kawat dengan beton sepanjang bentang tersebut.

Cara penegangan pasca tarik cocok untuk pekerjaan yang dilaksanakan ditempat, dengan bentang menengah sampai bentang yang panjang. Pada sistem pasca tarik memungkinkan pemakaian kabel-kabel melengkung atau dengan eksentrisitas yang bervariasi yang membantu

perencana untuk merubah distribusi tegangan tampang sehingga dapat menahan beban luar secara efisien.

Pada gambar 2.13, pemberian gaya prategang (penarikan tendon) dilakukan dengan menarik tendon kearah longitudinal.



Gambar 2.13: *Penarikan tendon secara longitudinal pada sistem pasca tarik*

2.4 Beban dan Persyaratan Tegangan

2.4.1 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 selalu diperhitungkan karena merupakan beban yang selalu terjadi. Atau beban lainnya yang direncanakan untuk membebani elemen struktur secara tetap dan terus menerus juga diperhitungkan sebagai beban tetap.

2. Beban hidup

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

2.4.2 Faktor beban dan faktor reduksi

Pada kekuatan batas, beban-beban yang digunakan sebagai dasar perhitungan adalah seperti yang telah ditetapkan pada ACI-Code. Beban-beban karakteristik tersebut telah dikalikan dengan faktor beban sesuai dengan kondisi pembebanan. Nilai-nilai faktor beban dan kondisi pembebanan pembebanan menurut ACI-Code dapat dilihat pada tabel 2.1.

Tabel 2.1: Kombinasi beban dan faktor-faktor beban

KOMBINASI BEBAN	FAKTOR BEBAN
Akibat beban hidup dan mati	$U = 1.4D + 1.7L$
Akibat beban hidup, mati dan beban angin	$U = 0.75(1.4D + 1.7L + 1.7W)$ $U = 0.9D + 1.3L$ $U = 1.4D + 1.7L$
Akibat beban hidup, mati dan beban tekanan tanah	$U = 0.75(1.4D + 1.7L + 1.87E)$ $U = 0.9D + 1.43L$ $U = 1.4D + 1.7L$
Akibat beban khusus: - Penurunan - Rangkak dan susut - Perbedaan suhu	$U = 0.75(1.4D + 1.4D + 1.7L)$ $U = 1.4D + 1.7L$

Pembebanan yang digunakan selanjutnya dalam perencanaan balok adalah menggunakan peraturan ACI CODE '89:

$$U = 1,4 D + 1,7L$$

Selain itu koefisien lain yang menentukan dalam perencanaan adalah faktor reduksi kekuatan (Φ). Faktor reduksi ini digunakan untuk menentukan nilai Momen Nominal. Momen nominal terjadi diperoleh dari momen ultimit dibagi dengan faktor reduksi. Nilai momen nominal balok komposit yang terjadi harus lebih kecil atau sama dengan momen nominal rencana (lihat pada analisa kapasitas lentur). Menurut peraturan ACI-Code, besarnya faktor reduksi tergantung pada komponen yang direncanakan, seperti pada tabel 2.2.

Tabel 2.2: faktor reduksi

Komponen struktur	Faktor reduksi(Φ)
Balok atau pelat: Lentur atau momen	0,9
Kolom dengan sengkang biasa	0,7
Kolom dengan sengkang spiral	0,75
Kolom yang menahan beban aksial yang kecil	0,7-0,9
Balok : Geser dan torsi	0,85

2.4.3 Tahap-tahap Pembebanan Balok Sistem Pasca Tarik

Tahap-tahap pembebanan balok sistem pasca tarik 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 harus dihindarkan.

Pada saat diberi gaya prategang kadang-kadang kabel putus disebabkan oleh cacat sewaktu pembuatan, sering kali tegangan maksimal kabel pada saat penarikan mencapai $0,8f_{pu}$ atau $0,94f_{py}$. Pada saat penarikan kekuatan beton harus mencapai maksimal untuk menghindari retak pada beton.

Pada saat peralihan gaya prategang pada sistem pasca tarik dilakukan secara bertahap. Pada keadaan tersebut tidak ada gaya eksternal pada komponen struktur kecuali berat sendiri.

2. Tahap Antara

Tahap ini merupakan tahapan selama pengangkat dan pengangkutan beton pracetak. Hal ini terjadi bila komponen struktur pracetak yang diangkut kelapangan dan dipasang pada tempatnya.

3. Tahap Akhir

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

2.4.4 Dasar Analisa Tegangan

Pada tahap pembebanan balok beton prategang komposit secara garis besar dapat dibedakan menjadi tiga tahap, yang seluruh tahapan harus diperhatikan terhadap tegangan-tegangan yang diijinkan untuk struktur.

Berikut ini syarat-syarat tegangan beton yang dikeluarkan oleh ACI 318-89 untuk komponen struktur

lentur. Tegangan ijin beton sesuai dengan kondisi gaya prategang dan pada tahap beban kerja tidak boleh melebihi nilai rata-rata berikut ini.

1. Tegangan beton sesaat setelah transfer gaya prategang (sebelum kehilangan tegangan, yang merupakan fungsi dari waktu).

- a. Serat terluar mengalami tegangan tekan $0,6f'_{ci}$
- b. Serat terluar mengalami tegangan tarik $3\sqrt{f'_{ci}}$
- c. Serat terluar pada ujung komponen struktur yang didukung sederhana, akan mengalami tegangan tarik $6\sqrt{f'_{ci}}$

Bila tegangan tarik yang dihitung melampaui nilai tersebut diatas, maka harus ditambah dengan memasang tulangan non-prategang pada daerah tarik, untuk menahan gaya tarik total pada beton, yang diasumsikan sebagai suatu penampang yang utuh.

2. Tegangan beton pada tingkat beban kerja (sesudah memperhitungkan semua kehilangan prategang yang mungkin terjadi) tidak boleh melampaui nilai-nilai berikut ini.

- a. Serat terluar mengalami tegangan tekan ... $0,45\sqrt{f'_c}$

b. Tegangan terluar pada daerah tarik yang awalnya mengalami tekan $6\sqrt{f'_c}$

c. Tegangan serat terluar pada daerah tarik yang awalnya mengalami tekan dari komponen struktur $12\sqrt{f'_c}$

3. Tegangan ijin beton dalam butir 1 dan 2 boleh melampaui bila dapat ditunjukkan dengan pengujian dan analisis bahwa penampang strukturnya tidak berkurang.

Sedangkan tegangan tarik ijin baja prategang boleh terjadi menurut ACI Building 318-89 adalah sebagai berikut ini.

1. Gaya dongkrak tendon tidak lebih dari $0,85 f_{pu}$ atau nilai maksimum yang telah ditetapkan pabrik tendon angkur prategang $0,94 f_{py}$

2. Tendon pratarik setelah tegangan transfer tidak lebih dari $0,74 f_{pu}$ $0,82 f_{py}$

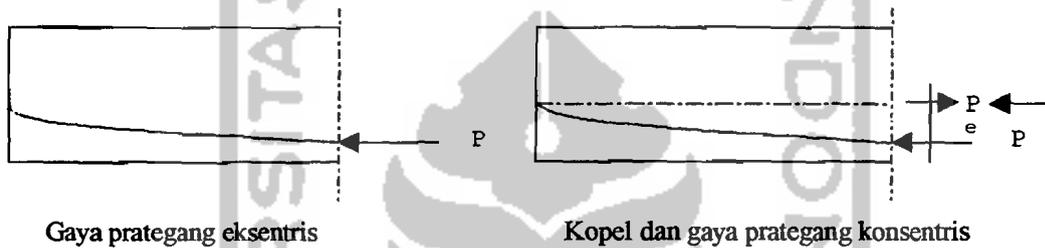
3. Tendon pasca tarik setelah tendon diangkur $0,70 f_{pu}$

Untuk tendon prategang dengan relaksasi rendah digunakan $f_{py} = 0,90 f_{pu}$ dan tendon prategang dengan relaksasi tinggi digunakan $f_{py} = 0,85 f_{pu}$.

2.5 Analisa Tegangan Lentur pada Struktur Beton

Prategang

Pada analisa tegangan lentur struktur beton komposit gaya prategang P bekerja dengan eksentrisitas sebesar e , maka dimungkinkan untuk memecah gaya menjadi gaya yang konsentris P yang melalui titik berat dan momen $P \cdot e$ seperti pada gambar 2.14.



Gambar 2.14: Gaya prategang pada balok

Dengan teori elastis, tegangan serat pada setiap titik akibat P_e diberikan oleh persamaan.

$$f = \frac{M \cdot y}{I} = \frac{P \cdot e \cdot y}{I} \quad (2.17)$$

Resultan tegangan akibat gaya prategang eksentris diberikan oleh persamaan.

$$f = \frac{P}{A_c} \pm \frac{P \cdot e \cdot y}{I} \quad (2.18)$$

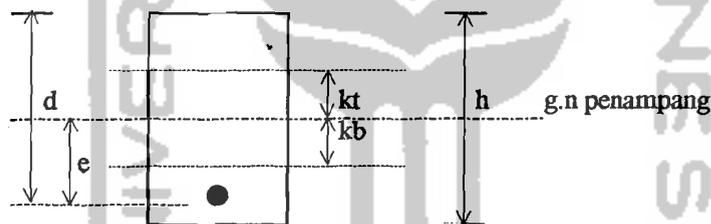
2.5.1 Pola Tegangan Beton Prategang.

Kelebihan beton prategang adalah pada tingkat beban kerja dan besarnya tegangan yang biasanya ditentukan dengan tegangan ijin. Maka bagian utama

perencanaan dan analisa menggunakan beban kerja dan tegangan ijin (Elastis), selain itu juga harus memenuhi syarat-syarat kekuatan sehingga beberapa bagian struktur juga dilakukan analisa dengan metoda kekuatan batas.

Pola tegangan yang terjadi pada sistem prategang pratarik maupun pasca tarik ditinjau pada dua kondisi yaitu pada saat awal dan pada saat layan.

Gambar 2.15 menunjukkan tampang geometris balok prategang.



Gambar 2.15: Penampang geometris balok prategang

Dari gambar diperoleh hasil:

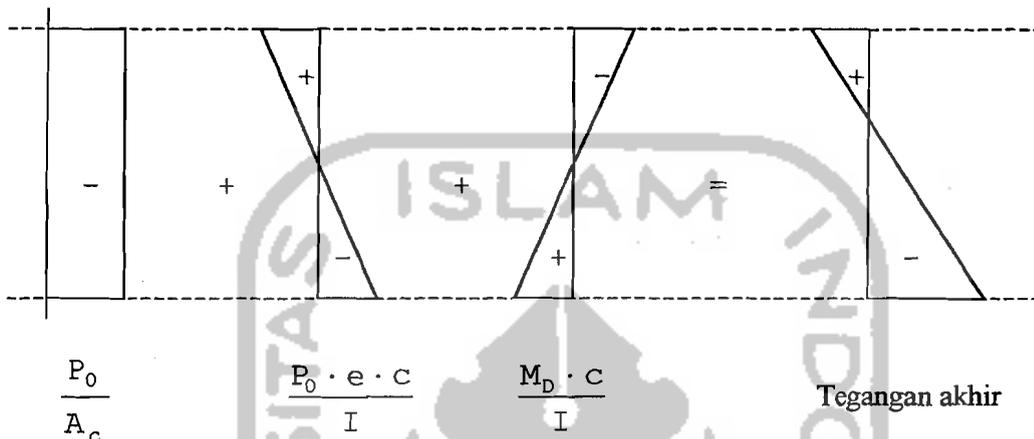
$$k_t = \frac{r^2}{c_b} \quad (2.19)$$

$$k_b = \frac{r^2}{c_t} \quad (2.20)$$

$$r^2 = \frac{I}{A_c} \quad (2.21)$$

1. Saat awal.

Distribusi tegangan balok prategang pada saat awal ditunjukkan pada gambar 2.16.



Gambar 2.16: Diagram tegangan pada saat awal (P_0)

Tegangan akhir yang terjadi:

a. Serat atas

$$f_t = -\frac{P_0}{A_c} + \frac{P_0 \cdot e \cdot c_t}{I} - \frac{M_D \cdot c_t}{I}, \text{ dengan } s_t = \frac{I}{c_t}$$

$$f_t = -\frac{P_0}{A_c} + \frac{P_0 \cdot e \cdot A_c}{s_t \cdot A_c} - \frac{M_D}{s_t}$$

$$f_t = -\frac{P_0}{A_c} \left(1 - \frac{e \cdot A_c}{s_t} \right) - \frac{M_D}{s_t}, \text{ dengan } r^2 = \frac{I}{A_c}$$

$$f_t = -\frac{P_0}{A_c} \left(1 - \frac{e \cdot c_t}{r^2} \right) - \frac{M_D}{s_t} \quad (2.22)$$

b. Serat bawah

$$f_b = -\frac{P_0}{A_c} - \frac{P_0 \cdot e \cdot c_b}{I} + \frac{M_D \cdot c_b}{I}, \text{ dengan } s_b = \frac{I}{c_b}$$

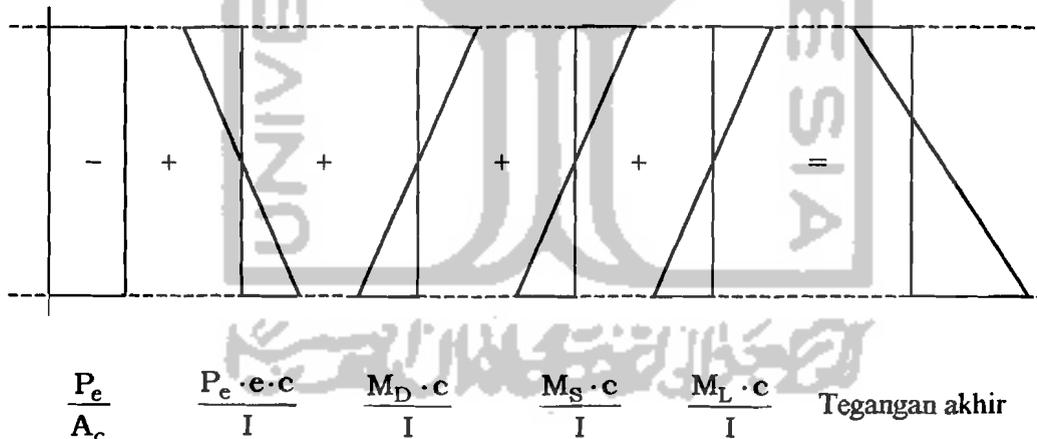
$$f_b = -\frac{P_0}{A_c} - \frac{P_0 \cdot e \cdot A_c}{s_b \cdot A_c} + \frac{M_D}{s_b}$$

$$f_b = -\frac{P_0}{A_c} \left(1 + \frac{e \cdot A_c}{s_b} \right) + \frac{M_D}{s_b}, \text{ dengan } r^2 = \frac{I}{A_c}$$

$$f_b = -\frac{P_0}{A_c} \left(1 + \frac{e \cdot c_b}{r^2} \right) + \frac{M_D}{s_b} \quad (2.23)$$

2. Saat layan

Gambar 2.17 menunjukkan distribusi tegangan balok prategan pada saat layan.



Gambar 2.17: Diagram tegangan pada saat layan (P_e)

Tegangan akhir:

a. Serat atas:

$$f_t = -\frac{P_e}{A_c} \left(1 - \frac{e \cdot c_t}{s_t} \right) - \frac{M_t}{s_t}, \text{ dengan } M_t = M_D + M_S + M_L \quad (2.23)$$

b. Serat bawah:

$$f_b = -\frac{P_e}{A_c} \left(1 + \frac{e \cdot c_b}{s_b} \right) + \frac{M_t}{s_b}, \text{ dengan } M_t = M_D + M_S + M_L \quad (2.24)$$

2.6 Kehilangan Gaya Prategang

Analisis keseluruhan dan rancangan dari komponen struktur beton prategang akan menyertakan pertimbangan gaya-gaya efektif dari tendon prategang pada setiap tahap pembebanan. Adapun tahap-tahap tersebut diberikan menurut T.Y.Lin dan H.Burn 1988 adalah sebagai berikut ini.

1. Sesaat setelah peralihan gaya prategang ke penampang beton, tegangan-tegangan di evaluasi sebagai acuan perilaku. Pengecekan ini termasuk gaya terbesar pada tendon yang bekerja pada beton yang mungkin jauh di bawah kekuatannya pada umur 28 hari, f'_c . Peraturan ACI menunjuk kekuatan beton sebagai f'_{ci} pada tahap permulaan ini dan memberikan tegangan ijin dan tegangan pada beton.
2. Pada beban kerja, setelah semua kehilangan gaya prategang terjadi dan tingkatan prategang efektif jangka panjang telah tercapai, tegangan-tegangan diperiksa lagi sebagai tolak ukur kekuatan. Tegangan efektif pada baja, f_{pe} , setelah terjadi kehilangan

gaya, diasumsikan untuk tendon sementara komponen struktur memikul beban hidup dan beban mati. Juga kekuatan beton kemudian dianggap bertambah menjadi f'_c .

Sulit untuk menyamakan jumlah kehilangan gaya prategang, karena tergantung dari banyak faktor, seperti, sifat-sifat baja dan beton, pemeliharaan dan keadaan kelembaban, besar dan waktu penggunaan gaya prategang.

Kehilangan gaya prategang yang diizinkan untuk pascatarik sebesar 20% dan untuk beton pratarik sebesar 25%. Gaya prategang efektif merupakan gaya prategang awal dikalikan dengan faktor reduksi. Sedangkan faktor reduksi adalah pengurangan dari besarnya kehilangan gaya prategang. Untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada persamaan dibawah ini.

$$P_e = R \cdot P_o$$

$$R = 1 - (\text{Kehilangan gaya prategang})$$

Dengan :

P_e = prategang efektif (KN).

P_o = gaya prategang awal (KN)

R = faktor reduksi gaya prategang

2.7 Karakteristik Bahan

2.7.1 Beton

Beton yang merupakan unsur utama dari struktur beton komposit adalah beton prategang dan beton cor langsung ditempat. Kekuatan masing-masing beton tersebut berbeda satu sama lain. Untuk beton prategang umumnya membutuhkan mutu beton yang tinggi atau kekuatan beton pada beton pracetak prategang lebih tinggi dari pada beton bertulang (cor ditempat). Kekuatan yang disyaratkan adalah kekuatan silinder beton umur 28 hari sebesar 28 sampai dengan 55 Mpa. Mutu beton yang disyaratkan ini merupakan keharusan karena beberapa alasan, baik teknis maupun ekonomis. Seperti, pengangkutan yang direncanakan berdasarkan mutu beton yang tinggi dan penghematan biaya. Untuk beton pracetak prategang spesifikasi kekuatan yang disyaratkan biasanya antara 41 sampai 55 Mpa. Regangan juga terjadi pada beton prategang. Hal ini perlu diperhatikan untuk memperhitungkan kehilangan gaya prategang yang terjadi. Adapun macam-macam yang tersebut antara lain adalah:

1. Regangan elastis

Sebagai nilai rata-rata untuk beton umur 28 hari dan untuk tegangan sampai kira-kira $0,4f'_c$ modulus

sekan akan dapat dihitung dengan rumus empiris. Peraturan ACI untuk beton bertulang merumuskan rumus empiris sebagai berikut ini.

$$E_c = W^{1,5} \cdot 0,043 \sqrt{f'_c}$$

Dimana berat jenis W bervariasi antara 1450 dan 2500 kg/m^3 . Untuk berat beton normal persamaan menjadi sederhana dimana

$$E_c = 4730 \sqrt{f'_c}$$

2. Regangan Lateral.

Dihitung dengan angka Poisson (Poisson Ratio). Karena pengaruh angka Poisson, kehilangan angka prategang berkurang sedikit pada prategang biaksial. Angka Poisson bervariasi dari 0,15 sampai 0,22 untuk beton, rata-rata sekitar 0,17.

3. Regangan rangkak

Rangkak didefinisikan sebagai deformasi yang dipengaruhi waktu yang diakibatkan oleh adanya tegangan. Regangan total akibat rangkak dapat diperkirakan sekitar 0,25 terjadi pada dua minggu pertama setelah penegangan, 0,25 dalam dua sampai tiga bulan, 0,25 dalam satu tahun dan 0,25 terakhir pada tahun-tahun berikutnya.

4. Regangan susut

Berbeda dengan rangkai, susut pada beton adalah kontraksi akibat pengeringan dan perubahan kimiawi yang tergantung pada waktu dan keadaan kelembaban tetapi tidak tergantung pada tegangan. Sebagian dari susut diakibatkan oleh kekeringan beton. Besarnya regangan susut bervariasi terhadap beberapa faktor dan berkisar dari 0.0000 sampai 0,0010 atau lebih besar.

2.7.2 Baja

1. Sebagai salah satu unsur dari beton prategang selain digunakan beton mutu tinggi juga diperlukan baja mutu tinggi untuk menghasilkan gaya prategang dan gaya tarik pada beton prategang. Baja mutu tinggi yang digunakan pada sistem prategang adalah kawat (wire), untaian kawat (strand) dan batang (bar). Untuk sistem pasca tarik, banyak dipakai kawat yang digabungkan secara paralel menjadi kabel. Strand dibuat pabrik dengan memuntir beberapa kawat bersama-sama, jadi mengurangi jumlah satuan yang harus dikerjakan pada pelaksanaan penarikan. Strand seperti juga batang baja mutu tinggi, digunakan pada sistem prategang pascatarik.

2. Pada beton komposit tegangan geser yang terjadi pada permukaan antara dua beton (pracetak dan beton cor langsung ditempat) akan ditahan oleh dowel (stud connector), selain itu oleh kekasaran permukaan unit pracetak. Dowel dibuat dari baja yang terdiri dari beberapa bentuk, bentuk "n", bentuk "u" atau bentuk "I". Dowel tersebut terbuat dari baja dan dapat dilihat pada tabel tulangan pada halaman lampiran.

2.7.3 Bahan Pelengkap

Untuk bahan pelengkap diperlukan pada beton pracetak prategang, bahan ini diperlukan sebagai bahan pengisi untuk selubung tendon. Bahan tambah ini berupa adukan semen, air dan pasir halus atau kombinasinya. Pada sistem pratarik tidak diperlukan selubung tendon. Sementara pada sistem pascatarik ada dua macam selubung, yaitu sistem prategang dengan rekatan (grouting) dan sistem prategang tanpa rekatan (un-grouting).

Selubung yang digunakan biasanya terbuat dari logam yang telah digalvanisasi atau jalur dari baja yang disambung memanjang dengan sambungan yang fleksibel atau semi kaku.

Bila digunakan sistem prategang tanpa rekatan dan sistem prategang pratarik maka biasanya digunakan plastik atau kertas tebal sebagai pembungkus dan digunakan tendon yang telah diberi minyak untuk mempermudah penarikan dan mencegah terjadinya karat. Sedangkan bila menggunakan sistem prategang dengan rekatan maka untuk merekatkan tendon ke beton setelah penarikan semen untuk grout disuntikkan, hal ini untuk mencegah terjadinya karat pada baja. Jika tidak menggunakan pasir sebagai bahan grouting bisa digunakan pula *Fly-ash* dan pozzolan kadang-kadang digunakan sebagai bahan pengisi. Tekanan grouting umumnya berkisar antara 550 sampai 700 Kpa dengan tekanan maksimum ditentukan sebesar 1700 Kpa.