

BAB II

STUDI PUSTAKA

2.1. Konsep Dasar Beton Prategang

Beton adalah bahan yang mampu menahan gaya desak sedang kemampuannya menahan gaya tarik kecil. Dalam perencanaan beton bertulang biasa, bagian dari penampang beton yang menahan tarik biasanya diabaikan, sehingga luasan efektif tampang adalah daerah yang hanya menahan desak, dengan demikian terdapat inefisiensi terhadap luasan yang direncanakan.

Atas dasar ini para ahli berusaha mereduksi gaya tarik yang terjadi pada beton, sehingga keseluruhan penampang beton dapat memaksimalkan kemampuannya dalam menahan gaya desak. Gaya tarik pada beton dapat direduksi dengan memadukan pemakaian beton dan baja mutu tinggi yang terlebih dahulu diberi tegangan awal, untuk memberikan gaya tekan pada beton, prinsip inilah yang dinamakan beton prategang.

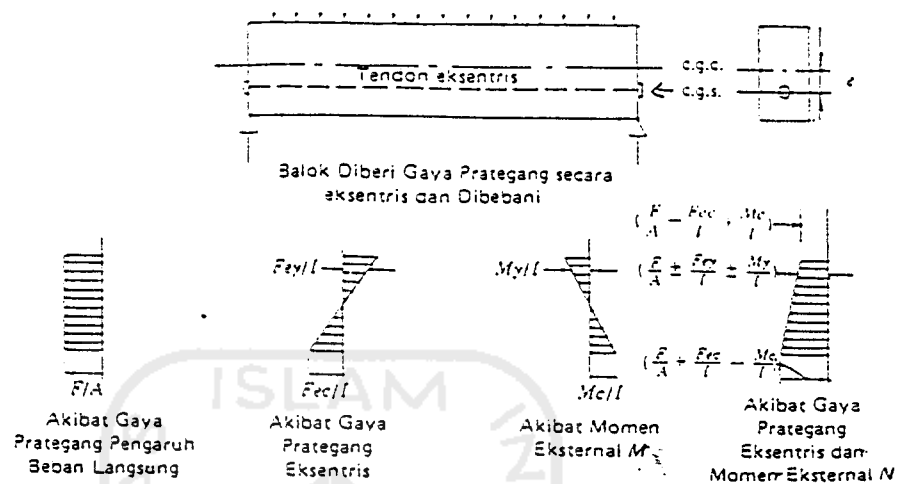
Beton prategang adalah beton yang mengalami tegangan internal dengan besar dan distribusi sedemikian sehingga dapat mengimbangi sampai batas tertentu tegangan yang terjadi akibat beban eksternal. Sistem ini dilakukan dengan menarik kawat baja atau tendon sesuai dengan

kemampuan tegangan izin baja dan beton yang disyaratkan. Konsep yang umum untuk menjelaskan dan menganalisa sifat-sifat dasar dari beton prategang untuk memperoleh desain yang baik dan efisien adalah sebagai berikut:

2.1.1. Sistem prategang untuk mengubah beton menjadi bahan yang elastis.

Konsep ini memperlakukan beton sebagai bahan yang elastis dan mungkin merupakan pendapat yang umum dari para sarjana. Pada dasarnya beton prategang adalah beton yang ditransformasikan dari bahan yang getas menjadi bahan yang elastis dengan memberikan tekanan (desakan) terlebih dahulu pada bahan tersebut. Dari konsep ini lahirlah kriteria bahwa tidak ada tegangan tarik pada beton.

Kriteria tidak terjadi tegangan tarik pada beton, pertama kali dikemukakan oleh *Eeugene Freyssinet*, dari konsep ini dapat diambil kesimpulan bahwa tidak akan terjadi retak tarik pada beton. Dengan demikian beton tidak lagi menjadi bahan yang getas melainkan sebagai material yang elastis. Atas dasar pandangan ini beton divisualkan sebagai benda yang mengalami dua sistem pembebanan yaitu gaya internal prategang dan beban eksternal, dengan tegangan tarik akibat gaya eksternal dilawan oleh tegangan akibat gaya prategang.



Gambar 2.1. Distribusi tegangan pada penampang beton prategang dengan eksentrisitas tetap^[1]

Dari gambar 2.1. diperoleh distribusi terakhir pada penampang sebagai berikut :

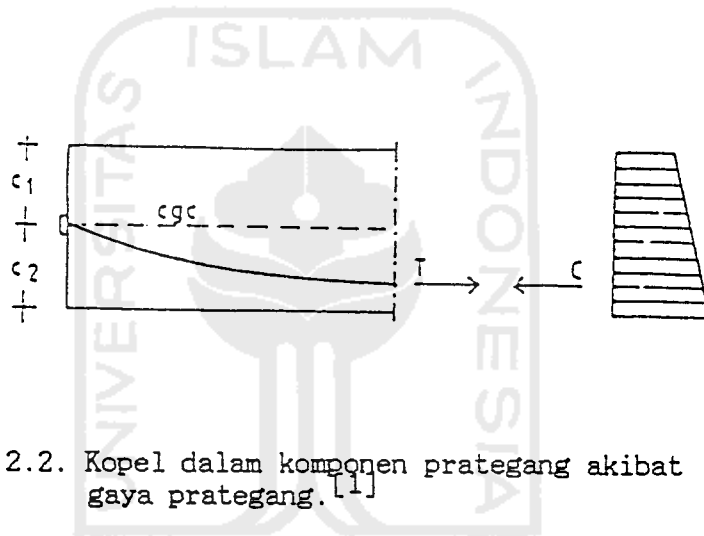
$$f = - \frac{P}{A_c} \pm \frac{P \cdot e \cdot c}{I_c} \pm \frac{M \cdot c}{I_c} \quad (2.1)$$

dengan :

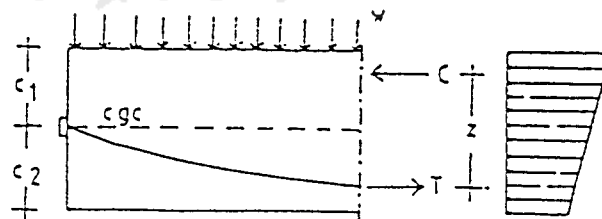
- f = tegangan pada penampang yang ditinjau (Mpa)
- P = gaya prategang yang diberikan (N)
- A_c = luasan penampang (mm²)
- e = eksentrisitas tendon (mm)
- c = jarak terhadap titik berat penampang (mm)
- M = momen total dari beban yang bekerja (Nmm)
- I_c = momen inersia total dari penampang (mm⁴)

2.1.2. Prategang sebagai kombinasi baja mutu tinggi dan beton

Konsep ini mempertimbangkan beton prategang sebagai kombinasi dari baja dan beton, seperti pada beton bertulang konvensional. Dimana baja menahan gaya tarik dan beton menahan gaya tekan, dengan demikian kedua bahan membentuk kopel penahan untuk melawan momen eksternal. [1]



Gambar 2.2. Kopel dalam komponen prategang akibat gaya prategang. [1]



Gambar 2.3 Kopel dalam akibat gaya prategang dan beban kerja. [1]

Sebelum beban luar bekerja, gaya tarik pada tendon (T) dan gaya tekan beton (C), bekerja pada titik yang sama sehingga kopel dalam sama dengan nol. Ketika beban luar bekerja, pusat blok gaya tekan akan terangkat akibat perubahan distribusi tegangan, sejauh kemampuan kopel dalam menahan beban eksternal sebesar :

$$M = C \cdot z = T \cdot z \quad (2.2)$$

Gaya T praktis bernilai konstan, karena penambahan tegangan akibat lentur dan kehilangan gaya prategang adalah kecil. Oleh karena itu untuk suatu beban yang bervariasi, C dan T dapat dianggap konstan tetapi dengan lengan momen (z) yang bervariasi. Bila eksentrisitas sudah diketahui atau dihitung, maka:

$$k_t = z - k_b, \text{ karena} \quad (2.3)$$

$$C = T \text{ dan } z = M/T \quad (2.4)$$

dengan melakukan substitusi persamaan di atas dan dari gambar (2.2) dan (2.3) diperoleh :

$$f_a = - \frac{C}{A_c} + \frac{C \cdot K_t \cdot c_1}{I_c} \quad (2.5)$$

$$f_b = - \frac{C}{A_c} - \frac{C \cdot K_t \cdot c_2}{I_c} \quad (2.6)$$

Pada tendon besarnya gaya tarik T sama dengan gaya prategang efektif P_e dan $I_c = A_c \cdot r^2$, maka :

$$f_a = - \frac{P_e}{A_c} \left[1 - \frac{k_t \cdot c_1}{r^2} \right] \quad (2.7)$$

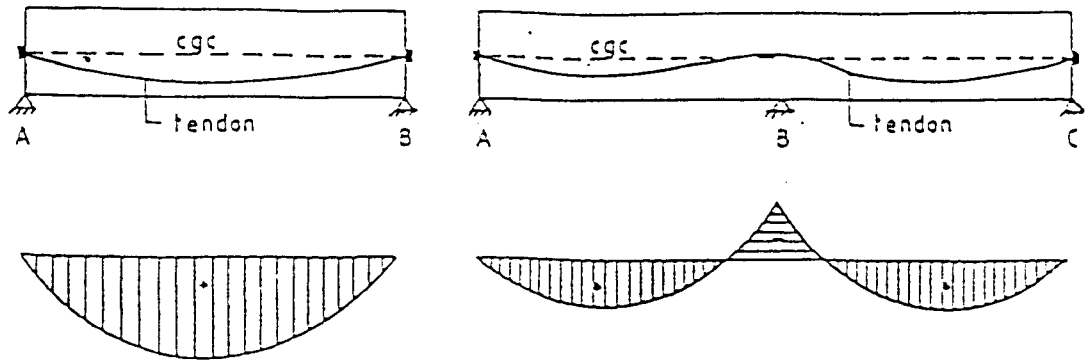
$$f_b = - \frac{P_e}{A_c} \left[1 + \frac{k_t \cdot c_2}{r^2} \right] \quad (2.8)$$

2.1.3. Sistem Prategang Untuk mencapai Perimbangan beban

Teknik ini didasarkan atas penggunaan gaya vertikal dari tendon prategang dengan cara menempatkan kabel sesuai dengan diagram momen yang terjadi, untuk dapat mengimbangi atau melawan beban gravitasi yang dialami oleh balok. Konsep ini dikembangkan oleh *T.Y. Lin*.^[1]

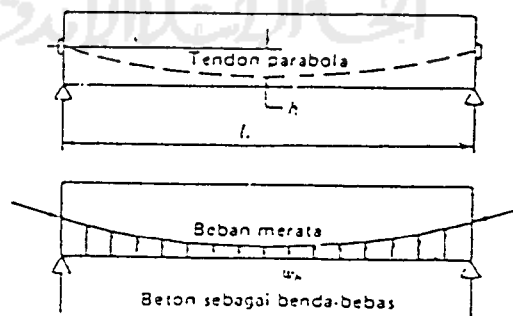
Besarnya beban imbang yang dihasilkan oleh tendon dengan gaya-gaya yang terdistribusi secara merata keatas adalah:

$$w_b = \frac{8 \cdot p \cdot z}{L^2} \quad (2.9)$$



Gambar 2.4. Penempatan tendon dan diagram momen.

Gaya prategang pada metode ini harus bekerja pada titik berat penampang untuk tumpuan dan titik berat ujung bebas pada balok kantilever. Kondisi ini untuk mencegah momen takimbang eksentris.



Gambar 2.5. Gaya pengimbang beban dari diagram free body. [1]

Pada gambar 2.5 simple beam dengan tendon berbentuk parabola, P_i adalah gaya prategang, L panjang bentang dan h jarak tendon terjauh dari garis netral, maka besarnya beban imbang yang dihasilkan oleh profil tendon parabola tersebut adalah:

$$W_b = 8.P_i.h / L^2$$

Ketika beban bekerja melampaui beban imbang (W_b), akan timbul beban tak imbang (W_{ab}) yang mengakibatkan momen (M_{ab}) = $1/8 \cdot W_{ab} \cdot L^2$

Sehingga tegangan pada serat ekstrim balok menjadi:

$$f_a = - \frac{P_e}{A_c} - \frac{M_{ab}}{S_1} \quad (2.10)$$

$$f_b = - \frac{P_e}{A_c} + \frac{M_{ab}}{S_2} \quad (2.11)$$

2.2. Prategang Parsial

2.2.1. Perilaku balok prategang parsial

Ketika beton prategang diperkenalkan, filosofi desainnya adalah menciptakan suatu material baru dengan membuat beton dalam keadaan tertekan sehingga tidak akan terjadi suatu tegangan tarik pada beton tersebut, setidaknya pada saat beban bekerja. Dalam perkembangannya ternyata dapat diindikasikan bahwa masih ada kekuatan tambahan yang terkandung pada struktur prategang tersebut. Oleh karena itu sebagian sarjana menyakini bahwa sejumlah tertentu tegangan tarik dapat diijinkan dalam desain, bertolak belakang dengan kriteria awal yang menyatakan bahwa tidak boleh terjadi tegangan tarik, yang biasanya disebut prategang penuh. Maka metode desain lain mengijinkan adanya sejumlah tegangan tarik yang biasanya disebut prategang sebagian. Sebenarnya tidak ada perbedaan mendasar antara keduanya, karena meskipun suatu struktur didesain tanpa suatu tegangan tarik pada beban kerja, tetapi tetap akan terjadi tarik pada kondisi beban berlebih (*overload*). [2]

Sebenarnya perbedaan itu hanya terletak pada tingkat tegangan tarik yang dipakai. Tegangan tarik akan lebih besar dan terjadi lebih sering untuk suatu struktur yang didesain dengan prategang parsial dari pada yang didesain menggunakan prategang penuh.

Untuk memberikan keamanan tambahan pada beton prategang parsial, suatu tulangan non-prategang sering ditambahkan untuk memberikan suatu kekuatan batas ultimit yang lebih tinggi pada balok dan memberi kekuatan tambahan untuk memikul tegangan tarik yang terjadi pada beton. Jadi pada struktur ini ada sebagian tulangan yang diprategangkan dan ada sebagian yang tidak (tulangan non-prategang). Suatu struktur prategang dapat dikatakan merupakan prategang parsial bila salah satu atau kedua pernyataan dibawah ini terpenuhi, meskipun kadang-kadang hanya digunakan pernyataan atau kondisi yang pertama saja.

1. Tegangan tarik diijinkan pada saat beton dibebani oleh beban kerja.
2. Sejumlah tulangan non-prategang ditambahkan pada struktur tersebut.

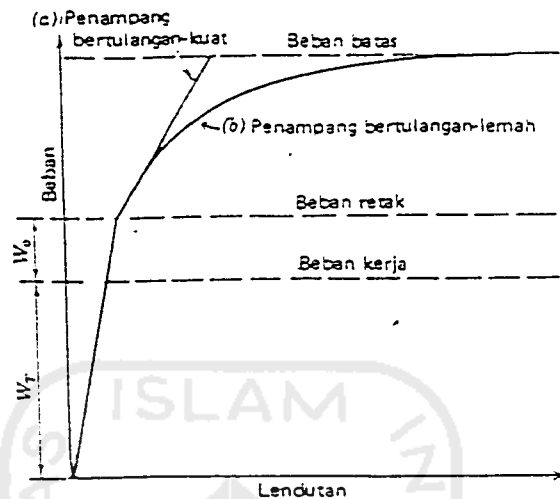
Suatu keuntungan yang penting dari prategang parsial adalah pengurangan besarnya lendutan keatas. Meminimumkan lendutan keatas adalah penting terutama ketika beban gelagar atau beban mati relatif kecil bila dibandingkan dengan beban rencana total. Meminimumkan lendutan keatas awal juga berarti menurunkan efek dari rangkai lentur dan mempermudah kontrol dari ketidak

seragaman lendutan keatas tersebut.

Untuk lebih memahami perilaku dari balok prategang parsial, perlu untuk mempelajari dari balok tersebut, yaitu dengan memberikan jumlah tulangan dan besar gaya prategang yang berbeda-beda. Perbedaan pada perilaku suatu balok yang bertulangan kuat (*over-reinforced*) dan bertulangan lemah (*under-reinforced*) terlihat dengan membandingkan kurva (a) dan kurva (b) dalam gambar 2.6. Sedangkan perbedaan perilaku dari prategang kuat (*over-prestressed*) dan prategang lemah (*under-prestressed*) dapat dilihat dalam gambar 2.7.

Suatu penampang yang diberi tulangan kuat akan mengalami suatu kegagalan akibat tekan pada beton sebelum tegangan tarik baja melewati batas elastisnya. Jadi deformasi batas dari baja dan lendutan dari balok adalah kecil dan kegagalan yang terjadi adalah kegagalan getas. Apabila tulangan yang diberikan terlalu kuat, meskipun bajanya tidak diberi gaya prategang, lendutan pada balok sebelum runtuh akan tetap terbatas. Ketika penampang tersebut diberi tulangan lemah, lendutannya akan terus meningkat sangat nyata sebelum kegagalan terjadi, sehingga akan memberikan suatu tanda yang cukup sebelum terjadi keruntuhan. Keruntuhan akan bermula dengan perpanjangan baja yang berlebihan dan berakhir

dengan keruntuhan beton secara bertahap pada daerah tekan.



Gambar 2.6. Kurva defleksi dan lendutan pada tulangan kuat dan lemah. [1]

Dalam usaha mencegah terjadinya kegagalan yang tiba-tiba atau keruntuhan yang getas dan juga untuk faktor ekonomis maka suatu beton prategang yang didesain berdasarkan peraturan ACI adalah *under-reinforced*. Ketika suatu penampang *under-reinforced* didesain untuk prategang penuh, yang mensyaratkan tidak terjadinya tegangan tarik pada saat beban kerja, hubungan antara beban dan defleksi diberikan oleh gambar 2.6. Sebelum retak, penampang akan menahan satu beban tambahan W_o diatas beban kerja W_t , yang besarnya adalah :

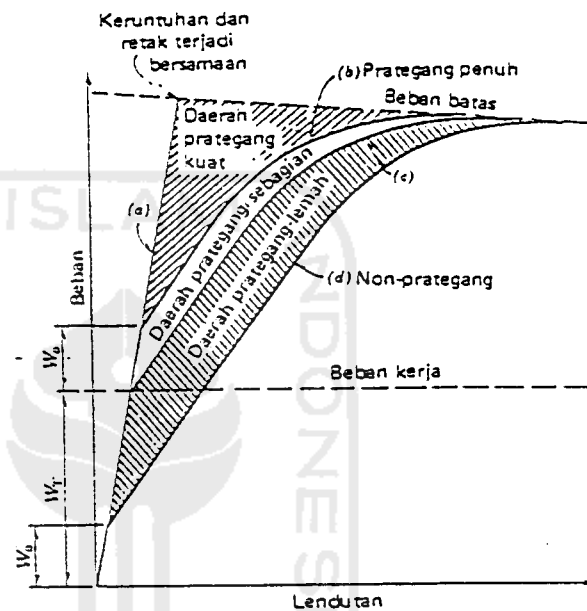
$$W_o = k \frac{f_r \cdot I_g}{C_b} \quad (2.12)$$

dengan:

k = suatu konstanta yang tergantung pada panjang bentang dan kondisi ujung-ujung.

f_r = modulus keruntuhan dari beton (N/mm^2).

C_b = jarak dari ogc keserat terluar (mm).



Gambar 2.7. Kurva beban lendutan untuk berbagai tingkat prategang. [1]

Jika suatu penampang yang sama bertulangan lemah dengan sejumlah baja yang sama diberi suatu prategang yang lebih kecil, sehingga retak baru akan terjadi bila beban kerja tercapai, tegangan tarik akan sama dengan modulus keruntuhan (f_r) dibawah beban kerja, hubungan beban lendutan ditunjukkan oleh kurva (c), dengan lendutan pada penampang retak mulai terjadi pada beban

kerja. Jika balok tidak diberi prategang sama sekali, tetapi masih diberi tulangan dengan jumlah baja yang sama, dan direkatkan pada beton, balok akan berperilaku seperti pada kurva (d). Balok tersebut akan mulai retak ketika beban W_0 tercapai, meskipun kekuatan batasnya tidak banyak berkurang.

Jika balok diberi tulangan kuat (*over-reinforced*), balok akan mulai retak bila beban telah melampaui $W_t + W_0$, dan kurva beban lendutan akan berada diantara kurva (a) dan (b), gambar 2.7. Untuk kasus yang ekstrim ketika suatu balok diberi tulangan lemah (*under-reinforced*) tetapi diberi gaya prategang yang tinggi, retak dan keruntuhan akan terjadi secara bersamaan sedemikian rupa sehingga keruntuhan getas terjadi. Pada prinsipnya balok prategang parsial akan mempunyai kurva beban lendutan yang terletak diantara kurva (b) dan (d), tergantung dari besarnya prategang. Tetapi dalam pelaksanaannya, retak yang terjadi pada saat beban kerja tidak diijinkan, sehingga kurva beban lendutan biasanya terletak diantara kurva (b) dan (c), dan jarang berada dibawah kurva (c).

Jumlah prategang yang digunakan tergantung pada type struktur. Untuk struktur yang tidak boleh mengalami retak pada kondisi beban kerja dan sering mengalami beban berlebih, sebaiknya digunakan prategang penuh yang

diperlihatkan oleh kurva (b) . Untuk struktur yang jarang mengalami beban berlebih, Prategang parsial diantara kurva (b) dan (c) dapat diijinkan. Jumlah baja prategang dapat dihemat bila digunakan desain dengan prategang parsial, tetapi jika diinginkan kekuatan batas yang sama, paling tidak harus digunakan jumlah tulangan total yang sama.

Luas dibawah kurva beban lendutan adalah suatu ukuran dari kekuatan balok untuk menahan beban kejut dan menyerap goncangan, sehingga akan terlihat bahwa balok dengan prategang penuh ataupun parsial memiliki kekenyalan yang besar, sedangkan balok prategang kuat (*over-prestressed*) dan prategang lemah (*under-prestressed*) memiliki kekenyalan yang kecil. Balok prategang kuat (*over-prestressed*) akan mempunyai energi plastis yang lebih kecil, sedangkan balok prategang lemah (*under-prestressed*) akan menyerap energi elastis yang lebih kecil.

Prategang parsial dapat diperoleh dengan salah satu cara berikut ini^[1]:

1. Dengan menggunakan baja prategang yang lebih sedikit akan menghemat bajanya, tetapi akan mengakibatkan penurunan kekuatan batas, yang proporsinya berbanding lurus dengan jumlah bajanya.

2. Dengan menggunakan sejumlah baja berkekuatan tarik yang sama, tetapi sebagian tidak diprategangkan, dengan ini akan dihemat sejumlah penarikan dan pengangkuran, dan dapat meningkatkan kekenyalan tetapi retak terjadi lebih awal dan akan sedikit mengurangi kekuatan batasnya.
3. Dengan menggunakan jumlah baja yang sama, tetapi dengan tingkat penarikan yang rendah, pengaruh dari cara ini sesuai dengan metode (2) tetapi tanpa penghematan angkur ujung.
4. Dengan menggunakan baja prategang yang lebih kecil dan menambahkan sejumlah tulangan non-prategang akan memberikan kekuatan batas seperti yang diinginkan dan menghasilkan kekenyalan yang lebih besar, tetapi retak akan terjadi lebih awal.

2.2.2 Keuntungan dan kerugian penggunaan prategang parsial

Dalam pelaksanaannya penggunaan balok prategang parsial mempunyai suatu keuntungan dan kerugian bila dibandingkan dengan balok prategang penuh. Keuntungan dan kerugian diantaranya adalah sebagai berikut:

a) Keuntungan Prategang Parsial^[1]

Prategang parsial mempunyai beberapa keuntungan bila dibandingkan dengan prategang penuh untuk sejumlah aplikasi dengan alasan sebagai berikut:

1. Pada prategang parsial gaya prategang dan luas penampang baja prategang dapat dikurangi, sehingga kuat lentur yang dihasilkan adalah sesuai dengan yang dibutuhkan untuk memikul beban berfaktor.
2. Pengurangan lendutan keatas (camber), sehubungan dengan adanya pengurangan gaya prategang yang diberikan
3. Penggunaan baja non-prategang pada prategang parsial akan meningkatkan daktilitas dan penyerapan energi pada penampang selama beban berulang terjadi pada kondisi inelastis.

Hal ini akan memberikan keuntungan dalam desain struktur gempa.

4. Secara ekonomis ada suatu penghematan karena adanya penghematan baja prategang, penghematan penarikan dan pengangkuran ujung.

b) Kerugian beton prategang parsial^[1]

Adapun kerugian dari penggunaan beton prategang parsial bila dibandingkan dengan prategang penuh adalah sebagai berikut:

1. Perhitungan beton prategang parsial lebih kompleks, karena analisa dari penampang retak tidak dapat menggunakan teori elastis dalam menghitung tegangan dan lendutan yang terjadi sehubungan dengan gaya prategang dan beban yang bekerja.
2. Pada kondisi beban berlebih lendutan yang terjadi akan lebih besar, hal tersebut akan membahayakan konstruksi.
3. Untuk struktur yang membutuhkan kededapan yang tinggi beton prategang parsial kurang menguntungkan karena retak yang ditimbulkan.
4. Pengurangan kekuatan lentur batas untuk jumlah baja yang sama.

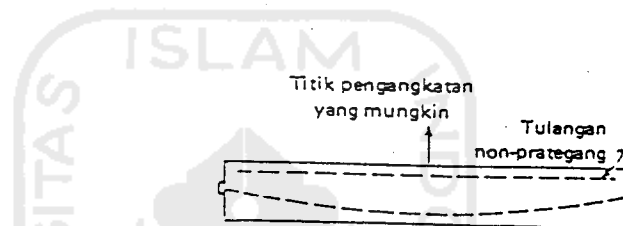
2.3. Penempatan Tulangan Non-Prategang

Salah satu dari beberapa perkembangan dalam beton prategang adalah penggunaan tulangan non-prategang. Tulangan non-prategang yang digunakan bersama dengan tulangan prategang akan membentuk kombinasi kekuatan yang efektif. Tulangan prategang akan mengimbangi sebagian dari beban, mengurangi lendutan dan memberikan sebagian terbesar dari kekuatan, sementara baja non-prategang akan mendistribusikan retak secara merata, meningkatkan kekuatan batas dan memperkuat bagian yang tidak terjangkau oleh baja prategang serta memberikan keamanan untuk kondisi pembebanan yang tak terduga.

Tulangan non-prategang dapat ditempatkan pada posisi yang berbeda dalam balok untuk tujuan dan fungsi tertentu. Tulangan ini terlihat jelas dengan memeriksa fungsi seperti berikut ini:

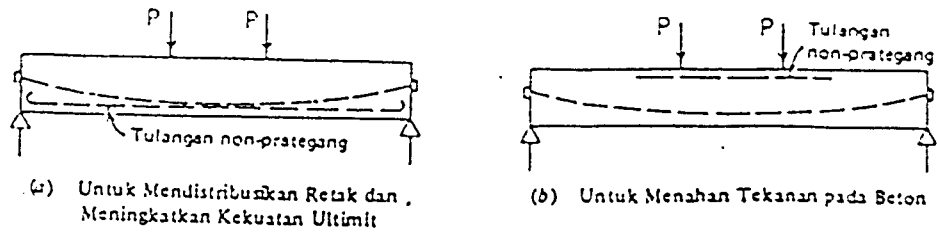
dapat ditempatkan untuk perkuatan. Gambar 2.8. (b).

- c. Jika tegangan tekan yang besar terjadi pada flens tarik sebagai akibat gaya prategang, maka tulangan dapat digunakan untuk memperkuat flens tersebut. Penempatan tulangan ini cenderung mengurangi rangkai pada beton. Gambar 2.8. (c).



Gambar 2.9. Tulangan non-prategang untuk memperkuat pracetak selama pengerjaan. [1]

2. Untuk memperkuat beberapa bagian tertentu dari balok pracetak agar mampu memikul beban tak terduga selama pengangkatan dan pemasangan. Gambar 2.9.



Gambar 2.10. Tulangan non-prategang untuk memperkuat balok akibat beban kerja dan ultimit. [1]

3. Untuk memperkuat balok pada tahap beban kerja.
 - a. Baja akan membantu meratakan retak yang terjadi dan juga meningkatkan beban batas, khususnya jika tendon tak terekat. Gambar 2.10. (a).
 - b. Baja dapat ditambahkan pada flens tersebut terhadap tekanan yang tinggi. Penempatan ini tidak ekonomis tetapi kadang-kadang terpaksa dilakukan pada kondisi tertentu. Gambar 2.10.(b).

Jika tulangan non-prategang dan prategang dikombinasikan dalam satu struktur, maka perilaku tegangan dari keduanya harus diperiksa. Baja non-prategang hampir selalu tidak efektif sampai terjadi retak. Setelah retak terjadi, baja non-prategang akan meratakan retak dan mencegah retak lebih besar yang akan menimbulkan keruntuhan. Kekuatan batas balok untuk beban statis dan beban berulang dapat ditingkatkan dengan menggunakan baja non-prategang.

2.4. Tendon Prategang

Dewasa ini telah terdapat banyak sekali sistem prategang yang menjadi milik dari suatu perusahaan tertentu. Setiap sistem biasanya memiliki kekhususan yang merupakan ciri dari sistem tersebut, misalnya adalah bahan untuk menghasilkan prategang atau tendon prategang.

Sebagai contoh sistem pasca tarik DYWIDAG menggunakan batang ulir Dywidag yang tersedia dalam diameter nominal $5/8"$, $1"$, $1\ 1/4"$ dan $1\ 3/8"$, sistem pasca tarik BBRV menggunakan beberapa atau banyak kawat berkekuatan tinggi diameter $1/4"$, sistem Freyssinet atau The Freyssinet Monogroup K System menggunakan untaian kawat (strand). Setiap sistem juga memiliki rincian angkur, perangkat dan selongsong tersendiri.

Dalam perencanaan tugas akhir ini kami menggunakan tendon VSL (Vorspann System Losinger) yang dikenal dengan VSL Multistrand System (Sistem Kawat Untaian VSL). Beberapa kekhususan dari sistem ini adalah sebagai berikut^[9]:

- Sederhana dan praktis dalam perencanaan maupun pelaksanaan.
- Tidak memerlukan ukuran yang tepat pada penentuan panjang awal tendon dilapangan.

- Tersedia berbagai ukuran angkur hidup dan angkur mati, sesuai dengan gaya yang diperlukan.
- Pemasangan kepala angkur dan tendon dapat dilakukan segera sebelum tendon ditarik.
- Penarikan tendon dapat dilakukan bertahap sesuai dengan tahap pembebanan konstruksi.
- Cara kerja penarikan yang cepat dan aman dengan peralatan yang mudah dikendalikan.
- Gaya prategang dapat dikontrol dengan teliti setiap saat.
- Sifat-sifat umum dari tendon VSL dapat dilihat pada lampiran 5.

Kekuatan Batas, f_{pu} = 18600 kg/cm^2 = 1860 Mpa

Kekuatan Leleh, f_{py} = 16150 kg/cm^2 = 1581 Mpa

SKSNI pasal 3.11.5 memberikan batas-batas maksimum bagi tegangan tarik baja prategang (f_{ps}) yang boleh terjadi dalam tendon prategang. Tegangan tersebut tidak boleh melampaui nilai-nilai berikut:

Tabel 2.4. Tegangan izin tendon prategang.

| | |
|---|----------------|
| a. akibat gaya penjangkaran tendon | 0,94. f_{py} |
| tetapi tidak boleh lebih besar dari | 0,85. f_{pu} |
| b. sesaat setelah pemindahan gaya prategang | 0,82. f_{py} |
| tetapi tidak lebih besar dari | 0,74. f_{pu} |
| c. tendon pasca tarik pada daerah jangkar dan sambungan sesaat setelah penjangkaran tendon | 0,70. f_{pu} |

Sistem VSL sendiri mensyaratkan tegangan tarik (fps) maksimum dalam tendon pada saat peralihan gaya prategang (awal) sebesar^[1]:

$$fps \leq 0,70.fpu \quad (2.13)$$

Dengan fpu dan fpv sebesar 1860 Mpa dan 1581 Mpa untuk sistem VSL, maka berdasarkan tabel dan persamaan 2.13 tegangan tarik (fps) yang disyaratkan adalah 1296,5 MPa.

